

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И ОПТИКА

ПОД РЕДАКЦИЕЙ
проф. В. И. ИВЕРОНОВОЙ

СОСТАВЛЕН:
А. Г. БЕЛЯНКИНЫМ, Г. П. МОТУЛЕВИЧ,
Е. С. ЧЕТВЕРИКОВОЙ, И. А. ЯКОВЛЕВЫМ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ, ПЕРЕРЕБОТАННОЕ

*Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования РСФСР
в качестве учебного пособия для университетов*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1968

Физический практикум, Электричество и оптика под ред В. И. Ивероновой, составлен А. Г. Белянкиным, Г. П. Мотулевиц, Е. С. Четвериковой, И. А. Яковлевым, 1968.

Учебное пособие по разделам электричества и оптики экспериментальной физики составлено в соответствии с программой по общему курсу физики и по физическому практикуму для физических и физико-математических факультетов университетов и педагогических институтов. Содержит описания выполняемых студентами названных вузов параллельно со слушанием курса лекций по общей физике и работе в семинарах экспериментальных задач, поставленных в физическом практикуме Московского университета и выдержавших практическую проверку в ходе студенческих занятий на протяжении многих лет. Описание каждой задачи содержит краткое изложение сущности изучаемого явления с ссылками на литературу, в которой это явление описано подробно, и подробное изложение экспериментального метода, положенного в основу изучения данного явления, сведения об используемой аппаратуре, о приемах наблюдений и измерений, а также правила обработки экспериментальных результатов. В книгу входят описания 58 экспериментальных задач по основам электростатики, учения о постоянном и переменном токе, магнетизма, электромагнитным колебаниям и волнам, 44 — по физической и геометрической оптике, спектроскопии и работе газового лазера, а также таблицы физических величин, необходимых для обработки результатов выполнения задач. Приведенная в книге библиография включает учебные пособия, рекомендованные Министерством высшего и среднего специального образования.

Таблиц 36. Рисунков 455. Библиография 357 назв.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	7
-----------------------	---

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

65. Изучение электростатического поля	9
66. Градуирование электростатического вольтметра по абсолютному электрометру	16
67. Определение элементарного заряда методом измерения скорости перемещения заряженных частиц в поле конденсатора	22
68. Градуирование амперметра и вольтметра	29
69. Измерение сопротивлений при помощи моста постоянного тока	34
70. Изучение зависимости сопротивления металлов от температуры	40
71. Изучение зависимости сопротивления электролитов от температуры	42
72. Измерение сопротивления гальванометра и внутреннего сопротивления гальванического элемента	45
73. Измерение малых сопротивлений при помощи двойного моста	49
74. Изучение принципа электрических компенсационных измерений	52
75. Изучение вакуумного диода и определение удельного заряда электрона	59
76. Определение работы выхода электрона методом компенсации охлаждения нити	63
77. Изучение явления термоэлектронной эмиссии и определение работы выхода электрона	67
78. Изучение распределения термоэлектронов по скоростям	72
79. Ознакомление с работой трехэлектродной лампы	76
80. Ознакомление с работой многосеточных радиоламп и наблюдение явления вторичной эмиссии электронов	81
81. Изучение работы тиратрона	84
82. Определение электрохимических эквивалентов и градуирование амперметра при помощи вольтметра	89
83. Изучение гальванометра магнитоэлектрической системы	93
84. Определение емкости конденсатора посредством баллистического гальванометра	105
85. Исследование магнитной индукции в железе баллистическим методом	110
86. Измерение напряженности магнитного поля соленоида на его оси	118
87. Изучение влияния геометрической формы тела на магнитную восприимчивость и петлю гистерезиса ферромагнетика	122
88. Магнитометрический метод измерения кривой намагничивания, петли гистерезиса и точки Кюри	129
89. Феррорезонансный стабилизатор напряжения	134

90. Измерение концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводниках	140
91. Изучение процессов зарядки и разрядки конденсатора	145
92. Измерение емкости конденсаторов при помощи мостовой схемы на переменном токе	150
93. Измерение емкости мостовым методом с учетом утечки в конденсаторах	152
94. Измерение индуктивности катушек при помощи мостовой схемы	157
95. Определение индуктивности мостовым методом с использованием постоянной емкости	163
96. Измерение коэффициента самоиндукции, емкости и проверка закона Ома для переменного тока	167
97. Измерение мощности переменного тока и сдвига фаз между током и напряжением	172
98. Изучение зависимости диэлектрической проницаемости титаната бариера от температуры и напряженности поля	182
99. Изучение работы полупроводниковых выпрямителей	189
100. Изучение работы полупроводниковых диодов и триодов	206
101. Изучение кенотронного выпрямителя	214
102. Изучение собственных электромагнитных колебаний в контуре	224
103. Исследование затухающих колебаний, возбуждаемых с помощью мульти vibratora в контуре, содержащем индуктивность, емкость и сопротивление	233
104. Исследование работы генератора синусоидальных колебаний типа «RC»	241
105. Тиратронный генератор релаксационных колебаний	248
106. Ознакомление с работой лампового генератора электромагнитных колебаний и исследование вынужденных колебаний в контурах с разной добротностью	258
107. Изучение вынужденных колебаний и явления резонанса в колебательном контуре	268
108. Изучение явлений в колебательном контуре, включенном параллельно источнику электродвижущей силы переменной частоты	274
109. Изучение работы электронного осциллографа	281
110. Изучение характеристик усилителя низкой частоты на сопротивлениях	299
111. Гармонический анализ	306
112. Определение отношения заряда электрона к его массе методом магнетрона	321
113. Изучение работы мотора и генератора постоянного тока	324
114. Изучение работы операционного элемента на усилителе постоянного тока	327
115. Электронная модель колебательной системы с одной степенью свободы	343
116. Изучение волнового поля трехсантиметровых электромагнитных волн, излучаемого рупором	356
117. Измерение коэффициента отражения R электромагнитной волны от металлических шероховатых поверхностей	366
118. Преломление волн диэлектрической призмой и учет потерь при отражении от граней призмы и на поглощение в призме	369
119. Изучение явления полного внутреннего отражения волны при тонком пограничном слое	373
120. Измерение интенсивности электромагнитных колебаний в заданной точке интерференционного поля в зависимости от разности хода интерферирующих волн	376
121. Электромагнитные волны в двухпроводной линии	379
122. Электромагнитные поверхностные волны в однопроводной линии	384

ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

ОПТИКА

123. Определение фокусного расстояния собирающей и рассеивающей линз	389
124. Определение увеличения оптической трубы и микроскопа	395
125. Изучение зрительной трубы	406
126. Исследование сложных оптических систем	411
127. Изучение погрешностей линз	419
128. Определение показателя преломления, дисперсии и разрешающей силы стеклянной призмы спектрометром	425
129. Определение показателя преломления жидких и твердых тел рефрактометром Пульфриха	434
130. Определение показателя преломления и средней дисперсии жидкостей и твердых тел с помощью рефрактометра Аббе	438
131. Определение длины световой волны при помощи билинзы и бипризмы	443
132. Определение радиуса кривизны линзы и длины световой волны с помощью колец Ньютона	451
133. Измерение показателей преломления газов с помощью интерферометра Релея	456
134. Изучение с помощью интерферометра зависимости показателя преломления газа от давления	467
135. Изучение основных явлений интерференции света с помощью интерферометра Майкельсона	478
136. Изучение дифракционной решетки и определение длины световой волны	493
137. Изучение явлений дифракции в параллельных лучах на отдельной щели и на простейших дифракционных решетках	497
138. Изучение явлений дифракции света на круглых и прямоугольных отверстиях и дисках	505
139. Зонная пластинка	516
140. Изучение роли дифракционных явлений в формировании оптического изображения	524
141. Дифракция света на ультразвуковых волнах	536
142. Изучение основных явлений поляризации света в параллельных световых пучках	551
143. Получение и исследование поляризованного света	564
144. Измерения показателей преломления кристаллов при помощи кристалл-рефрактометра	575
145. Изучение кристаллооптических явлений при помощи поляризационного микроскопа	583
146. Спектроскопическое исследование явлений хроматической поляризации света	594
147. Изучение явления естественного вращения плоскости поляризации света	600
148. Изучение явления магнитного вращения плоскости поляризации	606
149. Изучение спектров излучения паров и газов и спектральный анализ смесей солей щелочных металлов	612
150. Изучение сериальных закономерностей в спектре водорода	616
151. Изучение спектрографа и измерение длин волн спектральных линий	620
152. Ознакомление с работой интерференционного спектроскопа Фабри—Перо	631
153. Фотометрирование линейчатого спектра при помощи стилометра и спектральный анализ состава стали	642
154. Спектральная фотометрия	653
155. Исследование спектров поглощения растворов с помощью фотометра	665

156. Изучение спектров поглощения при помощи поляризационного спектрофотометра	671
157. Исследование дисперсии показателя преломления «методом крюков» Рождественского	679
158. Изучение эффекта Зеемана	691
159. Изучение основных законов внешнего фотоэлектрического эффекта	699
160. Изучение фотоэлементов с внутренним усилением фототока при помощи вторичной эмиссии электронов (фотоэлектронные умножители)	710
161. Измерение высоких температур с помощью оптического пирометра с исчезающей нитью	726
162. Определение коэффициента диффузии оптическим методом	733
163. Дифракция рентгеновских лучей на монокристалле	739
164. Дифракция рентгеновских лучей в поликристаллах	750
165. Измерение скорости света на малой базе	755
166. Знакомление с работой газового лазера непрерывного действия и некоторые его применения	767
Приложение. Некоторые сведения об электроизмерительной аппаратуре	793

ТАБЛИЦЫ

1. Сопротивления и веса медных проводов	798
2. Удельное сопротивление некоторых изоляторов	799
3. Удельное сопротивление некоторых металлов и сплавов	799
4. Удельное сопротивление некоторых водных растворов при 18° С	799
5. Электропроводность водных растворов серной кислоты	800
6. Температурные коэффициенты сопротивлений некоторых металлов и сплавов	800
7. Диэлектрические проницаемости различных веществ при 18° С	800
8. Термоэлектродвижущие силы	801
9. Электродвижущие силы элементов	802
10. Электрохимические эквиваленты	803
11. Длины волн некоторых спектральных линий	803
12. Длины волн спектральных линий ртутно-кадмиево-цинковой лампы	804
13. Длины волн некоторых линий в спектре неона	804
14. Спектры водорода, гелия, лития, натрия, ртути и солнца (вклейка)	804
15. Длины волн главных фраунгоферовых линий	805
16. Коэффициенты преломления некоторых твердых тел при 18° С относительно воздуха и вращательная способность кварца в 1 мм толщины	805
17. Показатели преломления некоторых жидкостей	806
18. Интерференционные окраски кварцевого клина при скрещенных и параллельных николях	806
19. Цветная номограмма интерференционной окраски кварцевого клина (вклейка)	806
20. Плотность водных растворов сахара в интервале температур от 0 до 50° С	807
21. Формулы размерностей электромагнитных единиц	808
22. Показатели преломления газов при 0° С 760 мм рт. ст. для желтой линии натрия n_D (5893 Å)	810
23. Времена экспозиций, вызывающие одинаковые почернения	810
24. Яркость и цветовая температура некоторых обычных источников света	811
25. Магнитное вращение плоскости поляризации	811
26. Показатель преломления воды при 20° С для различных длин волн	812
27. Красная граница фотоэффекта для некоторых веществ	813
28. Универсальные физические константы	813
29. Периодическая система элементов Д. И. Менделеева	815

ПРЕДИСЛОВИЕ

В этом (втором) томе «Физического практикума» содержатся третья и четвертая его части, посвященные электричеству и оптике. Книга так же, как и первый том, выпущенный в 1967 г., представляет собой самостоятельное учебное руководство к практическим занятиям для студентов физических факультетов университетов и педагогических институтов. Книга содержит описание 102 экспериментальных работ. Для удобства использования «Физического практикума» нумерация частей и работ сохранена единой для обоих томов.

Это руководство является результатом многолетней работы коллектива сотрудников кафедры общей физики физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. Руководство написано в соответствии с программой физического практикума и отвечает состоянию лабораторий практикума Московского университета. Отметим, чем отличается новое издание этого учебного пособия от прежнего.

1. В книгу включены описания цикла из семи задач по распространению электромагнитных волн сантиметрового диапазона. Соответствующая лаборатория практикума создана в последние годы.

2. В книге описаны две новые обширные задачи, относящиеся к непредставленному ранее в физических практикумах направлению. Задачи эти называются: «Изучение работы операционного элемента на усилителе постоянного тока» и «Электронная модель колебательной системы с одной степенью свободы». Уже из названия этих задач видно, что они представляют собой первые, но достаточно серьезные шаги на пути к созданию основ кибернетического практикума.

3. Рядом новых задач пополнены и прежние разделы практикума (задачи 100, 103, 104, 105, 152), описания других задач усовершенствованы.

4. В книгу включено описание задачи, посвященной ознакомлению с работой газового лазера.

Наконец, отметим, что указания к обработке экспериментальных материалов и оценке погрешностей измерений содержатся во введении к первому тому настоящего руководства (ссылки на первый том даются в тексте без повторения названия книги).

Кроме того, ввиду того, что во многих доступных сейчас студентам учебных пособиях и справочниках по электричеству и оптике используются различные системы единиц (СГСЕ, СГСМ и др.), мы не могли систематически придерживаться только системы единиц СИ без серьезного риска существенно сузить круг вспомогательной литературы, используемой студентами, которая, как известно, особенно необходимо для полноценной обработки экспериментальных результатов.

Отдел электричества настоящего тома составлен И. А. Яковлевым, а раздел оптики — Е. С. Четвериковой, Г. П. Мотулевич, И. А. Яковлевым.

Составители тома и его редактор приносят глубокую благодарность всем сотрудникам кафедры, в той или иной мере участвовавшим в создании настоящего руководства.

В заключение приводим список авторов описаний отдельных задач. Повторное упоминание одного и того же номера задачи при фамилии разных авторов указывает, что эти авторы совместно работали над описанием задачи. В. Г. Алексеева (90), К. Н. Баранский (137, 165), А. Г. Белянкин (97 — упражнение 2), Б. Б. Буховцев (67)¹⁾, Т. С. Величкина (144, 148, 153), Е. Н. Волкова (109), Н. М. Гегечкори (139), О. Н. Голубева (152), М. В. Дехтяр (87—89), О. И. Замша (129), В. П. Ионов (65, 83, 107, 108), Л. Н. Калугин (165), В. П. Кандидов (115), Ф. Е. Кононкова (98), Я. А. Крафтмахер (75—78), А. А. Кузовников (81), Н. К. Кульман (114), П. С. Ланда (100), Г. П. Мотулевич (126, 146, 151, 154, 157), В. С. Никольский (66), Н. А. Пенин (99), А. И. Пильщикова (110), В. К. Петерсон (93, 95, 127), И. И. Попова (81), В. Н. Слудский (104, 105, 111 и Приложение со сведениями об электроизмерительных приборах), Н. В. Степанова (100), Л. П. Стрелкова (105, 113, 116—122), Е. В. Талалаева (125), В. П. Тарасова (163, 164), А. В. Устинова (91), В. И. Шестаков (103), О. А. Шустин (158), Е. С. Четверикова (128—132, 136, 142, 145, 155²⁾), И. А. Яковлев (65, 68—71, 74, 79, 80, 82 — упражнение 1, 83, 85, 86, 92, 94, 97 — упражнение 1, 101³⁾, 106—108, 112, 133—135⁴⁾, 137, 140, 141⁵⁾, 143, 150, 152, 159⁶⁾—161, 166).

В. И. Иверонова

¹⁾ Первоначальная постановка задачи осуществлена В. П. Ионовым.

²⁾ Первоначальный текст описания задачи 155 принадлежит С. Л. Мандельштаму.

³⁾ В составлении первоначального текста описания задачи 101 принимал участие В. И. Шестаков.

⁴⁾ В постановке эксперимента участвовала Л. Ф. Михеева.

⁵⁾ Радиотехническая часть задачи поставлена К. Н. Баранским.

⁶⁾ Усилитель к фотодинарону сконструирован К. Н. Баранским.

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ЗАДАЧА 65

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Введение. Как известно, электростатическое поле характеризуется в каждой точке пространства значением вектора напряженности поля E и значением электростатического потенциала V . Направление вектора напряженности поля в каждой точке поля и распределение потенциалов в поле можно сделать особенно наглядным, пользуясь понятиями о силовых линиях и о поверхностях равного потенциала, так называемых эквипотенциальных поверхностях.

Силовые линии всегда нормальны к поверхностям равного потенциала. Так, например, силовые линии нормальны к поверхностям находящихся в электростатическом поле проводников, которые являются телами с одним значением потенциала во всем объеме.

Экспериментальное исследование электростатического поля в простейших случаях и описание его при помощи указанных характеристик (силовые линии и поверхности равного потенциала) составляют содержание настоящей задачи.

Практическому выполнению задачи следует предпослать следующие существенные замечания. Ортогональность силовых линий и поверхностей равного потенциала существенно облегчают как экспериментальное, так и теоретическое исследование электростатического поля. Именно, коль скоро найдены значения вектора напряженности поля, облегчается задача нахождения поверхностей равного потенциала. Справедливо и обратное: найденное положение поверхностей равного потенциала позволяет построить силовые линии поля. Последняя возможность как раз имеет практическое значение.

Теоретически, как правило, легче вести расчет потенциалов, чем напряженностей поля, так как первые есть величины скалярные, а вторые — векторные. Экспериментально измерения потенциалов также оказываются проще, чем измерения напряженностей поля, так как большинство приборов, пригодных для изучения полей, измеряют разности потенциалов, а не напряженности поля.

Поэтому и в данной задаче экспериментально изучается распределение потенциалов в поле, а не напряженностей этого поля.

Линии сил изучаемых полей строятся уже потом как ортогональные кривые к экспериментально найденным поверхностям равного потенциала.

В основу изучения распределения потенциалов в электростатическом поле часто кладется так называемый метод зондов. Его сущность заключается в следующем: в исследуемую точку поля вводится специальный дополнительный электрод — зонд, по возможности так устроенный, чтобы он минимально нарушал своим присутствием исследуемое поле. Этот зонд соединяется проводником с прибором, измеряющим приобретенный зондом в поле потенциал, по отношению к какой-нибудь избранной за начало отсчета точке поля. При этом необходимо обеспечить такие условия, чтобы этот зонд принял потенциал той точки поля, в которую он помещен. Только тогда показания прибора, соединенного с зондом, будут давать правильную картину распределения потенциалов в исследуемом поле. Выполнить это условие в непроводящей среде нелегко, и для этой цели существуют специальные методы, разработанные главным образом для изучения полей при электрическом разряде в газах.

Мы упомянем здесь только об устройстве простейшего пламенного зонда. Для того чтобы могло осуществиться выравнивание потенциала зонда и той точки поля, в которую он помещен, необходимо обеспечить возможность натекания (или стекания) электрических зарядов на зонд. Пламенный зонд представляет собой сочетание тонкой металлической проволоочки с маленьким пламенем газовой горелки, сделанной из оттянутого кончика стеклянной трубочки. Проволочка соединена с электрометром, а ее кончик помещается в пламени в исследуемую точку поля. Наличие в газовом пламени ионов и электронов обеспечивает возможность стекания или натекания зарядов на проволочку под действием электрического поля до тех пор, пока потенциал проволоочки не примет значения потенциала той точки поля, в которую помещен ее кончик. После этого показания электрометра, соединенного с проволочкой, будут действительно соответствовать потенциалу исследуемой точки поля.

Сложности работы с зондами и вообще трудности электростатических измерений привели к разработке особого метода изучения электростатических полей путем искусственного воспроизведения их структуры в проводящих средах, по которым пропускается постоянный ток. Таким путем прямое изучение электростатического поля заменяется изучением его точной, но более удобной модели. Оказывается, что при некоторых условиях распределение потенциалов в среде, по которой течет ток между установленными в ней электродами, может быть сделано тождественным с распределением потенциалов между теми же электродами, когда между ними имеется электростатическое поле в вакууме или в однородном диэлектрике.

Измерения же распределения потенциалов в проводящей среде, по которой течет постоянный ток, сравнительно легкая экспериментальная задача.

Поясним только что сказанное простым примером. Пусть имеются две концентрические металлические сферы. Если эти сферы заряжены, то в разделяющем их шаровом слое существует электростатическое поле, задаваемое зарядом только внутренней сферы. Поверхности равного потенциала в этом случае — концентрические сферы, силовые линии направлены радиально, напряженность поля убывает как $1/R^2$. Пусть теперь шаровой слой между сферами заполняется однородным проводящим веществом, проводимость которого много меньше электропроводности сфер. Пусть к внешней и внутренней сферам теперь подведены провода от батареи, поддерживающей между сферами ту же разность потенциалов, которая была между сферами в первом случае. В шаровом слое, разумеется, идет постоянный ток.

Как известно, в о д н о р о д н о м проводнике при прохождении по нему постоянного тока нет объемных зарядов; это значит, что поле в шаровом слое между сферами должно остаться т а к и м же, каким оно было при наличии на сферах только статических зарядов и в отсутствие проводящей среды в шаровом слое.

Таким образом, можно заменить изучение электростатического поля между системой заряженных проводников изучением электростатического поля постоянного тока между той же системой проводников, если потенциалы проводников поддерживаются постоянными и соотношение проводимостей среды и проводников допускает предположение об эквипотенциальности последних.

Указанная замена изучения поля неподвижных зарядов изучением поля стационарного тока дает большие экспериментальные преимущества: 1) вводя в проводящую среду в качестве зондов простые металлические электроды, мы автоматически получаем в ы р а в н и в а н и е потенциалов зонда и той же точки поля, в которую введен зонд; 2) зонды в этом случае могут быть соединены с токоизмерительными приборами, а не с электростатической аппаратурой, которая всегда гораздо сложнее и ненадежнее в работе, чем токовые приборы.

Надо иметь в виду, что электрическая цепь зонда должна обладать большим сопротивлением, по сравнению с сопротивлением проводящих слоев вещества между точкой, в которую помещен зонд, и ближайшим электродом. В противном случае включение зонда исказит распределение потенциалов в исследуемом поле.

Отдельного замечания заслуживает вопрос об изучении строения электростатического поля в пространстве, заполненном диэлектриком, в особенности неоднородным диэлектриком. Как известно, в тех случаях, когда весь объем поля заполнен однородным диэлектриком, структура поля остается такой же, как и в отсутствие диэлектрика. Поэтому такое поле может быть заменено на

общих основаниях полем стационарного тока. Если же объем изучаемого поля заполнен неоднородным диэлектриком, то такому полю должно быть приведено в соответствие поле стационарного тока в среде с неоднородной проводимостью. Мы не останавливаемся здесь на дальнейшем обсуждении этого вопроса, так как он в задаче экспериментально не исследуется, но предупреждаем от одной довольно распространенной среди начинающих работать ошибки. Именно иногда предполагают, что введение в проводящую среду (в которой поле тока воспроизводит электростатическое поле) диэлектрических тел изменит конфигурацию поля в соответствии со значением диэлектрической проницаемости введенных тел. Это — ошибочное предположение. Поле тока изменится в таком случае в соответствии со значением проводимости введенного тела, а не его диэлектрической проницаемости.

Практическое осуществление описанного приема изучения электростатического поля будет ясно из объяснения устройства применяемой для этой цели простейшей установки.

Описание установки и метода измерений. В ванну, сделанную из материала с хорошими электроизолирующими свойствами (например, из плексигласа), помещают металлические электроды A и B , поле между которыми хотят изучить (рис. 1; контуры ванны показаны пунктирными линиями). Ванна заполняется жидким электролитом, проводимость которого мала по сравнению с проводимостью металла. В частности, для заполнения ванны подходит вода. Электроды A и B опираются на дно ванны и возвышаются над поверхностью уровня налитого в ванну электролита.

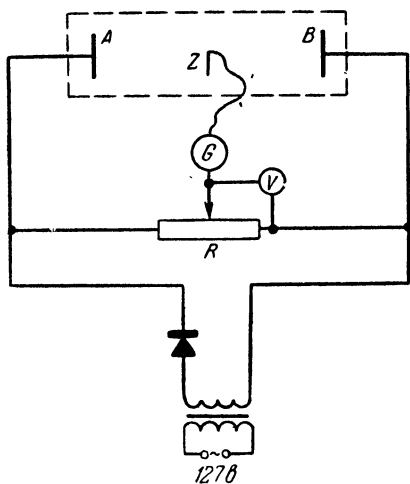


Рис. 1.

Схема подачи напряжения на электроды A и B включает понижающий трансформатор и купроксный выпрямитель (рис. 1). В измерительную часть схемы, кроме зонда Z , входят также нулевой гальванометр G , вольтметр V и делитель напряжения R ¹⁾. Принцип работы измерительной части схемы легко понять из следующих соображений.

Перемещая движок на делителе напряжения R , этому движку можно придавать различные значения потенциала относительно электродов, погруженных в ванну (разумеется, в пределах полной

¹⁾ Нулевым гальванометром называется стрелочный гальванометр, нулевое деление шкалы которого расположено посередине шкалы и стрелка прибора может отклоняться от него симметрично в обе стороны. Такой гальванометр удобен при работе с зондом, когда при поисках эквипотенциальной поверхности направление тока через гальванометр может менять знак.

разности потенциалов, наложенной на электроды и на делитель). Наличие или отсутствие тока в цепи гальванометра зависит при этих условиях от того, в какой точке поля находится зонд. Если он находится в такой точке поля, потенциал которой равен потенциалу, установленному на движке делителя, то тока в цепи зонда и гальванометра не будет.

Геометрическое место всех точек поля, для которых в цепи зонда ток будет равен нулю (при данном положении движка на делителе), образует эквипотенциальную поверхность в исследуемом поле. Для измерения потенциала этой поверхности (относительно электродов, помещенных в ванну) служит вольтметр, включенный между движком и одним из электродов.

Процесс изучения исследуемого поля сводится, таким образом, к следующему: перемещая по этапам движок на делителе напряжения, придают движку различные значения потенциала. Для каждого установленного на движке значения потенциала находят путем перемещений зонда в ванне соответствующую эквипотенциальную поверхность исследуемого поля.

Теперь остается только выяснить, каким образом надо рационально фиксировать положение и форму всех находимых с помощью зонда эквипотенциальных поверхностей изучаемого поля.

Это делается графическим путем с помощью специального прибора, называемого пантографом (рис. 2). К концу рычага 1 пантографа прикрепляется вертикальный зонд Z , могущий беспрепятственно вместе с рычагами перемещаться в горизонтальной плоскости над электролитической ванной, в которой создано поле. Контуры этой ванны показаны на рисунке пунктиром. Нижний конец зонда погружен в электролит, а верхний при помощи гибкого провода соединен с гальванометром. Таким устройством зонда с рычагами можно обследовать всю ванну.

Для фиксации эквипотенциальных поверхностей служит правая часть пантографа. К концу рычага 2 пантографа прикреплен вертикальный карандаш K . Карандаш может свободно перемещаться вместе с рычагами над листом бумаги, контуры которого показаны на рисунке пунктиром. С помощью пружины карандаш в нормальном положении приподнят над бумагой и движется в горизонтальной плоскости, не касаясь поверхности бумаги. При нажиме сверху на карандаш пружина укорачивается, и нижний оцинкованный конец карандаша достает до бумаги.

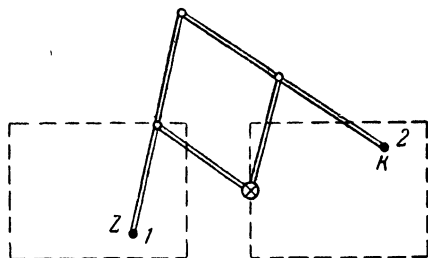


Рис. 2.

Система рычагов пантографа устроена таким образом, что все горизонтальные перемещения зонда в ванне автоматически воспроизводятся перемещениями карандаша над листом бумаги. Пусть зондом с помощью гальванометра последовательно отыскиваются в ванне точки на исследуемой в данный момент времени эквипотенциальной поверхности. Если после нахождения каждой такой точки нажимать на карандаш пантографа, то этот карандаш будет наносить точку (отметку) на лежащем под ним листе бумаги. Если нанести на бумаге таким путем отметки, соответствующие всем отысканным с помощью зонда точкам некоторой эквипотенциальной поверхности, то, соединяя потом эти отметки на бумаге плавкой линией, мы воспроизведем на бумаге геометрическую форму и размеры горизонтального сечения исследуемой эквипотенциальной поверхности. Таким способом можно по ходу работы с зондом зафиксировать все находимые с его помощью эквипотенциальные поверхности. Если предварительно обойти (ощупать) зондом контуры поверхности электродов (это будут, по условиям опыта, также эквипотенциальные поверхности), непрерывно нажимая при этом на карандаш, то мы автоматически получим на бумаге контуры горизонтальных сечений установленных в ванне электродов.

Разумеется, при всех описанных операциях лист бумаги под карандашом пантографа должен быть закреплен, иначе можно исказить всю геометрическую картину поля в результате случайных сдвигов бумаги. Указанным способом можно получить семейство эквипотенциальных линий. Так как эквипотенциальные поверхности и силовые линии ортогональны, то легко дополнить полученную картину и силовыми линиями. Это даст полное представление об изучаемом электростатическом поле.

Описанный метод исследования электростатического поля имеет не только иллюстративное значение, но и широкие применения на практике. Метод этот практически полезен для изучения сложных электростатических полей, точный расчет которых затруднителен из-за сложности граничных условий (многоэлектродные радиолампы в отсутствие объемного заряда, электростатические линзы, фотоэлектронные умножители). При этом принципиальное значение имеет правило подобия потенциальных полей, позволяющее в большом масштабе воспроизводить подлежащие изучению поля. Правило подобия утверждает, что если размеры электродов, создающих поле, и все расстояния между электродами изменены в одной пропорции, то структура поля остается прежней.

Измерения. При практическом выполнении задачи очевидно, что отыскание зондом эквипотенциальных поверхностей не должно проводиться бессистемно. Необходимо для каждого набора установленных в ванне электродов руководствоваться разумными соображениями о возможной в общих чертах конфигурации поля. В частности, необходимо привлекать при этом предварительном

рассмотрении поля свойства симметрии данной системы электродов. Но для полного анализа структуры поля уже необходимы плановые опыты с зондом. Наконец, необходимо в ходе опытов обеспечивать безопасные для гальванометра условия работы. Именно, устанавливая то или иное положение движка на делителе напряжения, надо перемещать и зонд в соответствующем направлении. При необдуманных действиях между зондом и движком реостата легко создать разность потенциалов, равную полной разности потенциалов между электродами, а это приведет к сгоранию обмотки рамки гальванометра.

1. Устанавливают в ванне систему двух плоских электродов. Помещают зонд вблизи одного из электродов и движок на делителе напряжения вблизи того же конца реостата делителя, к которому присоединен этот электрод.

2. С разрешения дежурного лаборанта или преподавателя включают в сеть понижающий трансформатор, от которого питается схема.

3. Исследуют зондом и зарисовывают пантографом эквипотенциальные поверхности поля между электродами. Около обоих концов каждой линии, обозначающей на бумаге эквипотенциальную поверхность, надписывают соответствующие ей показания вольтметра.

При всех измерениях особенно подробно обследуют зондом все участки сильных неоднородностей в поле, где эквипотенциальные поверхности (построенные через равные интервалы напряжения) располагаются особенно густо.

4. Помещают в середину ванны, в только что исследованное поле, металлический цилиндр и исследуют поле в новых условиях.

5. Помещают в ванну поочередно все наборы электродов, имеющиеся при установке, обследуют зондом и зарисовывают пантографом поля между этими электродами.

6. По полученным системам эквипотенциальных поверхностей строят для всех изученных полей картины силовых линий.

7. Для случая коаксиальных цилиндрических электродов по полученной системе эквипотенциальных поверхностей строят график распределения потенциала в поле между электродами в зависимости от расстояния до оси внутреннего электрода.

Технические данные установки. Электролитическая ванна размером $8 \times 40 \times 50$ см и соответствующие системы электродов и пантограф изготовлены в мастерской физического факультета университета. В работе используется гальванометр марки ГМП с чувствительностью $0,5$ мка на одно деление шкалы. На электроды подается напряжение ~ 2 в.

ЛИТЕРАТУРА

С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964, гл. 1.

ЗАДАЧА 66

ГРАДУИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ВОЛЬТМЕТРА
ПО АБСОЛЮТНОМУ ЭЛЕКТРОМЕТРУ

Введение. Задачей данной работы является применение метода абсолютных измерений разности потенциалов для градуирования электростатического вольтметра, т. е. для установления соответствия между делениями шкалы прибора, отсчитываемыми по этой шкале, и значениями измеряемого напряжения. Для построения абсолютной электростатической системы единиц (СГСЭ) за основные единицы выбираются сантиметр, грамм, секунда и используется закон Кулона для точечных зарядов при измерении силы взаимодействия между ними в пустоте. Полагая коэффициент пропорциональности равным единице, можно написать

$$f = \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (1)$$

где q_1 и q_2 — величины зарядов, r — расстояние между ними, f — сила взаимодействия между зарядами. Если f измерить в динах,

а r — в сантиметрах, то (1) позволяет установить СГСЭ — единицу заряда, исходя из которой можно определить единицы для измерения всех электрических величин. Силу взаимодействия f можно измерить с помощью крутильных весов Кулона. В этом случае величина заряда будет измерена непосредственно в абсолютных электростатических единицах. Такие измерения, которые позволяют найти величину заряда в единицах системы СГСЭ путем определения f и r , называются абсолютными, а измерения, основанные на использовании различных предварительно проградуированных приборов, — относительными.

Аналогично обстоит дело и в отношении измерений разности потенциалов. Необходимо установить связь между разностью потенциалов, приложенной к системе двух тел с силой их взаимного притяжения, и размерами этих тел. Тогда, найдя для такой системы способ определения силы взаимодействия, можно осуществить абсолютные измерения разности потенциалов.

Такую формулу легко получить для плоского конденсатора, состоящего из двух круглых горизонтальных пластин P_1 и P_2 (рис. 1), расположенных параллельно на расстоянии d друг от друга. Верхняя пластина P_1 окружена кольцом O , имеющим ту же толщину, как и P_1 , и находящимся в одной плоскости с P_1 . Между пластиной P_1 и кольцом O имеется незначительный зазор. Если нижнюю пластину P_2 зарядить до потенциала V_1 , а P_1 и O — до потенциала V_2 ,

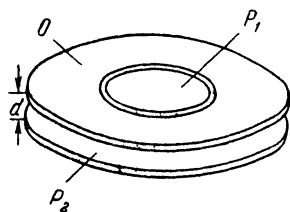


Рис. 1.

то электрическое поле между P_1 и P_2 будет однородно, так как рассеяние поля заметно сказывается только у внешних краев кольца и пластины P_2 . Такое кольцо, позволяющее осуществить однородность электрического поля в плоском конденсаторе, получило название охранного кольца. Зная напряженность поля плоского конденсатора с воздухом между пластинами, легко подсчитать силу взаимодействия f между пластинами. Тогда для разности потенциалов $V_1 - V_2$ получим [1]

$$V_1 - V_2 = 4 \cdot \frac{d}{D} \sqrt{2f}, \quad (2)$$

где d — расстояние между пластинами, а D — диаметр пластины P_1 . Выразив f в динах, а d и D в сантиметрах, получим $V_1 - V_2$ в абсолютных электростатических единицах. Силу f можно измерить

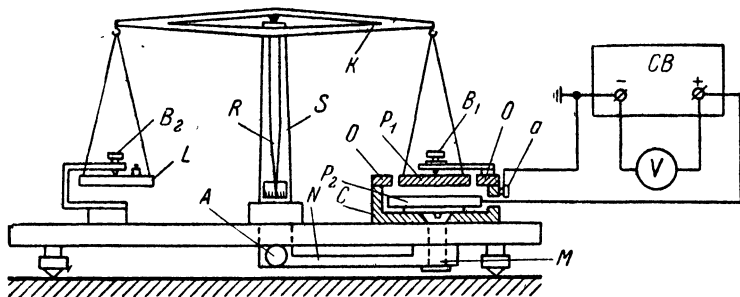


Рис. 2.

с помощью чувствительных рычажных весов, если заменить одну из их чашек пластиной P_1 . Приборы, служащие для измерения разности потенциалов путем определения силы притяжения между пластинами заряженного плоского конденсатора, носят название абсолютных электрометров, абсолютных потому, что позволяют производить абсолютные (т. е. без предварительного градуирования прибора) измерения разности потенциалов.

Для других видов электрометров (например, струнного или квадратного [2]) не удастся рассчитать достаточно точно и просто зависимость между силой, действующей на подвижную систему электрометра, и размерами последней. Поэтому, чтобы с помощью таких приборов можно было измерять разности потенциалов, необходимо их заранее проградуировать по абсолютному электрометру. В этом случае измерения будут относительными.

В настоящей задаче абсолютный электрометр применяется для градуирования электростатического вольтметра.

Описание приборов. 1. Абсолютный электрометр. Главной частью этого прибора, схематически изображенного на рис. 2, является

конденсатор, состоящий из пластин P_1 , P_2 и охранного кольца O . Верхняя пластина P_1 подвешена горизонтально к коромыслу аналитических весов; нижняя P_2 установлена параллельно P_1 внутри металлического цилиндра C , на верхней части которого укреплено охранное кольцо. К пластине P_2 , изолированной от цилиндра C , подводится проводник, потенциал которого измеряется. Если цилиндр C заземлить (с помощью клеммы a), то пластина P_1 будет также находиться под потенциалом земли благодаря наличию электрического соединения между цилиндром C и этой пластиной через винт M , проводящий стержень N (укрепленный в нижней части весов), стойку S , коромысло K и нити подвеса. Цилиндр C служит экраном от внешних электрических воздействий на поле конденсатора, а также защитой от высокого потенциала, под которым может находиться нижняя пластина P_2 .

При незаряженном конденсаторе верхняя пластина уравновешивается на одном уровне с охранным кольцом на расстоянии d от нижней пластины. Винт B_1 поддерживает P_1 в этом положении, когда чашка L весов нагружена гирьками. Для того чтобы при зарядке конденсатора верхняя пластина под действием силы притяжения не соединилась с нижней, предусмотрен задерживающий винт B_2 . В начале измерений расстояние между концом этого винта и чашкой весов устанавливается равным 1—1,5 мм.

Для предохранения прибора от пыли и воздушных потоков электрометр заключен в ящик со стенками из органического стекла; передняя стенка сделана подъемной.

В нижней части прибора помещена ручка A для арретирования весов.

2. Электростатический вольтметр. В данной задаче в качестве прибора, подлежащего градуированию, взят электростатический вольтметр типа С-95.

Принцип действия такого вольтметра основан на электростатическом взаимодействии заряженных проводников. Измерительный механизм прибора состоит из не-

подвижного электрода 1 (рис. 3), представляющего собой металлическую камеру, и подвижного алюминиевого электрода 2 в форме пластинки. Камера укреплена на изоляционной колонке 3 из вещества, обладающего большим сопротивлением на высоких частотах (керамики стеатита). Пластинка 2 закреплена на оси 4 , которая установлена вертикально с помощью двух нитей 5 из бронзы (так называемых растяжек). Пружины 6 , укрепленные на стойке 7 , растягивают эти нити.

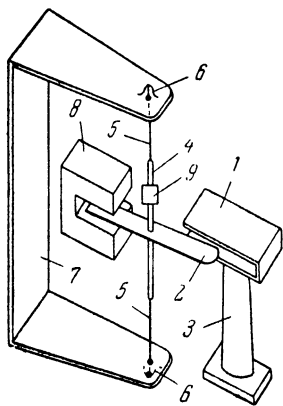


Рис. 3.

Измеряемое напряжение подводится одним полюсом к камере, а другим — к пластинке. Камера и пластинка заряжаются противоположными по знаку зарядами, и возникающая сила притяжения втягивает подвижную пластинку внутрь неподвижной камеры. Противодействующий момент создается упругими силами растяжек.

Для быстрого успокоения подвижной пластинки конец ее помещается в поле постоянного магнита δ . Торможение возникает благодаря силам, действующим со стороны магнитного поля магнита на ток, индуцируемый в той части пластинки, которая движется между полюсами магнита.

Так как обычно в таких электростатических приборах моменты, действующие на подвижную часть, малы, то для отсчета показаний прибора пользуются световым лучом, отраженным от небольшого легкого зеркальца 9 , укрепленного на оси 4 .

Для уменьшения влияния внешних электрических полей прибор снабжен экраном, который заземляется. Принципиальная схема электростатического вольтметра и его подключения к источнику напряжения V представлена на рис. 4.

Теория электростатического вольтметра дает следующее выражение для угла отклонения α подвижной части [3]:

$$\alpha = \frac{1}{2k} \frac{dC}{d\alpha} U^2. \quad (3)$$

Здесь U — напряжение, подаваемое на вольтметр, C — емкость между электродами, K — момент кручения растяжек, приходящийся на единицу угла отклонения.

Из формулы (3) видно, что угол α зависит как от квадрата напряжения U , так и от изменения емкости C . Подбором размеров и формы электродов удается сделать величину $dC/d\alpha$ постоянной. Поэтому обычно шкала электростатических вольтметров имеет квадратичный характер.

Квадратичная зависимость угла отклонения от напряжения позволяет применять такие приборы для измерения не только постоянного напряжения, но и напряжения переменного тока (до частоты порядка 30 Мгц).

Эти приборы имеют малую входную емкость и высокое сопротивление изоляции; поэтому измерение постоянного напряжения происходит практически без потребления мощности самим прибором и с очень малым потреблением мощности при измерении переменного напряжения. Электростатические вольтметры пригодны для измерений высоких напряжений постоянного, а также переменного токов, причем при измерении высокого напряжения

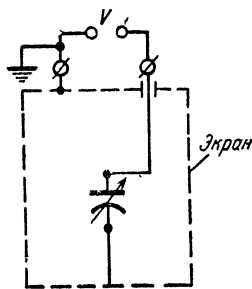


Рис. 4

переменного тока не требуется применения специальных измерительных трансформаторов.

Схематически внешний вид электростатического вольтметра типа С-95 изображен на рис. 5. Шкала 1 с горизонтальной прорезью 2 для светового указателя расположена наклонно на передней панели прибора. Для установки светового указателя в нулевое положение имеется корректор, головка 3 которого выведена на боковую сторону. На передней стенке прибора помещены штепсельная колодка 4 для подключения питания осветителя и переключатель 5 этого питания. Зажимы для включения вольтметра в схему расположены на задней панели.

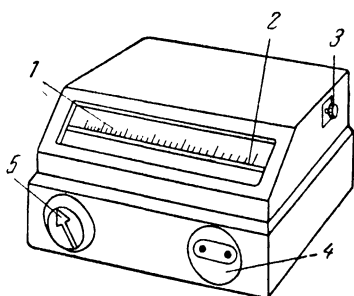


Рис. 5.

3. Источник напряжения. В качестве источника постоянного напряжения в задаче используется высоковольтный стабилизированный выпрямитель, дающий плавно регулируемое напряжение от 0 до 2000 в. Этот прибор собран по схеме двухполупериодного кенотронного выпрямителя (см. задачу 101) с фильтром и электронной стабилизацией на выходе. Такой выпрямитель дает напряжение, которое остается постоянным при случайных изменениях напряжения в сети. Прибор заключен в металлический кожух, служащий экраном. На передней панели выпрямителя (рис. 6) имеются два выходных гнезда 1 «—» и «+» для вывода напряжения, рукоятка 2 плавной регулировки напряжения, вольтметр постоянного тока 3 для приблизительной оценки величины напряжения на выходе выпрямителя, выключатель 4, включающий прибор в сеть, и сигнальная лампочка 5.

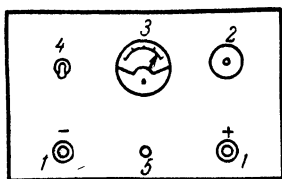


Рис. 6.

Напряжение, получаемое на выходе выпрямителя, подается к электрометру и вольтметру с помощью высоковольтных кабелей.

Измерения. Источник напряжения СВ, абсолютный электрометр и электростатический вольтметр V, подлежащий градуированию, соединяются в соответствии со схемой, представленной на рис. 2. Весы электрометра освобождают от арретира и замечают положение стрелки R весов, соответствующее равновесию. Затем весы арретируют и на чашку L кладут груз весом в 10 мг. Поворачивая винт B₂, устанавливают его конец на расстоянии 1—1,5 мм от чашки (регулировка винта B₁ производится лаборантом до начала выполнения работы студентом). После освобождения весов от арре-

тира пластина P_1 прижмется к винту B_1 . Включают источник напряжения CB и, дав прибору прогреться, через 2—3 минуты начинают постепенно повышать напряжение, плавно вращая ручку регулятора напряжения на щитке выпрямителя. При этом внимательно следят за показаниями градуируемого вольтметра V . Увеличение напряжения производится до тех пор, пока стрелка весов не отклонится от начального положения. (Или пластина P_1 не оторвется от винта B_1 .) В этот момент замечают показание вольтметра и сводят напряжение до нуля, устанавливая ручку регулятора в крайнее левое положение. Момент отрыва верхней пластины конденсатора соответствует равенству между силой притяжения пластины и весом гирьки, находящейся на чашке весов.

Затем увеличивают груз еще на 10 мг и вновь повторяют весь процесс измерений. Измерения производятся до тех пор, пока не будет пройдена вся шкала вольтметра, причем при каждом последующем измерении нагрузка увеличивается на 10 мг.

Обработка результатов измерений. Подставляя в формулу (2) данные прибора ($d = 0,4$ см, $D = 6$ см) и найденные в результате измерений значения сил притяжения пластин, выраженные в динах, вычисляют значения разности потенциалов, соответствующие отсчетам по шкале вольтметра. Затем графически изображают результаты градуирования. Для этого на оси абсцисс откладывают отсчеты по шкале вольтметра, а на оси ординат — вычисленные значения разности потенциалов, выраженные в вольтах.

Непрерывная кривая, получающаяся в результате соединения нанесенных на график точек, будет являться градуировочной кривой вольтметра. С помощью такой кривой можно найти значение напряжения (в вольтах), соответствующее любому делению шкалы вольтметра.

При проведении измерений надо иметь в виду, что приходится работать с высоким напряжением, достигающим 1500—2000 в. Поэтому *строго воспрещается*:

- 1) включать схему без проверки преподавателем или лаборантом;
- 2) делать какие-либо переключения при включенном источнике напряжения.

Технические данные установки. Абсолютный электрометр сконструирован на основе аналитических весов «Госметр» (Ленинград), разновес от аналитических весов «Госметр» (Ленинград), электростатический вольтметр типа С-95 с верхним пределом измерения 1000 в (или 1500, 2000 в), высоковольтный выпрямитель с электронной стабилизацией и плавной регулировкой напряжения от 0 до 1000 в (или 0—1500, 0—2000 в соответственно пределу измерения вольтметра, выбранного для градуирования).

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева, Курс общей физики, т. II, Физматгиз, 1962.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.
3. Г. П. Ш к у р и н, Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам, Воентиз, 1956.
4. Курс электрических измерений, под редакцией В. Г. П р ы т к о в а и А. В. Т а л и ц к о г о, Госэнергоиздат, 1960.

З А Д А Ч А 67

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНОГО ЗАРЯДА МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ
СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
В ПОЛЕ КОНДЕНСАТОРА**

Введение. Определение элементарного заряда e_0 может быть выполнено при помощи ряда методов:

- а) измерением заряда сосчитанных непосредственно частиц;
- б) статистической обработкой результатов наблюдений шротт-эффекта (дробовой шум в электронных лампах);
- в) из равенства $e_0 N = F$, где $F = 96494 \pm 6$ кулон — число Фарадея, $N = (6,02318 \pm 0,0016) \cdot 10^{23}$ — число Авогадро.

Число Фарадея определяется непосредственно; число Авогадро может быть очень точно определено, например, из наблюдений дифракции на кристалле рентгеновских лучей известной длины волны;

- г) из измерения скорости перемещения заряженных микроскопических частиц в однородном электрическом поле.

В настоящей работе используется метод измерения скорости заряженных частиц в электрическом поле, так как он является одновременно наиболее прямым и убедительным доказательством прерывного строения электрических зарядов.

В основу метода положено изучение движения заряженных капелек жидкости (масла) в однородном электрическом поле известной напряженности.

Измеряя скорости капелек, падающих в поле силы тяжести (при отсутствии электрического поля), и скорости капелек, поднимающихся в поле сил тяжести при наличии электрического поля, можно вычислить действующую на капельку силу электрического поля. Затем, зная величину напряженности электрического поля, уже нетрудно определить заряд капельки.

Измерение элементарного заряда по этому способу и доказательство дискретности электрического заряда было проведено в классических опытах Р. Милликена в 1914—1916 гг.

Следует отметить, что получение значения e_0 с точностью, достигнутой Р. Миллиkenом, невозможно в условиях учебной лабораторной работы. Поэтому при выполнении задачи необходимо

обратить внимание на изучение метода, примененного в данном случае, и на доказательство дискретности зарядов, удовлетворяясь значением e_0 , полученным с невысокой точностью.

Если к микроскопическим капелькам жидкости, движущимся в воздухе, применим закон Стокса, то скорость установившегося (равномерного) падения капельки в поле только силы тяжести определяется уравнением

$$\frac{4}{3} \pi a^3 \rho g - \frac{4}{3} \pi a^3 \sigma g - 6\pi \eta a v_g = 0 \quad (1)$$

(см. т. I, задачу 46). Здесь a — радиус капли, σ — плотность вещества капли (масла), ρ — плотность воздуха, g — ускорение силы тяжести, η — коэффициент внутреннего трения воздуха, v_g — скорость падения капли.

Установившаяся скорость движения заряженной капли, если она поднимается в электрическом поле, определяется уравнением

$$Ee + \frac{4}{3} \pi a^3 \rho g - \frac{4}{3} \pi a^3 \sigma g - 6\pi \eta a v_E = 0, \quad (2)$$

где E — напряженность электрического поля, e — заряд капли, v_E — скорость подъема капли.

В этих уравнениях все величины, за исключением заряда капельки e и ее радиуса a , доступны непосредственному измерению. Непосредственное измерение радиуса капельки сопряжено со значительными трудностями ввиду ее микроскопических размеров. Исключая из уравнений (1) и (2) радиус капельки a , находим выражение для величины заряда e

$$e = \frac{9\sqrt{2}\pi\eta^{3/2}}{E(\sigma - \rho)^{1/2}g^{1/2}} v_g^{1/2} (v_g + v_E). \quad (3)$$

Множкратно повторяя измерения заряда одной и той же капли, можно заметить, что этот заряд время от времени меняется. Причиной изменения заряда капли может быть ионизация воздуха космическими лучами или ионизация с помощью радиоактивного препарата, который помещают в особое гнездо футляра конденсатора. Изменение заряда капли может происходить также в результате фотоэффекта при взаимодействии фотонов с веществом капли.

Сравнивая величины заряда одной и той же капли, полученные из различных опытов, можно убедиться, что величина изменения заряда и сам заряд капли являются целыми кратными одной и той же величины. Эту величину e_0 естественно считать элементарным зарядом.

При выводе уравнений (1) и (2) мы предположили, что к микроскопическим капелькам, движущимся в воздухе, применим закон Стокса. Однако это справедливо только до тех пор, пока размеры капельки велики по сравнению с длиной свободного пробега молекул

воздуха. В противном случае закон Стокса неприменим, и вычисления усложняются. Кроме того, при значительном уменьшении капельки, когда ее размеры становятся сравнимыми с толщиной слоя молекул воздуха, адсорбированного на поверхности капли, эффективная плотность капли может существенно отличаться от плотности ее вещества. Отсутствие должного внимания к этим обстоятельствам являлось причиной ошибок при ранних измерениях элементарного заряда по этому методу.

Необходимо отметить, что определения по данному методу значения элементарного заряда e_0 до недавнего времени содержали также систематическую ошибку, связанную с несколько заниженными значениями принимавшегося для воздуха коэффициента внутреннего трения η . Считалось, что $\eta = 1822,6 \cdot 10^{-7}$ г/см·сек, при этом получилось $e_0 = 4,770 \cdot 10^{10}$ ед. СГСЭ, что отличалось от значений e_0 , измеренных другими методами. После ряда точных измерений (1936—1940 гг.) было найдено $\eta = 1832 \cdot 10^{-7}$ г/см·сек и соответственно $e_0 = 4,805 \cdot 10^{10}$ ед. СГСЭ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ к.

Другими методами для элементарного заряда было получено то же значение. Наиболее точное значение этой величины по последним данным следующее: $e_0 = (4,80294 \pm 0,0008) \cdot 10^{10}$ ед. СГСЭ = $1,602 \cdot 10^{-19}$ к.

При проведении эксперимента следует использовать капли микроскопических размеров, так как в этом случае заряд капли, а также его приращения равны достаточно малому числу элементарных зарядов. Поэтому кратность заряда капельки элементарному заряду e_0 устанавливается легче.

Точность измерения заряда капельки существенно зависит от точности измерения скорости ее движения (см. формулу (3)). При этом скорость v_g падения капли в отсутствие электрического поля, оставаясь неизменной для одной и той же капли при изменении ее заряда, может быть измерена достаточно точно за счет многократного повторения измерений. Для получения достаточной точности измерения скорости движения капельки в электрическом поле следует использовать достаточно малую напряженность поля. Однако при малой напряженности поля на движении капель существенно сказывается влияние воздушных конвекционных потоков, которое становится особенно заметным при малых скоростях перемещения капельки. Поэтому при осуществлении эксперимента существенное внимание уделяется уменьшению воздушных потоков.

Описание установки. Схема прибора представлена на рис. 1. На рис. 2 приведена электрическая схема соединений.

В пространство между пластинами конденсатора K через отверстие в центре верхней пластины при помощи пульверизатора P вводятся капли масла микроскопических размеров. За их движением наблюдают в трубу. Частицы освещаются пучком света, падающим перпендикулярно трубе от источника I , и видны в за-

темном поле как светящиеся точки. Для уменьшения движения воздуха внутри конденсатора, которое могло бы исказить движение капельки, пространство между пластинами конденсатора ограничено с боков эбонитовым кольцом Э, имеющим три окошка. Два из них O_1 и O_2 служат для прохождения через конденсатор светового пучка,

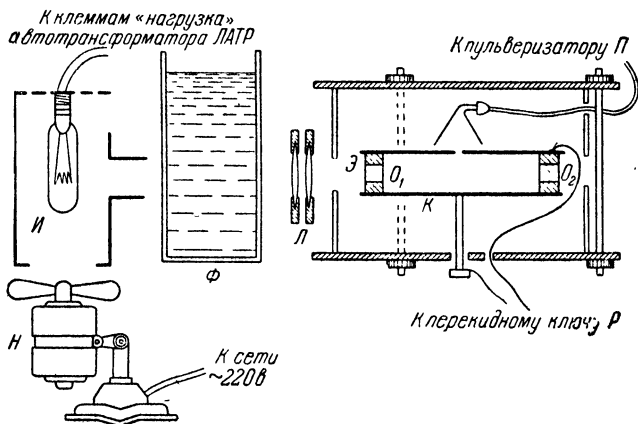


Рис. 1.

третье, перпендикулярное к первым двум, используется для наблюдения движения капель.

Условием удовлетворительной видимости капель является достаточно большая интенсивность светового потока, что достигается как за счет применения мощного источника света, так и путем применения линзового конденсора Л. Пучок света, прежде чем попасть в конденсатор К, проходит через плоскопараллельный сосуд с водой Ф, поглощающий тепловые лучи. Это уменьшает воздушные потоки внутри конденсатора и предотвращает испарение капелек.

Разность потенциалов подается на пластины конденсатора от выпрямителя В. Она может регулироваться с помощью потенциометра Д и измеряться статическим вольтметром V. Принцип действия статического вольтметра основан на измерении силы пондеромоторного взаимодействия между пластинками, которым сообщается измеряемая разность потенциалов. Измерение взаимодействия пластин в статическом

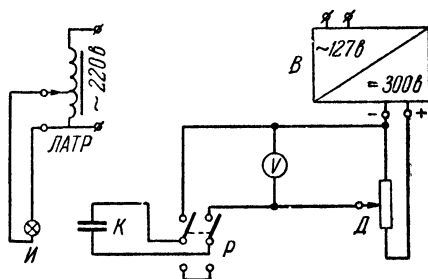


Рис. 2.

вольтметре производится обычно по методу крутильных весов. Статический вольтметр практически не потребляет тока и потому находит широкое применение при измерениях разности потенциалов в высокоомных цепях (см. задачу 66).

Ключ P служит для замыкания накоротко пластин конденсатора при измерениях скорости падения капель в отсутствие поля.

Измерения. При помощи пульверизатора в пространство между пластинами конденсатора вводятся микроскопические капельки масла. При распылении большинство капель электризуется, приобретая больший или меньший положительный или отрицательный заряд. Перемещением трубы, а также вращением конденсатора L , закрепленного несколько эксцентрично в оправе, добиваются отчетливой видимости капелек в виде звездочек на темном фоне.

Чтобы убрать капельки, несущие слишком большой заряд, пластинам конденсатора на некоторое время сообщают разность потенциалов около 300 в. При этом капельки с большим зарядом быстро двигаются к пластинам, капли же с малым зарядом двигаются медленно и не успевают за это время достигнуть электродов.

Все последующие измерения производят, установив в конденсаторе с помощью потенциометра разность потенциалов порядка 200—250 в. Эта разность потенциалов поддерживается неизменной в течение всего эксперимента и периодически контролируется при помощи статического вольтметра.

Выбрав ясно видимую обособленную капельку, которая под действием поля медленно движется вверх, выключают поле. Для этого при помощи ключа P замыкают конденсатор K накоротко. В отсутствие поля капля падает вниз.

Следует иметь в виду, что труба дает перевернутое изображение, поэтому наблюдатель будет видеть обратную картину: при наличии поля капля движется вниз, при отсутствии поля — вверх.

Определяют скорость падения капли, измеряя секундомером время прохождения капель нескольких (не менее трех) делений окулярного микрометра. Затем снова накладывают электрическое поле и измеряют уже скорость подъема той же капельки, отсчитывая время, затрачиваемое капелькой на прохождение того же числа делений окулярного микрометра. Перемещения данной капельки вверх и вниз повторяют много раз (не менее 15 в каждую сторону) своевременным включением и выключением поля.

Необходимо провести измерение не менее чем для восьми различных капелек, из которых некоторые должны обладать зарядом противоположного знака. При наблюдении за каплей, несущей противоположный заряд, надлежит соответственно изменить полярность пластин конденсатора, чтобы обеспечить движение капли вверх при наложении поля. Это достигается путем пересоединения проводов, идущих к ключу P от выпрямителя.

В первой и второй графах записываются соответственно время опускания и время подъема капельки, усредненные для ряда наблюдений за движением капли с одним и тем же зарядом. Изменение заряда капли, сопровождающееся резким изменением скорости, происходит довольно редко, вследствие чего мы получаем ряд значений скорости для одного и того же заряда. Разброс скоростей в этом случае относится к погрешностям эксперимента. В третьей графе записывается заряд капельки в относительных единицах. В четвертой графе помещаются разности между двумя последующими числами третьей графы. Эти разности являются численными значениями изменения заряда капелек, выраженного в относительных единицах. Если эксперимент был проведен достаточно тщательно, то при рассмотрении чисел четвертой графы можно заметить, что они являются приблизительно целыми кратными некоторого числа e_0^* .

Числа кратности Δn , округленные до целого, выписываются в следующей пятой графе.

Разделив величину изменения заряда на соответствующую ему кратность, получим ряд численных значений для элементарного заряда e_0^* в относительных единицах (6-я графа).

Если рассмотреть числа третьей графы, можно убедиться, что они также являются приблизительно целыми кратными некоторых чисел, совпадающих с числами шестой графы. Числа кратности n , округленные до целого, выписываются в седьмой графе.

Численные значения элементарного заряда e_0^* (в относительных единицах), полученные путем деления величин заряда (3-я графа) на соответствующие кратности (7-я графа), записываются в 8-й графе. Как указано выше, числа, помещенные в 6-й и 8-й графах, должны примерно совпадать.

Представленные в таблице результаты должны явиться доказательством того, что изменение заряда капельки происходит конечными порциями и что заряд капельки состоит из целого числа элементарных зарядов, равных по величине наименьшей порции изменения заряда.

Абсолютное значение элементарного заряда e_0 вычисляется из соотношения (4)

$$e_0 = ke_0^*.$$

За величину e_0^* следует взять среднее из всех экспериментально определенных относительных значений элементарного заряда.

Для каждой наблюдаемой капельки по формуле (1) следует вычислить радиус капли a (9-я графа).

В применяемом приборе среднее расстояние между пластинами конденсатора $d = 0,72$ см;

цена деления окулярного микрометра $s' = 0,036$ см;
 плотность масла (МЗП-6) $\sigma = 0,909$ г/см³;
 плотность воздуха ρ и коэффициент внутреннего трения воздуха
 берутся из таблиц.

Технические данные установки. В задаче используется прибор (конденсатор с оптической трубой и пульверизатором), изготовленный мастерскими Физико-технического института, стабилизированный выпрямитель на 300 в, статический вольтметр С-91. Для освещения используется кинопроекционная лампа К-15 (110 в, 750 в) и две конденсорные линзы (+5 диоптрий каждая).

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964, гл. XIV, § 159.
2. С. Э. Ф р и ш и А. В. Т и м о р е в а, Курс общей физики, т. II, Физматгиз, 1962.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

3. Э. В. Ш п о л ь с к и й, Атомная физика, т. 1, Гостехиздат, 1951, гл. 1.
4. Р. М и л л и к е н, Электроны (+ и —), протоны, фотоны, нейтроны и космические лучи, гл. I—V, Гостехиздат, 1939, гл. I—V.

ЗАДАЧА 68.

ГРАДУИРОВАНИЕ АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА

Проградуировать какой-либо измерительный прибор — это значит установить соответствие между делениями его шкалы и значениями величины, отсчитываемой по этой шкале. Результаты градуировки удобно представлять в виде градуировочных кривых, откладывая по оси абсцисс показания прибора, а по оси ординат значения измеряемой величины. Градуировочная кривая позволяет определить цену деления шкалы прибора; последняя является величиной постоянной, если результат градуировки может быть представлен прямой линией. Цена деления шкалы прибора в этом случае будет численно равна тангенсу угла наклона прямой к оси абсцисс.

Упражнение 1

Градуирование амперметра

Описание прибора. Для градуирования амперметра надо пропускать через него ток, сила которого известна, и сопоставлять показания амперметра со значениями этой силы тока. Одним из возможных методов градуирования амперметра является включение этого прибора в электрическую цепь с известным сопротивлением,

питаемую источником тока с известной электродвижущей силой. Тогда сила тока в этой цепи может быть вычислена по закону Ома, и показания амперметра сопоставлены с этими вычисленными значениями силы тока.

Другой возможный прием градуирования амперметра заключается в том, что он включается в цепь последовательно с другим ранее проградуированным амперметром и показания обоих приборов сопоставляются между собой. Исходным же моментом градуировки приборов, измеряющих силу тока, является сопоставление их показаний с величиной электрического заряда, протекающего через прибор за единицу времени. Количество же электричества определяется по химическому действию тока; подробнее с этим можно познакомиться по описанию задачи 82.

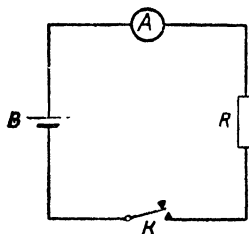


Рис. 1.

В настоящей задаче используется первый из только что описанных методов градуирования амперметра. Схема необходимой для этого электрической цепи изображена на рис. 1. На этой схеме A обозначает амперметр, R — магазин сопротивлений, K — ключ для замыкания цепи и B — аккумулятор, служащий в данном случае источником тока с известным значением электродвижущей силы.

Сделаем здесь некоторое замечание об устройстве штепсельных магазинов сопротивлений Р-14, с которыми предстоит дальше работать. Эти магазины состоят из многих последовательно соединенных между собой катушек бифилярно намотанной константановой проволоки. Каждая катушка, помимо соединения с двумя соседними катушками, соединена еще с двумя половинками массивного разрезного гнезда, находящегося непосредственно под верхней панелью магазина. Когда в такое гнездо плотно вставлен и притерт к нему вращением конический латунный штырек, то половинки гнезда и штырек замыкают находящуюся под ними катушку накоротко и ее сопротивление в работе магазина не участвует. Когда штырек вынут из разрезного гнезда — катушка включена. Вблизи каждого гнезда на верхней панели магазина есть надпись, указывающая сопротивление катушки.

Надо иметь в виду, что в верхней панели магазина, помимо рабочих разрезных гнезд для штырьков, замыкающих катушки неработающих сопротивлений, есть еще гнезда, расположенные также рядами. Эти гнезда служат для вставления в них штырьков, вынутых из разрезных гнезд включенных в данный момент сопротивлений. Штырьки вставляются в вспомогательные гнезда только для хранения.

В условиях задачи 74 (см. ниже) обычный способ хранения штырьков, вынутых из гнезд включенных сопротивлений, не рекомендуется ввиду специфического использования магазинов в компенсационной схеме. Вынутые на первом этапе работы штырьки из первого магазина откладываются совсем в сторону.

Аккумуляторы вообще не являются источниками тока со строго определенным значением электродвижущей силы и не используются в качестве таковых при точных электрических измерениях,

в которых применяются так называемые *нормальные элементы* (см. описание задачи 74). Аккумуляторы при точных измерениях играют лишь роль вспомогательных источников тока, электродвижущая сила которых не входит в окончательный расчет результата измерений¹⁾. Однако нормальные элементы не могут давать большие токи, необходимые, например, для калибровки грубого технического прибора, используемого для учебных целей в практикуме. Поэтому в настоящей задаче и используется аккумулятор.

Сила тока в цепи амперметра может быть вычислена из формулы

$$I = \frac{E}{R + \rho},$$

где E — электродвижущая сила аккумулятора, R — введенное в цепь сопротивление магазина сопротивлений, ρ — сопротивление амперметра. Сопротивлением аккумулятора и подводящих проводов можно пренебречь, так как оно составляет всего несколько сотых долей ома. Сопротивление амперметра указано непосредственно на приборе, а электродвижущая сила аккумулятора — на табличке, помещенной на лабораторном столе.

Измерения. Соединяют проводами приборы согласно схеме, изображенной на рис. 1, и, не включая тока, отсчитывают положение стрелки амперметра на шкале; это будет нулевым отсчетом прибора. Он может и не совпадать с нулевым делением шкалы прибора.

Затем устанавливают в магазине сопротивлений максимальное сопротивление; замыкают ключом цепь, отсчитывают и записывают первое показание амперметра.

Может оказаться, если аккумулятор недостаточно хорошо заряжен, что показания прибора меняются с течением времени (за 20—30 сек). В таком случае аккумулятор должен быть заменен.

Далее начинают уменьшать включенное в магазине сопротивление, что осуществляется путем помещения штепселей обратно в гнезда. Штепсели следует вставлять с легким вращением и небольшим нажимом, чтобы гарантировать надежный контакт с обеими половинками разрезного гнезда. Сопротивление надо уменьшить так, чтобы стрелка амперметра перемещалась каждый раз на 3—5 делений шкалы прибора. Отсчеты по шкале ведутся с точностью до 0,1 деления шкалы. Уменьшение сопротивления ведется при замкнутой цепи прибора, для того чтобы многократными размыканиями не изменять резко режим работы аккумулятора, что приведет к некоторому изменению его электродвижущей силы.

¹⁾ При точной работе лучше пользоваться кислотными аккумуляторами, а не щелочными, так как первые лучше держат постоянный режим в цепи.

Следует отметить, что хотя принцип по возможности неизменной нагрузки источника тока и должен соблюдаться при измерениях, это не должно приводить к слишком длительному пребыванию цепи аккумулятора в замкнутом состоянии во избежание излишнего расхода его запаса энергии. При всяких задержках хода измерений надо немедленно размыкать ключом цепь аккумулятора. Надо иметь в виду, что переключение металлических штепселей рукой при замкнутой цепи возможно только при питании схемы малым напряжением, как в данной задаче; в большинстве случаев этот прием недопустим.

Доводить сопротивление магазина до нуля возможно только в том случае, когда амперметр имеет значительное сопротивление и схема питается низковольтным источником напряжения. С произвольным прибором вести градуирование до полного выключения магазина сопротивлений нельзя, так как сопротивление амперметра может быть весьма малым и его включение без дополнительного сопротивления соответствует режиму короткого замыкания.

Результаты градуирования изображают графически, откладывая по оси абсцисс отсчеты по шкале прибора, а по оси ординат — вычисленные значения силы тока. Кривая, соединяющая нанесенные на график точки, является градуировочной кривой прибора. С ее помощью можно в дальнейшем найти силу тока, соответствующую любому отсчету на приборе. В том случае, если построенный график оказывается близким к прямолинейному, имеет смысл найти цену деления шкалы, которая будет величиной, постоянной для всей шкалы.

Упражнение 2

Градуирование вольтметра

Описание приборов. Для градуирования вольтметра надо подавать на него известные напряжения и сопоставлять показания вольтметра со значениями этих напряжений. Контроль значения этих напряжений может быть осуществлен путем соединения исследуемого вольтметра параллельно с ранее отградуированным точным прибором. В настоящей задаче используется другой прием. Он заключается в получении изменяемых, но всякий раз известных значений напряжения с делителя напряжения, соединенного с источником известной электродвижущей силы. Такой делитель напряжения, выполненный в виде магазина сопротивлений R , изображен на рис. 2

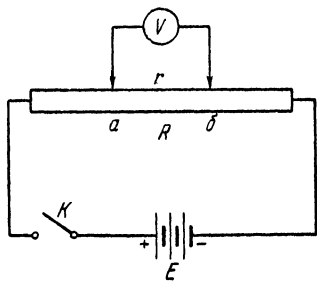


Рис. 2.

вместе с включенной в делитель батареей аккумуляторов (источник известной электродвижущей силы E), градуируемым вольтметром V и ключом K , замыкающим цепь. Из схемы видно, что на участке делителя ab , параллельно которому включен вольт-

метр, падение напряжения будет составлять некоторую долю значения электродвижущей силы батареи, замкнутой на делитель. В этом и заключается роль делителя напряжения — прибора, часто встречающегося в электроизмерительной практике слабых токов.

Для градуирования вольтметра надо знать величину E и то, какая ее доля снимается на вольтметр. Сопротивление вольтметра составляет даже для низковольтных приборов обычно несколько сотен ом, достигая для высоковольтных и точных приборов значения в десятки тысяч ом. Поэтому через вольтметр всегда идет небольшой ток, и вольтметр не может существенно изменить сопротивление участка схемы ab по сравнению с величиной части магазина сопротивлений, включенной между этими точками.

В таком случае снимаемая с делителя величина напряжения может быть определена особенно просто. Именно, пренебрегая по вышеуказанным причинам разветвлением тока на участке ab , можно из закона Ома найти, что падение напряжения на сопротивлении r будет пропорционально отношению сопротивления этого участка к сопротивлению всего магазина

$$e = \frac{r}{R} E.$$

В случае если сопротивление вольтметра ρ сравнимо с сопротивлением части магазина r , величина падения напряжения на этом участке представится выражением

$$e = \frac{E}{\frac{R-r}{\rho} + \frac{R}{r}}.$$

Эту формулу легко получить, если учесть, что теперь используемый участок делителя ab шунтируется сопротивлением вольтметра и они вместе обладают сопротивлением $Z = r\rho/(r + \rho)$. Тогда падение напряжения на участке представится выражением

$$e = \frac{Z}{R-r+Z} E = \frac{r\rho E}{(r+\rho)\left(R-r+\frac{\rho r}{\rho+r}\right)},$$

из которого после преобразований получается приведенная выше формула.

Относительно использования в этом случае в качестве источника известной электродвижущей силы батареи аккумуляторов следует сделать те же оговорки, которые были сделаны в первом упражнении. Однако использование нормальных элементов в этом упражнении уже возможно, так как делитель напряжения расходует очень небольшой ток.

Измерения. Устанавливают в магазине сопротивлений делителя напряжения постоянное сопротивление не менее 100 ом и собирают схему, включая вольтметр параллельно участку магазина с

сопротивлением в 1 ом. Записывают нулевой отсчет вольтметра. Затем замыкают ток ключом и записывают показания вольтметра. Комбинируя положение штепселей в магазине делителя или даже переключая провода, идущие от вольтметра к различным промежуточным клеммам магазина, изменяют сопротивление участка *ab* таким образом, чтобы показания вольтметра увеличивались всякий раз на 10—12 делений шкалы. Все перестановки штепселей в магазине можно делать не размыкая ключа, но при переключении проводов на клеммах магазина ключ нужно обязательно размыкать.

После окончания измерений вычисляют для каждого отсчета на вольтметре величину подававшегося на него напряжения e . Затем изображают графически результаты градуировки. Для этого на оси абсцисс откладывают результаты отсчетов по шкале вольтметра, а на оси ординат — вычисленные значения величины e . Соединяя нанесенные таким образом точки непрерывной кривой, получают градуировочную кривую вольтметра. Если построенный график окажется прямолинейным, то находят цену деления шкалы вольтметра, которая будет величиной, постоянной только в этом случае.

При сдаче результатов настоящей работы студенты обязаны знать конструкцию использованных измерительных приборов, а также методы изменения диапазона применений этих приборов путем включения шунтов к амперметрам и дополнительных сопротивлений к вольтметрам.

Технические данные установки. В работе используется миллиамперметр марки ЛМ на 500 ма, вольтметр марки ЛМ на 3 в, магазин сопротивлений Р-14.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.
2. Курс физики, под редакцией Н. Д. П а п а л е к с и, т. II, Гостехиздат, 1948.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

3. Е. А. С в и р с к и й, Общий курс электрических и магнитных измерений, Оборонгиз, 1939.
4. Курс электрических измерений, под редакцией В. Т. П р ы т к о в а и А. В. Т а л и ц к о г о, Госэнергоиздат, 1960.
5. Г. П. Ш к у р и н, Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам, Военгиз, 1956.

ЗАДАЧА 69

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ МОСТА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Целью задачи является ознакомление с классическим методом измерения сопротивления при помощи мостовой схемы.

Описание приборов. Мостовая схема постоянного тока, часто называемая сокращенно мостом Уитстона, представленная на рис. 1,

составлена из сопротивлений R , X , r_1 и r_2 , соединенных между собой проводами. В одну из диагоналей этой схемы включается источник электродвижущей силы. В другую диагональ схемы включается чувствительный гальванометр. Эта диагональ схемы и называется *мостом* в собственном смысле. Весь процесс измерений при помощи этой схемы связан с требованием равенства нулю силы тока в мосте, отсюда и распространение названия *м о с т* на всю схему. Мост в собственном смысле не обязательно состоит только из двух проводов и гальванометра, включенных в диагональ схемы. В некоторых случаях мост составляет и более сложную систему, в которую кроме гальванометра включены еще и сопротивления (см., например, описание задачи 73, в которой применяется так называемый *д в о й н о й м о с т*).

При произвольном соотношении сопротивлений, составляющих всю мостовую схему, через гальванометр, разумеется, должен идти ток. Но, как это можно показать простым расчетом (см. литературу в конце описания задачи), существует о д н о определенное соотношение между

сопротивлениями, составляющими схему, при котором сила тока, идущего через гальванометр, обращается в нуль, хотя при этом во всех других звеньях схемы сила тока не равна нулю. Указанное соотношение между сопротивлениями, составляющими так называемые *плечи моста*, имеет вид

$$\frac{X}{R} = \frac{r_1}{r_2}, \quad \text{откуда} \quad X = R \frac{r_1}{r_2}. \quad (1)$$

Это соотношение может служить для отыскания любого из четырех сопротивлений, включенных в плечи моста, если известны три других сопротивления. Поэтому сущность процесса измерений на мостовой схеме заключается в экспериментальном определении величин X , R , r_1 и r_2 , удовлетворяющих этому соотношению.

Мостовая схема применяется следующим образом. В одно из плеч моста включается известное сопротивление R (например, магазин сопротивлений). В другое плечо включается измеряемое сопротивление X . Наконец, третье и четвертое плечи мостовой схемы составляют два сопротивления r_1 и r_2 . Соответственно тому, что в окончательную расчетную формулу для X входят не абсолютные величины этих сопротивлений, а только их отношение, они обычно осуществляются в виде металлического проводника (*р е о х о р д а*), натянутого вдоль миллиметровой шкалы. Соединение гальванометра с реохордом осуществляется с помощью контактного движка, скользящего вдоль реохорда. Таким образом, сопротив-

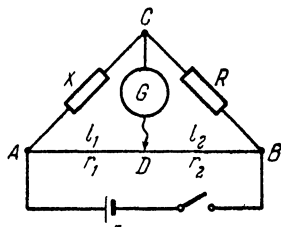


Рис. 1.

лениями r_1 и r_2 служат отрезки проводника, расположенные по разные стороны от движка D , такая система скользящего конца мостика позволяет легко изменять величины сопротивлений r_1 и r_2 , пропорциональные отрезкам l_1 и l_2 (рис. 1), а следовательно, и их отношение, входящее в выражение для расчета X .

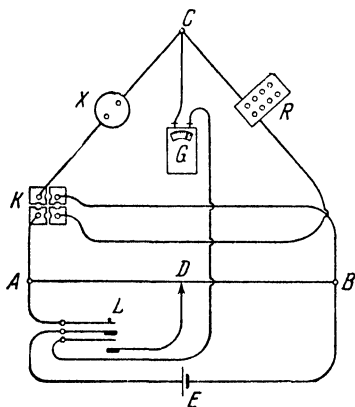


Рис. 2.

уравновешенном мосте, можно, зная величину R , найти неизвестное сопротивление X .

Практическая измерительная схема представлена на рис. 2. Эта схема полностью сохраняет принципиальное устройство схемы, изображенной на рис. 1, но она усложнена некоторыми деталями. Прежде всего в эту схему введен коммутатор K , допускающий обмен местами сопротивлений, включенных в плечи моста, без переключения для этого соединительных проводов схемы. Коммутатор (рис. 3) представляет собой разрезанную на четыре части металлическую пластинку с клеммами для включения проводов по углам пластинки. Различные комбинации соединения проводов, необходимые для переключения сопротивлений в плечах моста, достигаются путем перестановки металлических штырьков в прорезях между четырьмя частями металлической пластинки.

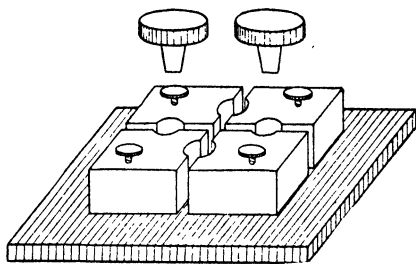


Рис. 3.

Целесообразность коммутирования сопротивлений при измерениях связана с тем, что проводник реохорда никогда не бывает вполне однородным по всей длине, а потому и отношение сопротивлений r_1 и r_2 не является точно равным отношению длин отрезков l_1 и l_2 . При окончательном расчете неизвестного сопротивления

используется среднее арифметическое каждой из величин l_1 и l_2 , найденных при двух положениях коммутатора.

Второе отличие практической мостовой схемы от принципиальной заключается в том, что в ней применяется двойной ключ (рис. 4 и L на рис. 2), которым можно замыкать и размыкать не только цепь источника тока, но и цепь включенного в мост гальванометра. Двойной ключ состоит из эбонитовой пластинки, на которой укреплена латунная пластинка a с клеммой и эбонитовая стойка h . В эту стойку вделаны одна над другой три изолированные друг от друга латунные плоские пружинные пластинки b , c и d , снабженные клеммами. Пластинки a и b , так же как c и d , при нажатии на верхнюю пластинку ключа замыкаются между собой, тогда как пластинки b и c разделены друг от друга эбонитовой прокладкой e , которая передает давление на пластинки, лежащие ниже. Сущность действия ключа заключается в том, что при нажиме на него сначала замыкаются

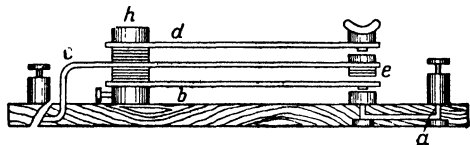


Рис. 4.

пластинки c и d и, разумеется, соединенные с их клеммами провода, а затем замыкаются пластинки a и b и соединенные с последними провода. При прекращении нажима на ключ размыкание пластинок происходит в обратном порядке.

Целесообразность такого устройства ключа связана с тем, чтобы цепь гальванометра, включенного к нижним пластинкам, замыкалась после замыкания цепи источника тока, а размыкалась, наоборот, раньше цепи источника тока. Таким образом, цепь гальванометра бывает замкнутой только при установившемся режиме работы схемы. Дело в том, что в моменты замыканий и размыканий цепи источника электродвижущей силы в схеме возникают электродвижущие силы самоиндукции. Текущие под действием этих электродвижущих сил экстратока могут быть значительны и портят гальванометр.

Наконец, непосредственно мостовая часть схемы осложнена тем, что гальванометр шунтирован переменным сопротивлением. Этот переменный шунт сделан для того, чтобы начинать уравнивание моста при малом токе через гальванометр с тем, чтобы предохранить его подвижную систему от сильных толчков. По мере улучшения равновесия моста сопротивление переменного шунта можно увеличивать. Окончательное уравнивание моста производится при разомкнутом шунте.

В схеме используется стрелочный гальванометр магнитоэлектрической системы чувствительностью порядка 10^{-6} а/дел шкалы, у которого нулевое деление находится посредине шкалы и стрелка может отклоняться в обе стороны (рис. 5). Под стрелкой гальванометра

расположена (ниже шкалы) зеркальная полоска. Для правильного положения глаза наблюдателя относительно шкалы и стрелки необходимо, чтобы стрелка закрывала для наблюдателя свое изображение в зеркале. Тогда луч зрения наблюдателя, проходящий через стрелку, нормален к плоскости шкалы.

При более точных измерениях на мостовых схемах применяются зеркальные гальванометры, и сопротивления r_1 и r_2 выполняются не в виде плеч реохорда, а в виде магазинов сопротивлений, допускающих хотя и скачкообразные, но очень небольшие изменения сопротивления при уравнивании схемы.

Измерения. После сборки схемы устанавливают шунт гальванометра на наименьшее сопротивление и включают в магазине сопротивление в несколько десятков омов. Движок мостика ставят на середину шкалы и замыкают на короткое время цепь источника тока и гальванометра¹⁾. При этом стрелка гальванометра отклоняется от нулевого положения.

Постепенно изменяя величину сопротивления в магазине, добиваются предельного уменьшения отклонений гальванометра при неподвижном движке. Когда изменение сопротивления в магазине на 1—2 ом перестает уменьшать отклонения гальванометра, добиваются уменьшения этих отклонений перемещениями движка. Если найдено положение движка, при котором шунтированный гальванометр перестает давать отклонения при замыкании ключа, то начинают постепенно увеличивать сопротивление шунта гальванометра. При этом передвигают движок всякий раз так, чтобы отклонения гальванометра становились незаметными при нажатии на ключ.

Измерения заканчиваются при полностью выключенном шунте.

После окончания первого измерения изменяют положение штырьков в коммутаторе так, чтобы сопротивления R и X обменялись местами в плечах моста, и снова производят измерения в вышеуказанном порядке.

После этого изменяют сопротивление в магазине примерно на $\pm 10\%$ и проделывают весь цикл измерений сначала.

Среднее значение, найденное в результате всех измерений, и является окончательным результатом работы с одним сопротив-

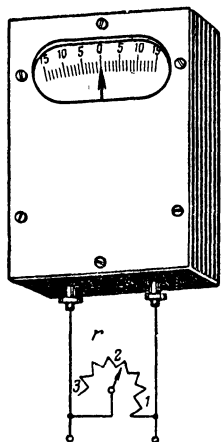


Рис. 5.

¹⁾ Держать длительное время под током даже уравновешенную схему нельзя, так как нагревание всех частей схемы током вызывает изменение их сопротивления.

лением. Отчет о работе включает отсчеты на реохорде, величины сопротивлений в магазине, результаты расчета X из отдельных измерений, среднее значение X и величину погрешностей измерений.

При выполнении задачи необходимо провести измерения д в у х неизвестных сопротивлений порознь, измерения сопротивления тех же двух сопротивлений, включенных последовательно, и, наконец, сопротивления тех же двух сопротивлений, соединенных между собой параллельно. Последние два результата измерений надо сопоставить с величинами сопротивлений, рассчитанными по формулам для последовательного и параллельного соединения сопротивлений, пользуясь значениями сопротивлений, найденными при их раздельном измерении.

На простом мосте Уитстона возможно вести измерения с точностью до десятых долей ома. Недостатком схемы является то, что неконтролируемое сопротивление соединительных проводов прибавляется к величине измеряемого сопротивления и к величине сопротивления магазина. Этот недостаток существенно исправляется в схеме двойного моста (см. задачу 73), а принципиально он исключается при компенсационном методе измерения сопротивлений (см. задачу 74).

Вопрос о чувствительности мостовой схемы при разных режимах ее работы достаточно сложен, и обсуждение его выходит за рамки первоначального знакомства с работой схемы. Подробно вопрос о чувствительности мостовой схемы разобран в книге М. М. Попова, указанной в списке специальной литературы к настоящей задаче.

Технические данные установки. В задаче используется стрелочный гальванометр чувствительностью 10^{-6} а/дел, магазин сопротивлений Р-14.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.
2. Курс физики, под редакцией Н. Д. П а п а л е к с и, т. II, Гостехиздат, 1948.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

3. А. Е. С в и р с к и й, Общий курс электрических и магнитных измерений, Оборонгиз, М., 1939.
4. М. М. П о п о в, Термометрия и калориметрия, Изд. МГУ, 1954.
5. Курс электрических измерений, под редакцией В. Т. П р ы т к о в а и А. В. Т а л и ц к о г о, Госэнергоиздат, 1960.
6. Г. П. Ш к у р и н, Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам, Воениздат, 1956.

ЗАДАЧА 70

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ
ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Электрическое сопротивление проводников зависит от температуры. У металлов оно возрастает при нагревании, у электролитов оно возрастает при охлаждении. Простейшим образом зависимость сопротивления металлов от температуры можно выразить соотношением

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2),$$

где R_0 и R_t — значения сопротивления соответственно при 0°C и при температуре t , α и β — индивидуальные константы металла, определяемые из опыта, t — температура.

Для определения α и β надо сделать измерение сопротивления при трех значениях температуры. Приблизительно можно считать зависимость сопротивления от температуры линейной:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t). \quad (1)$$

В таком случае для определения α надо произвести измерение сопротивления при двух значениях температуры.

Изучение зависимости сопротивления металла от температуры и определение величины α составляют содержание настоящей задачи.

Изучение зависимости сопротивления металлов от температуры имеет для экспериментальной физики и техники важное значение. Дело в том, что сейчас большинство точных измерений температуры производится при помощи так называемых *термометров сопротивления*. Последние представляют собой проволочные (обычно платиновые) сопротивления, температурная зависимость которых тщательно проградуирована в специальных термостатах. После подобной градуировки измерение сопротивления такого термометра позволяет определять температуру того объема, в котором находится термометр. Этот способ измерения температуры оказывается гораздо точнее и удобнее, чем применение ртутных или других жидкостных термометров. Диапазон применения термометра сопротивления несравненно шире диапазона применения ртутных термометров. Так, платиновый термометр сопротивления можно применять в интервале от -263 и до $+1000^\circ \text{C}$ ¹⁾. Получение точности в несколько сотых градуса при измерении температуры термометром сопротивления не представляет затруднения. При особенно благоприятных условиях опыта с помощью такого термометра можно регистрировать разность температур в несколько десятитысячных градуса.

¹⁾ До примерно 1700°C температуры измеряются термопарами. Более высокие температуры измеряются оптическими методами.

Описание прибора. Электрическая часть установки представляет собой мостовую схему. Принцип работы этого моста описан в задаче 69. Термостат для нагревания исследуемого сопротивления представляет собой водяную ванну (рис. 1), в которую погружены U-образная стеклянная трубка CD , электрический нагреватель E и мешалка M . В нижнюю часть U-образной трубки вложена спираль KL изучаемой платиновой проволоки. Концы этой спирали выведены через стекло в вертикальные колена трубки и соединены с электродами P и Q , к которым присоединяются провода, идущие к мосту. Спираль включается в мост к клеммам, предназначенным для измерения сопротивления.

Ток в нагревателе можно регулировать так, чтобы поддерживать температуру термостата на желаемом уровне. Охлаждение термостата осуществляется змеевиком из металлической трубки, погруженным в термостат. Через трубку змеевика пропускается в случае надобности вода из водопровода. На опыте, разумеется, измеряется не температурный коэффициент сопротивления, но значения сопротивления, из которых потом находят величину α .

Измерения и их обработка. Первый отсчет производят при комнатной температуре. Температуру отсчитывают по термометру T при постоянной работе мешалки M . Вслед за отсчетом температуры измеряют при помощи мостовой схемы сопротивление исследуемой проволоки.

В настоящей задаче для измерения сопротивления применяется мост Уитстона, собранный по схеме так называемого у н и в е р с а л ь н о г о м о с т а, допускающего измерения как на постоянном, так и на переменном токе. Заводское описание этого простого прибора выдается каждому выполняющему задачу студенту.

Измерений при комнатной температуре делают несколько и из них находят среднее значение сопротивления R_{t_1} . Затем повышают температуру термостата приблизительно на 20°C ; уменьшив ток в нагревателе, поддерживают температуру постоянной и производят то же число отсчетов по термометру и мосту. Пусть среднее значение сопротивления в этом случае будет R_{t_2} .

Продолжая нагревание, производят аналогичные измерения через равные интервалы температуры вплоть до температуры $90\text{--}95^\circ\text{C}$. Пусть полученные средние значения сопротивления будут $R_{t_1}, R_{t_2}, R_{t_3}, \dots$. Затем выключают нагреватель термостата и производят те же измерения в обратном порядке (при охлаждении). Полученные средние сопротивления обозначим через $R'_{t_1}, R'_{t_2}, R'_{t_3}, \dots$

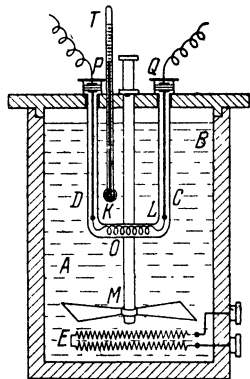


Рис. 1.

Окончив измерения, находят средние значения сопротивлений при каждой данной температуре, используя для этого результаты измерений, произведенных при восходящем и при нисходящем ходах температуры в термостате.

Результаты измерений изображают графически. Строят график зависимости сопротивления от температуры и составляют таблицу значений коэффициента α , вычисленного из нескольких значений R_t .

Искомое значение температурного коэффициента сопротивления определяется как производная от R по температуре, отнесенная к значению R при исходной (в нашем случае при комнатной) температуре опыта

$$\alpha = \frac{\Delta R}{\Delta t R_{\text{комн}}} \quad 1)$$

Технические данные установки. В работе используется водяной термостат марки МС-15 и реохордный мост типа РМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.
2. Курс физики, под редакцией Н. Д. П а п а л е к с и, т. II, Гостехиздат, 1948.
3. Курс электрических измерений, под редакцией В. Г. П р ы т к о в а и А. В. Т а л и ц к о г о, Госэнергоиздат, 1960.

З А Д А Ч А 71

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Электропроводность электролитов растет при повышении температуры. Это происходит вследствие возрастания степени диссоциации в электролитах при повышении температуры и уменьшения коэффициента вязкости жидкости при нагревании. Степень диссоциации электролита определяет число диссоциированных молекул, т. е. число ионов в электролите, которые являются в нем носителями зарядов. Электропроводность электролитов зависит не только от числа ионов в 1 см^3 , но и от их подвижности, а последняя обратно пропорциональна вязкости, убывающей при повышении температуры. Таким образом, влияние этих обоих факторов приводит к увеличению электропроводности электролитов при повышении температуры.

Целью настоящей работы является изучение температурной зависимости сопротивления электролитов. Зависимость сопротивле-

¹⁾ Если график зависимости R от t нелинеен, то вычисляют α для разных его участков.

ния электролитов от температуры можно представить следующей приближенной формулой:

$$R_t = R_0(1 - \alpha t),$$

где R_t и R_0 — сопротивления при температурах t_2 и t_1 ; коэффициент α носит название *температурного коэффициента* сопротивления. Написанное линейное соотношение неточно передает зависимость сопротивления электролитов от температуры, и найденная из него для разных значений температуры величина α не оказывается величиной вполне постоянной, что указывает на ограниченную применимость написанного выражения. Однако в узких интервалах температуры можно применять и линейное соотношение между R_t и R_0 .

Измерения сопротивления электролитов делают обыкновенно при помощи так называемого *универсального моста*, в который вместо источника постоянной электродвижущей силы можно включать индуктор, питающий мост переменным током. Применение переменного тока при измерении сопротивления электролитов необходимо потому, что под действием постоянного тока происходит поляризация электродов продуктами электролиза и измеренное сопротивление не соответствует истинному значению сопротивления объемного слоя электролита. Кроме помех в измерении, связанных с поляризацией электродов, существенно и то, что при прохождении постоянного тока постепенно изменяется состав электролита вследствие электролиза.

Работа с мостом, питаемым переменным током, осложняется тем, что в этом случае надо, вообще говоря, учитывать не только активные сопротивления элементов схемы, но и их индуктивные и емкостные сопротивления. Сам сосуд с электролитом и с введенными в него электродами представляет собой конденсатор. Когда мост уравновешен, то определенное из измерений значение сопротивления сосуда с электролитом не дает, строго говоря, величины активного сопротивления электролита и расчет электропроводности или удельного сопротивления осложняется. Возможное наличие в схеме некомпенсированной разности фаз между напряжениями в разных ветвях схемы приводит к нерезкому минимуму тока в цепи гальванометра. Компенсация емкостных эффектов возможна путем включения емкости параллельно другой ветви мостика.

Описание прибора. Универсальный мост Уитстона отличается от простого моста, питаемого постоянным током, тем, что он позволяет производить измерения при помощи как постоянного тока, так и переменного. При измерении на переменном токе в цепь источника электродвижущей силы включается небольшой индуктор, так называемый зуммер с механическим прерывателем, который производит периодические замыкания и размыкания цепи обмотки индуктора. При использовании переменного тока в цепь гальванометра вводятся купроксные выпрямители, так как без них гальванометр магнитоэлектрической системы при переменном токе показаний давать не сможет.

Для ознакомления студентов с работой варианта моста Уитстона, работающего как на переменном, так и на постоянном токе, используется подробное заводское описание этого прибора, которое выдается каждому выполняющему работу студенту.

Сосуд для испытуемого электролита представляет собой U-образную стеклянную трубку, в которую вводятся неокисляющиеся металлические электроды (рис. 1).

Сосуд с электролитом помещается в термостат. Термостат с водой нагревается электрическим нагревателем и охлаждается змеевиком с проточной водопроводной водой. В термостате имеется мешалка, приводимая во вращение электромотором, и термометр для измерения температуры воды в термостате.

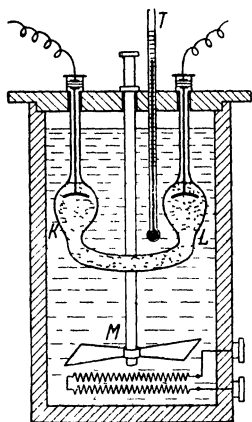


Рис. 1.

Измерения и их обработка. Измеряют несколько раз сопротивление электролита при комнатной температуре, после чего повышают по этапам приблизительно на 20° каждый раз температуру термостата. При каждом значении установившейся в течение 10 минут постоянной температуры производят трехкратные измерения сопротивления электролита. Таким образом достигают температуры около 100°C . Затем по этапам охлаждают термостат и вновь производят измерение сопротивления электролита.

Результаты измерений сопротивления R электролита в зависимости от температуры представляют в виде графика, строя R как функцию температуры t . Величину α находят из выражения

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_{\text{комн}} \Delta t}$$

(см. примечание на стр. 42).

Удельная электропроводность электролита может быть найдена, если известны размеры столба исследуемой жидкости; эти размеры указываются непосредственно на приборе.

Технические данные установки. В работе используется термостат марки ТС-15 и реохордный мост типа РМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.
2. Курс физики, под редакцией Н. Д. П а п а л е к с и, т. II, Гостехиздат, 1948.
3. Курс электрических измерений, под редакцией В. Г. П р ы г к о в а и А. В. Т а л и ц к о г о, Госэнергоиздат, 1960.

ЗАДАЧА 72

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГАЛЬВАНОМЕТРА
И ВНУТРЕННЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Для измерения сопротивления гальванометра и внутреннего сопротивления гальванического элемента пользуются методом мостика на постоянном токе (см. задачу 69) с некоторыми изменениями в расположении его отдельных частей.

Упражнение 1

Измерение сопротивления гальванометра

Описание прибора. Расположение отдельных приборов дано на рис. 1: ток от элемента E проходит через реостат LM с подвижным контактом m ; к точкам L и m присоединены концы одной диагонали $ALmB$ мостика, а в другой диагонали CD находится пружинный ключ K_1 . Гальванометр, сопротивление которого X измеряется, включен в одну из ветвей мостика; сопротивления R , r_1 и r_2 служат тремя остальными ветвями мостика. Меняя положение контакта m на реостате LM , мы тем самым изменяем разность потенциалов ($v_1 - v_2$) от нуля, когда контакт m совпадает с L , до некоторого максимума, когда контакт m совпадает с M ; вследствие этого изменяется величина силы тока, поступающего в схему, а следовательно, и величина силы тока, протекающего через гальванометр. Регулировка тока необходима, так как при работе схемы, в отличие от обычного мостика, гальванометр находится под током. Сила этого тока не должна превышать допустимой величины для данного гальванометра.

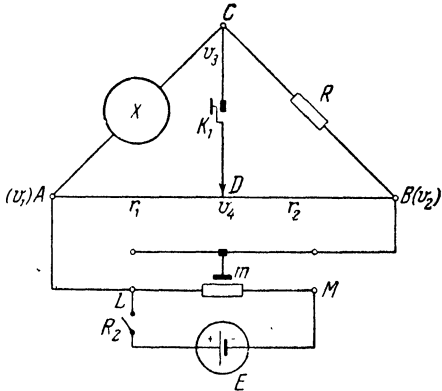


Рис. 1.

Этот способ включения источника тока, питающего схему, параллельно реостату применен для деления напряжения батареи E . В измерительных схемах со слабыми токами этот прием распространен как удобный метод регулировки подаваемых в схему напряжений. Его применение можно проследить на примере целого ряда электроизмерительных задач, описанных в этой книге.

Если потенциалы v_3 и v_4 равны, то сила тока в диагонали CD равна нулю, а потому замыкание и размыкание ключа K_1 не будут

вызывать изменения силы тока в ветвях мостовой схемы, в том числе и в ветви гальванометра X . Другими словами, при равенстве v_3 и v_4 замыкание ключа K_1 не будет вызывать изменения в показаниях гальванометра. При равенстве же потенциалов v_3 и v_4 для мостика на постоянном токе имеет силу формула (см. задачу 69)

$$X = R \frac{r_1}{r_2}, \quad (1)$$

из которой непосредственно определяется измеряемое сопротивление X гальванометра, если R и отношение r_1/r_2 известны.

Таким образом, мостовая схема может быть использована для измерений сопротивления не только в том случае, когда гальванометр включен в диагональ мостовой схемы, но и тогда, когда он включен в одно из плеч этой схемы. В этом случае надо при измерениях добиться постоянства показаний гальванометра при замыкании ключа в диагонали схемы. Такой прием существен именно для измерения сопротивления гальванометра, так как он не требует включения второго прибора в диагональ схемы для использования схемы в обычном порядке; измерения возможны только с одним изучаемым гальванометром.

Измерения. Соединяют приборы по схеме рис. 1 и включают в магазине R приблизительно половину его максимального сопротивления. Движок m делителя напряжения ставят близко к точке L , а движок D — на середину реохорда.

Замыкают ключ K_2 и передвигают контакт m до тех пор, пока стрелка гальванометра не отклонится приблизительно на половину шкалы.

Замыкая ключ K_1 , замечают, в каком направлении изменяется отклонение гальванометра, и в зависимости от этого направления увеличивают или уменьшают включенное в магазине сопротивление R . Постепенно подыскивают такое сопротивление R , чтобы при замыкании ключа K_1 величина отклонения гальванометра совершенно не менялась.

Если сопротивления в магазине R могут изменяться лишь слишком крупными для этой цели скачками, то окончательную установку на постоянство отклонений гальванометра производят, передвигая в ту или другую сторону подвижный контакт D .

В последнем случае имеем

$$\frac{X}{R} = \frac{l_1}{l_2},$$

где l_1 и l_2 — длины плеч реохорда. Если изучаемый гальванометр имеет вращающуюся рамку с двумя обмотками, то необходимо определить сопротивление X' и X'' каждой катушки.

Упражнение 2

Измерение внутреннего сопротивления элемента

Описание прибора. Измерительная схема для измерения внутреннего сопротивления гальванического элемента (рис. 2) представляет собой мостовую схему на постоянном токе (см. задачу 69), но распределение токов в ветвях схемы и принцип использования этой схемы отличаются от обычного использования схемы моста на постоянном токе.

В процессе измерений необходимо добиться того, чтобы замыкание ключа K в диагонали мостовой схемы не вызывало изменений силы тока в гальванометре G . Если это достигнуто, то вступает в силу известная пропорция, связывающая четыре сопротивления в ветвях мостовой схемы, в одну из которых теперь включен гальванический элемент с неизвестным внутренним сопротивлением. Ниже приводится подробный расчет работы схемы. Изображенный на схеме (рис. 2) реостат r_3 играет роль переменного шунта гальванометра.

Рассмотрим схему на рис. 2. Мы видим, что гальванометр G включен в ответвление mM диагонали $AmMB$; в диагонали CD

стоит ключ K и в ветви AC — гальванический элемент E , сопротивление x которого измеряется. Буквами x, R, r_1, \dots, r_4 обозначены сопротивления, а буквами I, i, i_1, \dots, i_4 — токи при замкнутых ключах K и K_1 . Стрелки обозначают направления токов.

Первый закон Кирхгофа при замкнутых ключах K и K_1 для точек C, A, B дает

$$I = i + i_4, \quad I = i_1 + i_3, \quad i_3 = i + i_2.$$

Второй закон Кирхгофа при тех же условиях для контуров $ACBMLA$ и $ADBMLA$ дает

$$E = Ix + iR + i_3r_3, \quad 0 = i_2r_2 + i_3r_3 - i_1r_1.$$

Из этих выражений следует:

$$\begin{aligned} I(x + R) + i_3r_3 - i_4R &= E, \\ I(r_1 + r_2) - i_3(r_1 + r_2 + r_3) - i_4r_2 &= 0. \end{aligned}$$

Предположим, что размыкание ключа K не изменяет тока i_3 , а следовательно, и тока, текущего через гальванометр. Разомкнем

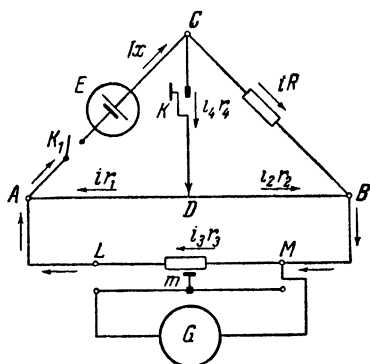


Рис. 2.

ключ K , тогда должно быть $i_3 = \text{const}$, $i_4 = 0$ и $E = \text{const}$, но I , вообще говоря, примет значение I' ; получим

$$I(x + R) + i_3 r_3 - i_4 R = I'(x + R) + i_3 r_3,$$

$$I(r_1 + r_2) - i_3(r_1 + r_2 + r_3) - i_4 r_2 = I'(r_1 + r_2) - i_3(r_1 + r_2 + r_3),$$

или

$$(I - I')(x + R) = i_4 R, \quad (I - I')(r_1 + r_2) = i_4 r_2.$$

Отсюда

$$\frac{x + R}{r_1 + r_2} = \frac{R}{r_2} \quad \text{или} \quad \frac{x}{R} = \frac{r_1}{r_2}. \quad (2)$$

Итак, если размыкание и замыкание ключа K в одной диагонали CD не влияет на ток i_3 в другой, то существует соотношение (2).

Если сопротивление R заведомо велико, то почти весь ток i_3 обуславливается током, идущим по пути CDB , ибо потенциал точки D выше потенциала точки B , а сопротивление CDB меньше сопротивления CB (сопротивление проводов не принимают в расчет). В этом случае размыкание ключа K , очевидно, вызовет уменьшение величины отклонения гальванометра G . Если, наоборот, сопротивление R равно нулю, то потенциалы точек D и B можно принять почти равными, и так как сопротивление пути CDA значительно меньше сопротивления пути $CBMLA$ (сопротивление реостата LM для предохранения гальванометра берется около 200—300 ом), то размыкание ключа K в этом случае вызовет очевидное увеличение тока, идущего через гальванометр. Беря различные значения R то больше, то меньше и постепенно делая между ними разницу все меньше и меньше, мы, наконец, подыщем такое R , при котором размыкание ключа K не вызывает изменения величины отклонения гальванометра. В этом случае мы вправе применить формулу (2).

Очевидно, что этот метод измерения внутреннего сопротивления элемента применим только в том случае, если оно не малó по сравнению с сопротивлением подводящих проводов в плечах моста. Поэтому этим методом нельзя измерять внутреннее сопротивление аккумуляторов, которое в нормальных условиях достигает значения лишь в несколько сотых долей ома.

Измерения. Соединяют при разомкнутых ключах K и K_1 все приборы по схеме.

Передвижной контакт m на реостате LM передвигают к точке M , чтобы при случайном замыкании ключей не испортить гальванометра. В мостике AB подвижной контакт D ставят на среднее деление.

Замыкают ключи K и K_1 и, отодвигая контакт m от точки M , добиваются того, чтобы стрелка гальванометра отклонилась приблизительно на половину шкалы.

Включая в магазин сопротивление R , заведомо большее сопротивления элемента, и размыкая ключ K при замкнутом K_1 , замечают, в каком направлении и на сколько изменяется величина отклонения гальванометра.

Снова замыкают ключ K . Контакт m в реостате LM передвигают к M . Сопротивление R делают равным нулю. Передвижением контакта m добиваются приблизительно прежнего отклонения гальванометра. Вторично размыкают ключ K и наблюдают, в каком теперь направлении и на сколько изменяется величина отклонения гальванометра.

Постепенно сближая пределы, т. е. беря сопротивления, промежуточные между 0 и наибольшим R , добиваются того, чтобы при замыкании и размыкании ключа величина отклонения гальванометра не изменялась. Если с помощью магазина сопротивлений R этого добиться не удастся, то для более точной регулировки прибегают к помощи ползушки D , небольшим перемещением которой добиваются в конце концов постоянства величины отклонения гальванометра.

Так как сопротивления r_1 и r_2 пропорциональны длинам плеч моста l_1 и l_2 , то сопротивление x вычисляется по формуле

$$x = R \frac{l_1}{l_2}$$

(см. литературу к задаче 69).

Технические данные установки. Упражнения задачи могут быть поставлены со стрелочным гальванометром с чувствительностью порядка 10^{-6} а на одно деление шкалы и сопротивлением порядка нескольких десятков ом; используются реостаты сопротивлением 300 ом, магазины сопротивлений типа Р-14, аккумулятор, разборные элементы типа Лекланше или Грене для измерений внутреннего сопротивления источника э. д. с.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Е. А. С в и р с к и й, Общий курс электрических и магнитных измерений, Оборонгиз, 1939.
2. Курс электрических измерений, под редакцией В. Т. П р ы т к о в а и А. В. Т а л и ц к о г о, Госэнергоиздат, 1960.
3. Г. П. Ш к у р и н, Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам, Воениздат, 1956.

ЗАДАЧА 73

ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ДВОЙНОГО МОСТА

Описание прибора. Если при помощи моста на постоянном токе измерять небольшие сопротивления, которые приближаются по величине к сопротивлениям подводящих проводников и контактов, то результат измерений, вычисленный по общей формуле моста (формула (1) задача 69), оказывается ошибочным, и ошибка будет тем больше, чем меньше измеряемое сопротивление по сравнению с сопротивлением подводящих проводов,

Для измерения малых сопротивлений широко распространение получила схема, изображенная на рис. 1. Буквой X на схеме обозначено измеряемое малое сопротивление. Отличие ее от обычной схемы моста заключается в том, что один конец моста с гальванометром G присоединен к добавочной цепи $NabP$, в которой вставлены два значительных в сравнении с R и X сопротивления a и b . Сопротивления A и B также велики по сравнению с R и X . В такой схеме влияние сопротивлений соединительных проводников и зажимов практически исключается.

Действительно, благодаря наличию значительных сопротивлений в проводниках $MAaN$ и $PbBQ$ сила тока, ответвляемого в эти две цепи, мала по сравнению с силой тока в R и X . Поэтому падение напряжения на соединительных проводниках на всех участках мостика, т. е. на участках ML , LQ , NF и FP , мало по сравнению с падением напряжения как на сопротивлениях A , B , a , b , так и на R и X ; следовательно, сопротивления соединительных проводников должны быть малы лишь в сравнении с a , b и A , B , но не X и R .

Сопротивление R представляет собой хорошо калиброванную проволоку, натянутую вдоль миллиметровой

шкалы; длину используемого ее отрезка между точками M и N можно изменять с помощью подвижных контактов; сопротивление всей проволоки должно быть заранее точно известно. Неизвестные измеряемые сопротивления X представляют собой металлические стержни, которые вставляются в особые неподвижные зажимы, провода же от сопротивлений b и B подводятся к сопротивлению X при посредстве двух подвижных зажимов («ножей»).

Изменением сопротивлений A , B , a , b и R можно добиться того, что ток в цепи гальванометра будет равен нулю, при этом токи в ветвях A и B , a и b , R и X будут, очевидно, попарно равны; обозначим их I , i , I_0 .

По закону Кирхгофа имеем

$$RI_0 + ai = AI \quad \text{и} \quad XI_0 + bi = BI.$$

Отсюда

$$\frac{R}{X} = \frac{A}{B} \frac{I - \frac{a}{A} i}{I - \frac{b}{B} i}. \quad (1)$$

Если подобрать сопротивления a , A , b и B так, чтобы

$$\frac{a}{A} = \frac{b}{B},$$

то уравнение (1) значительно упростится, и мы будем иметь

$$\frac{R}{X} = \frac{A}{B} \text{ или } X = \frac{B}{A} R.$$

Измерения. Соединяют приборы согласно схеме и, поместив неизвестное измеряемое сопротивление X в зажимы между P и Q , вводят одинаковые сопротивления в ветвях A и a , а также в ветвях B и b . Одновременно изменяя A и a , можно при измерениях установить следующие отношения:

$$\frac{B}{A} = \frac{b}{a} = \frac{10}{10} \text{ или } \frac{10}{100}, \text{ или } \frac{10}{1000}.$$

Для каждого из этих отношений подыскивают такие положения подвижных контактов на R , чтобы стрелка гальванометра совершенно не отклонялась. Всякий раз записывают длину отрезка калиброванной проволоки, заключенную между контактами.

При измерениях, так же как при работе с обычным мостиком, цепь тока следует замыкать лишь на короткие промежутки времени.

Вычисления. Если сопротивление 1 см калиброванной проволоки обозначить через ω , а длину ее, заключенную между подвижными контактами, — через l , то окончательные вычисления нужно производить по формуле

$$X = \frac{B}{A} R = \frac{B}{A} l \omega.$$

Определение удельного сопротивления. При помощи линейки измеряют длину исследуемого стержня, а при помощи штангенциркуля в нескольких местах измеряют его диаметр. Для величины диаметра берут среднее из всех отдельных измерений.

Удельное сопротивление ρ вычисляют по формуле

$$X = \rho \frac{L}{\pi r^2},$$

где X — измеренное выше сопротивление проволоки, L — ее длина, а r — радиус.

Технические данные установки. В задаче используется двойной мост заводского изготовления, стрелочный гальванометр чувствительностью 10^{-6} а на одно деление шкалы.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.
2. Курс физики, под редакцией Н. Д. П а п а л е к с и, т. II, Гостехиздат, 1948.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

3. Е. А. С в и р с к и й, Общий курс электрических и магнитных измерений, Оборонгиз, 1939.
4. Курс электрических измерений, под редакцией В. Т. П р ы т к о в а и А. В. Т а л и ц к о г о, Госэнергоиздат, 1960.
5. Г. П. Ш к у р и н, Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам, Военгиз, 1956.

ЗАДАЧА 74

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОМПЕНСАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель настоящей задачи заключается в изучении *компенсационных методов* измерения электродвижущих сил, токов и сопротивлений и в применении этих методов к некоторым конкретным случаям.

Метод компенсации является в настоящее время одним из основных приемов точных лабораторных электрических измерений.

Упражнение 1

Измерение электродвижущей силы методом компенсации

Сущность метода можно понять, анализируя принципиальную схему измерений, изображенную на рис. 1. В этой схеме два элемента с электродвижущими силами E и e и внутренними сопротивлениями ρ и ρ_1 присоединены к некоторому сопротивлению $R = R_1 + R_2$, где R_1 и R_2 соответственно сопротивления участков цепи AB и BC . Обратим внимание на то, что источники электродвижущих сил в схеме соединены друг с другом одноименными полюсами.

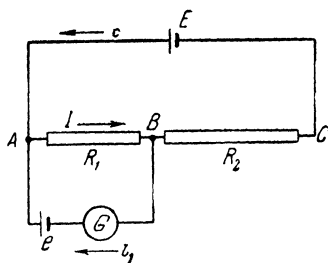


Рис. 1.

Обозначим через r сопротивление подводящих проводов от элемента E и через r_1 сопротивление подводящих проводов от элемента e . Буквами I , i и i_1 , с соответствующими индексами, как это показано на схеме рис. 1, обозначим токи, идущие в отдельных участках схемы.

Рассмотрим условия, при которых сила тока i_1 в цепи элемента e и гальванометра G будет равна нулю. Для этого напишем уравнения первого и второго законов Кирхгофа. Для разветвления токов в точке A имеем

$$I = i + i_1.$$

Для контуров $EABCE$ и $eABe$ можем написать

$$IR_1 + i(R_2 + \rho + r) = E, \quad IR_1 + i_1(\rho_1 + r_1) = e.$$

Решая совместно написанные уравнения при условии, что сила тока в цепи элемента e равна нулю ($i_1 = 0$), находим, что это будет иметь место, когда

$$e = IR_1 = \frac{ER_1}{\rho + r + R_1 + R_2} = \frac{ER_1}{\rho + r + R}. \quad (1)$$

Полученное условие означает, что сила тока в цепи элемента e равна нулю в том случае, когда падение напряжения на участке цепи AB , параллельно которому присоединен элемент e , равно электродвижущей силе этого элемента. В таких случаях также принято говорить о взаимной компенсации падения напряжения на участке цепи AeB и включенной в этот участок электродвижущей силы e . От слова компенсация и получил свое название метод измерений, называемый *компенсационным*. Сущность его будет разъясняться ниже.

Если вместо элемента e ввести в схему другой элемент e_1 и вновь добиться отсутствия тока в цепи гальванометра и этого элемента (сохраняя неизменным значение общего сопротивления контура $EABCE$), то тогда сопротивление участка цепи AB' будет равно некоторому значению R_1' . Теперь будет иметь силу равенство

$$e_1 = \frac{ER_1'}{\rho + r + R}. \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2) легко находим

$$\frac{e_1}{e} = \frac{R_1'}{R_1}.$$

Если электродвижущая сила элемента e известна, например, если это нормальный элемент (см. [2]), имеющий электродвижущую силу e_N , то, зная R_1 и R_1' , мы можем из последнего равенства определить электродвижущую силу элемента e . Таким образом, сравнение электродвижущих сил двух элементов может быть практически сведено к сравнению двух сопротивлений, использованных при компенсационных измерениях.

Метод компенсации для измерений электродвижущих сил обладает рядом существенных достоинств. Во-первых, сила тока через элементы, электродвижущие силы которых сравниваются между собой, близка к нулю. Поэтому падения напряжения внутри элемента, снижающего значение измеренной на полюсах элемента разности потенциалов, практически нет. В этом методе ток через элемент при использовании чувствительного зеркального гальванометра может быть уменьшен до значения 10^{-9} — 10^{-10} а. Соответственно не играет также роли и падение напряжения в проводах, соединяющих элемент с измерительной схемой. Во-вторых, при компенсационном методе измерений гальванометр работает как нулевой прибор и градуировка его шкалы в результате измерений не входит. Сопротивления, входящие в окончательное выражение, могут быть в настоящее время измерены с точностью до сотых долей процента. Наконец, величина электродвижущей силы вспомогательной батареи E также не входит в окончательный результат. Необходимо лишь, чтобы значение ее электродвижущей силы во время измерений было постоянным, кроме того, электродвижущая сила должна

превышать электродвижущие силы сравниваемых элементов. Такую роль может с успехом выполнять батарея аккумуляторов.

Практически описанный метод в простейшем варианте реализуется так, как это показано на рис. 2. В изображенной схеме E — батарея аккумуляторов, R_1 и R_2 — два штепсельных магазина сопротивлений Р-14 по 11111 ом каждый, R — курбельный магазин сопротивлений на 9999,9 ом, e_N — нормальный элемент Вестона с известной электродвижущей силой (она указана в паспорте элемента, находящемся при установке), G — гальванометр, служащий индикатором отсутствия тока через элемент e в момент компенсации

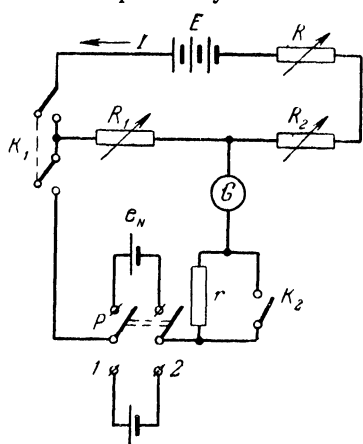


Рис. 2.

его э. д. с., K_1 — двойной ключ, замыкающий сначала цепь вспомогательной батареи E , а затем цепь гальванометра и исследуемого (или нормального) элемента ¹⁾, r — постоянное вспомогательное сопротивление, служащее для уменьшения тока в цепи гальванометра при предварительной, грубой компенсации, K_2 — однополюсный ключ, служащий для замыкания накоротко этого сопротивления при точной компенсации, P — двухполюсный перекидной рубильник, позволяющий включать в схему поочередно нормальный или исследуемый элемент.

Если путем изменения сопротивлений R_1 и R_2 , включенных в схему, достигнута компенсация, т. е. сила

тока через исследуемый элемент и через гальванометр равна нулю, то согласно изложенному выше имеет место равенство $e = IR_1$. Следовательно, для определения электродвижущей силы исследуемого элемента нужно знать величину рабочего тока I , идущего через сопротивление R_1 , и величину самого сопротивления R_1 , при котором наступает компенсация. Если установить ток равным 0,001 а, то значение искомой электродвижущей силы запишется в виде $e = 0,001 R_1$ в. Для получения определенного значения рабочего тока 0,001 а служит нормальный элемент e_N и переменное сопротивление R . Указанный способ осуществления компенсационного метода может показаться отличным от описанного выше принципа подобных измерений. Однако, как будет видно дальше, практически он сводится к тому же самому.

Подготовка к измерениям и измерения. Установление рабочего тока силой в 0,001 а производится в два этапа. Сначала, зная по

¹⁾ Пунктирная линия вблизи ключа K_1 означает, что обе его части механически соединены друг с другом для срабатывания в указанной последовательности.

паспорту электродвижущую силу нормального элемента, устанавливают по расчету такое сопротивление R_1 (в магазине, включенном параллельно нормальному элементу), чтобы e_N/R_1 было равно $0,001 a$.

Полное сопротивление каждого магазина Р-14 (см. стр. 30) составляет 11111 ом . Сопротивления по 4, 3 и 2 тыс. ом в обоих магазинах вообще в задаче не используются, и штырьки в их гнездах остаются все время вставленными. Перед началом работы необходимо только проверить, насколько плотно они вставлены. Это указание относится также и ко всем другим штырькам неработающих сопротивлений. Следовательно, в каждом магазине привлекаются к работе сопротивления только из числа 2111 ом , имеющиеся в каждом магазине сверх 9000 ом , но и эти сопротивления включаются не полностью (см. ниже).

Итак, после того, как установлено нужное значение сопротивления R_1 , включают во втором магазине сопротивления все те катушки, которые остались невключенными в первом магазине. Таким образом, сумма сопротивлений R_1 и R_2 , включенных в обоих магазинах, составляет вместе 2111 ом . Эта сумма сопротивлений $R_1 + R_2$ должна оставаться в дальнейшем все время постоянной.

После этого переходят к фактическому установлению в схеме нужного рабочего тока от аккумулятора батареи. Это делается с помощью курбельного магазина R (рис. 2). (Мы не останавливаемся здесь на описании способа работы с этим магазином, так как он вполне очевиден: нужные сопротивления включают посредством вращений ручек курбелей, устанавливаемых против соответствующих стрелок.)

Для установления рабочего тока, учитывая сопротивление 2111 ом , включенное в двух штепсельных магазинах, и ориентировочное значение электродвижущей силы батареи (из расчета $1,3 e$ на одну банку щелочного аккумулятора), устанавливают в курбельном магазине такое сопротивление R , чтобы приблизительно имело место равенство

$$\frac{E}{R + 2111} = 0,001a.$$

После этого, установив перекидной рубильник в такое положение, чтобы к схеме был присоединен нормальный элемент, размыкают ключ K_2 и замыкают на короткое время двойной ключ K_1 , наблюдая за показаниями гальванометра. Стрелка гальванометра даст какое-то отклонение. Тогда, изменяя сопротивление, включенное в курбельном магазине, и нажимая на короткое время на двойной ключ, добиваются отсутствия тока через гальванометр. Когда отклонения стрелки гальванометра перестанут быть заметными, то замыкают накоротко ключом K_2 предохранительное сопротивление

гальванометра и вновь добиваются отсутствия тока через гальванометр в условиях возросшей чувствительности измерительной схемы.

Когда поставленное требование отсутствия тока в цепи гальванометра и нормального элемента выполнено, то это значит, что в цепи штепсельных магазинов действительно установлен рабочий ток силой в $0,001 \text{ а}$.

После этого размыкают ключ K_2 и с помощью перекидного рубильника P присоединяют к схеме элемент с неизвестным значением электродвижущей силы.

Теперь при нажиме на двойной ключ K_1 можно будет опять наблюдать отклонения стрелки гальванометра, так как электродвижущая сила включенного исследуемого элемента не будет скомпенсирована. Изменяя значения сопротивлений R_1 и R_2 в обоих штепсельных магазинах, но так чтобы их сумма оставалась всегда постоянной и равной 2111 ом , снова добиваются компенсации, т. е. отсутствия тока в цепи гальванометра ¹⁾. Это делают сначала при разомкнутом ключе K_2 , а затем окончательно при замкнутом ключе K_2 . Разумеется, что при всех этих операциях значение сопротивления R , включенного в курбельном магазине, остается все время постоянным.

Когда компенсация будет достигнута, значение электродвижущей силы исследуемого элемента может быть найдено из условия

$$e = 0,001 R_1,$$

где R_1 — включенное в цепь сопротивление магазина, параллельного исследуемому элементу. В самом деле, в процессе компенсации сумма значений всех сопротивлений $R_1 + R_2 + R$ в цепи вспомогательной батареи оставалась неизменной, следовательно, рабочий ток сохранил свое значение, установленное с помощью нормального элемента.

Измерения электродвижущей силы исследуемого элемента производят два раза, меняя между собой ролями штепсельные магазины, при неизменной общей измерительной схеме. Закончив измерения, находят погрешность конечного результата.

Надо отметить, что в настоящей задаче демонстрируется общий принцип компенсационных измерений и только поэтому используются три отдельных

¹⁾ Для соблюдения обязательного условия сохранения постоянства суммы двух сопротивлений R_1 и R_2 надо придерживаться следующего правила работы: каждый штырек, вынимаемый при компенсации измеряемого напряжения из рабочего гнезда одного магазина, немедленно вставляется в гнездо, отмеченное той же цифрой второго магазина. Это гнездо во втором магазине будет обязательно свободным в силу принятого первоначального способа включения сопротивлений в обоих магазинах. Таким образом будет автоматически сохраняться требуемое постоянство суммы $R_1 + R_2$ (см. стр. 30).

магазина сопротивлений. Практически в лабораторных работах применяются комбинированные магазины сопротивлений, смонтированные вместе со всеми ключами, а нередко и с гальванометром. Такие установки носят название потенциометров. В потенциометрах обычно имеется отдельный магазин, соответствующий нашему курбельному магазину R , для установления рабочего тока. В качестве двух штепсельных магазинов используются также курбельные магазины. Вращающиеся ручки этих магазинов так соединены между собой, что условие постоянства суммы $R_1 + R_2$ (при изменениях R_1) автоматически выполняется: всякое сопротивление, введенное в одном магазине, одновременно автоматически выключается в другом магазине.

Компенсационный метод измерения электродвижущих сил используется, в частности, для измерения электродвижущих сил термоэлементов, применяемых для измерения температуры. Метод компенсации позволяет достигать точности до 0,03% от измеряемой величины.

Упражнение 2

Измерение силы тока компенсационным методом

Принцип осуществляемых в настоящем упражнении измерений легко понять на основании всего изложенного выше и рис. 3. Пусть надо измерить силу тока в контуре батареи E_1 . В таком случае в этот контур, кроме необходимых для работы приборов (в нашем случае это батарея аккумуляторов E_1 , переменное сопротивление R , балластное сопротивление R_x , градуируемый миллиамперметр mA), включено еще специально для измерительных целей *эталонное* (или, иначе, *нормальное*) сопротивление R_N ¹⁾. Величина этого сопротивления заранее надежно измерена. Если мы будем знать величину падения напряжения V_N на нормальном сопротивлении, то из соотношений $V_N = IR_N$ можно найти искомую величину силы тока в контуре батареи E_1 . Следовательно, задача сводится к измерению величины V_N .

Но способ измерения V_N нам уже известен из предшествующего упражнения. Именно, присоединяя к клеммам 1 и 2 (рис. 2) перекидного рубильника вместо исследуемого элемента провода от клемм 1 и 2 эталонного сопротивления (рис. 3), мы можем измерить величину V_N так же, как измеряли раньше электродвижущую силу.

Надо только, разумеется, правильно задать полярность аккумуляторной батареи в том новом контуре, в котором измеряется сила тока. В противном случае компенсация падения напряжения на

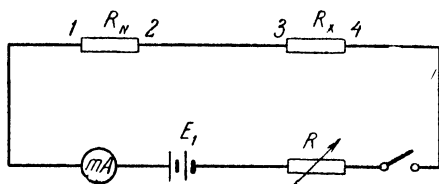


Рис. 3.

¹⁾ О роли миллиамперметра сказано ниже.

эталонном сопротивлении окажется невозможной. Компенсацию необходимо сначала вести при разомкнутом ключе K_2 в схеме рис. 2, а затем при замкнутом ключе.

В данном упражнении компенсационные измерения силы тока используются для градуировки некоторого миллиамперметра. Поэтому в той цепи, в которой измеряется сила тока, кроме постоянного балластного сопротивления R_X имеется еще переменное сопротивление R и миллиамперметр. Переменное сопротивление позволяет устанавливать последовательно по этапам различные значения силы тока, текущего через миллиамперметр, постепенно проходя всю его шкалу. Каждое установленное значение силы тока измеряется компенсационным методом.

По результатам работы следует построить калибровочный график миллиамперметра, выражающий зависимость показаний этого прибора от силы протекающего через него тока. На основании этого графика надо найти среднее значение цены деления шкалы прибора, выраженное в миллиамперах.

Упражнение 3

Измерение сопротивления компенсационным методом

Компенсационный метод измерения сопротивлений является дальнейшим развитием описанного выше метода измерения силы тока.

Пусть мы хотим найти значение балластного сопротивления R_X в нашей схеме рис. 3. Так как это сопротивление включено последовательно с R_N , то через оба сопротивления идет ток одной и той же силы. Исходя из этого, легко написать, что $V_N = IR_N$ и $V_X = IR_X$, где V_N и V_X соответственно значения падений напряжения на эталонном и балластном сопротивлениях. Следовательно, если мы измерим тем же компенсационным методом величины V_N и V_X , то, зная R_N , мы можем найти

$$R_X = R_N \frac{V_X}{V_N}.$$

Для этого надо к клеммам перекидного рубильника 1 и 2 (рис. 2) присоединить поочередно провода от клемм балластного и эталонного сопротивлений (рис. 3) и обычным путем измерить с помощью компенсационной схемы величины V_X и V_N . Измерения надо сделать при нескольких значениях силы тока в цепи, варьируя в ней сопротивление R так же, как это делалось при градуировке миллиамперметра. Измерения надо начинать всегда при разомкнутом и заканчивать при замкнутом ключе K_2 (рис. 2). В конце работы надо оценить точность сделанных измерений сопротивления.

В заключение необходимо отметить особые преимущества компенсационного метода измерения сопротивлений перед другими

способами. При этом способе измерений на результате не сказывается сопротивление подводящих проводов. Существенно также и то, что значение силы тока, идущего через измеряемое и эталонное сопротивления, также никак не входит в конечный результат. Сила тока может иметь совершенно произвольное значение в пределах нагрузок, допустимых для сопротивлений данной конструкции. Кроме того, сила тока должна быть постоянна только в течение времени, достаточного для измерения величин V_N и V_X .

Как показывает ближайшее рассмотрение, компенсационный метод позволяет также полностью исключать влияние паразитных термоэлектродвижущих сил, легко возникающих во всех контактах цепи. Для этого требуется лишь добавление в схему специальных инверсионных переключателей у источников электродвижущих сил, включаемых в схему. В настоящей задаче мы ими не пользовались, чтобы не затруднять понимание принципиальной стороны.

Компенсационный метод является основным точным лабораторным приемом измерения сопротивлений и используется, в частности, для обслуживания таких важных приборов для измерения температуры, как термометры сопротивления. Метод позволяет при наилучших условиях измерений доводить их точность до сотых долей процента измеряемой величины.

Технические данные установки. В работе, помимо аккумуляторов, нормального элемента и сухой батареи (исследуемый элемент), используются гальванометр марки ЛМ с чувствительностью 0,5 ма на одно деление шкалы и магазины сопротивлений КМС-6 (курбельный) и Р-14 (штепсельный).

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. А. Штрауф, Электричество и магнетизм, Гостехиздат, 1950.
2. С. Г. Калашников, Электричество, гл. III, § 27, «Наука», 1964.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

3. М. М. Попов, Термометрия и калориметрия, Изд. МГУ, 1954.
4. Курс электрических измерений, под редакцией В. Т. Прыткова и А. В. Талцкого, Госэнергоиздат, 1960.
5. Г. П. Шкурин, Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам, Воениз, 1956.

ЗАДАЧА 75

ИЗУЧЕНИЕ ВАКУУМНОГО ДИОДА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Введение. Целью настоящей задачи является исследование вольт-амперных характеристик вакуумного диода и определение удельного заряда электрона на основании уравнения Богуславского — Лэнгмюра [1—4].

В вакуумной электронной лампе электрическое поле, действующее на каждый электрон, складывается из внешнего поля, создаваемого разностью потенциалов между электродами, и поля, создаваемого всеми остальными электронами, образующими пространственный заряд. Благодаря пространственному заряду при малых анодных напряжениях анодный ток может быть значительно меньше возможного тока эмиссии катода и постепенно увеличивается при повышении анодного напряжения.

Теоретическое рассмотрение вопроса о зависимости анодного тока от величины анодного напряжения в вакуумном диоде было проведено при следующих допущениях:

1) начальные скорости электронов, эмитируемых катодом, настолько малы, что можно считать их равными нулю. Так как энергии электронов, покидающих катод, не превышают нескольких десятых электронвольта, при анодных напряжениях в десятки вольт это допущение вполне оправдано;

2) анодный ток далек от насыщения;

3) пространственный заряд создает такое распределение потенциала между катодом и анодом, что непосредственно у поверхности катода напряженность электрического поля равна нулю.

При указанных предположениях расчет [2—4] показывает, что анодный ток i пропорционален анодному напряжению в степени три вторых:

$$i = KU^{3/2}, \quad (1)$$

где K — коэффициент, зависящий от формы и размеров электродов, заряда и массы электрона.

В случае коаксиальных цилиндрических электродов выражение (1), называемое *законом трех вторых* или *уравнением Богуславского — Лэнгмюра*, имеет вид

$$i = \frac{2\sqrt{2}}{9} \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{lU^{3/2}}{r\beta^2}, \quad (2)$$

где e/m — удельный заряд электрона, r — радиус анода, l — длина катода, β^2 — коэффициент, зависящий от отношения радиусов анода и катода (при отношении радиусов больше 10 близок к единице [2, 3]).

Так как в настоящей задаче по вольтамперным характеристикам диода определяется удельный заряд электрона, удобно строить график зависимости анодного тока от анодного напряжения в степени три вторых. Угловой коэффициент полученной прямой в случае коаксиальных цилиндрических электродов равен

$$K = \frac{2\sqrt{2}}{9} \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{l}{r\beta^2}. \quad (3)$$

Отсюда можно рассчитать удельный заряд электрона e/m

$$\frac{e}{m} = \left(\frac{9r\beta^2}{2\sqrt{2} l} i K \right)^2. \quad (4)$$

Чтобы получить значение удельного заряда электрона в системе единиц СГСЭ при расчете углового коэффициента прямой K , необходимо выразить ток и напряжение в этой же системе единиц.

Из факторов, приводящих к отклонениям от закона трех вторых, наиболее существенными являются следующие [2, 3]:

1) начальные скорости электронов, эмитируемых катодом. За счет этого изменяется характер распределения потенциала между электродами; в частности, напряженность электрического поля у поверхности катода не равняется нулю;

2) контактная разность потенциалов между катодом и анодом, так как в уравнении (1) или (2) под напряжением U подразумевается истинная величина разности потенциалов между электродами. Влияние контактной разности потенциалов наиболее заметно при малых анодных напряжениях;

3) неэквипотенциальность катода (в случае катодов прямого накала). В этом случае разность потенциалов между анодом и различными участками катода оказывается разной. Этот фактор также является существенным при малых анодных напряжениях;

4) асимметрия системы электродов (например, неконцентричность катода и анода);

5) наличие остатков газа в лампе. При достаточно высоких анодных напряжениях происходит ионизация газа. Положительные ионы нейтрализуют действие отрицательного пространственного заряда, и анодный ток возрастает значительно быстрее, чем следует из закона трех вторых.

Перечисленные выше факторы приводят к заметным отклонениям от закона трех вторых и погрешности при определении удельного заряда электрона по формуле (4). Существенно и то обстоятельство, что величина удельного заряда электрона входит в выражение закона трех вторых (2) под знаком квадратного корня. Поэтому при расчете удельного заряда электрона по формуле (4) погрешность соответственно увеличивается.

При снятии вольтамперных характеристик вакуумного диода при разных токах накала получается семейство характеристик, несколько различных даже при низких анодных напряжениях. Это связано с тем, что при изменении температуры катода контактная разность потенциалов между катодом и анодом и начальные скорости электронов изменяются.

В настоящей задаче используется лампа с подогревным оксидным катодом. Оксидный катод отличается той особенностью, что у него не наблюдается резко выраженного, как у катодов из чистых металлов, насыщения анодного тока (см. задачу 77). Это вызвано сильным влиянием внешнего электрического поля на величину тока эмиссии оксидного катода. Поэтому даже при значительных внешних полях при дальнейшем увеличении анодного напряжения анодный ток продолжает возрастать.

Описание установки. Схема установки для проведения измерений представлена на рис. 1. В задаче используется радиолампа типа 2Ц2С (диод). Анодное напряжение подается или через кенотронный выпрямитель или от сети постоянного тока. Величина напряжения регулируется потенциометром и измеряется вольтметром. Анодный ток лампы измеряется миллиамперметром.

Напряжение накала подается от понижающей обмотки трансформатора выпрямителя. Ток накала регулируется реостатом и измеряется амперметром.

Данные радиолампы типа 2Ц2С: длина катода $l = 0,9$ см, радиус анода $r = 0,95$ см, отношение радиусов анода и катода приблизительно равно 10, так что $\beta^2 = 0,98$; см. [2].

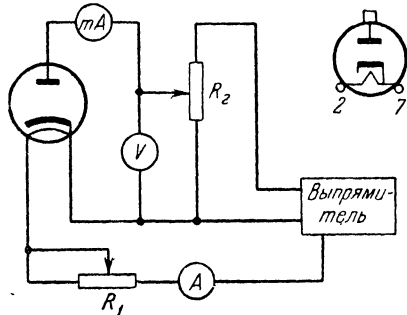


Рис. 1.

Измерения и их обработка.

1. Собрать схему для проведения измерений согласно рис. 1.

2. Изучить зависимость анодного тока от анодного напряжения, изменяя его от 0 до 200 в при токах накала 1,4; 1,5; 1,6; 1,75 а, и построить соответствующие графики.

3. Построить график зависимости анодного тока от анодного напряжения в степени три

вторых. При построении этого графика рекомендуется использовать экспериментальные данные, относящиеся к меньшим температурам катода (но в области, где закон трех вторых еще выполняется).

4. Определить угловой коэффициент полученной прямой и рассчитать по нему величину удельного заряда электрона в системе единиц СГСЭ.

Технические данные установки. Радиолампа типа 2Ц2С, кенотронный выпрямитель на 200—250 в или сеть постоянного тока, вольтметр в анодной цепи на 150—300 в, миллиамперметр на 75 ма, реостат в цепи накала на 10 ом, амперметр накала на 2,5 а.

Отличие получаемых значений удельного заряда электрона от истинного может достигать 15—20%.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. Н. А. К а п ц о в, Электрические явления в газах и вакууме, Гостехиздат, 1950; Электроника, Гостехиздат, 1956.

3. Электроника, под ред. А. А. Ж и г а р е в а, Госэнергоиздат, 1951.

4. И. Е. Т а м м, Основы теории электричества, «Наука», 1966.

5. А. М. Б о н ч - Б р у е в и ч, Радиоэлектроника в экспериментальной физике, «Наука», 1966.

ЗАДАЧА 76

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА
МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ ОХЛАЖДЕНИЯ НИТИ

Целью настоящей задачи является определение работы выхода электрона из оксидного катода [1—3] методом компенсации охлаждения нити.

Метод компенсации охлаждения нити является одним из методов непосредственного определения работы выхода электрона. Этот метод [2] основан на том, что при электронной эмиссии каждый электрон, покидающий катод, уносит с собой энергию, равную работе выхода электрона φ . Если катод электронной лампы (рис. 1) нагреть до температуры, достаточной для термоэлектронной эмиссии, то в случае разомкнутой анодной цепи устанавливается равенство числа электронов, покидающих катод, и числа электронов, возвращающихся на катод, из области пространственного заряда. При замыкании анодной цепи возникает движение электронов от катода к аноду. Вследствие этого происходит понижение температуры катода, связанное с указанным выше переносом энергии каждым электроном. Это явление аналогично переносу энергии молекулами жидкости при испарении, в результате которого жидкость охлаждается.

При расчете переносимой электронами энергии следует также учесть, что электроны покидают катод при температуре T , а возвращаются к катоду по проводнику, имеющему температуру T_0 . За счет этого каждый электрон переносит в среднем энергию $2k(T - T_0)$, где k — постоянная Больцмана [2]. Это можно показать расчетом средней энергии электронов, способных покинуть катод [3].

При установлении в лампе анодного тока i потеря энергии катодом за одну секунду в результате переноса энергии электронами составляет

$$\frac{i}{e} [\varphi + 2k(T - T_0)], \quad (1)$$

где e — заряд электрона.

Происходящее при замыкании анодной цепи лампы понижение температуры катода можно скомпенсировать увеличением тока накала. В случае катода прямого накала с сопротивлением нити R при повышении тока накала i_n на величину Δi_n увеличение мощности накала нити-катода равно

$$(i_n + \Delta i_n)^2 R - i_n^2 R = 2Ri_n \Delta i_n + R(\Delta i_n)^2. \quad (2)$$

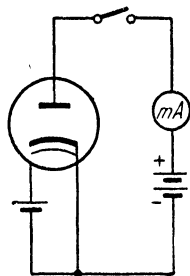


Рис. 1.

Если подобрать приращение тока накала Δi_n так, чтобы восстановить прежнее значение температуры нити-катода, будет выполняться соотношение

$$\frac{i}{e} [\varphi + 2k(T - T_0)] = 2Ri_n \Delta i_n + R(\Delta i_n)^2. \quad (3)$$

Потери энергии нитью-катодом в результате установления анодного тока в лампе значительно меньше потерь на излучение и потерь из-за теплопроводности держателей катода. Но эти основные потери энергии остаются постоянными, так как при компенсации восстанавливается первоначальное значение температуры нити.

В правой части формулы (3) второй член можно отбросить, так как в данном случае он значительно меньше первого. При этом получаем

$$\varphi = \frac{2eRi_n \Delta i_n}{i} - 2k(T - T_0). \quad (4)$$

Таким образом, для определения работы выхода электрона достаточно измерить приращение тока накала Δi_n , необходимое для компенсации охлаждения нити при установлении в лампе анодного тока i . Измерение тока накала i_n и сопротивления нити R не представляет трудностей. Температуру нити достаточно знать лишь приблизительно, так как второй член в формуле (4) в 10—20 раз меньше первого. Поэтому даже значительная ошибка в определении температуры T вызовет небольшую ошибку при расчете работы выхода. В то же время фиксирование восстановления первоначальной температуры при компенсации охлаждения нити должно быть точным. Удобно производить фиксирование равенства температур по величине электрического сопротивления нити. Наибольшую трудность представляет точное измерение приращения тока накала нити Δi_n , необходимого для компенсации ее охлаждения при установлении анодного тока. Поэтому в задаче применяется специальная методика измерений, описанная ниже.

Описание установки. Схема установки для проведения измерений представлена на рис. 2. Для измерения электрического сопротивления нити и фиксирования восстановления первоначальной температуры используется мост Уитстона на постоянном токе, в одно из плеч которого включена нить накала лампы R_2 . Чтобы на уравновешивании моста не сказывалось дополнительное падение напряжения на нити, вызванное протеканием по ней анодного тока, используется лампа, имеющая отвод от середины нити; к этому отводу присоединяется анодная цепь. Сопротивления плеч моста R_3 и R_4 в 100 раз больше сопротивлений R_2 и R_1 соответственно. Мост питается от кенотронного выпрямителя с электронной стабилизацией напряжения через большое сопротивление R_6 . Для точного измерения малых приращений тока накала служит цепь с реостатом R_5

и миллиамперметром, которая может включаться параллельно мосту. Так как $R_1 + R_2 \ll R_6$, а $R_5 \gg R_1 + R_2$, то при замыкании ключа в цепи сопротивления R_5 полное сопротивление нагрузки выпрямителя практически не изменяется, а потребляемый схемой ток остается прежним. Происходит лишь перераспределение тока между мостом и цепью сопротивления R_5 . Поскольку $R_3 + R_4 = 100 (R_1 + R_2)$, то в плечах моста R_3 и R_4 протекает лишь 1% полного тока. Поэтому можно считать, что уменьшение тока накала нити равно величине тока в цепи сопротивления R_5 . Таким образом, малые изменения тока накала нити можно точно определять измерительным прибором с соответствующим пределом измерений.

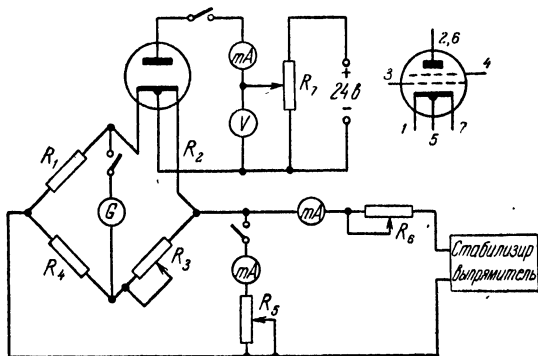


Рис. 2.

В задаче используется радиолампа типа 2П1П с оксидным катодом прямого накала, включенная диодом (управляющая и экранная сетка соединены с анодом). У полупроводникового оксидного катода, состоящего из смеси окислов бария, кальция и стронция, работа выхода, в отличие от катодов из чистых металлов, может изменяться в зависимости от соотношений компонент, технологии изготовления, срока службы и т. д. Широкое применение оксидных катодов связано с малой работой выхода, что позволяет получать большие токи эмиссии при низких температурах.

Источником анодного напряжения служит 24-вольтовая сеть постоянного тока или батарея аккумуляторов. Величина анодного напряжения изменяется потенциометром R_7 и измеряется вольтметром. Для измерения анодного тока служит миллиамперметр.

Отвод от нити накала делит ее обычно на несимметричные части, т. е. при протекании анодного тока на нити создается дополнительное падение напряжения, не связанное с изменением ее электрического сопротивления. Это дополнительное падение напряжения на нити приводит к ошибке в установлении равновесия моста. При изменении направления тока накала знак этой ошибки изменяется. Поэтому работу выхода электрона следует определять как среднее

значение результатов, полученных при разных направлениях тока накала. Изменение направления тока накала достигается простым переключением проводов, соединяющих концы с соответствующими клеммами моста Уитстона.

Перед включением кенотронного выпрямителя следует установить переключатель отношения плеч моста $R_1 : R_4$ в положение $1 : 100$, а сопротивление R_3 на значение 3000 ом ; сопротивление R_6 должно иметь максимальную величину. Выпрямитель включается при разомкнутом ключе в цепи сопротивления R_5 и замкнутой анодной цепи. После установления напряжения выпрямителя изменением сопротивления R_6 подбирается такой ток накала, чтобы при анодном напряжении $10\text{—}12 \text{ в}$ анодный ток лампы составил $1,5 \text{ ма}$. После этого изменением сопротивления R_3 производится уравнивание моста. Затем ключ в анодной цепи лампы размыкается. Ток в лампе прекращается. Температура нити и ее электрическое сопротивление повышаются, так как прекращается перенос энергии от катода электронами (теперь эмитируемые электроны возвращаются на катод). Изменение сопротивления нити вызывает отклонение нуль-гальванометра. Тогда замыкается ключ в цепи сопротивления R_5 , а величина его подбирается такой, чтобы мост вновь оказался уравновешенным. Таким образом, при измерениях осуществляется не компенсация охлаждения нити при установлении в лампе анодного тока, а компенсация нагрева ее при прекращении анодного тока; существо дела остается прежним. Такое изменение применено для того, чтобы вначале установить подходящую величину анодного тока лампы. Изменение тока накала нити при компенсации отсчитывается непосредственно по миллиамперметру в цепи сопротивления R_5 .

В формуле (4) все величины предполагаются выраженными в системе СГСЭ. Если выразить сопротивление и токи в практической системе единиц и разделить первый член формулы на величину заряда электрона, то сразу получается значение работы выхода в электроновольтах

$$\varphi = \frac{2Ri_n \Delta i_n}{i} - 2k(T - T_0). \quad (5)$$

При этом величину $2k(T - T_0)$ необходимо выразить в электроновольтах. Разность температур $T - T_0$ принять равной 600° К .

Измерения и их обработка. 1. Собрать схему согласно рис. 2.

2. Произвести измерения при величинах анодного тока $1,5; 0,5 \text{ ма}$, каждый раз по $2\text{—}3$ измерения.

3. Выключить кенотронный выпрямитель, переключить провода, соединяющие концы нити накала с соответствующими клеммами моста, и вновь повторить все измерения.

4. Рассчитать работу выхода электрона из оксидного катода как среднее значение результатов всех измерений. При этом число из-

мерений при обоих направлениях тока накала нити должно быть одинаковым.

5. Рассчитать абсолютную и относительную погрешности измерений работы выхода.

Технические данные установки. Радиолампу типа 2П1П следует отобрать из группы в 5—10 ламп по признаку наибольшей электрической симметрии двух половин нити накала, между которыми имеется отвод. Выбор лампы осуществляется измерением сопротивления нити накала в рабочей схеме (рис. 2) при анодном токе 1,5 *ма*. Если при двух направлениях тока накала результаты измерений отличаются незначительно (до 5%), лампу можно использовать в задаче. Ток накала лампы около 40 *ма*. Возможно использование и лампы без отвода от середины нити. В этом случае анодная цепь присоединяется к средней точке потенциометра, шунтирующего нить накала.

Мост постоянного тока типа МВЛ или УМВ. Нуль-гальванометр типа ГМП. Кенотронный выпрямитель на 200—250 *в* с электронной стабилизацией напряжения. Миллиамперметр для измерения тока накала на 50 *ма*. Вольтметр в анодной цепи на 15 *в*. Миллиамперметры в анодной цепи и в цепи сопротивления R_5 на 1,5 *ма*. Реостаты ползунковые на 5000 *ом* (R_5 и R_7). Сопротивление R_6 представляет собой последовательно включенное постоянное сопротивление 5000 *ом* и реостат на 2000 *ом*.

Разброс значений работы выхода, получаемых в задаче, составляет 5—10%.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. Н. А. К а п ц о в, Электрические явления в газах и вакууме, Гостехиздат, 1950; Электроника, Гостехиздат, М., 1956.
3. Электроника, под ред. А. А. Ж и г а р е в а, Госэнергоиздат, 1951.

ЗАДАЧА 77

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА

Введение. Целью настоящей задачи является исследование зависимости плотности тока при термоэлектронной эмиссии от температуры катода и определение работы выхода электрона из вольфрама методом прямых Ричардсона [1—5].

Как известно, при обычных температурах имеющиеся в металле свободные электроны удерживаются внутри металла. Это означает, что на границе металл — вакуум существует потенциальный барьер, мешающий электронам покидать металл. Наличие этого барьера объясняется тем, что при выходе электрона в вакуум на него действуют силы электрического притяжения со стороны металла, в котором благодаря выходу электрона произошло перераспределение свободных зарядов. Под действием этих сил электрон, если его энергия

недостаточна, возвращается в металл. Кроме того, электроны, временно вышедшие из металла в вакуум, создают электрическое поле, также препятствующее выходу электронов из металла [1].

Состояние свободных электронов в металле описывается квантовой статистикой Ферми — Дирака, согласно которой распределение электронов по энергиям имеет вид [2, 5]

$$dn_{\epsilon} = \frac{\gamma \epsilon^{1/3} d\epsilon}{\exp\left(\frac{\epsilon - W_i}{kT}\right) + 1}, \quad (1)$$

где dn_{ϵ} — число свободных электронов с энергиями от ϵ до $\epsilon + d\epsilon$ в единице объема металла, T — абсолютная температура, k — постоянная Больцмана, W_i — наибольшее значение энергии свободных электронов при абсолютном нуле, пропорциональное концентрации их в степени две трети, γ — некоторая постоянная величина.

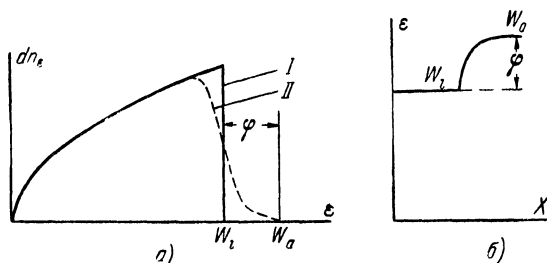


Рис. 1.

При имеющих место в металлах концентрациях свободных электронов распределение по энергиям согласно статистике Ферми — Дирака существенно отличается от распределения согласно классической статистике Максвелла — Больцмана (вырожденный электронный газ). На рис. 1 показано соответствующее формуле (1) распределение свободных электронов в металле по энергиям при абсолютном нуле (кривая I) и при температуре 2500° К (кривая II). При $T = 0$ не существует электронов с энергиями, большими W_i . В то же время W_i есть то значение энергии, которым при абсолютном нуле обладает наибольшее число электронов. Кривая II показывает, что при повышении температуры характер распределения электронов по энергиям изменяется незначительно. Существенным, однако, является то, что теперь имеется относительно незначительное число электронов, энергия которых больше W_i . За счет наиболее быстрых электронов и осуществляется термоэлектронная эмиссия.

Чтобы электрон мог покинуть металл, он должен обладать некоторой энергией W_a , характерной для каждого металла. Разность $W_a - W_i$, т. е. величина дополнительной энергии, которую необ-

ходимо сообщить наиболее быстрым электронам при абсолютном нуле, чтобы они могли покинуть металл (при соответствующем направлении их скорости), называется *работой выхода электрона*. Величина работы выхода ϕ определяет высоту потенциального барьера для электронов на границе металл — вакуум (рис. 1) и является характерной для каждого металла. Обычно работа выхода выражается в электронвольтах.

При повышении температуры увеличивается скорость хаотического движения электронов в металле. При этом число электронов, способных покинуть металл, резко возрастает. Расчет плотности тока при термоэлектронной эмиссии, в котором используется квантовая статистика Ферми — Дирака, приводит к выражению [1—2]

$$j = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right), \quad (2)$$

где A — величина постоянная.

Формула (2) называется *уравнением термоэлектронной эмиссии*. Благодаря экспоненциальному множителю плотность термоэлектронного тока чрезвычайно сильно зависит от работы выхода и температуры катода. Например, при повышении температуры вольфрама от 2000 до 2500° К плотность тока эмиссии возрастает почти в 200 раз.

Логарифмируя уравнение (2), получаем

$$\ln \frac{j}{T^2} = \text{const} - \frac{\phi}{kT}. \quad (3)$$

Такой вид уравнения термоэлектронной эмиссии наиболее удобен для экспериментальной проверки и определения работы выхода. Если построить график зависимости $\ln(j/T^2)$ от $1/T$, получается прямая линия, угловой коэффициент которой равен ϕ/k . Определив его, можно рассчитать работу выхода ϕ . Этот метод определения работы выхода называется методом прямых Ричардсона. (Совершенно иной метод определения работы выхода использован в задаче 76.)

В настоящей задаче изучается термоэлектронная эмиссия в вакуумной лампе с вольфрамовым катодом. Если накаливать катод лампы и постепенно увеличивать анодное напряжение, анодный ток будет увеличиваться, пока не достигнет насыщения (рис. 2). Увеличение анодного тока при малых анодных напряжениях связано с тем, что анод притягивает электроны из области пространственного заряда вблизи катода. В этих условиях анодный ток пропорционален анодному напряжению в степени три вторых (закон Богуславского — Лэнгмюра)

$$i = KU^{3/2}, \quad (4)$$

где K — коэффициент пропорциональности, зависящий от формы электродов лампы [1—5] (см. также задачу 75).

Насыщение анодного тока наступает тогда, когда все электроны, испускаемые катодом в единицу времени, попадают на анод. Поэтому при дальнейшем увеличении анодного напряжения анодный ток уже не может увеличиться. Таким образом, величина тока насыщения определяется термоэлектронной эмиссией катода. При увеличении тока накала, а следовательно, температуры T катода, ток насыщения возрастает (рис. 2).

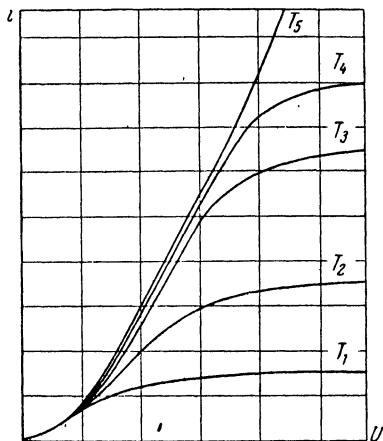


Рис. 2.

Для построения графика в соответствии с формулой (3) необходимо знать температуру катода. Расчет температуры может быть проведен путем рассмотрения теплового равновесия катода [5]. Подводимая к катоду мощность расходуется на тепловое излучение, так как в вакуумной лампе потери тепла через конвекцию отсутствуют. Некоторое количество тепла теряется из-за теплопроводности держателей катода, но при высоких температурах доля этих потерь обычно невелика. Для вольфрама были экспериментально проведены определения температуры

в зависимости от мощности нагрева, приходящейся на единицу площади поверхности катода, так как потери на излучение пропорциональны этой площади.

В таблице для упрощения расчетов указаны значения мощности нагрева P , деленной на произведение длины l катода на его диаметр d , т. е. величины, в π раз большие [4]. Интерполяцией этих данных можно рассчитать температуру катода при любой подводимой к нему мощности.

Таблица для расчета температуры вольфрамового катода [4]

$T, ^\circ\text{K}$	$\frac{P}{ld}, \text{ вт/см}^2$	$T, ^\circ\text{K}$	$\frac{P}{ld}, \text{ вт/см}^2$
1500	17,33	2300	148,2
1600	24,32	2400	181,2
1700	33,28	2500	219,3
1800	44,54	2600	263,0
1900	58,45	2700	312,7
2000	75,37	2800	368,9
2100	95,69	2900	432,4
2200	119,8	3000	503,5

При использовании в задаче лампы типа ГУ-4 не рекомендуется производить измерения при температурах катода ниже 2000°K , так как при этом доля потерь энергии из-за теплопроводности держателей катода становится значительной. Кроме того, неравномерность температуры катода, возникающая по той же причине, при низких температурах сказывается сильнее. Оба этих фактора приводят к тому, что эффективная температура катода оказывается заметно меньше величины, рассчитанной по таблице.

При более высоких температурах ошибка становится незначительной.

Описание установки. Схема для проведения измерений представлена на рис. 3. Радиолампа типа ГУ-4 с вольфрамовым катодом включена диодом (управляющая сетка соединена с анодом). Источником анодного напряжения является кенотронный выпрямитель. Анодное напряжение может изменяться при помощи потенциометра и измеряться вольтметром. При изучении зависимости плотности тока эмиссии от температуры анодное напряжение должно быть достаточным для получения тока насыщения. Анодный ток измеряется миллиамперметром с несколькими пределами измерений.

Нагрев катода осуществляется постоянным током от батареи аккумуляторов; сила тока регулируется реостатом. Амперметр и вольтметр в цепи накала служат для определения мощности, расходуемой на нагрев катода, что необходимо при расчете его температуры. Величину произведения ld длины катода на его диаметр для лампы ГУ-4 принять равной $0,05\text{ см}^2$.

Измерения и их обработка. 1. Собрать схему для проведения измерений согласно рис. 3.

2. Изучить зависимость анодного тока от анодного напряжения при токах накала 1,4; 1,5; 1,6; 1,7 а и построить соответствующие графики, иллюстрирующие получение тока насыщения при разных токах накала.

3. Получить данные о зависимости тока эмиссии от мощности, расходуемой на нагрев катода, при токах накала от 1,2 до 1,7 а. При этом ток накала следует изменять каждый раз так, чтобы ток эмиссии возрастал в 1,5—2 раза.

4. Рассчитать при помощи интерполяции данных, приведенных в таблице, значения температуры катода при разных токах накала и построить график зависимости плотности термоэлектронного тока от температуры катода. Так как ток эмиссии очень сильно изменяется при изменении температуры, этот график целесообразно представить

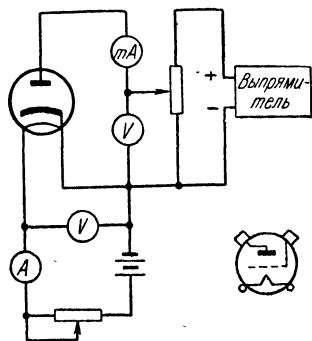


Рис. 3.

в виде двух участков кривой с разными масштабами по оси ординат (например, отличающимися в 10 раз).

5. Построить график зависимости $\ln(j/T^2)$ от $1/T$ и рассчитать по нему значение работы выхода электрона из вольфрама. При построении графика можно пользоваться и десятичными логарифмами, умножив затем угловой коэффициент прямой на 2,3.

Технические данные установки. Радиолампа типа ГУ-4, кенотронный выпрямитель на 200 в, миллиамперметр в анодной цепи с пределами измерений 7,5 ма и 75 ма, вольтметр в анодной цепи на 150—300 в.

Аккумулятор накала на 7,5 в, реостат накала на 10 ом, амперметр в накальной цепи на 3 а, вольтметр накала на 7,5 в должен иметь достаточно большое внутреннее сопротивление.

При снятии вольтамперных характеристик лампы анодная цепь должна быть присоединена к отрицательному концу нити накала.

Отличие получаемых значений работы выхода электрона от табличного не превышает 2—3%.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. Н. А. К а п ц о в, Электрические явления в газах и вакууме, Гостехиздат, 1950; Электроника, Гостехиздат, 1956.

3. В. Ф. В л а с о в, Электровакуумные приборы, Связьиздат, 1960.

4. К. Ш п а н г е н б е р г, Электронные лампы, ч. I, «Советское радио», 1953.

5. Электроника, под ред. А. А. Ж и г а р е в а, Госэнергоиздат, 1951.

ЗАДАЧА 78

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРОНОВ ПО СКОРОСТЯМ

Введение. Целью настоящей задачи является исследование распределения термоэлектронов по скоростям методом задерживающего потенциала [1—3].

Как известно, к свободным электронам в металле применима квантовая статистика Ферми — Дирака, согласно которой распределение электронов по скоростям имеет вид

$$dn = \frac{2m^3}{h^3} \frac{du dv dw}{\exp\left(\frac{\epsilon - W_i}{kT}\right) + 1}, \quad (1)$$

где dn — число свободных электронов в единице объема металла с компонентами скоростей в интервалах от u до $u + du$, от v до $v + dv$, от w до $w + dw$, ϵ — энергия электронов, m — масса электрона, h — постоянная Планка, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, W_i — наибольшее значение энергии электронов при абсолютном нуле, пропорциональное концентрации свободных электронов в степени две трети.

Распределение свободных электронов по скоростям в металле существенно отличается от распределения согласно классической статистике Максвелла — Больцмана. Но при термоэлектронной эмиссии за пределы металла выходят только наиболее быстрые электроны (см. задачу 77), и концентрация электронов, покинувших металл, в 10^{10} — 10^{12} раз меньше концентрации свободных электронов в металле. В этих условиях распределение по статистике Ферми — Дирака практически совпадает с распределением согласно классической статистике Максвелла — Больцмана [3]

$$dn = n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{\varepsilon}{kT} \right) du dv dw, \quad (2)$$

где n — концентрация электронов, вышедших из металла в вакуум.

Для изучения распределения термоэлектронов по скоростям в настоящей задаче используется метод задерживающего потенциала. Если на анод вакуумной лампы с накаливаемым катодом подавать отрицательные напряжения, препятствующие попаданию электронов на анод, то попадать на анод будут лишь те электроны, энергия которых больше работы сил электрического поля по их торможению. Измеряя анодный ток при изменении величины отрицательного анодного напряжения, можно непосредственно исследовать распределение термоэлектронов по энергиям или по скоростям. При расчете зависимости анодного тока от анодного напряжения необходимо учитывать геометрию системы электродов. Расчет для случая плоских параллельных электродов в предположении о распределении термоэлектронов по скоростям согласно классической статистике (2) приводит к выражению

$$i = i_0 \exp \left(-\frac{eU}{kT} \right), \quad (3)$$

где i_0 — сила тока при нулевой разности потенциалов между катодом и анодом, e — заряд электрона, U — величина отрицательного анодного напряжения.

Экспериментальную проверку формулы (3) удобно осуществить построением графика зависимости $\ln i$ от величины анодного напряжения. Этот график является прямой линией, угловой коэффициент которой равен $\frac{e}{kT}$:

$$\ln i = \text{const} - \frac{e}{kT} U. \quad (4)$$

Определив угловой коэффициент прямой, можно рассчитать температуру, соответствующую состоянию электронного газа. Опыт показывает, что при термоэлектронной эмиссии электронный газ находится в тепловом равновесии с катодом, так что тем самым определяется температура катода.

Выражения (3) и (4) справедливы в случае плоских параллельных электродов. В настоящей задаче используется радиолампа с коаксиальными цилиндрическими электродами, но с небольшой разницей радиусов анода и катода. При использовании такого диода погрешность за счет отличия системы электродов от плоскопараллельной является заметной лишь при малых величинах отрицательного анодного напряжения.

Так как анод и катод лампы сделаны из разных материалов, между ними имеется контактная разность потенциалов, изменяющаяся при изменении температуры катода. Контактная разность потенциалов алгебраически складывается с приложенным извне напряжением. Знак и величину ее можно определить непосредственно по графикам, построенным в соответствии с формулой (4). Зависимость (4) имеет место лишь при отрицательных разностях потенциалов между анодом и катодом (с учетом контактной разности потенциалов). При положительных разностях потенциалов возрастание тока замедляется, а в случае достижения тока насыщения — прекращается. На рис. 1 показаны примерные графики зависимости

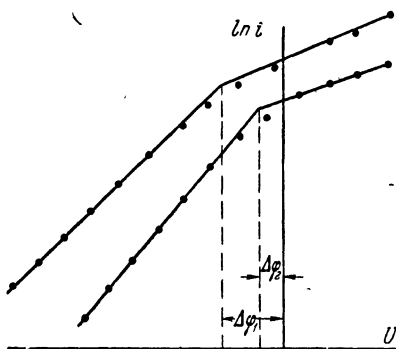


Рис. 1.

$\ln i$ от U , иллюстрирующие определение контактной разности потенциалов $\Delta\phi$ между анодом и катодом путем экстраполяции обеих частей графика прямыми линиями до пересечения.

После определения контактной разности потенциалов можно построить график зависимости анодного тока от величины отрицательного анодного напряжения. Такой график показывает, какое число электронов обладает энергиями, большими определенной величины, соответствующей задерживающему анодному напряжению (речь идет не о полной энергии электронов, а о энергии, связанной с движением от катода к аноду). От величины задерживающего напряжения легко перейти к соответствующей составляющей скорости электронов, воспользовавшись известным соотношением

$$\frac{mu^2}{2} = eU. \quad (5)$$

Описание установки. Схема установки для проведения измерений представлена на рис. 2. Используется радиолампа типа 6Х6С (двойной диод с подогревным оксидным катодом); в цепь включен один диод лампы. Цифры на схеме цоколевки лампы указывают, как обычно, номера ножек лампы, соединенных с соответствующими

ее электродами. Источником отрицательных анодных напряжений является аккумулятор. Величина напряжения регулируется потенциометром и измеряется вольтметром. Анодный ток лампы измеряется многопредельным микроамперметром μA , так как величина тока изменяется в широких пределах. Такой микроамперметр обладает заметным внутренним сопротивлением. Поэтому при расчете величины отрицательного напряжения на аноде лампы следует учитывать падение напряжения на микроамперметре, вычитая его из показаний вольтметра. Внутреннее сопротивление микроамперметра, различное при разных пределах измерения, указывается на приборе (в других случаях указывается падение напряжения на приборе при полном отклонении стрелки).

Источником тока накала является аккумулятор или понижающий трансформатор. Ток накала регулируется реостатом и измеряется амперметром.

Измерения и их обработка.

1. Собрать схему для проведения измерений согласно рис. 2.

2. Изучить зависимость анодного тока от анодного напряжения, изменяя его от $+0,5$ до $-0,5$ в при токах накала $0,20$; $0,22$; $0,24$; $0,26$ а; при измерениях учитывать падение напряжения на микроамперметре. Изменение полярности анодного напряжения осуществляется переключением проводов, соединяющих катод лампы и микроамперметр с вольтметром.

3. По полученным данным построить график зависимости $\ln i$ от U и определить по ним величину и знак контактной разности потенциалов между катодом и анодом при указанных выше токах накала. Рассчитать по графикам значения температуры катода.

4. Построить графики зависимости анодного тока от величины отрицательного анодного напряжения с учетом контактной разности потенциалов при указанных выше токах накала.

5. Построить графики зависимости относительного числа электронов, имеющих скорость (в направлении от катода к аноду) больше определенной величины.

Технические данные установки. Радиолампа типа 6Х6С, микроамперметр М193 или М95, вольтметр в анодной цепи на $0,5$ в, амперметр накала на $0,3$ а, реостат накала на 10 ом.

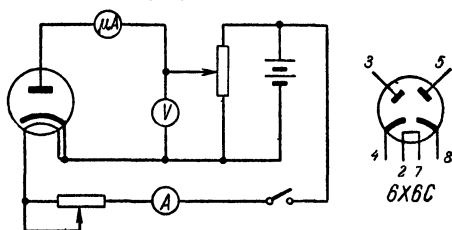


Рис. 2.

ЛИТЕРАТУРА

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. Н. А. Кацов, Электрические явления в газах и вакууме, Гостехиздат, 1950; Электроника, Гостехиздат, 1956.

3. Электроника, под ред. А. А. Жигарева, Госэнергоиздат, 1951.

ЗАДАЧА 79

ОЗНАКОМЛЕНИЕ С РАБОТОЙ ТРЕХЭЛЕКТРОДНОЙ ЛАМПЫ

Целью настоящей задачи является получение анодных и сеточных характеристик лампы и вычисление на основании полученных экспериментальных результатов важнейших параметров электронной лампы.

Описание устройства электронной лампы и принципа ее работы имеется во всех учебниках по общему курсу физики (см., например, [1], гл. XV), поэтому приводим здесь только описание используемой в работе лампы и установки.

В задаче исследуется трехэлектродная стеклянная усилительная лампа 6С5С с подогревным катодом (рис. 1). На этом рисунке *A* — анод лампы, *C* — сетка лампы, *K* — катод лампы, *H* — нить подогрева катода. С устройством всех деталей лампы студенты могут познакомиться в практикуме с помощью специального стенда,

на котором расположены детали демонтированных ламп многих конструкций. Цоколевка используемой в задаче лампы показана на рис. 2. В практикуме панель лампы вмонтирована в специальный миниатюрный столик, на котором каждое гнездо панели лампы соединено с винтовой клеммой для включения необходимых проводов.

Схема, используемая для снятия характеристик лампы, приведена на рис. 3.

Анодное напряжение подается на лампу с высокоомного реостата R_1 , включенного на выход выпрямителя в качестве делителя напряжения. Параллельно лампе включен вольтметр V_1 , рассчитанный на напряжение до 300 в. В схему для измерения анодного тока в лампе введен миллиамперметр mA .

Накал катода лампы питается переменным напряжением 6,3 в. Это напряжение от соответствующего понижающего трансформатора, находящегося внутри выпрямителя, подведено к клеммам,

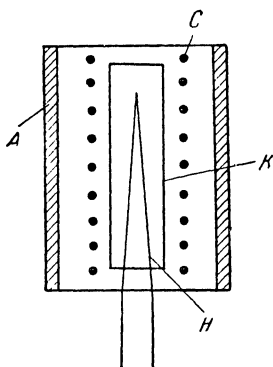


Рис. 1.

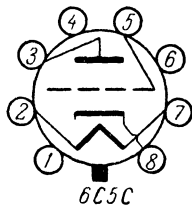


Рис. 2.

расположенным на его передней панели. Накал лампы в процессе работы не регулируется.

Напряжение на сетку лампы подается с делителя напряжения R_2 , включенного параллельно аккумуляторной сеточной батарее E . Сеточный ток в лампе столь незначителен, что не представляет

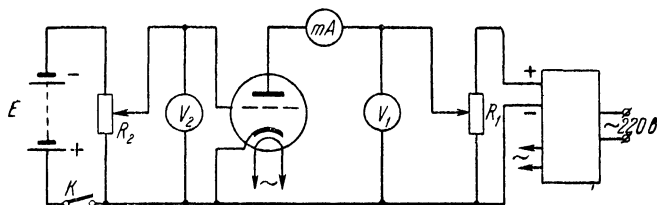


Рис. 3.

трудности обеспечивать питание цепи сетки батареями, что дает большую стабильность напряжения на сетке.

Вся схема собирается студентами при выключенном выпрямителе и разомкнутом ключе K сеточной батареи. Включение схемы разрешается только после проверки ее преподавателем или дежурным лаборантом.

Упражнение 1

Снятие анодных характеристик лампы

1. Устанавливают на сетке лампы отрицательное (относительно катода) напряжение -4 в. Движок реостата делителя анодного напряжения устанавливают в положение, соответствующее минимуму анодного напряжения.

Включают общим тумблером выпрямитель и понижающий трансформатор накала лампы. После включения выпрямитель и исследуемая лампа разогреваются в течение 2—3 минут.

2. Последовательно через каждые 10 в изменяют анодное напряжение на лампе от 0 до $+250$ в. Одновременно для каждого значения установленного анодного напряжения измеряют и записывают силу анодного тока в лампе. Таким образом снимается анодная характеристика при сеточном напряжении -4 в.

3. Устанавливая поочередно на сетке лампы напряжение от -8 до -1 в, через 2 в снимают анодные характеристики лампы для каждого указанного значения сеточного напряжения. Этим путем будет получено семейство анодных характеристик лампы.

По указанию преподавателя анодные характеристики могут быть сняты не для всех рекомендованных значений напряжения на сетке лампы.

Результаты измерений представляют в виде графиков, изображающих зависимость анодного тока в лампе от анодного напряжения

для каждого использованного в ходе измерений значения напряжения на сетке лампы. Рекомендуется строить график анодных характеристик непосредственно в процессе измерений, параллельно с записью показаний измерительных приборов.

Упражнение 2

Снятие сеточных характеристик лампы

Устанавливают на аноде лампы поочередно напряжения 100, 150, 200, 220 в.

Для каждого значения анодного напряжения снимают сеточную характеристику лампы. Это значит, что при фиксированных значениях указанных выше анодных напряжений изменяют значение сеточного напряжения от -1 до -8 в через каждые 0,5 в. Для каждого значения сеточного напряжения измеряют анодный ток. Результаты измерений представляют в виде графиков, выражающих зависимость силы анодного тока от напряжения на сетке лампы, для каждого значения анодного напряжения. Рекомендуется строить сеточные характеристики лампы непосредственно по ходу измерений. Во всяком случае, существенно их построить до выполнения третьего упражнения задачи.

Упражнение 3

Изучение влияния анодной нагрузки на сеточные характеристики лампы

Для того чтобы познакомиться с работой лампы в условиях рабочей схемы, в этом упражнении вновь снимаются сеточные характеристики лампы, но с включенным в анодной цепи лампы сопротивлением (нагрузкой). Ход характеристик в этом случае изменяется, так как анодное напряжение в этом случае непостоянно: оно составляет разность между напряжением, снимаемым с делителя, и величиной падения напряжения на нагрузке. При изменениях анодного тока изменяется и падение напряжения на анодной нагрузке, а следовательно, и значение напряжения на аноде лампы. Это обстоятельство вызывает изменения характеристик лампы.

В этом упражнении в анодную цепь лампы, включенной в ту же схему, что и в предшествующих упражнениях, дополнительно вводят поочередно несколько сопротивлений R_a , имеющих на установке. На лампу и нагрузку подается при всех нагрузках полное напряжение выпрямителя. В этих условиях снимают сеточные характеристики лампы при разных нагрузках.

В результате измерений получается новое семейство так называемых динамических сеточных характеристик.

Обработка результатов. Результаты работы представляют в виде графиков анодных и сеточных характеристик лампы. Кроме того,

по полученным характеристикам определяют основные параметры, характеризующие работу катодной лампы: статический коэффициент усиления лампы

$$\mu = - \frac{\Delta V_a}{\Delta V_c} \text{ при } I_a = \text{const}$$

(обратная ему величина $D = 1/\mu$ носит название *проницаемости лампы*), внутреннее сопротивление лампы

$$R_i = \frac{\Delta V_a}{\Delta I_a} \text{ при } V_c = \text{const}$$

и крутизну сеточной характеристики лампы

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta V_c} \text{ при } V_a = \text{const.}$$

Целью обработки результатов третьего упражнения является отыскание динамического коэффициента усиления лампы.

Физический смысл и способ определения этих параметров лампы могут быть разъяснены следующим образом:

1. Внутреннее сопротивление лампы

$$R_i = \left(\frac{\Delta V_a}{\Delta I_a} \right)_{V_c = \text{const}}$$

определяется как производная от анодного напряжения по анодному току, взятая при постоянном значении напряжения на сетке. Эту производную нельзя смешивать с отношением V_a/I_a .

По экспериментальным данным величина R_i может быть определена из наклона касательной к анодным характеристикам лампы, полученным при $V_c = \text{const}$. Можно поступить и иначе: построив сеточные характеристики лампы, проводят вертикаль $V_c = \text{const}$, пересекающую линейную часть двух смежных сеточных характеристик, снятых при разных значениях анодного напряжения. Тогда отрезок этой вертикали, заключенный между сеточными характеристиками, даст величину ΔI_a (при $V_c = \text{const}$). Отношение разности тех анодных напряжений, при которых были сняты использованные сеточные характеристики, к этой величине ΔI_a даст величину R_i , выражаемую в омах. Найденные для разных значений сеточного напряжения величины R_i откладываются на графике в функции сеточного напряжения.

2. Коэффициент усиления лампы μ имеет следующий физический смысл. Анодный ток в лампе при постоянном накале есть функция двух величин: анодного и сеточного напряжений. Однако зависимость анодного тока от приращений этих двух напряжений неодинакова. Сетка лампы расположена ближе к катоду, чем анод лампы, и поэтому изменение напряжения на сетке в значительно большей степени влияет на силу анодного тока, чем изменение напряжения на аноде лампы. Отношение приращений анодного и сеточного

напряжений $\mu = -\Delta V_a/\Delta V_c$ (при $I_a = \text{const}$), дающих равные, но противоположные по знаку приращения анодного тока, называется *коэффициентом усиления лампы*. Подробнее с использованием лампы как усилителя можно познакомиться в задаче 110.

Из экспериментальных данных коэффициент усиления определяется следующим образом. На линейном участке сеточных характеристик проводится горизонтальная прямая $I_a = \text{const}$. Отрезок этой прямой между двумя смежными сеточными характеристиками даст значение ΔV_c . Отношение разности анодных напряжений, при которых были получены эти две использованные сеточные характеристики, даст величину ΔV_a . Статический коэффициент усиления определится как отношение $-\left(\frac{\Delta V_a}{\Delta V_c}\right)_{I_a = \text{const}}$. Результаты вычисления величины μ представляются в виде графика зависимости μ от напряжения на сетке лампы. Динамический коэффициент усиления определяется из графиков сеточных характеристик, снятых при анодной нагрузке.

3. Крутизна сеточной характеристики $S = \Delta I_a/\Delta V_c$ (при $V_a = \text{const}$) определяется из тех же сеточных характеристик как тангенс угла их наклона к оси абсцисс. Крутизна имеет размерность, обратную сопротивлению, но выражается обычно в ma/v , этим указывается на смысл крутизны как параметра, определяющего зависимость анодного тока от сеточного напряжения. Величина S также изображается на графике как функция сеточного напряжения.

Если все три статических параметра лампы найдены в одной и той же точке сеточных характеристик, то представляется возможным проверить связь, которая должна существовать между ними:

$$R_i \frac{S}{\mu} = 1.$$

Технические данные установки. В анодной цепи лампы 6С5С используется вольтметр МПА-46 на 300 в; в цепи сетки — вольтметр М-45 на 15 в; в цепи анода — миллиамперметр ЛМ 1 на 30 ма; выпрямитель изготовлен в мастерских физического факультета МГУ; реостат — делитель напряжения 2800 ом; 0,18 а; реостат в цепи сетки 2400 ом; 0,15 а; нагрузочные сопротивления 2,7; 7,5 и 16 ком.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.
2. Курс физики, под редакцией Н. Д. П а п а л е к с и, т. II, Гостехиздат, 1948.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

3. Н. А. К а п ц о в, Электроника, Гостехиздат, 1956.
4. А. М. Б о н ч - Б р у е в и ч, Радиоэлектроника в экспериментальной физике, «Наука», 1966.
5. В. Ф. В л а с о в, Электровакуумные приборы, Связьиздат, 1960.

ЗАДАЧА 80

ОЗНАКОМЛЕНИЕ С РАБОТОЙ МНОГОСЕТОЧНЫХ РАДИОЛАМП
И НАБЛЮДЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ВТОРИЧНОЙ ЭМИССИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Целью настоящей задачи является получение анодных и сеточных характеристик тетрода и пентода и наблюдение динаatronного эффекта в радиолampe.

Особенности устройства и работы многосеточных электронных ламп описаны в настоящее время и в общих курсах физики и в доступной студентам литературе специального характера. Поэтому здесь приводится исключительно описание установки для снятия характеристик этих ламп и порядка выполнения упражнений.

На рис. 1 изображена схема для получения характеристик многоэлектродных ламп; там же показана цоколевка изучаемой

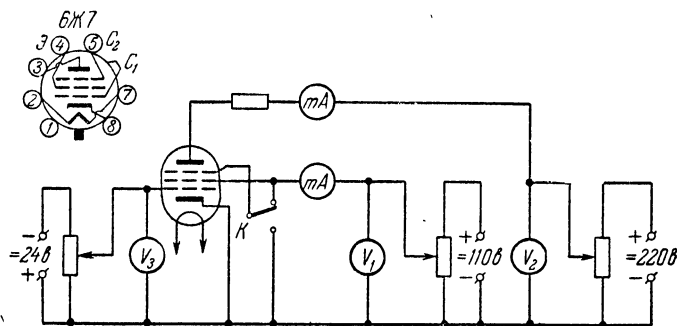


Рис. 1.

лампы. В работе используется пентод типа 6Ж7. Этот пентод имеет отдельные выводы всех электродов лампы. Это обстоятельство удобно в настоящей работе, так как, соединяя накоротко антидинаatronную сетку с экранной ключом K , можно использовать пентод как тетрод и, таким образом, работая с одной и той же лампой, выяснить характерные особенности ламп того и другого типа¹).

Схема в принципе совершенно аналогична схеме для снятия характеристик триода, но допускает возможность регулировки напряжения не только на аноде и на управляющей сетке лампы, но также и на экранной сетке. Схема также допускает измерения не только анодного тока, но и тока на экранную сетку.

Правильность сборки схемы перед ее включением проверяется преподавателем или лаборантом.

¹ Разумеется, указанный способ замыкания сеток лампы используется в настоящей задаче лишь как учебный прием. На самом деле, в качестве тетродов используются лампы специальных конструкций.

Упражнение 1

Снятие анодных и сеточных характеристик пентода и тетрода

Целью упражнения является снятие зависимости анодного тока от анодного и сеточного напряжений при отсутствии нагрузки в анодной цепи лампы. Лампа используется сначала как пентод, а затем как тетрод.

Анодные характеристики снимаются при двух значениях напряжения на экранной сетке 90 и 45 в и для каждого из этих двух значений напряжения на экранной сетке при значениях напряжения на управляющей сетке от -1 до -8 в через 1 в. Таким образом,

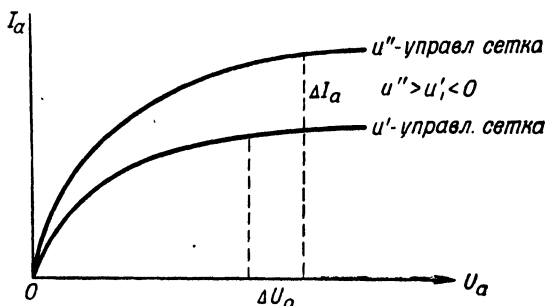


Рис. 2.

каждая анодная характеристика соответствует определенной паре значений напряжения на экранной и управляющей сетках.

Анодное напряжение при снятии каждой анодной характеристики изменяют от 0 до 220 в. При снятии анодных характеристик измерения следует вести ступенями: через каждые 2 в — в интервале от 0 до 10 в, через 5 в — в интервале 10—40 в и через 10 в — в интервале 40—220 в.

Непосредственные результаты измерений представляют в виде соответствующих графиков.

Найденное на опыте семейство анодных характеристик дает возможность определить внутреннее сопротивление лампы R_i и крутизну сеточной характеристики S . Физический смысл и математическое выражение этих параметров лампы объяснены в описании задачи 79. В данном случае надо использовать для расчета параметров лампы семейство анодных характеристик, снятых при различных значениях сеточного смещения. Величина внутреннего сопротивления лампы может быть определена обычным способом из каждой анодной характеристики (см. задачу 79). Необходимая для отыскания крутизны сеточной характеристики величина приращения анодного тока определяется как разность анодных токов (рис. 2), полученных при одном и том же значении анодного напряжения, но при разных значениях сеточного смещения. Другими

словами, ΔI_a будет разностью ординат точек, лежащих на двух анодных характеристиках, отличающихся сеточным смещением ΔU_c .

Коэффициент усиления лампы можно определить, пользуясь формулой $\mu = SR_i$.

Сеточные характеристики пентода можно снять при тех же двух значениях напряжения на экранной сетке и при анодных напряжениях 90, 160 и 220 в. Результаты представляют в виде графиков. Из сеточных характеристик параметры лампы вычисляют обычным образом.

После этого замыканием ключа, соединяющего экранную сетку с антидинаatronной, превращают пентод в тетрод и затем исследуют анодные и сеточные характеристики тетрода.

Упражнение 2

Снятие динамических анодных и сеточных характеристик пентода и тетрода при различных нагрузках

Включают в анодную цепь лампы нагрузки в 10, 18 и 27 ком. Снимают те же характеристики лампы, которые были получены в первом упражнении. Результаты измерений представляют в виде графиков. Параметры лампы вычисляют из этих графиков.

Следует сопоставить графики статических и динамических характеристик пентода и сравнить результаты этого сопоставления с соответствующими данными для триода с тем, чтобы уяснить физический смысл перехода к лампам более сложных конструкций.

Упражнение 3

Наблюдение динаatronного эффекта и роль антидинаatronной сетки

Упражнение имеет целью прежде всего познакомить выполняющего работу с явлением вторичной эмиссии электронов.

Как указано выше, пентод 6Ж7 допускает использование его как тетрода. При этом на соединенные сетки поочередно напряжения 90 и 45 в и на управляющую сетку подают смещение от —3 до —1 в.

После этого снимают анодные характеристики, изменяя анодное напряжение от 0 до 220 в при неизменных значениях напряжений на сетках. Анодное напряжение в интервале 0—30 в надо изменять степенями через каждые 5 в, в интервале 30—220 в его можно изменять степенями через 10 в. Ведется одновременно запись значений силы тока и в анодной цепи и в общей цепи экранной и антидинаatronной сеток.

Следует обратить особое внимание на измерение анодного и сеточного токов для тех значений анодного напряжения, для которых рост этого напряжения ведет к уменьшению анодного тока и к увеличению тока на антидинаatronную и экранную сетки. На этом

участке характеристики надо снимать экспериментальные точки через интервалы значений анодного напряжения, меньшие, чем указано выше для прочих частей характеристики. Наличие такого участка анодной характеристики лампы наглядно демонстрирует явление вторичной эмиссии электронов с анода лампы.

Результаты измерений анодного и сеточного токов изображают в виде соответствующих графиков.

Роль антидинатронной сетки выясняется из сопоставления анодных характеристик пентода с полученной в настоящем упражнении характеристикой того же пентода, с соединенными накоротко двумя сетками.

Применяемая в задаче схема допускает, как видно из сказанного выше, исследование работы лампы при многих режимах. Продолжительность выполнения описанных измерений затрудняет проведение их всех в течение одного занятия в практикуме. Поэтому минимальный комплекс измерений устанавливается преподавателем для каждого выполняющего работу студента.

Технические данные установки. Напряжение накала подается от сети через понижающий трансформатор, напряжение на экранную сетку подается от аккумуляторной сети лаборатории, анодное напряжение — от отдельного выпрямителя, напряжение на управляющую сетку — от аккумуляторной батареи. Напряжение на экранной сетке измеряется вольтметром М-45 на 150 в, на аноде — вольтметром М-80/1 на 300 в, на управляющей сетке — вольтметром ЛМ-1; в качестве миллиамперметров в анодной цепи и в цепи экранной сетки используются приборы М-45.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. Н. Н. М а л о в, Курс электротехники и радиотехники, Физматгиз, 1959.
3. А. М. Б о н ч - Б р у е в и ч, Применение электронных ламп в экспериментальной физике, Гостехиздат, 1955.
4. В. Ф. В л а с о в, Электровакуумные приборы, Связьиздат, 1949.
5. Г. В. В о й ш в и л л о, Общий курс радиотехники, Воентгиз, 1948.
6. Методы экспериментальной электроники, Сборник, ИЛ, 1949.

ЗАДАЧА 81

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ТИРАТРОНА

Введение. В настоящее время наряду с электронными вакуумными лампами широкое применение находят газонаполненные приборы, к числу которых принадлежит тиратрон.

По своему устройству тиратрон аналогичен электронной лампе. В тиратроне имеется анод, катод и одна или две сетки. Баллон тира-

трона наполняется парами ртути или инертными газами (неоном, аргонем и др.) при давлении от нескольких долей до 1—2 мм рт. ст. Существенную роль в протекании тока через тиратрон играют ионы газа или пара, находящегося в его баллоне. Не касаясь сложных процессов газового разряда, укажем только, что в тиратроне при определенных анодном и сеточном напряжениях имеет место переход от тлеющего разряда к дуговому.

В тиратроне электроны, вылетающие из катода, при достаточном напряжении между катодом и анодом вызывают ионизацию газа, в результате чего в тиратроне образуется газоразрядная плазма с большой концентрацией ионов и электронов, так называемая низковольтная дуга. Такой разряд характеризуется величиной потенциала «зажигания» тиратрона. Если до зажигания ток, проходящий через тиратрон, измеряется миллионными долями ампера, то после зажигания величина тока, которая определяется эмиссионными свойствами катода и параметрами нагрузки, может достигать в малых тиратронах десятых долей ампера. Пока разряда в тиратроне нет, его сетка действует аналогично сетке вакуумной электронной лампы, и с ее помощью можно управлять величиной тока в тиратроне (участок 1 рис. 1 и рис. 2, а). Вследствие того, что сетка в тиратроне не представляет собою сплошной перегородки, часть электронов, проникающих за пределы сетки при определенном напряжении, «зажигает» тиратрон. Требуемое для «зажигания» анодное напряжение тем больше, чем выше по абсолютной величине отрицательный потенциал сетки.

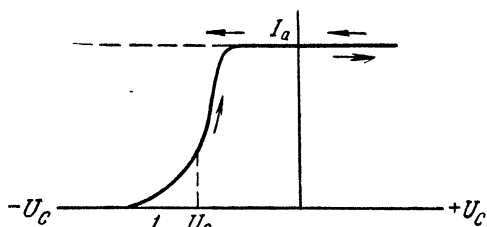


Рис. 1.

Зависимость величины сеточного напряжения U_c , при котором зажигается тиратрон, от величины анодного напряжения U_a называется статической пусковой характеристикой тиратрона.

Каждому значению сеточного напряжения соответствует определенное напряжение на аноде, ниже которого разряд не зажигается, тиратрон «заперт». В данной задаче исследуется работа тиратронов, имеющих отрицательную пусковую характеристику, которая может быть записана в виде

$$U_c = C - DU_a, \quad (1)$$

где C — постоянный коэффициент, зависящий от конструкции лампы, D — постоянный коэффициент, зависящий от конструкции лампы, рода газа и его давления.

После зажигания разряда в тиратроне сетка теряет свои управляющие свойства. Причина этого явления заключается в том, что вблизи сетки образуется ионная оболочка, которая полностью экранирует сетку. Вне этой оболочки электрическое поле оказывается практически таким же, как и в отсутствие сетки (рис. 2, б).

Убывающая с течением времени концентрация ионов у сетки приводит к превалированию отрицательного поля сетки в сеточных

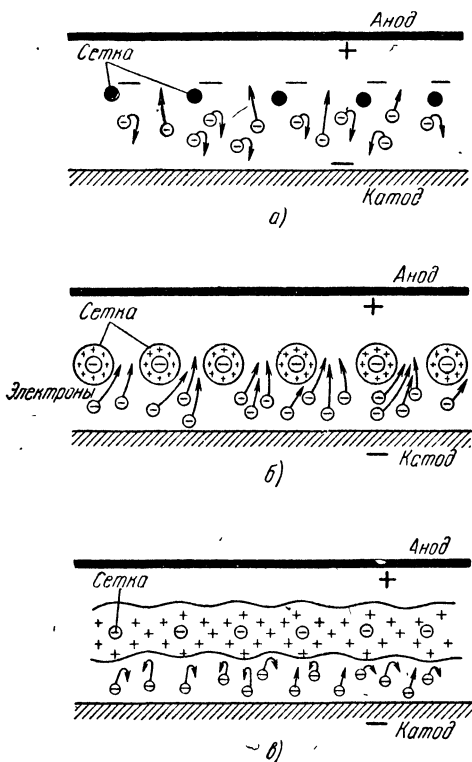


Рис. 2.

отверстиях, которое тормозит электроны, мешая тем самым возобновлению разряда (рис. 2, в), тиратрон запирается.

В ряде тиратронов для уменьшения сеточных токов и исключения возможности возникновения разряда между сеткой и анодом вводят дополнительную экранную сетку, имеющую отдельный вывод. Важное преимущество тиратронов с экранными сетками заключается в том, что, изменяя величину напряжения на экранной сетке, можно изменять положение пусковой характеристики.

Указанные выше свойства тиратронов позволяют широко использовать их для решения разнообразных задач, требующих быстрого включения больших мощностей. Тиратроны применяются в различных автоматических устройствах для включения и вы-

ключения различных агрегатов, для регулирования скорости электромоторов, контроля за температурой и т. п. Тиратроны применяются в генераторах пилообразных импульсов (генераторы развертки), в стробоскопах. Широкое применение нашли тиратроны в выпрямителях переменного тока.

Постановка задачи и описание упражнений. В настоящей задаче изучаются характеристики маломощного тиратрона ТГ-1-0,1/0,3 и рассматривается одна из схем управления средним значением анодного тока тиратрона. Название «сетка» в тиратроне ТГ-1-0,1/0,3

нужно понимать условно, так как эта «сетка» в действительности имеет форму цилиндра с узкой щелью. Тиратрон смонтирован в стеклянном баллоне, наполненном криптоноксеноновой смесью.

Схема в задаче монтируется из отдельных элементов: панели с тиратроном (нанесенные на панели цифры соответствуют указанным в цоколевке), панелей с набором сопротивлений и емкостей к каждому упражнению, измерительной аппаратуры.

Упражнение 1

Снятие пусковых характеристик

В первом упражнении снимается пусковая характеристика тиратрона ТГ-1-0,1/0,3, т. е. исследуется зависимость напряжения на сетке U_c от анодного напряжения U_a , при котором происходит зажигание разряда в тиратроне.

Для снятия пусковой характеристики тиратрона собирают схему, приведенную на рис. 3. Включают накал и устанавливают на сетке наибольшее отрицательное смещение, снимаемое с сопротивления R_1 , затем подают с сопротивлением R_4 анодное напряжение $+30$ в и замыкают

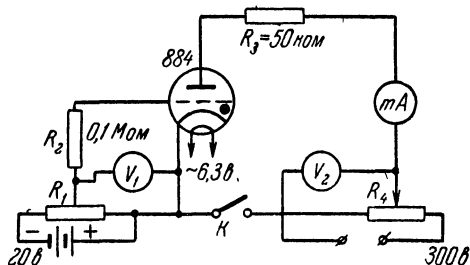


Рис. 3.

ключ K . Постепенно уменьшая напряжение на сетке, фиксируют значение сеточного напряжения, при котором тиратрон зажигается, но перестает зажигаться при незначительном увеличении отрицательного смещения. Повторяют измерения, увеличивая каждый раз анодное напряжение на 5—10 в. Строят график $U_c = f(U_a)$ и определяют из графика постоянные C и D согласно уравнению (1).

Упражнение 2

Наблюдение формы тока и напряжения при помощи осциллографа

Из предыдущего упражнения видно, что тиратрон зажигается при определенном анодном напряжении $U_{зж}$, которое зависит от потенциала сетки U_c . Если питать анодную цепь тиратрона переменным напряжением, то разряд зажигается, когда напряжение возрастает до потенциала зажигания $U_{зж}$ при данном смещении на сетке, и гаснет, когда анодное напряжение U_a понижается до значения потенциала потухания.

Для выполнения этого упражнения собирают схему согласно рис. 4 и включают накал катода. На сетку подают напряжение

2—3 в от источника постоянного тока, на анод 120 в переменного напряжения.

Для получения осциллограмм $U_a(t)$ напряжение, снимаемое с сопротивления R_3 (точки 2, 3), включенного в цепь параллельно тиратрону, подается на вертикальный (Y_1) вход осциллографа. Для получения осциллограмм тока напряжение, снимаемое с сопротивления R_2 (точки 1, 2), включенного в цепь катода, подается на вертикальный (Y_2) вход осциллографа. Осциллограммы напряжения и тока необходимо зарисовать и объяснить их зависимость от времени t при различных напряжениях U_c на сетке.

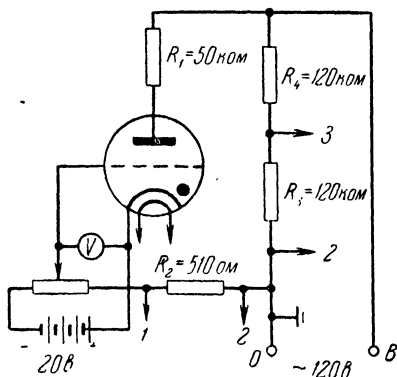


Рис. 4.

Изменение величины сеточного смещения при питании тиратрона переменным напряжением дает возможность менять среднее значение анодного тока, так как изменение величины сеточного смещения меняет долю полупериода, в течение которого через тиратрон идет ток. Еще большие возможности управления средним значением анодного тока дает питание сеточной цепи переменным напряжением одной частоты с анодным. Изменяя сдвиг фаз между анодным и сеточным напряжениями от 0

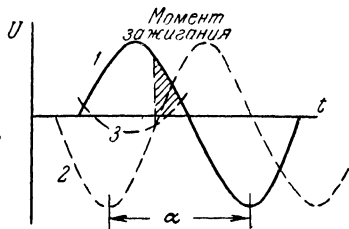


Рис. 5.

Упражнение 3 Фазовое управление анодным током тиратрона

Изменение постоянного сеточного смещения при питании тиратрона переменным напряжением

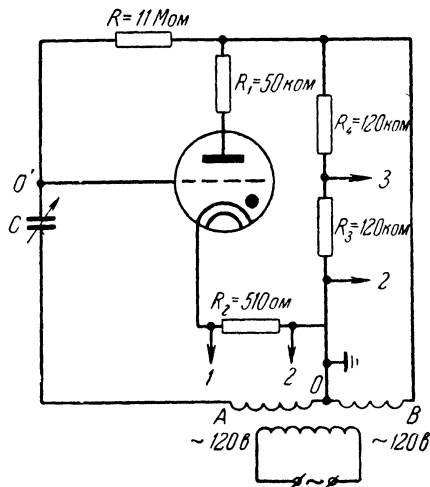


Рис. 6.

до 180° , можно плавно изменять величину среднего значения выпрямленного тока от максимального значения до нуля.

Принцип фазового управления средним значением анодного тока показан на рис. 5, где кривая 1 — анодное напряжение, кривая 2 — напряжение на сетке, кривая 3 — потенциал зажигания, α — сдвиг фаз между анодным и сеточным напряжением. Для создания управляемого сдвига фаз в нашей задаче применяется простейший фазовращатель с сопротивлением и переменной емкостью (рис. 6).

Из приведенной векторной диаграммы фазовращателя (рис. 7) видно, что, изменяя соотношение между R и $X_C = 1/\omega C$, можно изменять угол α — сдвиг фаз между анодным и сеточным напряжениями — от 0 до 180° .

Для выполнения упражнения собирают схему по рис. 6, включают накал, а затем анодное напряжение. Наблюдают на экране осциллографа кривые тока и напряжения в зависимости от соотношения между X_C и R .

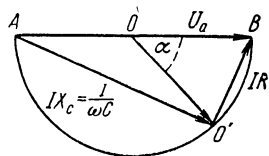


Рис. 7.

Технические данные установки. Тиратрон ТГ-884 (ТГ-1-0,1/03); реостаты на 1600 ом и 6000 ом; набор сопротивлений: 120 ком (2 шт.), 500 ом, 50 ком, 0,1 Мом, 11 Мом, набор емкостей: 600, 500, 400, 300, 200, 100 пф, вольтметр постоянного тока 0—75 в, вольтметр астатический 0—300 в, миллиамперметр постоянного тока 0—10 ма, выпрямитель 0—300 в, источник постоянного тока 0—40 в, трансформатор со средней нулевой точкой, двухлучевой осциллограф.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Капцов, Электрические явления в вакууме и газах, Физматгиз, 1950.
2. И. Л. Каганов, Электронные и ионные преобразователи, Госэнергоиздат, 1955.
3. Г. А. Тягунов, Электровакуумные приборы, Госэнергоиздат, 1949.
4. В. Ф. Власов, Электровакуумные приборы, Связьиздат, 1960.

ЗАДАЧА 82

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ЭКВИВАЛЕНТОВ И ГРАДУИРОВАНИЕ АМПЕРМЕТРА ПРИ ПОМОЩИ ВОЛЬТАМЕТРА

Упражнение 1

Определение электрохимического эквивалента меди

Количество вещества, выделившееся из электролита в результате прохождения через него заряда в один кулон, носит название электрохимического эквивалента этого вещества. Соответственно этому определению электрохимический эквивалент принято выражать в миллиграммах на кулон. Если имеется точный амперметр, вклю-

ченный в цепь электролитической ванны, и секундомер, позволяющий измерять время, в течение которого происходит электролиз, то легко определить электрохимические эквиваленты выделяющихся на электродах веществ. Произведение силы тока на время дает величину протекшего количества электричества, а изменение веса электродов — количество выделившегося вещества. Отношение этих величин и даст электрохимический эквивалент.

Описание прибора. Прибор, в котором ведется электролиз, называется вольтметром. Медный вольтметр (рис. 1) состоит из стеклянного сосуда, в который опущены три медные пластины; из них две крайние A и A_1 , служащие анодом, соединяются между собою медным полупоясом, облегающим стеклянный сосуд по внешней стороне. Катодом служит третья медная пластинка, которая при помощи винта может быть укреплена на стержне K . В сосуд наливают насыщенный раствор медного купороса. При пропускании тока через цепь, в которую включен вольтметр, на катодной пластинке осаждается чистая медь.

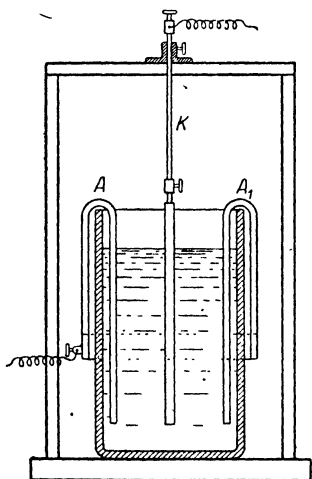


Рис. 1.

Схема соединений изображена на рис. 2; здесь E — источник тока, F — медный вольтметр, A — амперметр, K — ключ и R — реостат.

Измерения. Собирают электрическую цепь по схеме рис. 2 и, перемещая движок реостата, устанавливают силу тока около $0,5$ а. Затем выключают ток, вынимают центральный электрод (катод) и готовят его к измерениям. Для этого его тщательно промывают, высушивают и взвешивают с точностью до $0,001$ г. После этого ставят электрод на место в сосуд, замыкают ток и одновременно пускают в ход секундомер. Ток пропускают в течение приблизительно получаса, поддерживая все время реостатом его постоянство. По окончании опыта вынимают пластину, снова промывают ее, высушивают и взвешивают.

Вычисления. Из первого закона Фарадея имеем для медного вольтметра

$$Q = a_{Cu}it,$$

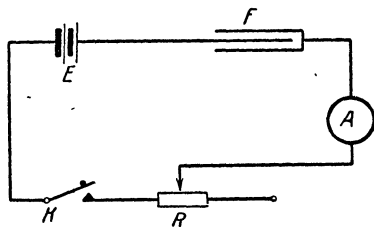


Рис. 2.

где Q — вес осажденной на катоде меди, α_{Cu} — электрохимический эквивалент меди и t — время прохождения тока i . Подставляя сюда измеренные значения Q (в миллиграммах), i и t , находят α_{Cu} .

Пользуясь значением атомного веса меди и зная валентность иона меди, вычисляют заряд отдельного иона меди и заряд электрона.

Упражнение 2

Градуирование амперметра при помощи газового вольтметра

Задача настоящего упражнения обратна задаче первого упражнения этой работы. Во втором упражнении электрохимический эквивалент выделяющегося при электролизе вещества считается известным, и количество выделившегося вещества используется для расчета силы тока, протекавшего при электролизе через вольтметр и подлежащий градуировке амперметр.

В условиях этого упражнения ведется электролиз раствора серной кислоты. Продукты электролиза — водород и кислород — собираются в газовом вольтметре.

Газовый вольтметр изображен на рис. 3.

Две симметрично расположенные в передней плоскости прибора стеклянные трубки AA с делениями снабжены небольшими кранами, сообщающими трубки с атмосферой. Эти трубки служат мерными объемами, для газа и носят название газовых бюреток. В нижнюю часть трубок впаяны электроды, через которые подводится ток к раствору серной кислоты, заполняющему вольтметр и предназначенному для электролиза. Третья, стеклянная трубка вольтметра соединена тройником с нижней частью газовых бюреток. В верхней части трубки имеется сферический резервуар B для того же раствора серной кислоты, который заполняет всю систему вольтметра.

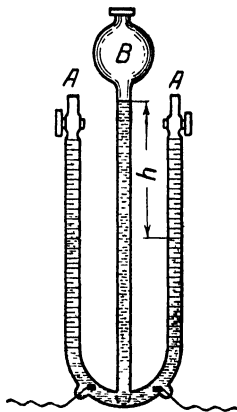


Рис. 3.

Открывая краны бюреток, можно выпустить из их верхней части газовый пузырь, скапливающийся под кранами. На место уходящего газа из центральной трубки с ее верхнего резервуара поступает раствор серной кислоты, вытесняющий газ через краны бюреток.

При пропускании тока через прибор на электродах выделяются кислород и водород, поднимающиеся затем в верхнюю часть бюреток, под краны. Уровень раствора серной кислоты при этом в бюретках опускается ниже кранов, а раствор серной кислоты вытесняется в центральную стеклянную трубку и в расположенный над ней резервуар. Если при помощи открывания кранов бюретки были до начала опыта целиком заполнены раствором серной кислоты, то в дальнейшем понижение уровня в каждой бюретке позволяет

измерять объем выделившегося в ней газа. Это измерение делается непосредственно по шкалам, нанесенным на стенках бюреток.

Измерения. Прибор включают последовательно с реостатом, введенным на максимальное сопротивление, и амперметром в цепь постоянного тока. Соединения выполняются по схеме, совершенно аналогичной схеме, изображенной на рис. 2. Затем начинают медленно выводить реостат, доводя силу тока приблизительно до одной пятой части шкалы амперметра, и добиваются того, чтобы стрелка стояла при этом на одном из целых делений шкалы прибора. После этого выключают ток и, действуя кранами бюреток, выпускают весь газ из бюреток, приготовляя их таким образом к основному опыту, в котором предстоит измерить объем выделившихся при электролизе газов. Затем вновь замыкают цепь тока и одновременно пускают в ход секундомер. Записывают показания амперметра, пока в делениях еще непроградуированной его шкалы. По выделении определенного объема газов (около 100 см^3) выключают ток и одновременно останавливают секундомер. Точно отсчитывают выделившийся объем V и температуру газа T ; измеряют при помощи масштабной линейки разность уровней h кислоты в газовых бюретках и в центральной трубке бюретки. Это необходимо для того, чтобы в дальнейшем определить то давление, при котором находится газ в бюретках. Последнее будет необходимо для определения массы выделившихся при электролизе газов. Снова заполнив бюретки серной кислотой, повторяют опыт при других значениях силы тока.

При выполнении этого упражнения необходимо помнить, что выделяющийся при электролизе водород образует с воздухом взрывоопасную смесь. Поэтому всякое приближение огня или электрических искр к прибору совершенно недопустимо.

Вычисления. Прежде всего объем газа в бюретках газового вольтметра приводят к 0° и 760 мм давления, пользуясь газовыми законами:

$$V_0 = \frac{V}{1 + 0,003675 T} \frac{p}{760}.$$

Здесь T — температура газа в градусах Цельсия, p — давление газа в миллиметрах ртутного столба и V — объем газа в см^3 . Давление p равно барометрическому p_0 плюс давление столба раствора кислоты высотой h от уровня ее в бюретке A до уровня в третьей трубке B и за вычетом давления p_1 насыщенных паров 20%-ного раствора серной кислоты при данной температуре, p_1 находится из таблиц ¹⁾. Так как с достаточной точностью можно принять, что 20%-ная серная кислота в 12 раз легче ртути, то

$$p = p_0 + \frac{h}{12} - p_1,$$

¹⁾ Без большой ошибки можно воспользоваться таблицей упругости водяного пара.

где ρ_0 , ρ_1 и h должны быть выражены в миллиметрах ртутного столба.

Для газового вольтметра сила тока выражается так:

$$i = \frac{2}{3} \frac{V_0}{\alpha_H t},$$

где V_0 — приведенный к нормальным условиям объем выделившегося газа, t — время прохождения тока и α_H — электрохимический эквивалент водорода, который берется из таблиц. Пользуясь этой формулой, вычисляют i для каждого отдельного опыта и строят градуировочный график зависимости величины i от показаний исследуемого амперметра (см. также задачу 68), что и составляет цель работы.

В случае если цель работы заключается в проверке уже градуированного амперметра, практически удобнее по оси абсцисс откладывать показания испытуемого прибора, а по оси ординат — найденные к ним положительные и отрицательные поправки.

Технические данные установки. Для медного вольтметра может быть использован стеклянный сосуд диаметром около 100 мм с электродами соответствующих размеров; газовый вольтметр изготавливается путем спая газовых бюреток емкостью около 0,5 л каждая.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.

ЗАДАЧА 83

ИЗУЧЕНИЕ ГАЛЬВАНОМЕТРА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Краткое описание и теория гальванометра магнитоэлектрической системы. Гальванометры — приборы, служащие для измерения слабых электрических токов, — подразделяются по своей конструкции на две основные группы: 1) с подвижной катушкой, обтекаемой током и вращающейся в поле неподвижного магнита или электромагнита; 2) с подвижным магнитом и неподвижной катушкой.

Для измерения силы тока как в тех, так и в других приборах используется вращение подвижной системы, отклоняющейся от некоторого положения равновесия под влиянием взаимодействия тока и магнита. При точных измерениях применяются исключительно гальванометры первого типа.

Подвижная система такого гальванометра представляет собой в большинстве случаев четырехугольную рамку, составленную из плотно уложенных и склеенных изолирующим лаком четырехугольных витков изолированной тонкой проволоки сечением в несколько сотых миллиметра. Эффективное поперечное сечение такой катушки, пронизываемое линиями сил магнитного поля, составляет nQ , где

n — число витков рамки, а Q — площадь сечения отдельного прямоугольного витка проволоки. Число витков в такой катушке бывает от нескольких десятков до сотни. Нить E с укрепленным на ней легким зеркальцем M (рис. 1) служит подвесом для рамки C . Рамка может свободно вращаться в зазоре, образуемом двумя полюсами постоянного магнита и цилиндром J из мягкого железа, укрепленных на пластинке P из немагнитного материала. В этом случае, как показано пунктиром в нижней части рисунка, магнитное поле в воздушном промежутке почти радиально (на верхней части рисунка один из полюсов магнита частично удален).

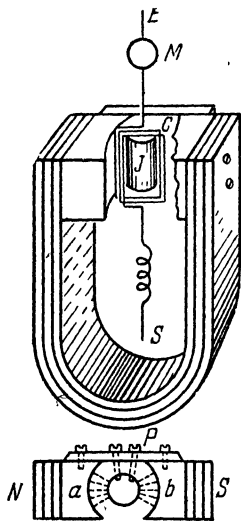


Рис. 1.

Нитью подвеса служит тонкая металлическая (платиновая) проволочка или бронзовая ленточка сечением в несколько микрон или тонкая кварцевая нить, иногда платинированная по поверхности. Вторым подводом тока к катушке служит обычно металлическая серебряная или золотая ленточка толщиной в несколько десятых микрона. В гальванометрах с кварцевым подвесом обычно оба подвода тока к рамке выполняются в виде таких ленточек, соединенных с обмоткой рамки (катушки) гальванометра в нижней ее части. Подводы тока к подвижной системе гальванометра не должны оказывать упругого сопротивления вращению подвижной системы. Таким образом, моментом упругих сил, действующим на рамку, являлся только крутящий момент нити подвеса.

Перед началом работы гальванометр должен быть правильно установлен, что достигается вращением трех установочных винтов, на которые опирается корпус прибора. Это значит, что подвижная система гальванометра, удерживаемая в фиксированном положении до начала работы специальным приспособлением (арретиром), должна после освобождения арретира свободно двигаться между полюсами магнита, не касаясь их при вращении. Узость зазора между полюсами магнита и центральным цилиндром требует весьма точной установки прибора.

Для правильной установки некоторые системы гальванометров снабжены уровнем, при помощи которого прибор приводится в правильное положение. В других системах гальванометров в корпусе прибора установлено специальное наклонное зеркальце, которое облегчает наблюдения положения рамки относительно полюсов магнита.

Приборы первого типа устанавливаются по уровню при арретированной подвижной системе. Приборы второго типа устанавли-

ваются при освобожденной подвижной системе. Арретир приводится в движение специальным рычажком или головкой винта, выведенной где-либо из корпуса гальванометра и снабженной надписью.

Освобождение и закрепление подвижной системы гальванометра перед работой прибора (или по окончании ее) следует производить с большой осторожностью, так как толчки подвижной системы гальванометра, подхватываемой вилкой арретира, передаются непосредственно тонкой нити подвеса. Студентам выполнять самостоятельно эту операцию в практикуме не рекомендуется, они должны обращаться за помощью к лаборантам практикума и воспользоваться возможностью проследить за выполнением этих операций опытными лицами.

Верхний конец нити подвеса закреплен во вращающейся головке (обозначенной на корпусе прибора надписью «корректор нуля»), выведенной на верхнюю часть корпуса гальванометра. Вращением этой головки можно поворачивать подвижную систему гальванометра для установки ее в нулевое положение между полюсами магнита. В нулевом положении плоскость витков подвижной системы подвеса устанавливается приблизительно параллельно линии ab (рис. 1). Операция поворота рамки (катушки) гальванометра требует тех же предосторожностей, что и освобождение арретира прибора. Необходимо при этом иметь в виду, что при вращении головки корректора нуля рамка следует за вращением головки с запозданием, так как передача крутящего момента к рамке осуществляется через нить подвеса. Поэтому, повернув корректор нуля на небольшой угол, следует всякий раз выждать, пока подвижная система прибора установится в новое положение. Только таким прерывистым вращением корректора нуля можно привести подвижную систему в нужное положение между полюсами магнита. В практикуме эти операции производятся также не студентами, а лаборантами.

Измерение силы тока основано на наблюдении углов поворота рамки C . При протекании через обмотку рамки тока последняя испытывает вращающий момент сил, действующих на ток в магнитном поле. Как известно, при этом рамка стремится расположиться так, чтобы магнитный момент протекающего по ней тока был направлен вдоль внешнего магнитного поля.

При установившемся отклонении рамки имеет место равенство моментов сил, действующих на рамку со стороны магнитного поля, и крутящего упругого момента нити подвеса

$$BnQi = Da_k, \quad (1)$$

где B есть индукция магнитного поля в воздушном промежутке, Q — площадь витка, n — число витков, D — момент сил кручения на единицу угла поворота, а i — сила тока, протекающего по

виткам и сообщающего рамке угловое отклонение α_k . Отсюда

$$i = C\alpha_k = \frac{1}{S_i}\alpha_k, \text{ где } C = \frac{D}{BnQ}$$

есть динамическая постоянная прибора, выражающая численно силу тока, отклоняющую подвижную часть прибора на угол $\alpha = 1$. Величина

$$S_i = \frac{1}{C} = \frac{BnQ}{D} \quad (2)$$

называется *токовой чувствительностью* гальванометра.

Вольтовая чувствительность гальванометра S_V определяется соотношением

$$S_V = \frac{S_i}{R} = \frac{BnQ}{RD},$$

где R — сопротивление обмотки рамки гальванометра¹⁾.

Из выражения (2) видно, что для увеличения чувствительности гальванометра необходимо, чтобы D было по возможности малым, а B , n и Q — по возможности велики. Уменьшение D достигается уменьшением поперечного сечения нити подвеса или увеличением ее длины. Значение величины B в воздушном промежутке возрастает при уменьшении размеров этого промежутка; увеличение nQ достигается увеличением числа витков, а это неизбежно приводит к уменьшению B . Обычно эти условия подбираются так, чтобы получалось максимальное значение для произведения BnQ .

Описанная система приборов позволяет измерять самыми совершенными гальванометрами силу тока до 10^{-11} а и разность потенциалов до 10^{-8} в. Следует заметить, что техника конструирования и изготовления гальванометров достигла в настоящее время такого совершенства, что подвижная система гальванометра реагирует на статистические тепловые флуктуации тока в цепи гальванометра, что мешает точным измерениям в приборах высшей чувствительности.

При работе с гальванометром имеет важное значение не только его токовая или вольтовая чувствительность, но также характер движения его подвижной системы и время, в течение которого последняя займет положение равновесия, отвечающее конечному углу отклонения. Дело не только в том, чтобы экономить время измерений, но и в том, что режим измерительной цепи не всегда возможно поддерживать длительное время постоянным и отсчеты по гальванометру должны соответствовать вполне определенным состояниям той системы, в которую он включен. Движение рамки гальванометра, перед тем как она займет окончательное отклоненное поло-

¹⁾ Еще раз о вольтовой чувствительности прибора см. на стр. 103 в связи с обсуждением характерных режимов работы гальванометра.

жение после включения тока i , можно исследовать, рассмотрев уравнение ее движения.

Уравнение движения рамки будет

$$K \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = BnQi - P \frac{d\alpha}{dt} - D\alpha, \quad (3)$$

где K — момент инерции подвижной системы, $BnQi$ — момент сил, направляющих движение рамки, $D\alpha$ — момент кручения подвеса рамки и $P \frac{d\alpha}{dt}$ — момент сил, тормозящих движение рамки, причем $P = P_1 + P_2$, где P_1 — коэффициент торможения рамки вследствие трения ее о воздух, P_2 — коэффициент электромагнитного торможения, являющегося следствием того, что в обмотке рамки во время ее движения индуцируется электродвижущая сила.

Если коэффициент P_1 не поддается изменению или регулировке в готовом приборе, то величину коэффициента P_2 можно легко изменять, что позволяет, как будет видно дальше, изменять характер движения подвижной системы гальванометра.

Величина коэффициента P_2 может быть определена из следующих рассуждений. При повороте рамки на угол $d\alpha$ за время dt скорость возрастания площади двух полосок цилиндрической поверхности, описываемой вертикальными сторонами поворачивающейся рамки, будет $ab \frac{d\alpha}{dt} = Q \frac{d\alpha}{dt}$ (рис. 2), а скорость изменения потока магнитной индукции через поверхность этих полосок в радиальном магнитном поле будет $BQ \frac{d\alpha}{dt}$ (см. рис. 1). Следовательно, (см. [1]), электродвижущая сила, индуцируемая при этом в n витках обмотки, равна

$$E = -BnQ \frac{d\alpha}{dt}. \quad (4)$$

Если сопротивление обмотки рамки R_g , а сопротивление внешней цепи R , то, пренебрегая самоиндукцией обмотки, можно определить индуцируемый в рамке ток i' ; получим $i' = \frac{E}{R_g + R} = \frac{BnQ}{R_g + R} \frac{d\alpha}{dt}$.

Момент пары сил, испытываемый этим током в магнитном поле, будет равен $BQni' = \frac{B^2 n^2 Q^2}{R_g + R} \frac{d\alpha}{dt} = P_2 \frac{d\alpha}{dt}$, откуда $P_2 = \frac{B^2 n^2 Q^2}{R_g + R}$.

У готового гальванометра мы можем изменять величину R , а следовательно, и значение $P = P_1 + P_2$.

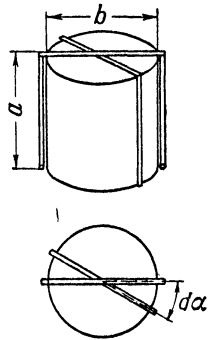


Рис. 2.

Вернемся к уравнению (3), рассмотрим его решение и разные случаи движения рамки гальванометра. Из этого уравнения видно следующее. Угловая частота ω_0 свободных колебаний разомкнутой рамки в отсутствие подведенного к ней тока и в условиях, когда можно пренебречь трением рамки о воздух, будет иметь значение $\omega_0^2 = D/K$. Для замкнутой рамки $\omega^2 = D/K - P^2/4K^2$ и колебания рамки (если ток к ней не подведен, но она была выведена из положения равновесия) будут происходить по закону

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\mu t} \sin(\omega t + \varphi), \quad \text{где } \mu = \frac{P}{2K}. \quad (5)$$

Если же в покоящуюся рамку ($\alpha = 0$ и $d\alpha/dt = 0$) будет включен ток постоянной силы, то движение рамки можно описать выражением

$$\alpha = \alpha_k \left[1 - e^{-\mu t} \sqrt{\frac{\mu^2 + \omega^2}{\omega^2}} \sin\left(\omega t + \arctg \frac{\omega}{\mu}\right) \right], \quad (6)$$

где $\alpha_k = BnQi/D$ — установившееся отклонение рамки гальванометра при прохождении по ней тока i (см. формулу (1)).

Рассмотрим следующие частные случаи применения найденного решения уравнения (3):

1. Если между постоянными прибора имеет место равенство $P^2 = 4KD$, то ω равно нулю и поворот рамки на угол α совершается аperiодически, т. е. рамка поворачивается и подходит асимптотически к положению равновесия, не переходя его. Характер движения рамки для этого случая изображен на рис. 3, где по оси абсцисс отложено время от момента замыкания для трех разных затуханий, а по оси ординат — углы поворота рамки.

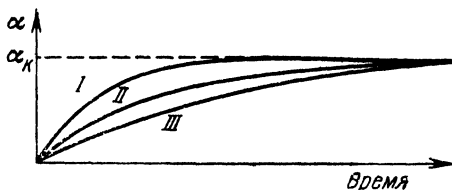


Рис. 3.

Гальванометр, у которого подобрано указанное равенство постоянных, называется критически успокоенным, причем этого удобнее всего достигнуть, изменяя величину того внешнего сопротивления R , на которое замкнута обмотка рамки.

Пренебрегая P_1 , положим $P = P_2$, т. е. $P = B^2 n^2 Q^2 / (R_g + R)$, а так как, с другой стороны, $P = 2\sqrt{KD}$, то для данного случая необходимо, чтобы

$$R_g + R = \frac{B^2 n^2 Q^2}{2\sqrt{KD}}, \quad (7)$$

что легче всего осуществить, подобрав соответствующее сопротивление R внешней цепи, на которую замкнута обмотка рамки. Иногда

гальванометры снабжаются переменным магнитным шунтом, который, изменяя величину B , позволяет добиться критического успокоения при заданном значении R . В случае соблюдения равенства (7) величина $R_g + R$ называется полным критическим сопротивлением.

Следует обратить внимание и на то, что электромагнитное торможение пропорционально B^2 , в то время как чувствительность пропорциональна B , поэтому изменения в напряженности поля значительно сильнее влияют на условия успокоения гальванометра, чем на его чувствительность.

Близкий к критическому режим работы гальванометра и является практически наиболее удобным для измерений, так как обеспечивает минимальное время подхода подвижной системы гальванометра к положению равновесия. Обычно режим работы сдвигают несколько в сторону периодического колебательного движения рамки, устанавливая для суммы величин $R + R_g$ значение, равное 1,1 полного критического сопротивления.

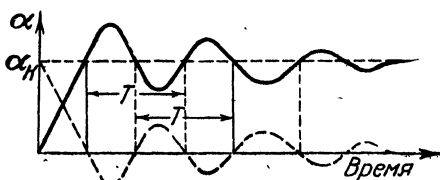


Рис. 4.

2. Увеличивая трение, т. е. уменьшая сопротивление R внешней цепи гальванометра так, чтобы P^2 стало больше $4KD$, мы заставим поворачиваться рамку гальванометра тоже аperiodически, но с меньшей скоростью (см. кривые II и III рис. 3). В этих случаях гальванометр называется переуспокоенным.

3. Если между постоянными гальванометра имеет место неравенство $P^2 < 4KD$, то движение рамки происходит периодически (колебательно). На рис. 4 сплошная кривая изображает движение рамки в этом случае после замыкания цепи гальванометра, а пунктирная — то же после размыкания.

Колебательный характер движения рамки гальванометра описывается периодом T колебания и величиной затухания колебаний. Декремент затухания Δ определяется отношением двух следующих друг за другом амплитуд:

$$\Delta = \frac{A_1}{A_2} = \frac{A_2}{A_3} = \dots = \frac{A_n}{A_{n+1}}, \quad \text{где } A_n = \alpha_k \sqrt{\frac{\mu^2 + \omega^2}{\omega^2}} e^{-\mu n T} \quad (8)$$

(см. уравнение (6)). Натуральный логарифм этого отношения $\ln \Delta = \lambda$, называемый логарифмическим декрементом затухания, весьма просто зависит от соотношения постоянных гальванометра

$$\lambda = \frac{PT}{2K}.$$

Это выражение легко получить из уравнений (6) и (8).

Период колебаний T в свою очередь зависит от соотношения постоянных гальванометра. Из уравнения (6) находим

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{D}{K} - \frac{P^2}{4K^2}}}.$$

Из этого выражения видно, что у готового гальванометра период колебания рамки можно изменять, воздействуя на постоянную торможения P , ибо K и D не меняются.

При $P \approx 0$, чего можно достигнуть, заставляя работать гальванометр при разомкнутой цепи рамки, период колебания его подвижной системы

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{K}{D}}. \quad (9)$$

Период T_0 является, как мы увидим дальше, одной из основных характеристик гальванометра.

Из всего изложенного видно, что характер движения рамки (при неизменных K и D) легко и удобно изменяется в широких пределах — от периодического с малым затуханием и до аperiodического, причем тот или иной режим движения рамки достигается в основном регулированием постоянной электромагнитного торможения P_2 , а последняя зависит от сопротивления внешней цепи, на которую замкнута обмотка рамки прибора. На этом же основан способ быстрого успокоения колебаний рамки (демпфирование). Достаточно ее обмотку замкнуть накоротко в тот момент, когда она в процессе колебаний проходит через положение покоя (нуля), чтобы она быстро остановилась.

Для уяснения вопроса о том, от каких факторов зависит чувствительность гальванометра, полезно выразить ее теперь в функции периода колебаний рамки и критического сопротивления гальванометра. Из ранее приведенных выражений имеем

$$R_g + R = \frac{B^2 n^2 Q^2}{2\sqrt{KD}} \quad \text{и} \quad T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{K}{D}},$$

но $S = BnQ/D$, следовательно,

$$S^2 = \frac{2(R_g + R)\sqrt{KD}}{D^2} = \frac{(R_g + R)T_0}{\pi D}. \quad (10)$$

Таким образом, при заданном периоде гальванометра (практически 1—5 сек) чувствительность пропорциональна корню квадратному из критического сопротивления, которое, казалось бы, надо поэтому делать возможно большим. Однако надо иметь в виду, что увеличение значения критического сопротивления ведет к понижению вольтовой чувствительности прибора. Между тем именно вольтовая

чувствительность гальванометра определяет его ценность в целом ряде случаев.

В самом деле, гальванометр может иметь два разных назначения: либо он применяется как прибор для измерения малых токов, либо для измерения малых напряжений. Практически оказывается, что режимы работы цепей, в которых важно измерение малых токов и малых напряжений, в большинстве случаев резко различны. Так, измерение малых токов характерно для случаев, когда измерительная схема содержит большие сопротивления (фотоэлементы, ионные или электронные трубки). В этих случаях большие значения критического сопротивления гальванометра не являются помехой. Другое дело, когда гальванометр применяется для измерения малых разностей потенциала (термоэлектродвижущие силы, гальваномагнитные эффекты, включения гальванометра в потенциометрические или мостовые схемы). Обычно в этих случаях сопротивление той цепи, на которую включается гальванометр, невелико, и при больших значениях критического сопротивления прибора он будет практически полностью задемпфирован. Поэтому в таких случаях в цепь гальванометра, обладающего значительным критическим сопротивлением, приходится искусственно вводить последовательно с прибором дополнительное сопротивление, создающее для подвижной системы режим движения, более близкий к критическому. А это значит, что вольтовая чувствительность гальванометра будет практически определяться частным от деления его токовой чувствительности не на внутреннее сопротивление прибора, а на его критическое сопротивление.

Таким образом, чувствительный к току гальванометр, но с большим критическим сопротивлением оказывается часто, несмотря на формально значительную чувствительность, мало пригодным для измерения малых разностей потенциала. Между тем измерение малых разностей потенциала или контроль за доведением их до нуля является одним из распространеннейших назначений прибора, что можно легко проследить даже по задачам практикума. Изготовление гальванометров специально для этих целей с малым значением критического сопротивления не так просто, потому что значение критического сопротивления пропорционально величине тех же параметров (сравни соответствующие формулы), которые входят в выражение для токовой чувствительности, и растет пропорционально ее квадрату. Разумный компромисс между этими нелегко совмещаемыми требованиями и составляет трудную задачу конструктора прибора.

Из всего сказанного следует, что выбор гальванометра для рационального обслуживания заданной электрической схемы имеет большое значение для успеха измерений.

В данной задаче выполняются следующие упражнения: 1) определение чувствительности гальванометра к току; 2) определение

периода свободных колебаний рамки гальванометра; 3) определение внешнего критического сопротивления $R_{кр}$ гальванометра; 4) определение зависимости декремента затухания колебаний рамки гальванометра от величины внешнего сопротивления.

Упражнение 1

Определение чувствительности гальванометра к току

Для определения чувствительности гальванометра к току применяется схема, изображенная на рис. 5. Здесь E — аккумулятор на 1,4 в, R — делитель напряжения, V — вольтметр, R_0 — постоянное сопротивление (9000 ом), R_1 — магазин сопротивления (1—50 ом), R_2 — магазин сопротивления (1—9999 ом)¹⁾, G — гальванометр, K_1 — переключатель цепи гальванометра, K_2 — ключ для демпфирования гальванометра (см. стр. 100).

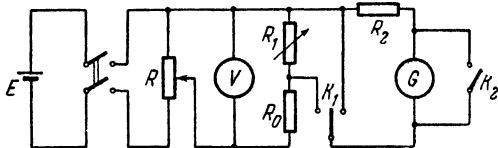


Рис. 5.

Сила тока в цепи гальванометра, как легко видеть из схемы, определяется следующим приближенным выражением:

$$i_g = \frac{V \frac{R_1}{R_0}}{R_g + R_2}, \quad (11)$$

где i_g — сила тока в цепи гальванометра, R_g — сопротивление рамки гальванометра. Значение R_g , входящее в формулу, может быть определено следующим образом.

При неизменном токе через гальванометр, но при различных значениях V и R_2 можно написать

$$\frac{V' \frac{R_1}{R_0}}{R_g + R_2'} = \frac{V'' \frac{R_1}{R_0}}{R_g + R_2''}, \text{ откуда } R_g = \frac{V'' R_2' - V' R_2''}{V' - V''}. \quad (12)$$

Входящие в правую часть формулы (12) величины определяются из опыта (см. ниже). Зная R_g , можно определить i_g , а затем и чувствительность к току по формуле

$$S_i = \frac{N}{i_g l} \quad (13)$$

¹⁾ В практикуме фактически R_1 и R_2 являются частями одного и того же магазина сопротивления КМС-6 с общим сопротивлением 99999,9 ом, имеющего независимые выводные клеммы от разных участков.

или динамическую постоянную по формуле

$$C_1 = \frac{i_g l}{N},$$

где N — число миллиметров отклонения светового указателя по шкале от нулевого положения, l — расстояние в метрах от шкалы до зеркальца гальванометра ¹⁾. Чувствительность обычно выражают в $мм$ отклонения, вызываемого током в $1 мка$ при расстоянии от зеркальца до шкалы в $1 м$ ($мм \cdot мка^{-1} м^1$).

Постоянная гальванометра определяется силой тока (в $ма$), вызывающей отклонение указателя на $1 мм$ при расстоянии от зеркала до шкалы в $1 м$ ($\frac{мка}{мм/м}$).

Зная чувствительность к току, легко получить чувствительность к напряжению (вольтовую чувствительность) ²⁾ по формуле

$$S_V = \frac{S_i}{R_g}. \quad (14)$$

Однако, как подробно указано выше, практически эту величину часто приходится заменять другой, именно

$$S'_V = \frac{S_i}{R + R_g} = \frac{S_i}{R_{кр}}. \quad (15)$$

В задаче подлежат вычислению вольтовые чувствительности, найденные и по формуле (14), и по формуле (15).

Измерения. Подбирая по два значения V и R_2 , дающих одинаковые отклонения гальванометра, по формулам (12), (13) и (14) определяют S_i , S_V и R_g . Для величин R_g и S_i должно быть получено не менее трех значений и подсчитаны ошибки измерения.

Практические замечания. 1. После сборки схемы (рис. 5) и проверки ее преподавателем необходимо установить шкалу так, чтобы изображение нити светового указателя отсчетного устройства находилось на средней части его шкалы.

2. Включить рубильник и установить напряжение по вольтметру $0,5—0,8 в$.

3. Включить сопротивление R_1 на $3—5 ом$, а сопротивление R_0 — на $9000 ом$ и после этого ключом K_1 включить гальванометр. Если отклонение будет невелико, то, уменьшая сопротивление R_2 , можно получить отклонение на $100—150 мм$ от нулевого положения и затем перейти к выполнению упражнения.

¹⁾ С отсчетным устройством гальванометра можно ознакомиться непосредственно в практикуме.

²⁾ Чувствительность к напряжению выражается в $мм \cdot мка^{-1} м^{-1}$.

*Упражнение 2***Определение периода свободных колебаний рамки гальванометра**

Для определения периода свободных колебаний рамки гальванометра необходимо получить отклонение светового указателя по шкале на 150—200 мм, а затем разомкнуть цепь гальванометра ключом K_1 . После этого следует измерить время нескольких полных колебаний рамки с помощью секундомера и найти их период T .

*Упражнение 3***Определение внешнего критического сопротивления гальванометра**

Получив отклонение светового указателя гальванометра на 150—200 делений, быстро переключают ключ K_1 таким образом, чтобы отделить гальванометр от источника напряжения и замкнуть рамку гальванометра на сопротивление R_2 . Ключ K_2 при этом, разумеется, остается все время разомкнутым. Затем наблюдают, в каком режиме движения (колебательном, аperiodическом) указатель подходит к нулевому положению. Наблюдения повторяют, уменьшая последовательно сопротивление R_2 до тех пор, пока движение рамки не станет аperiodическим¹⁾. Значение сопротивления R_2 , при котором движение рамки гальванометра становится аperiodическим, будет равно внешнему критическому сопротивлению гальванометра.

*Упражнение 4***Определение зависимости декремента затухания колебаний рамки гальванометра от величины внешнего сопротивления**

Схема остается без изменения, порядок работы такой же, как и в упражнении 3. В этом упражнении наблюдают за колебаниями светового указателя по шкале и записывают величину последовательных его отклонений вправо и влево (или в одну сторону). Произведя подобные измерения для различных сопротивлений R_2 , можно рассчитать декремент затухания и его зависимость от сопротивления внешней цепи гальванометра и построить график зависимости декремента затухания от внешнего сопротивления R_2 .

¹⁾ Разумеется, при каждом значении R_2 световой указатель будет в одном и том же режиме подходить как к нулевому положению (при вышеуказанной последовательности действий с ключом), так и к своему отклоненному положению (при обратном присоединении рамки гальванометра к источнику напряжения). Но практически удобнее вести наблюдения за режимом возвращения рамки к нулевому положению, так как отклоненное положение изменяется при подборе нужного значения сопротивления R_2 и цепь гальванометра остается при этом присоединенной ко всей схеме, что нежелательно при наблюдениях режима движения рамки.

Величину декремента определяют при значениях R_2 , не слишком близких к $R_{кр}$. Рекомендуемые для этого значения R_2 указаны непосредственно на установке задачи.

Технические данные установки. Работа поставлена с гальванометром марки М-21/2; сопротивления используемых магазинов указаны выше по ходу описания установки и измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.
2. О. В е р н е р, Чувствительные гальванометры постоянного и переменного тока, КУБУЧ, 1933.
3. Курс электрических измерений, под редакцией В. Г. П р ы т к о в а и А. В. Т а л и ц к о г о, Госэнергоиздат, 1960.
4. Г. П. Ш к у р и н, Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам, Военгиз, 1956.

З А Д А Ч А 84

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА ПОСРЕДСТВОМ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА

Измерение емкости конденсатора может быть произведено несколькими принципиально различными способами ¹⁾. В настоящей задаче в основу измерения емкости положено соотношение между зарядом конденсатора q , его емкостью C и разностью потенциалов на конденсаторе V . Если применить это соотношение к двум конденсаторам, заряженным до одной и той же разности потенциалов V , то легко прийти к соотношению $C_2 = C_1 q_2 / q_1$.

Из него видно, что если емкость одного из конденсаторов известна, то относительное измерение емкости двух конденсаторов сводится к сравнению их зарядов (при условии, что $V_1 = V_2$) ²⁾. Этот способ относительных измерений емкости и положен в основу настоящей задачи.

В данном случае сравнение зарядов конденсаторов выполняется баллистическим методом.

Значение баллистического метода измерения зарядов выходит далеко за пределы настоящего частного вопроса сравнения емкостей двух конденсаторов (см. задачи 85, 87, 102 и т. I, задачу 18). Названный метод является одним из важнейших приемов электрических, в особенности магнитных, измерений (см. задачи 85—87), к которым он был впервые применен профессором А. Г. Столетовым. Поэтому при выполнении задачи надо уделить особое внимание

¹⁾ См задачи 92 и 96.

²⁾ Если $V_1 \neq V_2$, то еще надо знать, в каком они находятся соотношении.

баллистическому методу измерения зарядов. тем более, что элементарные электростатические соображения, используемые для сравнения емкостей конденсаторов, делают цель применения этого метода совершенно ясной.

Краткая теория баллистического гальванометра. Баллистический гальванометр применяется для измерения количества электричества, протекающего по цепи за промежуток времени, малый по сравнению с периодом собственных колебаний рамки, и представляет собой особую разновидность гальванометра магнитоэлектрической системы, который описан в задаче 83. Кратковременные токи имеют место в схемах при разряде конденсатора, быстром изменении магнитного потока и т. д. Баллистический гальванометр отличается от обычного гальванометра магнитоэлектрической системы искусственным увеличением момента инерции его подвижной системы. Увеличение момента инерции обычного гальванометра может иногда

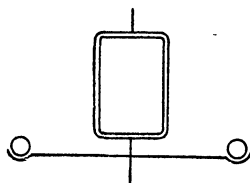


Рис. 1.

достигаться скреплением с подвижной системой двух стерженьков с чашечками на концах, в которых помещено по тяжелому шарику (рис. 1).

Движение рамки баллистического гальванометра в общем случае описывается уравнением того же типа, как и для обыкновенного гальванометра (см. задачу 83)

$$K \frac{d^2\alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + D\alpha = HnQi. \quad (1)$$

Однако так как при измерениях баллистическим гальванометром время протекания тока $\tau \ll T$ — периода собственных колебаний рамки гальванометра (или, вернее, времени первого отброса), то можно считать, что рамка начинает свое движение только после протекания тока и, таким образом, движение рамки в период времени $t > \tau$ описывается уравнением вида

$$K \frac{d^2\alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + D\alpha = 0. \quad (2)$$

Указанные особенности баллистического гальванометра обуславливают особый режим его работы и определяют его основные свойства: пропорциональность величины первого отброса рамки количеству электричества, протекшего через нее.

Не прибегая к решению дифференциального уравнения (2), найдем условия работы гальванометра упрощенным путем.

Выведем соотношение между q — количеством электричества, проходящим через обмотку рамки баллистического гальванометра (например, при разряде конденсатора через него), и α_0 — первым максимальным отклонением рамки от положения равновесия при условии отсутствия торможения ($P = 0$).

Так как за время τ прохождения тока рамка не успевает выйти из положения равновесия, то уравнение движения за время $t < \tau$ может быть упрощено и записано в виде

$$K \frac{d^2\alpha}{dt^2} = HnQi, \quad (3)$$

откуда

$$HnQ \int_0^\tau i dt = HnQq = K \frac{d\alpha}{dt}. \quad (4)$$

Здесь q — полное количество электричества, протекшее через гальванометр. При этом рамка приобретает кинетическую энергию, равную $\frac{1}{2} K \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)^2$. Эта энергия затрачивается на закручивание подвеса на угол α .

Момент сил кручения при угле поворота α есть $D\alpha$; при дальнейшем закручивании на угол $d\alpha$ работа сил кручения будет $D\alpha d\alpha$. Вся работа, затраченная на отклонение рамки, будет

$$\int_0^{\alpha_0} D\alpha d\alpha = \frac{D\alpha_0^2}{2}. \quad (5)$$

Таким образом,

$$\frac{D\alpha_0^2}{2} = \frac{1}{2} K \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)^2, \text{ или } K \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)^2 = D\alpha_0^2. \quad (6)$$

Возводя в квадрат уравнение (4) и деля его на уравнение (6), получаем

$$K = \frac{H^2 n^2 Q^2 q^2}{D\alpha_0^2}. \quad (7)$$

Период свободных колебаний разомкнутой рамки гальванометра $T_0 = 2\pi \sqrt{K/D}$ (см. задачу 83), или $K = T_0^2 D / 4\pi^2$; подставляя K в уравнение (7), получаем

$$\frac{T_0^2 D}{4\pi^2} = \frac{H^2 n^2 Q^2 q^2}{D\alpha_0^2}.$$

Отсюда

$$q = \frac{T_0}{\pi} \frac{D}{HnQ} \frac{\alpha_0}{2} = \frac{T_0}{2\pi} C\alpha_0, \text{ или } q = B\alpha_0, \quad (8)$$

где $B = CT_0/2\pi$, а C есть динамическая постоянная гальванометра. Величина B носит название баллистической постоянной гальванометра.

Приведенный вывод основан на предположении, что рамка при своих колебаниях не испытывает никаких тормозящих воздействий. Практически это не совсем так, поэтому связь между q и α_0 на самом деле несколько сложнее.

Метод и схема измерения. Как было только что показано, отклонение баллистического гальванометра пропорционально количеству электричества, протекшему за короткий промежуток разряда конденсатора через гальванометр. Если q известно, то выражение (8) дает возможность, измерив α , определить B .

Так как практически отклонение α гальванометра всегда отсчитывается по линейной шкале (см. задачу 83), то удобнее B выразить через смещения светового указателя по шкале

$$\alpha = \frac{n}{2l},$$

где l — расстояние от зеркала гальванометра до шкалы и n — число делений, которое отсчитывается по шкале; отсюда

$$q = \frac{B}{2l} n,$$

т. е. n зависит от l . Но для каждой данной установки l обыкновенно не меняется; поэтому, обозначив $B' = B/2l$, получим $q = B' n$ и

$$B' = \frac{q}{n} = \text{const}, \quad (9)$$

где B' выражено уже в кулонах на деление шкалы (в условиях данной установки).

Практически B и B' можно определить, разряжая через баллистический гальванометр конденсатор известной емкости C , заряженный до известной разности потенциалов V и, следовательно, содержащий заряд

$$q = CV. \quad (10)$$

Для определения B и B' составляют электрическую цепь по схеме, изображенной на рис. 2. Постоянный ток от сети подводится через рубильник S на столе к концам реостата R , включенного в качестве делителя напряжения. От одного из этих концов

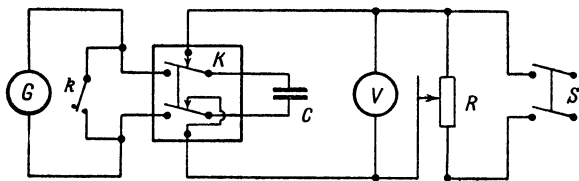


Рис. 2.

и ползунка напряжение подводится через двойной ключ K к обкладкам конденсатора C . Напряжение это можно изменять путем передвижения ползунка в ту или иную сторону и измерять вольтметром V . Так как напряжение в сети может колебаться, то за вольтметром надо постоянно следить и в случае, если будет замечено

изменение напряжения, немедленно компенсировать его соответствующим передвижением ползунка. При нажатии ключа K замыкается сначала цепь зарядки конденсатора, а затем последний замыкается на гальванометр G .

Параллельно гальванометру включен ключ k , назначением которого является замыкание цепи индуктивных токов (см. задачу 83), возникающих в катушке гальванометра при ее качании. Торможение рамки осуществляется действием магнитного поля магнита гальванометра на индуктивные токи, возникающие в его рамке. Ключ этот должен замыкаться после отклонения гальванометра в тот момент, когда после отсчета световой указатель опять проходит через нулевое деление шкалы.

Измерения. 1. Определение баллистической постоянной установки. Включают в схему эталонный конденсатор C_0 . Замкнув рубильник S и передвигая контакт реостата, устанавливают по вольтметру какое-либо определенное напряжение, например 100 в. Затем ключом K быстро включают заряженный конденсатор на гальванометр и отмечают то крайнее деление шкалы, до которого передвинется световой указатель во время первого колебания. Замыкая ключ k , успокаивают гальванометр в момент возвращения светового указателя к нулевому делению. Определив таким образом несколько раз показание гальванометра (не менее пяти раз), подставляют среднее значение его в формулу (9) и определяют B' .

2. Измерение емкости конденсаторов. Из выражений (9) и (10) имеем

$$C = \frac{B'n}{V}, \quad (11)$$

отсюда следует, что, зная B' и V и измерив n , можно определить емкость неизвестного конденсатора C . Для этого в схеме (рис. 2) включают вместо эталона конденсатор неизвестной емкости и измеряют аналогично предыдущему отклонение светового указателя гальванометра. По полученным данным вычисляют C по формуле (11).

Таким образом измеряется емкость нескольких конденсаторов, а затем их емкость при параллельном и последовательном соединении между собой. Эти результаты сопоставляются с расчетами суммарной емкости при параллельном и последовательном соединении конденсаторов.

Практические указания. Ввиду того что в задаче пользуются напряжением в 120 в, возникает опасность при малейшей неисправности цепи пережечь гальванометр. Поэтому необходимо:

1. Ни в коем случае не включать ток до проверки соединений преподавателем.

2. Все переключения конденсаторов производить с возможной тщательностью и обязательно при выключенном рубильнике S и замкнутом ключе k .

3. По выполнении переключений сначала включать рубильник S и затем уже размыкать ключ k .

4. Соединение приборов производить исключительно целыми проводами с неповрежденной изоляцией.

Технические данные установки. В работе используется баллистический гальванометр М-21/2, конденсаторы емкостью $\sim 0,01$ мкф, питание осуществляется от аккумуляторной сети напряжением 110 в.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.
2. Курс физики, под редакцией Н. Д. П а п а л е к с и, т. II, Гостехиздат, 1948.
3. А. И. Т у д о р о в с к и й, Электричество и магнетизм, ч. II, ОНТИ, 1935.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

4. Е. А. С в и р с к и й, Общий курс электрических и магнитных измерений, Оборонгиз, 1939.
5. Курс электрических измерений, под редакцией В. Г. П р ы т к о в а и А. В. Т а л и ц к о г о, Госэнергониздат, 1960.

З А Д А Ч А 85

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ЖЕЛЕЗЕ БАЛЛИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Описание метода и установки. Магнитная индукция B ферромагнитных веществ — железа, кобальта, никеля и специальных ферромагнитных сплавов, находящихся в магнитном поле, — нелинейно зависит от напряженности H этого магнитного поля. Исследованию этой зависимости B от H и посвящена настоящая задача.

На рис. 1 в виде примера дана кривая зависимости магнитной индукции B от напряженности магнитного поля внутри вещества для чистого мягкого железа. Форма кривой зависит не только от химического состава вещества, но и от его температуры, от предшествующей термообработки исследуемого образца и от существующих в нем упругих напряжений. Эти факторы должны учитываться при исследовании магнитных свойств вещества.

Впервые полное экспериментальное исследование зависимости B от H было произведено в 1871—1872 гг. профессором Московского университета А. Г. Столетовым. Он разрешил чрезвычайно важный при магнитных измерениях вопрос о том, как от исследования магнитных свойств образца данной геометрической формы перейти к магнитной характеристике вещества, из которого сделан образец, что, разумеется, совершенно необходимо для выяснения физики

процесса намагничивания вещества. Решение этого вопроса важно потому, что магнитную индукцию вещества имеет смысл исследовать только как функцию напряженности магнитного поля внутри испытуемого образца, т. е. как функцию так называемого истинного магнитного поля. Величина же напряженности магнитного поля внутри образца, вообще говоря, не совпадает со значением напряженности внешнего магнитного поля, в которое помещен исследуемый образец.

Столетов указал, как учитывать влияние геометрической формы образцов, взятых для измерений, при оценке результатов измерений, т. е. как переходить от значения напряженности внешнего магнитного поля к значению напряженности истинного магнитного поля. Только после этого из магнитных измерений начали получать результаты, характеризующие свойства вещества независимо от того, на образцах какой формы было проведено исследование. Столетов указал также такую форму образцов (тороид или тор), для которых напряженность внутреннего поля в образце равна напряженности внешнего магнитного поля.

В необходимости учета геометрической формы образцов легко убедиться, получая магнитные спектры образцов разной формы при помощи железных опилок, насыпаемых вблизи образцов, находящихся в магнитном поле. Обращает на себя внимание различное рассеяние линий сил магнитного поля на границах образцов, а следовательно, и различная структура магнитного поля внутри различных образцов даже в одинаковых внешних магнитных полях. Отсюда и возникает трудность перехода от измеряемых значений напряженности внешнего поля к значениям напряженности истинного магнитного поля внутри образца, в функции которого надо строить кривую индукции. Проще всего вопрос решается в том случае, когда линии сил магнитного поля равномерно расположены во всем объеме образца и нигде не пересекают его поверхности.

Примером такого поля является поле в случае кольцеобразного тороидального образца, намагничиваемого кольцевой обмоткой, намотанной на тот же образец (B на рис. 2). При достаточно малом

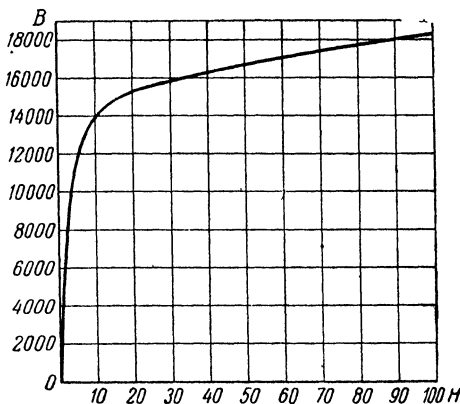


Рис. 1.

радиусе поперечного сечения тора по сравнению с радиусом самого тора магнитное поле, создаваемое током, текущим по обмотке, однородно; оно остается таким и внутри образца. Линии сил не пересекают поверхности образца и образуют систему концентрических окружностей вокруг общего с железным тором центра. Полученные экспериментальные данные о магнитном поле не нуждаются в этом случае в сложных поправках на форму образца. Именно такой образец используется в настоящей задаче.

В остальных случаях необходимо учитывать влияние концов образца, где линии сил под разными углами выходят из образца. Очевидно, что эти концевые эффекты могут вести только к ослаблению магнитного поля внутри образца. По этой причине поправки,

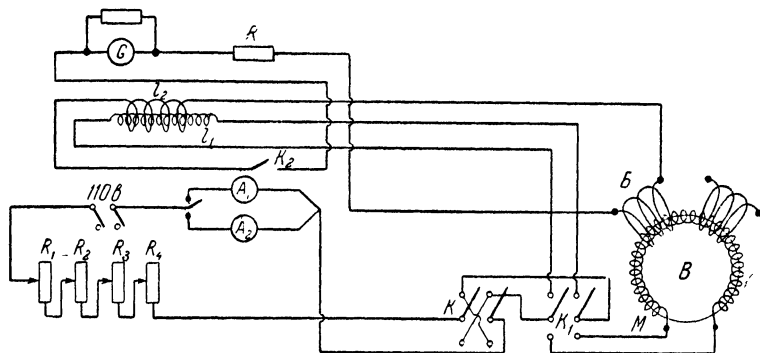


Рис. 2.

вводимые на форму образца и совершенно необходимые для перехода от значений напряженности магнитного поля вне образца к значениям H внутри образца, носят общее название — размагничивающий фактор.

Для используемого в настоящей задаче тороида размагничивающий фактор равен нулю, и напряженность внешнего поля совпадает с напряженностью истинного поля внутри образца.

Экспериментальное исследование кривой индукции может быть проведено различными методами. В данной задаче используется предложенный Столетовым и ставший классическим и наиболее распространенным баллистический метод, дающий простыми экспериментальными средствами надежные количественные результаты.

Сущность баллистического метода, применяемого также и в других магнитных задачах практикума, заключается в следующем.

Баллистический гальванометр (см. общую теорию гальванометра в описаниях задач 83 и 84) включается в цепь катушки, поме-

щаемой в магнитное поле, напряженность которого подлежит изменению. Размер катушки определяется степенью неоднородности поля. Очевидно, чем неоднороднее поле, тем меньше должна быть катушка. Магнитный поток через катушку

$$\Phi = BS N_{\text{изм}},$$

где S — сечение одного витка катушки, а $N_{\text{изм}}$ — число ее витков. При изменении магнитного потока через измерительную катушку, включенную в цепь гальванометра, в ней возникнет электродвижущая сила индукции $\epsilon = -d\Phi/dt$. Кроме того, поскольку сила тока в цепи гальванометра и катушки при изменении магнитного потока во времени t по произвольному закону не будет постоянна, в катушке и в рамке гальванометра возникнет также э. д. с. самоиндукции $-LdI/dt$, где L — коэффициент самоиндукции всей этой цепи. Сила тока в цепи гальванометра определится, согласно закону Кирхгофа, выражением

$$-\frac{d\Phi}{dt} = RI + L\frac{dI}{dt},$$

где R — активное сопротивление рамки гальванометра и измерительной катушки. Интегрируя выражение закона Кирхгофа за время τ прохождения импульса индукционного тока в измерительной цепи, имеем $\Delta\Phi = R\int_0^{\tau} I dt + L(I_{\text{кон}} - I_{\text{нач}}) = Rq$, где q — элект-

рический заряд, протекший в цепи. Мы учли, что $I_{\text{кон}} = I_{\text{нач}} = 0$. Отсюда следует, что при изменении магнитного потока на величину $\Delta\Phi$ через измерительную катушку в цепи гальванометра пройдет количество электричества $q = \Delta\Phi/R$.

Отброс баллистического гальванометра, как известно, пропорционален количеству протекшего через него электричества, если время протекания заряда мало по сравнению с периодом гальванометра. Следовательно, если в катушке, соединенной с гальванометром, достаточно быстро изменится магнитный поток, то отброс баллистического гальванометра пропорционален изменению магнитного потока. Из измеренной величины отброса гальванометра можно определить величину изменения магнитного потока, а затем — индукцию магнитного поля.

Изменение магнитного потока через катушку в изучаемом магнитном поле можно осуществить двумя способами: 1) изменяя положение измерительной катушки в магнитном поле, например, поворачивая ее; 2) изменяя магнитный поток за счет изменения мощности источников магнитного поля.

В случае изучения магнитного поля, создаваемого током, удобно, не производя никаких геометрических перемещений в поле, изменять ток в создающих поле катушках. Проще всего это производить, изменяя направление тока на обратное. Такое изменение

направления тока носит название коммутации тока. При коммутации тока вектор B меняет направление на обратное, следовательно, изменение магнитного потока через измерительную катушку будет $\Delta\Phi = 2BSN_{\text{изм}} = qR$, откуда

$$B = \frac{qR}{2SN_{\text{изм}}}. \quad (1)$$

Описанный прием коммутации тока широко применяется при магнитных измерениях, в частности и в этой задаче.

На часть испытуемого тороида, кроме основной намагничивающей обмотки, намотанной равномерно на протяжении всего тороида, намотана (непосредственно по поверхности тороида) еще измерительная обмотка, включенная в цепь баллистического гальванометра. При коммутации тока в намагничивающей обмотке в измерительной обмотке проходит импульс тока. Количество электричества, протекающего при этом через цепь гальванометра, определяет его отброс. Если известна чувствительность гальванометра, то по формуле (1) можно определить индукцию B .

Напряженность магнитного поля H находится расчетным путем. В самом деле, применяя к намагничивающей обмотке формулу

$$H = 0,4\pi nI, \quad (2)$$

где n — число витков на единицу длины средней линии соленоида, можно после измерения силы тока I в намагничивающей обмотке найти все нужные значения H .

Практически, однако, не градуируют баллистическую установку для измерения заряда, но поступают иначе, сводя все измерения к сравнению индукции в испытуемом образце с другим известным магнитным полем. Для этого, помимо тороида с обмоткой, пользуются еще совершенно независимым длинным прямым соленоидом без сердечника с тесно расположенными нитками. Поле в таком соленоиде, называемом нормальной катушкой, рассчитывается по такой же формуле (2), как и поле в тороиде, причем длина нормальной катушки обеспечивает достаточную точность в оценке H . На нормальной катушке имеется своя короткая измерительная обмотка, включаемая также в цепь баллистического гальванометра.

Пусть произведена коммутация тока в нормальной катушке. Тогда отброс гальванометра β будет пропорционален известным изменениям магнитного потока через измерительную обмотку нормальной катушки

$$\Delta\Phi = 2HS_{\text{норм}}N_{\text{изм}} = 2 \cdot 0,4\pi n_{\text{норм}}IS_{\text{норм}}N_{\text{изм}} = A\beta, \quad (3)$$

где H — магнитное поле в нормальной катушке, $S_{\text{норм}}$ и $N_{\text{изм}}$ — соответственно сечение нормальной катушки и общее число витков надетой на нормальную катушку измерительной катушки, $n_{\text{норм}}$ —

число витков на единицу длины нормальной катушки и A — так называемая постоянная баллистической установки ¹⁾).

Подсчитывая магнитный поток через измерительную катушку, надетую на нормальную катушку или железный тороид, мы должны тем не менее учитывать сечение не измерительной катушки, а *нормальной* катушки или *тороида*. Это связано с тем, что магнитное поле практически целиком сосредоточено в сечении нормальной катушки или тороида. Увеличение геометрических размеров измерительной катушки за пределы сечения нормальной катушки или тороида не приведет к увеличению магнитного потока через нее. Другое дело, если измерительная катушка помещается *внутри* нормальной катушки. Тогда всякое увеличение размеров измерительной катушки будет приводить к перехватыванию ею все большего магнитного потока и в расчетную формулу должна входить площадь сечения измерительной катушки (см. описание задачи 86). Из формулы (3) получаем для A выражение

$$A = \frac{0,8\pi l_{\text{норм}} S_{\text{норм}} N_{\text{изм}} I}{\beta} \quad (4)$$

Пусть при работе с тороидом гальванометр дает отброс α . Тогда

$$\Delta\Phi_{\text{тор}} = 2BS_{\text{тор}}N_{\text{тор}} = A\alpha,$$

где $S_{\text{тор}}$ и $N_{\text{тор}}$ — соответственно сечение тороида и полное число витков его измерительной обмотки. Отсюда

$$B = \frac{A\alpha}{2S_{\text{тор}}N_{\text{тор}}}.$$

Подставляя значения постоянной A , окончательно получим для индукции в железе

$$B = \frac{0,4\pi l_{\text{норм}} N_{\text{изм}}}{N_{\text{тор}}} I \frac{\alpha S_{\text{норм}}^2}{\beta S_{\text{тор}}} \quad (5)$$

Таким образом, измерения индукции в тороиде основаны на сравнении отбросов гальванометра при коммутации тока в нормальной катушке и при коммутации тока в намагничивающей обмотке тороида. Как было указано выше, отбросы баллистического гальванометра пропорциональны количеству электричества, протекающего во время импульса тока через рамку гальванометра,

¹⁾ Поскольку магнитные поля нормальной катушки и тороида сосредоточены исключительно в пределах их сечений, при подсчете магнитных потоков через измерительные катушки, надетые на нормальную катушку и тороид, мы должны учитывать сечения последних, но не сечения измерительных катушек.

²⁾ Буквы N с соответствующими индексами обозначают во всех случаях полное число витков катушек, величину, существенную для катушек измерительных. Буквы l обозначают число витков на единицу длины катушек, т. е. величину, существенную для катушек намагничивающих. Все данные, необходимые для расчетов по этой формуле, приведены в конце описания задачи под общим заголовком «Технические данные установки».

которое при заданном $\Delta\Phi$ обратно пропорционально сопротивлению цепи гальванометра. Отсюда следует, что при сравнительном методе измерений магнитных потоков, применяемом в настоящей задаче, сопротивление цепи гальванометра должно оставаться неизменным при всех измерениях. Для этого, однако, нет надобности делать равными сопротивления измерительных обмоток на тороиде и на нормальной катушке. Как видно из схемы на рис. 2, в цепь гальванометра всегда последовательно включены обе эти измерительные обмотки, и сопротивление его цепи остается всегда неизменным. Значительное расстояние между тороидом и нормальной катушкой исключает возможность индуктивных влияний на вторую измерительную катушку при коммутации тока в не сопряженной с ней намагничивающей обмотке.

Рассматривая метод коммутации тока при магнитных баллистических измерениях, надо обратить внимание и на то, что коммутация тока ведет к перемагничиванию образца. Именно, при каждом переключении тока меняются на обратные направления векторов H и B . Таким образом, при каждой коммутации тока вектор магнитной индукции описывает петлю гистерезиса, практически неизбежную в железе, а измеряемое значение B есть вершина такой частной петли гистерезиса, недоведенной, однако, до состояния насыщения. По мере роста магнитного поля намагничивающей обмотки размахи этих петель гистерезиса все увеличиваются. Соответственно этому искомая кривая зависимости индукции B от H представляет собой геометрическое место вершин частных петель гистерезиса, проходимых образцом при каждом перемагничивании.

Измерения. Измерения проводятся описанным выше методом с помощью схемы, изображенной на рис. 2, где B — намагничиваемый тороид, M — намагничивающая обмотка, B — баллистическая обмотка, G — баллистический гальванометр, R — магазин сопротивления $9999,9 \text{ ом}$ в цепи гальванометра (в цепь гальванометра из этого магазина сопротивления фактически введено 1500 ом с тем, чтобы световой указатель гальванометра не выбрасывало при работе за пределы шкалы прибора), A_1 — амперметр постоянного тока до 3 а , A_2 — миллиамперметр до 750 ма , I_1 и I_2 — первичная и вторичная обмотки нормальной катушки, K — коммутатор, K_1 и K_2 — переключатель и ключ.

Кривую индукции снимают в полях от 0 до 300 э . Нужные для получения этих полей значения силы тока в намагничивающей обмотке тороида вычисляют по формуле (2) ¹⁾.

В условиях задачи для питания нормальной катушки необходима сила тока $1\text{--}2 \text{ а}$. Насыщение индукции в тороиде наступает при силе тока в его обмотке в 2 а .

¹⁾ Необходимые для расчетов данные указаны в конце описания задачи под общим заголовком «Технические данные установки».

При сборке схемы следует обратить особое внимание на хорошую изоляцию намагничивающих обмоток и идущих к ним проводов от измерительной цепи гальванометра, чтобы не повредить зеркальный баллистический гальванометр с токовой чувствительностью порядка 10^{-8} а/мм.

Для того чтобы снять кривую индукции образца действительно с ее нулевого значения и исключить нелегко учитываемые эффекты остаточного намагничивания, образец перед измерениями должен быть заведомо размагничен. Процесс размагничивания проводится в данном случае циклическим путем. Это делают следующим образом. При разомкнутой цепи гальванометра и при выключенном точном амперметре в цепи намагничивающей обмотки тороида доводят силу тока в этой обмотке до 2 а. Затем, производя непрерывное коммутирование тока (несколько раз в секунду) в этой обмотке, медленно увеличивают сопротивление реостата, включенного в цепь той же обмотки, и снижают таким образом силу тока до нулевого значения. Многократно перемагничиваемый во все более слабых полях железный тороид после этого оказывается практически размагниченным.

Другой возможный прием размагничивания железных образцов заключается в пропускании через их обмотку переменного тока технической частоты. В таком магнитном поле образец также практически размагничивается. Однако в нашем случае большая самоиндукция намагничивающей обмотки, навитой на замкнутый железный тороид, не дает возможности создать в этой обмотке от сети с напряжением в 220 в переменный ток достаточной силы, почему и приходится прибегать к коммутации постоянного тока.

После размагничивания образца приступают к непосредственным измерениям индукции, начиная их, разумеется, при минимальных значениях силы тока в намагничивающей обмотке. Предварительное случайное (даже мгновенное) пропускание большого тока в этой обмотке исказит весь ход кривой индукции и потребует возобновления процесса размагничивания.

После промеров значений индукции приступают к калибровке баллистической установки при помощи нормальной катушки.

При производстве опытов необходимо подобрать во всех случаях такие значения силы тока, которые обеспечивали бы достаточно большие для точных отсчетов отклонения гальванометра. Разумеется, что этот подбор значений силы тока должен производиться в пределах нагрузок на обмотки, допускаемых их устройством. Все возникающие в связи с этим вопросы должны быть обязательно выяснены студентами у преподавателя при проверке схемы до ее включения.

Отчет о работе представляется в виде таблиц измерений, сводки значений всех параметров, входящих в окончательную расчетную формулу, таблицы вычисленных по формуле (5) значений магнитной

индукции и графика зависимости B от H . Величину H находят по формуле (2) для всех значений силы тока.

Таблица результатов

Сила тока I , ма	Отброс гальванометра, мм				Напряженность магнитного поля H , э	Магнитная индукция B , гс	Магнитная проницаемость, μ
	d_1	d_2	d_3	$d_{ср}$			

Технические данные установки. В работе используется баллистический гальванометр марки М-21/2, данные о прочих измерительных приборах приведены в тексте задачи по ходу изложения, все катушки и тороид изготовлены на физическом факультете университета.

Данные нормальной катушки: число витков на 1 см длины $n = 8,3$, сечение витка $S = 5,7 \text{ см}^2$, число витков вторичной обмотки $N_{изм} = 500$.

Данные тороида и его обмоток: число витков намагничивающей обмотки 3600, площадь сечения витка $S_{тор} = 0,785 \text{ см}^2$, число витков измерительной обмотки $N_{тор} = 7$, средний диаметр тороида 9,6 см.

Сопротивления в схеме: $R_1 = 50 \text{ ом}$, $R_2 = 400 \text{ ом}$, $R_3 = 2000 \text{ ом}$, сопротивление в цепи гальванометра $R = 1500 \text{ ом}$ введено в магазине сопротивления КМС-4.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.
2. Курс физики, под редакцией Н. Д. П а п а л е к с и, т. II, Гостехиздат, 1948.
3. Курс электрических измерений, под редакцией В. Г. П р ы т к о в а и А. В. Т а л и ц к о г о, Госэнергоиздат, 1960.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

4. Специальный физический практикум, под редакцией Г. В. С п и в а к, т. II, Гостехиздат, 1945.
5. С. В. В о н с о в с к и й и Я. С. Ш у р, Ферромагнетизм, Гостехиздат, 1948.
6. Н. С. А к у л о в, Ферромагнетизм, Гостехиздат, 1939.
7. А. Г. С т о л е т о в, Избранные сочинения, Гостехиздат, 1950.

ЗАДАЧА 86

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА НА ЕГО ОСИ

Напряженность магнитного поля, создаваемого цилиндрическим соленоидом на его оси OA (рис. 9), определяется формулой

$$H = 0,2\pi n' i (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1), \quad (1)$$

где i — сила тока в амперах, n' — число витков на 1 см длины

обмотки, α_1 и α_2 — углы, под которыми из точки наблюдения видны радиусы соленоида у его ближнего и дальнего концов. Если точка

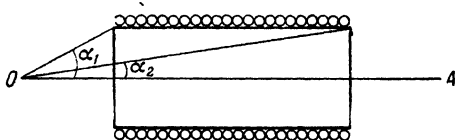


Рис. 1.

наблюдения лежит внутри соленоида, то угол α_1 тупой, и формула (1) примет вид

$$H = 0,2\pi n'i(\cos \alpha_2 + \cos \alpha_3), \quad (2)$$

где α_3 — дополнительный угол (рис. 2). В центре соленоида, длина l которого значительно больше его радиуса R , очевидно, имеем

$$H = 0,4\pi n'i, \quad (3)$$

а на его концах

$$H = 0,2\pi n'i. \quad (4)$$

При многослойной обмотке соленоида поле в точках наблюдения является результатом наложения полей отдельных слоев, каждое

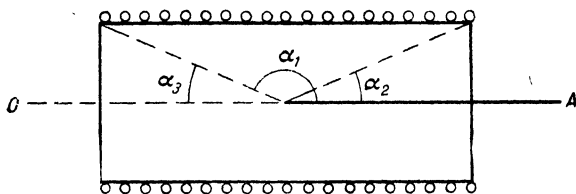


Рис. 2.

из которых рассчитывается по формуле (1). Поэтому, качественно, поле многослойного соленоида имеет такой же характер, как и поле однослойного.

Как видно из формулы (1), при удалении от центра соленоида вдоль его оси по направлению к концам поле будет уменьшаться.

Описание установки и метода измерения. Определение напряженности поля соленоида в настоящей задаче производится баллистическим методом (см. задачу 85). Установка (рис. 3) состоит из баллистического гальванометра G с нормальной катушкой H и на ней измерительной катушкой K_1 , служащих для определения баллистической постоянной гальванометра, измерительной

катушки K_2 , помещаемой в исследуемое поле многослойного соленоида C , реосгата R , амперметра A и переключателей I и II .

Нормальная катушка представляет собой длинный однослойный соленоид ¹⁾, на средней части которого плотно намотана также однослойная вторичная измерительная обмотка K_1 . Напряженность магнитного поля в средней части нормальной катушки

$$H = 0,4\pi n'_1 i,$$

где n'_1 — число витков первичной ее обмотки на сантиметр длины.

Магнитный поток, пронизывающий измерительную обмотку K_1 нормальной катушки, будет

$$\Phi = HS_1 n_1,$$

где S_1 — площадь сечения обмотки нормальной катушки, n_1 — число витков ее измерительной обмотки ²⁾.

При коммутировании тока в обмотке нормальной катушки ее измерительную обмотку пересечет магнитный поток, равный $2\Phi = 2HS_1 n_1$. При этом изменении потока на величину 2Φ в измерительной обмотке индуцируется электродвижущая сила, и в цепи

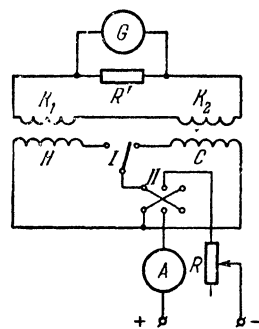


Рис. 3.

баллистического гальванометра возникает кратковременный индукционный ток. В результате этого рамка гальванометра даст отброс, а вместе с ней повернется и зеркальце гальванометра. Соответствующее повороту зеркальца смещение светового указателя (β мм) можно отсчитать по шкале.

Количество электричества, протекшее через обмотку при изменении магнитного потока на 2Φ , можно представить выражением

$$q = C\beta,$$

где C — баллистическая постоянная гальванометра. Постоянная C может быть определена в кулонах на 1 мм шкалы гальванометра или на единицу угла поворота светового указателя.

¹⁾ Величина отношения длины соленоида к его диаметру $\lambda = l/d > 25$ называется относительной длиной соленоида. Введение понятия относительной длины позволяет по принципам подобия описывать магнитные поля соленоидов различных размеров, но одинаковой относительной длины, коль скоро известно магнитное поле одного соленоида той же относительной длины.

²⁾ Относительно того, какую именно площадь сечения надо учитывать при подсчете магнитного потока через измерительную катушку, см. специальное замечание на стр. 115 в описании задачи 85. Там разъяснено, почему в расчетную формулу для магнитного потока через измерительную катушку может входить площадь сечения нормальной катушки. В данном случае это относится только к измерительной катушке K_1 , которая одета поверх нормальной катушки.

Полное количество электричества q , протекшее через обмотку, включенную на гальванометр, при изменении магнитного потока на 2Φ равно ¹⁾

$$q = \frac{2\Phi}{R},$$

где R — сопротивление баллистической цепи. Следовательно,

$$C = \frac{q}{\beta} = \frac{2\Phi}{\beta R} = \frac{2Hn_1S_1}{\beta R} = \frac{0,8\pi n'_1 n_1 S_1 i}{\beta R}.$$

В схеме измерительная обмотка нормальной катушки K_1 и измерительная катушка K_2 при всех измерениях остаются соединенными последовательно, и сопротивление цепи гальванометра остается всегда постоянным. В связи с этим удобнее пользоваться баллистической постоянной установки $C' = CR$:

$$C' = \frac{0,8\pi n'_1 n_1 S_1 i}{\beta}.$$

После того как постоянная установка C' определена с помощью нормальной катушки, включают в цепь с помощью переключателя I катушку соленоида.

Измерительная катушка K_2 , перемещаемая на стержне внутри исследуемого соленоида, имеет число витков N_2 , намотка ее однослойная, короткая, площадь сечения каждого витка равна S_2 . При коммутировании тока в соленоиде поле в измерительной катушке K_2 меняется от $+H_x$ до $-H_x$ на величину $2H_x$, а поток, пересекающий ее витки, на величину

$$2\Phi' = 2H_x S_2 N_2 = q'R. \quad (5)$$

Но заряд q' равен $C\alpha$, где α — отброс гальванометра (в *мм* шкалы) при переключении тока в соленоиде. Следовательно,

$$2\Phi' = C\alpha R. \quad (6)$$

Произведение CR равно постоянной установки C' , определенной ранее с помощью нормальной катушки.

Из соотношений (5) и (6) получаем

$$C\alpha = 2H_x S_2 N_2; \text{ отсюда } H_x = \frac{C'\alpha}{2N_2 S_2}. \quad (7)$$

Измерения. 1. Собрав схему согласно рис. 3, включают с помощью переключателя I нормальную катушку H и устанавливают реостатом R в ней ток не больше $0,9 \text{ а}$ ²⁾. Коммутируя ток ³⁾ в цепи

¹⁾ Обоснование этого соотношения см. в описании предшествующей задачи. Изменение магнитного потока $\Delta\Phi$ через измерительную катушку в нашем случае будет $\Delta\Phi = 2\Phi$, так как направление магнитного потока изменяется при коммутации тока на обратное.

²⁾ Необходимо установить реостат на максимальное сопротивление. Сечение провода обмотки и реостаты рассчитаны на максимальную нагрузку $0,9 \text{ а}$.

³⁾ Продолжительность коммутации (время переброса рубильника) должно быть мало по сравнению с периодом гальванометра. В противном случае гальванометр не будет работать в баллистическом режиме.

нормальной катушки при помощи переключателя II определяют отброс β и вычисляют баллистическую постоянную C' . Сделав 5—6 измерений при двух значениях силы тока, определяют среднее значение C' .

2. Включая в цепь с помощью переключателя I вместо нормальной катушки исследуемый соленоид C , устанавливают силу тока ($0,8 \text{ а}^1$). Измерительную катушку K_2 помещают возле одного из концов соленоида. Коммутируя ток переключателем II , получают отброс гальванометра α . Проведя это несколько раз, по формуле (7) вычисляют H_x .

Передвинув измерительную катушку на 2 см в глубь соленоида, повторяют измерения и т. д., пока не достигнут противоположного конца соленоида.

3. Вычислив все значения H_x , строят график, откладывая по оси ординат поле H_x , а по оси абсцисс — расстояние от конца соленоида. Полученная кривая представляет собой распределение напряженности поля вдоль оси соленоида (при данном отношении длины соленоида к его диаметру $\lambda = l/d$). Измерив длину l и средний диаметр соленоида d , находят его относительную длину λ , которую и указывают в примечании к полученному графику.

Технические данные установки. В работе используется баллистический гальванометр М-21/2, амперметр типа М-45 с шунтами, нормальная катушка имеет 8,2 витка на 1 см, площадь сечения витка 6 см^2 , измерительная катушка имеет 580 витков, площадь сечения витка $0,6 \text{ см}^2$.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, Гостехиздат, 1956.
2. Курс электрических измерений, под редакцией В. Г. П р ы т к о в а и А. В. Т а л и ц к о г о, Госэнергоиздат, 1960.

ЗАДАЧА 87

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ТЕЛА НА МАГНИТНУЮ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ И ПЕТЛЮ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНЕТИКА

Введение. Вектор намагничивания I (магнитный момент единицы объема магнетика, создаваемый в ферромагнитном теле заданным внешним полем H) зависит не только от магнитной восприимчивости χ материала, но и от формы тела. Если внести железный стержень цилиндрической формы в однородное магнитное поле так, чтобы направление последнего совпадало с осью стержня, то на его торцах появляются магнитные полюсы (рис. 1). Поле H_0 , создаваемое этими полюсами внутри образца, будет направлено

¹⁾ Соленоид долго под током держать не следует: он может сильно нагреться.

противоположно внешнему полю и поэтому ослабляет его действие. Истинное поле внутри образца

$$H_i = H_e - H_0,$$

следовательно, внешнее поле равно

$$H_e = H_i + H_0, \quad (1)$$

где H_0 — размагничивающее поле образца.

Величина размагничивающего поля H_0 зависит от формы тела и его намагниченности I . В области не слишком сильных полей, когда намагничение однородно на всех участках образца,

$$H_0 = NI. \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности N носит название размагничивающего фактора; он зависит от формы образца, возрастает с уменьшением длины цилиндрического (или призматического) образца и с увеличением его сечения. Размагничивающий фактор N равен нулю только в одном частном случае, когда образец имеет форму

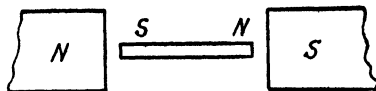


Рис. 1.

кольца (тороида), вдоль окружности которого направлено внешнее поле. Для цилиндрического образца размагничивающий фактор практически равен нулю, если отношение длины l к диаметру d достаточно велико; например, если $l/d \approx 300$.

В связи с возникновением размагничивающего поля внутри образца различают магнитную восприимчивость вещества χ_i , зависящую от структуры ферромагнетика:

$$\chi_i = \frac{I}{H_i}, \quad (3)$$

и восприимчивость тела (по Аркадьеву [3]) χ_0 , зависящую как от структуры, так и от формы тела:

$$\chi_0 = \frac{I}{H_e} = \frac{I}{H_i + H_0} = \frac{I}{H_i + NI}. \quad (4)$$

Влияние формы тела характеризуется размагничивающим фактором N . Только в том случае, когда $N = 0$ и, следовательно, $H_i = H_e$, магнитная восприимчивость (или проницаемость μ_i) определяется непосредственно по измеренным значениям поля H_e и намагниченности I (или индукции B ; $\mu_i = B/H_i$). Для определения χ_i или μ_i по измеренным значениям соответственно I или B при $N \neq 0$ необходимо определить величину последнего.

Нетрудно убедиться в том, что влияние формы тела на магнитные его свойства может сказаться сильнее, чем влияние структуры. Из формулы (4) следует, что при $NI \gg H_i$ величина $\chi_0 \approx 1/N$, т. е.

магнитная восприимчивость, определяется не структурой, а формой тела. Кривая Столетова (график зависимости $\mu = f(H)$) с резко выраженным максимумом магнитной проницаемости в случае короткого и толстого цилиндра вырождается в прямую. Наклон этой

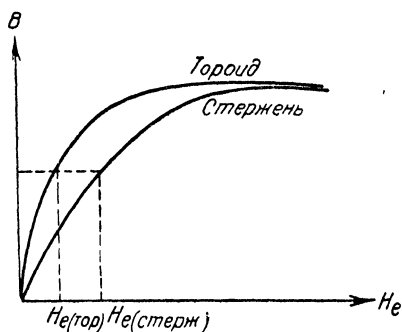


Рис. 2.

большие внутренние поля, а значит, и большее намагничение, чем в стержне (рис. 2). Обратно, для достижения одного и того же намагничения I и магнитной индукции B у тороида и у стержня необходимы различные внешние поля, чтобы внутренние поля были одинаковыми. Из последнего условия найдем различие необходимых внешних полей. Если $B_{(тор)} = B_{(стерж)}$, то и

$$H_{i(тор)} = H_{i(стерж)}. \quad (5)$$

Но $H_{i(тор)} = H_{e(тор)} (N = 0)$, а $H_{i(стерж)} = H_{e(стерж)} - NI$; отсюда

$$H_{e(стерж)} - H_{e(тор)} = NI. \quad (6)$$

Если сравнивать кривые намагничения тороида и стержня, то абсциссы точек с одинаковыми ординатами B различаются на NI . Таким образом, для каждого B может быть найдено соответствующее NI , а отсюда и N .

Определение N проводится в следующем порядке (рис. 3):

1. Вычисляют и строят кривые намагничения тороида и стержня

$$I = f(H_e) = \frac{B - H_e}{4\pi}.$$

2. Проводят на графике, где построены эти кривые, ряд прямых, параллельных оси абсцисс ($CADB$, $C'A'D'B'$, $C''A''D''B''$ и т. д.).

прямой, как можно видеть, определяется исключительно величиной размагничивающего фактора N .

В настоящей задаче определение размагничивающего фактора образца (цилиндра) производится путем сравнения кривой намагничения образца $B = f(H_e)$ с кривой намагничения тороида из того же материала.

В случае тороида эта кривая будет идти круче, так как при одном и том же внешнем поле в тороиде будут достигаться

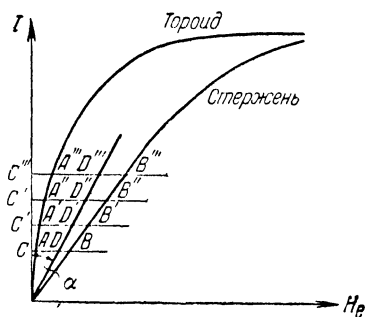


Рис. 3.

Не следует доходить до изгиба кривых B , так как в сильных полях N изменяется с возрастанием напряженности поля H .

3. На каждой прямой откладывают от оси ординат ее отрезок, заключенный между двумя кривыми ($I_{(\text{стерж})}$ и $I_{(\text{тор})}$): $CD = AB$, $C'D' = A'B'$, $C''D'' = A''B''$ и т. д.

4. Через концы отрезков проводят прямую $DD'D''D'''$. Ее наклон к оси ординат $\text{tg} \alpha$ и даст величину N .

Все, что было сказано о кривой намагничивания, относится и к кривой перемагничивания (петля гистерезиса).

Задача делится на два упражнения: 1) изучение влияния формы тела на ход кривой намагничивания, снятой баллистическим методом, и на петлю гистерезиса, снятую при помощи осциллографа; 2) определение N по тем же кривым.

Упражнение 1

Изучение кривой намагничивания баллистическим методом

О баллистическом методе см. задачу 84. Работа проводится на установке, схема которой изображена на рис. 4, где 1 и 2 — намагничивающая катушка и баллистическая обмотка на образце,

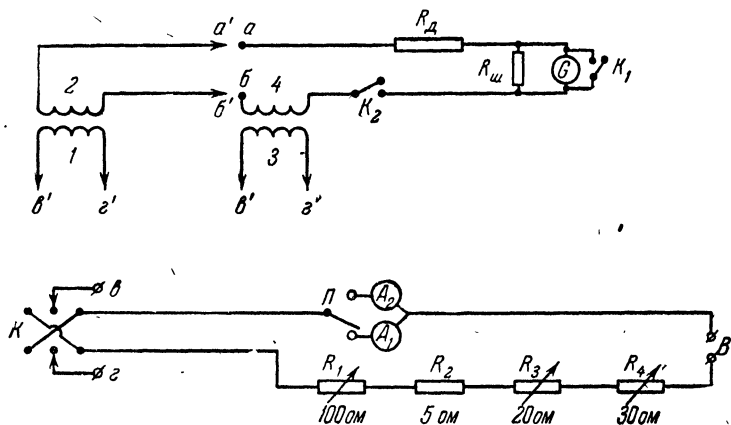


Рис. 4.

3 и 4 — нормальная катушка и ее вторичная обмотка ¹⁾, K — коммутатор тока, к концам $\varphi 2$ которого подключается намагничивающая катушка (или обмотка тороида), Π — переключатель приборов,

¹⁾ Нормальная катушка 3 и ее вторичная обмотка 4 использованы при определении баллистической постоянной гальванометра (численное значение постоянной дано на установке). Вторичная обмотка 4 нормальной катушки оставлена в цепи гальванометра для того, чтобы не изменить общего сопротивления измерительной цепи и тем самым значения баллистической постоянной.

A_1 — амперметр постоянного тока (2,5 а), A_2 — амперметр переменного тока, R_1, R_3, R_4 — движковые реостаты, R_2 — постоянное сопротивление (желательно безындуктивное), B — вилка питания, $R_{ш}, R_d$ — шунтирующее и дополнительное сопротивления цепи гальванометра, G — баллистический гальванометр.

Примечание. Баллистические обмотки 2 на тороиде и двух цилиндрических образцах имеют по 200 витков. Вторичная обмотка нормальной катушки 4 постоянно включена в измерительную цепь гальванометра. Намагничивающая катушка, служащая для намагничивания прямолинейных образцов, имеет 8 витков провода на 1 см длины. Намагничивающая обмотка тороида имеет также 8 витков на 1 см.

Измерения. Размагничение образца. Подключив концы $v'e'$ намагничивающей катушки к клеммам $вг$ коммутатора K и установив реостаты на максимум сопротивления, помещают один из цилиндрических образцов в катушку 1. Включив в цепь (с помощью переключателя Π) амперметр переменного тока A_2 , включают вилку питания B в розетку переменного тока и доводят с помощью реостата R_1 силу тока до значения, отвечающего полю насыщения образца, после чего ток медленно снижают до нуля. При этом остаточное намагничение уничтожается.

Намагничение образца. Закончив процесс размагничивания, включают амперметр постоянного тока A_1 , а вилку питания переключают в розетку постоянного тока. Далее баллистическую обмотку 2 образца присоединяют к клеммам a и $б$ и отпускают арретир гальванометра. Устанавливают с помощью реостатов ток 0,1 а и размыкают ключ K_1 . Замыкают цепь гальванометра ключом K_2 .

Коммутатором K меняют направление тока и фиксируют отброс гальванометра от нулевого положения. Увеличивая ток в намагничивающей цепи каждый раз на 50 ма, коммутируют ток и отмечают отброс гальванометра. После 400 ма интервалы увеличивают до 100 ма (измерения ведутся до 1,5 а). При каждом измерении записывают как отброс гальванометра, так и силу тока I . Такие измерения проводятся для трех образцов. (В нашей схеме при работе с тороидом при намагничивающем токе 0,5 а луч, отраженный от зеркальца гальванометра, уходит за пределы шкалы. Чтобы избежать больших отбросов, изменяют сопротивление шунта $R_{ш}$ от 5 до 2 ом. Сопротивление рамки гальванометра 35 ом.)

Вычисление и построение графиков $B = f(H_e)$, $I = f(H_e)$ и $\mu = f(H_e)$. Сначала строят графики $B = f(H_e)$ для всех трех образцов. Напряженность намагничивающего поля H_e вычисляется по формуле

$$H_e = 0,4\pi ni, \quad (7)$$

где n — число витков на 1 см длины намагничивающей катушки или обмотки тороида, i — намагничивающий ток в амперах.

Индукция B вычисляется по формуле

$$B = \frac{\alpha C}{2nS}, \quad (8)$$

где S — сечение образца в см^2 , n — число витков баллистической обмотки, α — отброс гальванометра в миллиметрах, C — баллистическая постоянная установки ($C = RC_r$, где R — сопротивление цепи гальванометра, C_r — баллистическая постоянная гальванометра).

Для тороида и двух цилиндрических образцов по вычисленным значениям B и H_e строятся графики $B = f(H_e)$ и $I = f(H_e)$.

Далее по известным значениям B и H_e вычисляется $\mu = B/H_e$ и строится график $\mu = f(H_e)$. По графикам $I = f(H_e)$ определяется величина размагничивающего фактора N .

Упражнение 2

Изучение влияния формы тела на петлю магнитного гистерезиса с помощью осциллографа

О катодном осциллографе см. задачу 109. Поместим ферромагнитный образец в переменное магнитное поле. Изображенная на рис. 5 схема позволяет с помощью интегратора импульсов

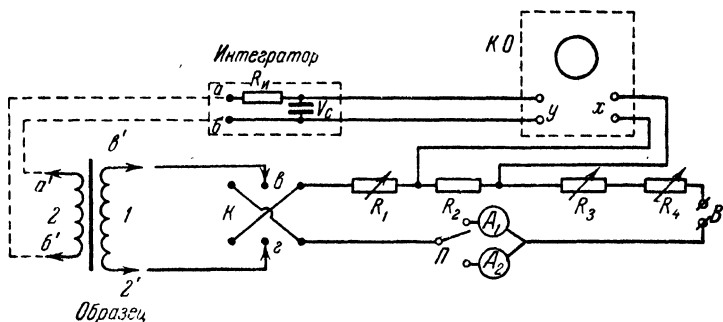


Рис. 5.

напряжения наблюдать петлю гистерезиса на экране катодного осциллографа КО.

Поясним принцип действия интегратора (схема изображена на рис. 6). Напряжение на конденсаторе

$$V_c = \frac{1}{C} \int i dt.$$

При достаточно больших величинах сопротивления R_u и емкости C напряжение на емкости V_c значительно меньше напряжения E

на клеммах ab ($V_C \ll E$), поэтому

$$V_C = \frac{1}{C} \int_0^t i dt = \frac{1}{C} \int_0^t \frac{E - V_C}{R} dt \approx \frac{1}{RC} \int_0^t E dt.$$

Пренебрегая незначительным падением напряжения в обмотке 2 (рис. 5), принимаем, что напряжение E на клеммах ab равно электродвижущей силе, индуцируемой в обмотке 2, которая равна — $d\Phi/dt$. Поэтому можно считать, что $\int E dt$ и, следовательно, напря-

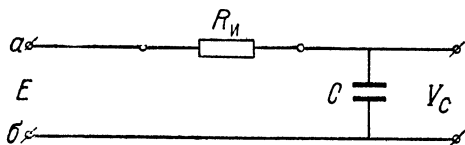


Рис. 6.

осциллографа подводится напряжение, снимаемое с небольшого сопротивления R_2 (около 5 ом), стоящего в намагничивающей цепи схемы (рис. 5). Это напряжение пропорционально силе тока и, следовательно, напряженности магнитного поля, действующего на исследуемый образец.

Интегратор смонтирован, и выводы его постоянно подключены к вертикальному усилителю осциллографа.

Намагничивающая цепь на рис. 5 состоит из тех же элементов, что и намагничивающая цепь на рис. 4.

Измерения. Включив обмотку тороида или намагничивающую катушку в коммутатор K , присоединяют выводы $a'b'$ обмотки, наложенной на исследуемый образец, к клеммам ab интегратора. Включают цепь переменного тока и зарисовывают форму петли гистерезиса при силе тока 0,5 а. Одновременно наносят на рисунок осевые линии сетки экрана осциллографа. Опыт выполняется с тороидом и двумя цилиндрическими образцами.

Для удобства изучения влияния формы образца, петли гистерезиса, соответствующие одной силе тока, наносятся на один рисунок.

Технические данные образцов и приборов. Для выполнения работы должны быть приготовлены три образца, отличающиеся по величине размагничивающего фактора N .

Один выполняется в виде тороида диаметром 10 см, два других — в виде цилиндров длиной 100 и 300 мм. Все образцы должны быть изготовлены из одного прутка мягкой углеродистой стали одного диаметра (6—8 мм). Для изготовления тороида отрезок прутка необходимой длины изгибается в кольцо и концы его свариваются.

¹⁾ Если на эти пластины подать прямо (помимо интегратора) напряжение с клемм ab , то оно будет пропорционально не индукции B , а величине $\frac{dB}{dt}$.

После этого тороид и цилиндрические образцы отжигаются одновременно два часа при 900°C .

Баллистические обмотки 2 (рис. 4 и 5) на тороиде и двух цилиндрических образцах должны быть одинаковы. Они состоят из 200 витков проволоки ПЭШ диаметром 0,15 мм и положены непосредственно на образцы (одним слоем). Перед наложением обмотки поверхность образцов следует покрыть тонким слоем изолирующего лака. Намагничивающая катушка для прямолинейных образцов имеет длину 600 мм и внутренний диаметр 12 мм. На каждый сантиметр длины положено 8 витков проволоки ПЭ диаметром 1,25. Намагничивающая обмотка тороидов также имеет 8 витков на 1 см такой же проволоки и положена одним слоем вдоль всего периметра кольца (поверх вторичной обмотки).

Нормальная катушка используется в первом упражнении для определения баллистической постоянной установки. Ее каркасом служит цилиндр из эбонита или гетинакса (можно полый) длиной 1 м и диаметром 5 см. В средней части каркаса положена однослойная вторичная обмотка, состоящая из 300 витков проволоки ПШД диаметром 0,15 мм. Поверх ее вдоль всего цилиндра положена однослойная первичная обмотка проводом ПЭ диаметром 1,25 мм.

В схеме первого упражнения используется: 1) баллистический гальванометр марки М-21/2; 2) магазин сопротивлений марки Р-14; 3) амперметр постоянного и переменного тока Ц-312 с различными пределами измерения; 4) двухполюсный переключатель на 5 а; 5) реостаты «Рустрат» на 100, 200, 300 и 5 ом (см. схему на рис. 5). Во втором упражнении используются те же реостаты, осциллограф ЭО-4 с сеткой на экране для зарисовки изображения петли гистерезиса и интегратор импульсов напряжения, обладающий емкостью 2 мкф и сопротивлением ~ 10 ком (рис. 6). В вертикальном усилителе напряжения, подаваемого от интегратора, используется большая чувствительность осциллографа ЭО-4 (25 мм на 1 в).

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. Калашников, Электричество, § 115—119, стр. 240—249; § 122, стр. 256—260, «Наука», 1964.
2. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева, Курс общей физики, т. II, § 202—204, стр. 313—327, Физматгиз, 1962.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

3. В. К. Аркадьев, Электромагнитные процессы в металлах, ОНТИ, 1934.
4. С. В. Вонсовский и Я. С. Шур, Ферромагнетизм, Гостехиздат, 1948.

ЗАДАЧА 88

МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КРИВОЙ НАМАГНИЧЕНИЯ, ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА И ТОЧКИ КЮРИ

Задача знакомит студента с магнитометрическим методом измерения магнитных моментов. Используемый для этой цели астатический магнитометр позволяет производить измерения магнитного момента ферромагнетика в слабых (по сравнению с магнитным полем Земли) магнитных полях. Идея метода заключается в сравнении магнитного момента исследуемого образца с магнитным моментом соленоида (рис. 1).

Для сравнения магнитных моментов образца 1 и соленоида 6 их помещают по разные стороны и на равном расстоянии от аstaticеского подвеса 3. Последний состоит из двух одинаковых магнитов 2, укрепленных на легком стерженьке, подвешенном на вольфрамовой нити, расположенных горизонтально, антипараллельно, в одной вертикальной плоскости. Между магнитами на стерженьке укреплено зеркальце 9 для отсчета угла поворота аstaticеской системы под действием магнитного поля намагниченного образца 1 или компенсирующего поля соленоида 6.

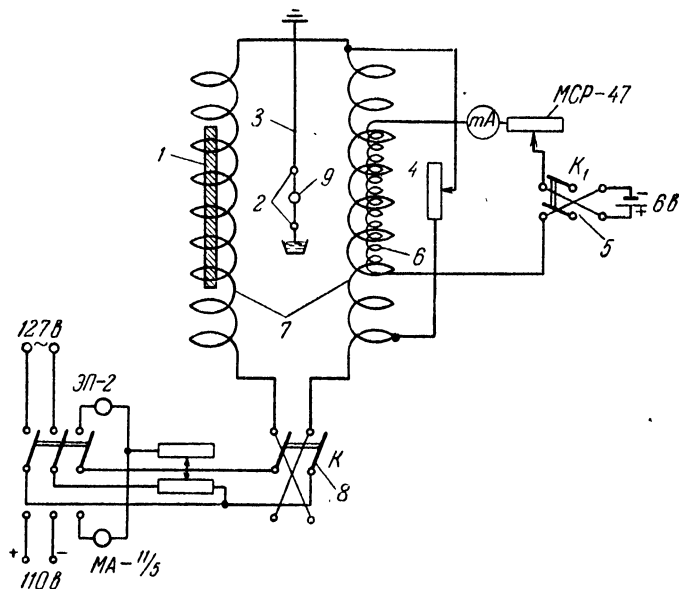


Рис 1.

При пропускании тока по намагничивающей катушке 7 находящийся в ней исследуемый образец 1 намагничивается и своим полем вызывает поворот аstaticеского подвеса. Затем включается компенсационный соленоид 6, и ток в нем подбирается такого направления и силы, чтобы под действием его магнитного поля аstaticеский подвес вернулся в нулевое положение. При этом устанавливается равенство магнитных моментов образца и компенсационного соленоида, а численная величина магнитного момента M определяется по приводимой ниже формуле (1).

Основной частью обычного магнитометра, как известно, служит магнитная стрелка, подвешенная на нити. Величина направляющей силы такого магнитометра определяется направляющей силой нити подвеса и действующим магнитным полем Земли. Чувствительность прибора ограничена тем, что вращению стрелки, подвешенной на

нити, противодействует магнитное поле Земли. Кроме того, магнитометр подвержен действию посторонних однородных и неоднородных полей. Чувствительность магнитометра повышается, а действие посторонних однородных полей исключается применением астатической системы магнитов.

Вращающие моменты антипараллельно ориентированных магнитов астатического подвеса в однородном поле, в частности в магнитном поле Земли, равны и прямо противоположны. Таким образом, исключается действие магнитного поля Земли и увеличивается чувствительность магнитометра.

Астатическая система магнитов подвешена к винту, укрепленному к крышке деревянного футляра, стенки которого застеклены. Астатический подвес 3 расположен посередине между двумя намагничивающими катушками 7, закрепленными неподвижно. Катушки включаются так, чтобы действие их на астатическую систему взаимно компенсировалось. Для удобства компенсации правая катушка магнитометра шунтируется. Ток, отвечаемый в шунт 4 для точной компенсации полей намагничивающих катушек, регулируется магазином сопротивлений МКМС. Компенсация проверяется в отсутствие образца при коммутации тока переключателем К в цепи намагничивающих катушек. При полной компенсации астатический подвес не реагирует на возникающие и исчезающие при коммутации тока поля. Над намагничивающими обмотками 7 на каждой из катушек по всей ее длине положена однослойная обмотка 10 (рис. 2), которая служит для компенсации вертикальной составляющей магнитного поля Земли. Величина тока, необходимая для компенсации магнитного поля Земли в данной установке, порядка 12 ма.

Исследуемый образец 1 помещается строго вертикально в нешунтируемую намагничивающую катушку 7 так, чтобы центр образца находился на одном уровне с центром астатической системы. Прежде чем начать измерения, включают катушки 10, компенсирующие магнитное поле Земли (см. схему), и размагничивают испытуемый образец: для этого намагничивающие катушки, как это показано на схеме включения (рис. 1), могут быть приключены к сети переменного тока. Максимальный допустимый ток в нашей установке равен 4 а.

При включении постоянного тока образец намагничивается и вызывает поворот астатической системы. Изменяя величину намагничивающего поля, мы изменяем магнитный момент образца и соответствующий ему угол поворота астатической системы. Последний регистрируется по шкале с помощью зрительной трубы и луча, отраженного от зеркала, укрепленного на астатическом подвесе. Измерения ведутся нулевым методом с помощью компенсационного соленоида 6. Компенсационный соленоид расположен на таком же расстоянии от астатического подвеса, что и испытуемый образец.

Центр компенсационного соленоида находится на одном уровне с центром астатической системы. По току в компенсационном соленоиде определяется магнитный момент исследуемого образца.

Вычисление магнитного момента образца. Компенсационный соленоид имеет однослойную обмотку, магнитный момент M которого можно определить, если известны его сечение S , число витков n и ток I , обтекающий соленоид [1]

$$M = ISn \text{ или } M = k_1 I, \quad (1)$$

где $k_1 = Sn$. В нашей установке $Sn = 1588$.

Упражнение 1

Измерение кривой намагничивания и петли гистерезиса ферромагнетиков

Измерив объем образца ¹⁾ v и определив магнитный момент M в поле H , можно вычислить намагничение J и восприимчивость χ :

$$J = \frac{M}{v}, \quad (2)$$

$$\chi = \frac{J}{H}. \quad (3)$$

Внешнее поле H вычисляют по формуле $H = 0,4\pi N I_n = k_2 I_n$, где N — число витков на единицу длины намагничивающей катушки, I_n — намагничивающий ток, а $k_2 = 0,4\pi N = 92,6$ (для нашей установки). Измеренные и вычисленные величины сводятся в таблице.

Намагничивающий ток I_n	Напряженность магнитного поля H	Компенсирующий ток I , а	Магнитный момент образца M	Намагниченность образца J	Восприимчивость χ

Для снятия кривой намагничивания необходимо измерить магнитные моменты образца в полях разной напряженности, изменяя намагничивающий ток от 0 до 1,5 а.

Для получения половинки петли гистерезиса необходимо измерить магнитные моменты образца в полях от $+H_{\max}$ до $-H_{\max}$, изменяя соответственно ток от +1,5 до -1,5 а.

По окончании вычислений необходимо построить кривые $J(H)$ и $\chi(H)$.

¹⁾ Длина образца измеряется миллиметровой линейкой, сеченье определяется по диаметру, измеренному микрометром.

Упражнение 2

Определение точки Кюри

Для определения точки Кюри включают нагреватель 11 (рис. 2) в сеть переменного тока. При постоянном поле H , соответствующем в нашей установке намагничивающему току 1 а , измеряются магнитные моменты образца при разных температурах. Изменение температуры образца достигается регулированием тока в нагревательной (бифилярной) обмотке автотрансформатором ЛАТР-1.

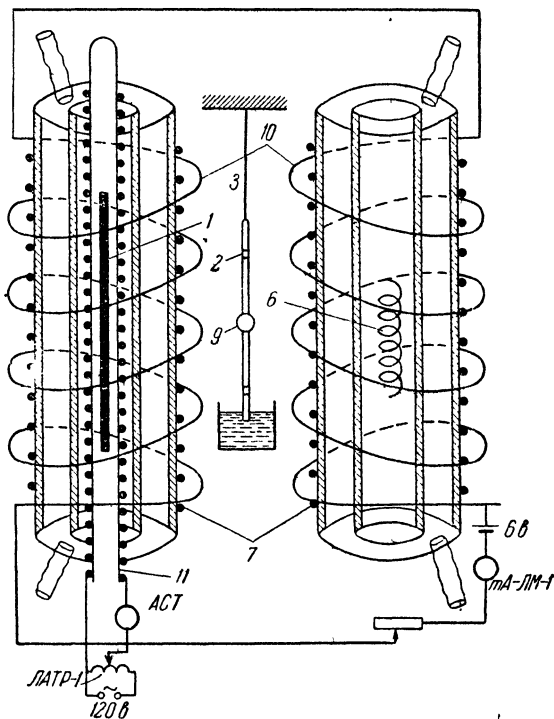


Рис. 2.

Температура определяется термопарой, вставленной в нагреватель снизу (на рис. 2 не показана). По полученным результатам строится кривая зависимости намагниченности от температуры и определяется температура Кюри.

Технические данные установки. Астатический магнитометр, используемый в настоящей задаче, изготовлен на физическом факультете МГУ. Кроме того, в электрической цепи астатического магнитометра используются следующие типовые приборы (см. рис. 1 и 2): 1) амперметр постоянного тока М-30 с пределами измерения от 0,03 до 1,5 а (или типа МА-11/5). Один прибор этого типа

требуется для измерения тока в цепи компенсационного соленоида 6; 2) миллиамперметр ЛМ-1 на 30 *ма* в цепи соленоидов 10, компенсирующих магнитное поле Земли (рис. 2); 3) магазин сопротивлений МКМС — шунт 4 к правой намагничивающей катушке 7; 4) магазин сопротивлений МСР-47 для тонкой регулировки тока в цепи компенсационного соленоида 6; 5) амперметр переменного тока на 5 *а* АСТ или ЭП-2 для измерения размагничивающего тока; 6) две аккумуляторные батареи типа 5НКН-100 на 6,25 *в*, одна для питания цепи компенсационного соленоида 6 (рис. 1), другая — для питания цепи, компенсирующей магнитное поле Земли (рис. 2); 7) трехполюсный переключатель, служащий как для включения намагничивающих катушек в цепь переменного тока для размагничивания образца или постоянного тока для намагничивания образца, так и для соответственного включения в цепь амперметра переменного тока ЭП-2 или прибора постоянного тока МА-11/5 или М-80 (рис. 1); 8) два двухполюсных переключателя 8 и 5 для изменения направления тока в цепи намагничивающих катушек и цепи компенсирующего соленоида при снятии петли гистерезиса; 9) автотрансформатор ЛАТР-1 для регулировки напряжения и силы тока в нагревательной обмотке; 10) милливольтметр МП-28 и к нему самодельная немагнитная термопара, изготовленная из немагнитного нихрома и константана, для измерения температуры нагревательной печи; 11) амперметр переменного тока марки АСТ на 5 *а* для измерения тока в цепи нагревательной обмотки; 12) реостаты «рустрат»: на 5000 *ом* — 0,2 *а*, 2000 *ом* — 0,15 *а* (2 шт.), 1500 *ом* — 0,35 *а*, 150 *ом* — 1,5 *а* (3 шт.), 18 *ом* — 5 *а*, 400 *ом* — 1 *а* (2 шт.).

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.
2. С. Ф р и ш и А. Т и м о р е в а, Курс общей физики, т. II, Физматгиз, 1962.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

3. И. В. А н т и к и Е. И. К о н д о р с к и й и др., Магнитные измерения, Гостехиздат, 1939.
4. С. В. В о н с о в с к и й и Я. С. Ш у р, Ферромагнетизм, Гостехиздат, 1948.

З А Д А Ч А 89

ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЙ СТАБИЛИЗАТОР НАПРЯЖЕНИЯ

Настоящая работа знакомит студента с принципом действия стабилизатора напряжения, основанном на явлении феррорезонанса.

Теория. Точные измерения в электрических схемах, питаемых от сети переменного тока, а также нормальная работа другой аппаратуры невозможны, если не устранить влияния колебаний напряжения сети.

Феррорезонансный стабилизатор напряжения автоматически стабилизирует напряжение, подводимое от питающей сети. Его простейшая электрическая схема представляет собой трансформатор с железным сердечником, в цепи первичной обмотки которого последовательно включен конденсатор.

На клеммах вторичной обмотки стабилизатора напряжение остается постоянным при изменении в пределах нескольких десятков вольт напряжения сети, питающей первичную цепь трансформатора.

Представим себе, что напряжение, поданное на первичную обмотку I трансформатора (рис. 1), и сила тока достаточны, чтобы довести магнитную индукцию сердечника до величины, соответствующей насыщению. Тогда дальнейшее возрастание напряжения на клеммах первичной обмотки не будет практически изменять величину э. д. с. $E = -d\Phi/dt$, наводимой во вторичной обмотке II .

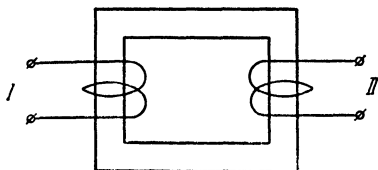


Рис. 1.

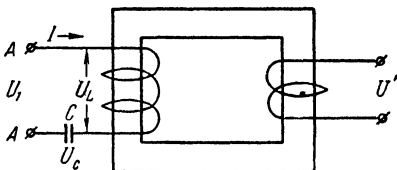


Рис. 2.

Если бы насыщение железа достигалось, например, при 100 в, то колебания напряжения в первичной обмотке от 100 до 220 в не вызвали бы изменения напряжения на клеммах вторичной обмотки ¹⁾.

Большое индуктивное сопротивление первичной обмотки, связанное с наличием железного сердечника, препятствует достижению насыщения последнего при малых напряжениях на клеммах первичной обмотки. Преодолеть это препятствие можно компенсацией влияния индуктивного сопротивления первичной катушки действием конденсатора, включенного последовательно в цепь этой катушки (рис. 2). Резонанс в этой цепи, присоединенной к источнику переменного синусоидального напряжения частоты ω , имеет место при соблюдении известного соотношения $\omega L = 1/\omega C$. Индуктивность L пропорциональна магнитной проницаемости сердечника трансформатора μ и изменяется по кривой, аналогичной кривой Столетова $\mu = f(H)$ (рис. 3). Поэтому величина L зависит от силы тока I в катушке I (рис. 1): $L = \varphi(I)$.

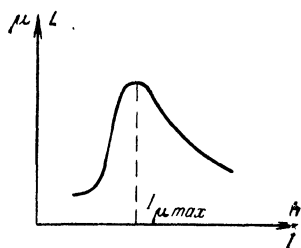


Рис. 3

Для нашего случая

$$\omega \varphi(I) = \frac{1}{\omega C}, \text{ т. е. } \omega = \sqrt{\frac{1}{C\varphi(I)}}.$$

¹⁾ Мы пренебрегаем незначительным влиянием поля H , возбуждаемого самой катушкой, так как в формуле $B = H + 4\pi I_s$ после достижения величины намагничивания насыщения I поле H будет много меньше $4\pi I_s$. В замкнутом сердечнике из трансформаторного железа $I_s \approx 1700$ ед. достигается при H порядка 100 э, т. е. H составляет 0,5% от величины $4\pi I_s$.

Следовательно, каждой емкости в зависимости от силы тока соответствует множество резонансных частот. Состояние резонанса в электрической цепи, содержащей железо; при заданной емкости может быть достигнуто либо изменением частоты подводимого напряжения, либо при постоянной частоте изменением приложенного напряжения U^1 , а следовательно и тока I . Ниже мы рассмотрим случай, когда частота приложенного напряжения ω остается постоянной, а состояние резонанса достигается изменением силы тока в последовательной цепи конденсатора и первичной обмотке трансформатора.

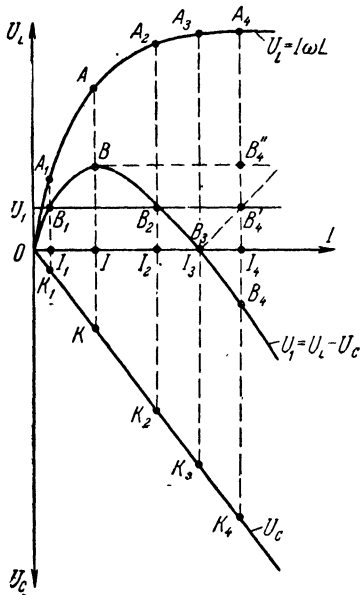


Рис. 4.

$OK_1KK_2K_3K_4$ (рис. 4). Напряжение же на клеммах катушки U_L , напротив, опережает ток I по фазе на 90° : $U_L = I\omega L$. Так как L пропорционально магнитной проницаемости сердечника трансформатора μ и, следовательно, изменяется по кривой, аналогичной кривой Столетова $\mu = f(H)$ (рис. 3), то U_L с увеличением силы тока I в области от $I = 0$ до $I = I_{\text{макс}}$ растет очень быстро. После того, как μ и L достигли максимального значения, т. е. при силе $I \geq I_{\text{макс}}$, рост U_L резко замедляется за счет уменьшения коэффициента самоиндукции L , вызванного уменьшением магнитной проницаемости. Напряжение U_1 на клеммах цепи первичной обмотки (рис. 2) равно разности напряжений на катушке U_L и конденсаторе U_C , так как U_L и U_C взаимно противоположны по фазе.

Для изменения силы тока мы будем изменять напряжение U_1 на клеммах этой цепи (рис. 2) от нуля до максимального значения напряжения сети. Учтем, что активное сопротивление обмотки мало по сравнению с индуктивным. Предположим также, что при синусоидальном внешнем напряжении U_1 ток I и индуктивное напряжение U_L изменяется тоже по гармоническому закону. Пренебрегая искажением кривой тока I при насыщении, мы не изменим качественной стороны рассматриваемого явления.

Напряжение на клеммах конденсатора U_C отстает по фазе от тока на 90° и изменяется пропорционально силе тока I по прямой

¹⁾ Здесь и далее речь идет об амплитудных значениях I и U .

При силе тока $I < I_{\mu\max}$ $U_L > U_C$, например, рис. 4, при силе тока I_1 $U_L = I_1 A_1 > U_C = I_1 K_1$ и $U_1 = U_L - U_C = I_1 A_1 - I_1 K_1 = I_1 B_1$,

при силе тока I $U_L = IA > U_C = IK$ и $U_1 = U_L - U_C = IA - IK = IB$,

при силе тока I_2 $U_L = I_2 A_2 > U_C = I_2 K_2$ и $U_1 = U_L - U_C = I_2 A_2 - I_2 K_2 = I_2 B_2$,

при силе тока I_3 $U_L = U_C$.

Изменение U_1 представлено кривой $OB_1BB_2B_3B_4$. Ординаты ветви $OB_1BB_2B_3$ этой кривой лежат выше оси абсцисс, т. е. ток отстает от внешнего напряжения на 90° , так как $U_L > U_C$. В интервале сил токов от 0 до I_3 , где $U_L > U_C$ — фаза напряжения, U_L совпадает с фазой напряжения U_1 , приложенного к клеммам AA цепи первичной обмотки трансформатора.

Ветвь B_3B_4 кривой U_1 при силе тока $I > I_3$ соответствует $U_C > U_L$. Например, при силе тока I_4 $U_C = I_4 K_4 > U_L = I_4 A_4$ и $U_1 = U_C - U_L = I_4 K_4 - I_4 A_4 = I_4 B_4$. В последнем случае фаза напряжения U_L противоположна фазе U_1 , а сила тока опережает по фазе напряжение U_1 . На рис. 4 ветвь B_3B_4 кривой U_1 показана над осью абсцисс пунктирной линией B_3B_4 .

Резонанс наступает, когда напряжение на клеммах первичной обмотки U_L равно напряжению на конденсаторе U_C , однако экспериментально это состояние резонанса нельзя получить по следующим причинам. Рассматривая кривую $OB_1BB_2B_3B_4$, мы видим, что при внешнем напряжении $U_1 = OU_1 = I_1 B_1 = I_2 B_2 = I_4 B_4$ возможны три значения тока OI_1, OI_2, OI_4 . Из этих трех состояний устойчивыми будут только I_1 и I_4 , так как они соответствуют участкам OB и B_3B_4 кривой $OB_1BB_2B_3B_4$, на которых с увеличением напряжений U_1 ток I растет. Силе тока I_2 соответствует неустойчивое состояние, так как на участке BB_3 с уменьшением приложенного к первичной цепи напряжения U_1 ток I увеличивается. Поэтому, если внешнее напряжение U_1 постепенно возрастает от нуля, то ток I , а также напряжения U_L и U_C будут расти. Когда внешнее напряжение U_1 достигает величины $IB = I_4 B_4'$, сила тока увеличивается скачком от OI до OI_4 . Минув неустойчивую резонансную область BB_3 , ток изменяет свою фазу на противоположную. При силе тока OI_4 $U_C > U_L$; $U_1 = U_C - U_L = I_4 K_4 - I_4 A_4 = I_4 B_4' = I_4 B_4$ и U_1 совпадает по фазе с U_C , а сила тока I , в отличие от участка, находящегося в интервале от 0 до I_3 , опережает внешнее напряжение на 90° .

Значительное увеличение силы тока в первичной обмотке трансформатора вследствие скачка, наблюдаемого в резонансной области, уже при малом приложенном внешнем напряжении U_1 доводит магнитную индукцию сердечника до насыщения. В связи с этим достигается необходимое условие для стабилизации напряжения во вторичной обмотке трансформатора.

При заданном коэффициенте самоиндукции первичной обмотки трансформатора можно регулировать по своему желанию величину внешнего напряжения U_1 , при котором наступает скачок силы тока I , изменяя для этого емкость C и, следовательно, наклон кривой OU_C (рис. 4).

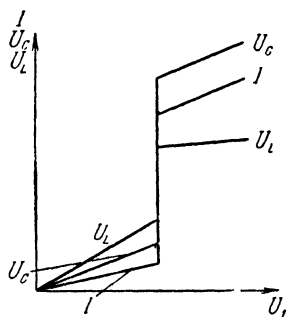


Рис. 5.

На рис. 5 схематически показано изменение силы тока I , напряжения на катушке U_L , на конденсаторе U_C в зависимости от внешнего напряжения сети U_1 .

При малых значениях величины U_1 и, следовательно, силы тока I величина $U_L = I\omega L$ растет быстрее $U_C = I/\omega C$, так как коэффициент самоиндукции L также растет с увеличением I .

После скачка силы тока I напряжение U_C больше напряжения U_L и по-прежнему растет пропорционально току I , U_L

же практически изменяется мало, так как рост U_L за счет увеличения тока компенсируется уменьшением коэффициента самоиндукции, вызванного уменьшением величины магнитной проницаемости μ сердечника в области, близкой к насыщению железа.

Измерения. Электрическая схема феррорезонансного стабилизатора напряжения, изучаемого в настоящей задаче, дана на рис. 6. Чтобы было легче достигнуть насыщения железа в одной части

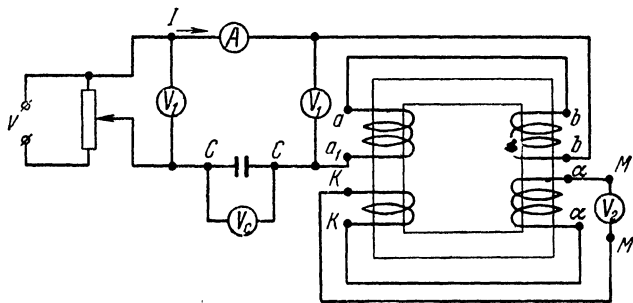


Рис. 6.

сердечника трансформатора, где помещена вторичная обмотка bb , сечение сердечника уменьшено. Первичная обмотка состоит из двух секций aa_1 и bb , которые соединены последовательно и размещены на толстой и тонкой частях сердечника трансформатора.

Стабилизированное напряжение U_2 снимается с клемм MM . Небольшое изменение $U_{2\text{стаб}}$, снимаемое с клемм $\alpha\alpha$, наблюдается и после того, как достигнуто насыщение железа. Это объясняется возрастанием магнитного потока намагничивающей катушки с уве-

личением тока I уже после скачка. Э. д. с., наведенная во вспомогательной катушке KK , включается навстречу э. д. с., индуктируемой в обмотке aa , таким образом достигается совершенная стабилизация напряжения во вторичной обмотке.

Сначала снимают кривые изменения силы тока I в первичной обмотке трансформатора и напряжения U_2 на клеммах MM вторичной обмотки в зависимости от напряжения U_1 при закороченных (вилкой) клеммах конденсатора CC (рис. 6).

В этом случае по полученным кривым убеждаются в плавном увеличении I в первичной обмотке и в отсутствие стабилизированного напряжения во вторичной обмотке.

Затем включают конденсатор C . Изменяя с помощью потенциометра напряжение U_1 , снимают одновременно кривые $I = f(U_1)$; $U_2 = \varphi(U_1)$; $U_L = \psi(U_1)$ и $U_C = \xi(U_1)$. По снятым кривым легко установить:

а) наличие скачков силы тока I (рис. 5), напряжения U_2 , а также U_L и U_C при некотором определенном значении приложенного внешнего напряжения U_1 ;

б) интервал значений U_1 , в пределах которого U_2 стабилизировано.

Достигнув максимального значения силы тока при $U_{1\max}$, уменьшают напряжение U_1 потенциометром и убеждаются, что скачок силы тока, напряжения U_2 , а также U_L и U_C происходит при силе тока значительно меньшей величины I_4 , так как участок I_3I_4 (рис. 4) отвечает устойчивым состояниям.

Кривые $U_2 = \varphi(U_1)$; $U_L = \psi(U_1)$; $U_C = \xi(U_1)$, полученные во втором упражнении, следует нанести на один график в одинаковом масштабе.

Технические данные установки. В настоящей задаче используется феррорезонансный стабилизатор напряжения, изготовленный на физическом факультете МГУ по схеме, приведенной на рис. 2 и 6. Сечение железа трансформатора в широкой части, несущей первичную обмотку (клеммы aa_1 , рис. 6) и компенсационную обмотку (клеммы KK), равно 18 см^2 . В узкой части трансформатора, несущей половину первичной обмотки (клеммы bb) и вторичную обмотку (клеммы aa), сечение железа равно 11 см^2 . Первичная обмотка имеет 835 витков провода марки ПЭ диаметром $1,1 \text{ мм}$. Вторичная обмотка имеет 440 витков проволоки ПЭ диаметром $0,7 \text{ мм}$. Компенсационная обмотка имеет 170 витков проволоки ПЭ диаметром $0,7 \text{ мм}$. Емкость конденсатора равна 8 мкф . В схеме (рис. 6) используются следующие приборы: автотрансформатор ЛАТР-1 для изменения напряжения U_1 , два вольтметра Ц-312 со шкалами на 600 в для измерения напряжения U_L и U_C , вольтметры марки АСТ на 300 и 150 в для измерения U_1 и стабилизированного напряжения на вторичной обмотке U_2 .

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964, §§ 122, 105, 245—246.
2. С. Ф р и ш и А. Т и м о р е в а, Курс общей физики, т. II, §§ 203, 224, 232, Физматгиз, 1962.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

3. К. К р у г, Основы электротехники, т. 2, Госэнергоиздат, 1952.

4. С. Л и в ш и ц, Феррорезонансные стабилизаторы напряжения, Госэнергоиздат, 1951.

З А Д А Ч А 90

ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ И ПОДВИЖНОСТИ
НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Введение. Важными величинами, характеризующими свойства полупроводников, являются концентрация носителей заряда и их подвижность. Существенно также знать тип проводимости, т. е. знак носителей заряда. Целью настоящей задачи является ознакомление студентов с одним из наиболее распространенных методов измерения этих величин, основанном на измерении электропроводности или удельного сопротивления полупроводников и постоянной Холла.

Известно, что электропроводность σ связана с концентрацией носителей заряда и их подвижностью уравнением

$$\sigma = enb, \quad (1)$$

где n — концентрация носителей заряда, e — заряд электрона, b — подвижность. С другой стороны, концентрация носителей заряда обратно пропорциональна так называемой постоянной Холла R :

$$n = \frac{K}{R}, \quad (2)$$

где K — числовой коэффициент.

Таким образом, если измерить электропроводность или обратную ей величину ρ — удельное сопротивление ($\rho = 1/\sigma$), а также постоянную Холла R , можно вычислить концентрацию носителей заряда и их подвижность¹⁾.

Удельное сопротивление полупроводника можно определить, если измерить падение напряжения U между зондами, соприкасающимися с поверхностью полупроводника на некотором определенном расстоянии l вдоль проводника при прохождении через него постоянного тока I :

$$\rho = \frac{US}{Il} \text{ ом} \cdot \text{см}, \quad (3)$$

где S — поперечное сечение образца.

¹⁾ Выражения (1) и (2) справедливы для полупроводников с преобладанием одного типа носителей заряда.

С другой стороны известно, что если образец, по которому идет ток I , поместить в магнитное поле, вектор напряженности H которого перпендикулярен направлению тока I , в нем возникает поперечное электрическое поле напряженностью E (явление Холла) в направлении, перпендикулярном току I и полю H (рис. 1). При этом зонды, помещенные на противоположных боковых поверхностях (xz) пластинки, покажут наличие разности потенциалов

$$U_H = Ed = R djH, \quad (4)$$

где d — расстояние между зондами, а j — плотность тока в образце.

Если образец представляет плоскопараллельную пластинку толщиной a в направлении магнитного поля, то, очевидно, получим

$$U_H = R \frac{IH}{a}. \quad (5)$$

Таким образом, зная силу тока через образец, величину магнитного поля, толщину пластины в направлении поля и измерив поперечную разность потенциалов (между электродами Холла — зондами), можно определить постоянную Холла R .

Зная величину R , можно вычислить концентрацию носителей заряда n . Простой расчет без учета закона распределения электронов по скоростям приводит к значению постоянной Холла $R = 1/en$. Более точный расчет с учетом закона распределения скоростей и применением при этом классической статистики приводит к выражению для постоянной Холла

$$R = \frac{3\pi}{8en}, \quad (6)$$

применение статистики Ферми — Дирака дает значение $R = 1/en$.

Для полупроводников, в силу того, что концентрация электронов в них меньше, чем в металлах, применима классическая статистика и при вычислении R следует пользоваться формулой

$$R = \frac{3\pi}{8en}.$$

Если численные значения тока выражать в амперах, а поперечную разность потенциалов Холла в вольтах, толщину пластины в сантиметрах и напряженность магнитного поля в эрстедах, то R будет равно

$$R = \frac{U_H a}{IH} 10^8 \frac{\text{см}^8}{\text{а} \cdot \text{сек}}. \quad (7)$$

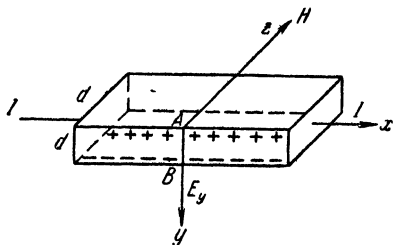


Рис. 1.

Тогда для концентрации электронов получаем выражение

$$n = \frac{3\pi}{8R} \frac{10^{19}}{1,6} \text{ см}^{-3} = \frac{7,4}{R} 10^{18} \text{ см}^{-3}, \quad (8)$$

для подвижности —

$$b = 0,85 \frac{R}{\rho} \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}. \quad (9)$$

Знак постоянной Холла определяется знаком носителей заряда.

У полупроводников постоянная Холла может быть отрицательной и положительной, так как существует два типа проводимостей. У полупроводников с электронной проводимостью носителями заряда являются электроны, и знак постоянной Холла отрицателен. У другого типа полупроводников электропроводность осуществляется положительными зарядами или так называемыми «дырками». Такие полупроводники называются дырочными. Они имеют положительный знак постоянной Холла.

У одного и того же полупроводника может быть электронная или дырочная проводимость в зависимости от характера введенных в него примесей. Таким образом, по знаку постоянной Холла можно определить тип проводимости полупроводника.

При экспериментальном исследовании эффекта Холла следует учесть, что при перемене направления магнитного поля или направления тока поперечная разность потенциалов также должна менять знак. Это обстоятельство позволяет легко отличить истинный эффект Холла от всяких побочных эффектов, которые при изменении направлений поля не меняют знак. Так, например, у полупроводников удельное сопротивление значительно больше, чем у металлов, и для них может оказаться заметной величиной падение напряжения между зондами (электродами Холла), которое возникает вследствие того, что зонды не установлены строго в эквипотенциальной плоскости. А так как на практике бывает весьма трудно установить электроды Холла (зонды) строго в эквипотенциальной плоскости, то для исключения возможной ошибки следует всегда проводить измерения при двух противоположных направлениях магнитного поля.

Пусть при некотором направлении магнитного поля измеренная разность потенциалов между зондами будет

$$U_1 = U_H + U_R + U_T, \quad (10)$$

где U_H — истинная э. д. с. Холла, U_R — падение напряжения, обусловленное неправильной установкой электродов, U_T — все другие побочные э. д. с., например термо-э. д. с., возникшая вследствие наличия градиента температуры, и т. д.

Пусть при противоположном направлении магнитного поля полная разность потенциалов будет равна

$$U_2 = -U_H + U_R + U_T. \quad (11)$$

Из уравнений (10) и (11) находим

$$U_H = \frac{U_1 - U_2}{2}, \quad (12)$$

т. е. все дополнительные эффекты исключаются.

Описание установки. Схема измерения удельного сопротивления образца и эффекта Холла приведена на рис. 2.

Здесь O — испытуемый образец, 1 — зонды для измерения эффекта Холла, 2 — зонды для измерения удельного сопротивления, $нз$, X и $Б$ — клеммы потенциометра.

Исследуемые образцы полупроводников имеют форму прямоугольных пластинок шириною 4 мм, толщиной 2 мм и длиной около 20 мм.

Образцы вставлены в футляр из плексигласа, который помещается в специальный держатель, укрепленный на штативе. Торцовые поверхности образцов покрыты слоем металла для получения хорошего контакта с токопроводящими электродами.

Зонды для измерения удельного сопротивления представляют собою заостренные проволоки, расположенные на расстоянии 6 мм друг от друга. Зонды для измерения э. д. с. Холла имеют такие же острия; нижний зонд неподвижен, верхний зонд может перемещаться вдоль образца при помощи винта. Так как при контакте металлического острия с полупроводником может возникнуть большое переходное сопротивление, то падение напряжения между зондами должно измеряться методом компенсации. В качестве компенсационной схемы в данной задаче используется потенциометр ППТВ-1. (Описание схемы потенциометра и порядок измерений см. в заводском описании потенциометра, выдаваемом лаборантом.)

Перед измерениями постоянной Холла следует произвести измерения величины магнитного поля при данном зазоре между полюсами электромагнита. Схема включения электромагнита приведена на рис. 3.

До подключения электромагнита к источнику постоянного тока прежде всего необходимо ввести полностью все реостаты, после этого с разрешения лаборанта включить рубильник постоянного тока на 110 в и с помощью реостатов установить нужный ток в электромагните,

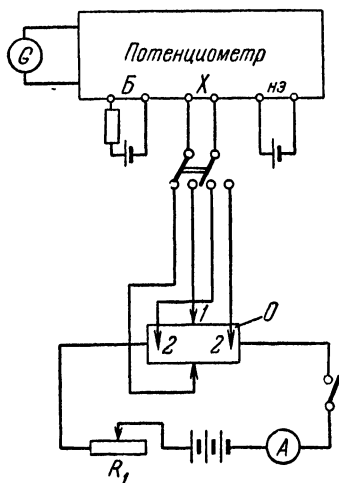


Рис. 2.

Для изменения направления магнитного поля на противоположное служит двойной переключатель. Прежде чем изменить направление тока, нужно *ввести полностью все реостаты*, так как при

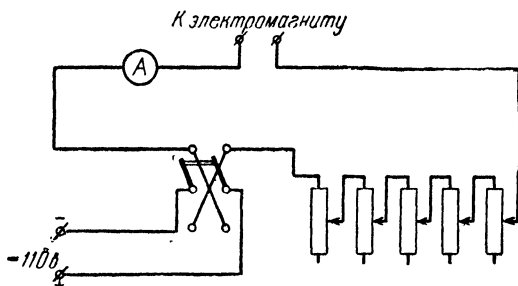


Рис. 3.

больших токах в катушке возникают большие экстрапоки при размыкании цепи. Измерения производить при двух значениях тока 3 и 4 а.

Для определения величины магнитного поля в данной задаче используется баллистический метод (см. описания задач 85, 86).

Упражнение 1

Измерение удельного сопротивления полупроводников

Вставить футляр с образцом в держатель так, чтобы зонды для измерения удельного сопротивления находились против отверстий в футляре. Перед включением образца в цепь проверить положение движка реостата (рис. 2), реостат должен быть введен полностью. Замкнув ключ, отрегулировать ток через образец при помощи реостата. Подсоединить провода, идущие от зондов к зажимам Х потенциометра, измерить падение напряжения между зондами при трех значениях тока через образец (до 10 ма).

По формуле (3) определить величину удельного сопротивления образца, численное значение последнего вычисляется как среднее из трех измерений.

Упражнение 2

Измерение постоянной Холла

Подключить электроды Холла к зажимам потенциометра, установить ток через образец не более 10 ма. Подвести оба электрода Холла до соприкосновения с образцом так, чтобы электроды были друг против друга. Наличие контакта между зондами и образцом проверить по отклонению светового указателя гальванометра от нулевого положения,

Перемещая верхний электрод в ту или другую сторону, найти положение зонда, отвечающее минимальной величине отклонения гальванометра. Затем вставить держатель с образцом между полюсами электромагнита, перпендикулярно направлению силовых линий. Подключить электромагнит к источнику тока, как указано выше, и измерить падение напряжения между электродами Холла при помощи потенциометра. Затем, изменив направление тока в электромагните (*предварительно уменьшив его плавно реостатами до нуля*), вновь измерить падение напряжения между зондами (при том же токе через образец и той же величине магнитного поля). Истинную величину ε д. с. Холла определить по формуле (12). Измерения произвести при нескольких значениях тока через образец.

При помощи магнитной стрелки определить направление поля. По направлению магнитного поля, направлению тока через образец и знаку электродвижущей силы Холла определить знак носителей заряда в образце. По формуле (7) вычислить величину постоянной Холла. Вычислить концентрацию носителей заряда n и подвижность b , используя уравнения (8) и (9).

В данной задаче исследуемые образцы представляют собою пластинки германия с электронной и дырочной проводимостями.

Технические данные установки. В работе используется электромагнит, изготовленный мастерскими физического факультета. Расстояние между полюсами 30 мм, поперечное сечение 80×80 мм, максимальная напряженность поля 5800 э при токе 3,5 а. Потенциометр ППТВ-1, нормальный элемент и приборы.

Исследуется образец монокристалла германия в виде прямоугольной пластинки 4×2×20 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. А. Ф. И о ф ф е, Физика полупроводников, Изд. АН СССР, 1957.
3. В. Ш о к л и, Теория электронных полупроводников, ИЛ, 1953, гл. I.

ЗАДАЧА 91

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАРЯДКИ И РАЗРЯДКИ КОНДЕНСАТОРА

Теория. Ток зарядки и разрядки конденсатора C через сопротивление R изменяется во времени t по закону

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (1)$$

Принципиальная схема, с помощью которой можно проверить этот закон, изображена на рис. 1. При замыкании ключа K в

положение 1 конденсатор C заряжается через значительное активное сопротивление R до напряжения \mathcal{E} источника постоянной э. д. с. При переключении ключа K в положение 2 конденсатор разряжается через то же сопротивление. В схему включен микроамперметр, позволяющий измерять ток при зарядке и разрядке в различные моменты времени.

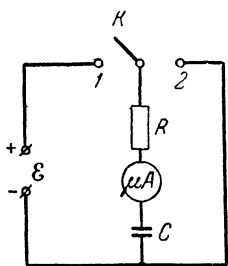


Рис. 1.

Если включать в цепь различные известные сопротивления и емкости, подобранные так, что произведения RC для выбранных пар остаются одинаковыми, то можно убедиться в том, что экспериментально измеренные значения тока разрядки и зарядки для любых пар ложатся на одну и ту же кривую $I/I_0 = f(t)$ или на одну и ту же прямую $\ln(I/I_0) = \varphi(t)$. В последнем случае очевидно, что тангенс угла наклона прямой равен $1/RC$.

Время τ , в течение которого ток разрядки уменьшится в e раз, называется постоянной времени системы или ее временем релаксации. По прямой $\ln(I/I_0) = \varphi(t)$ легко найти $\tau = RC$. Оно равно абсциссе той точки, для которой

$$\ln I_0 - \ln I = 1. \quad (2)$$

Измеряя ток разрядки и зарядки для неизвестных сопротивления R и емкости C , можно определить величины R , C и τ — время релаксации системы.

Измерения. Рабочая схема рис. 2 отличается от принципиальной только наличием переключателя K_2 . При зарядке конденсатора K_1 и K_2 устанавливаются в положение 1, при разрядке — в положение 2. Как видно из схемы, этим достигается такое переключение микроамперметра, что направление тока в нем при обоих процессах остается неизменным.

Во избежание порчи прибора необходимо следить за правильным положением ключей K_1 и K_2 .

Питание схемы осуществляется источником постоянного напряжения 24 в и может контролироваться вольтметром. Собрав схему по рис. 2 (все ключи разомкнуты), ставят переключатель K_2 в положение 1, после чего замыкают ключ K_1 на клемму 1 и одновременно пускают в ход секундомер.

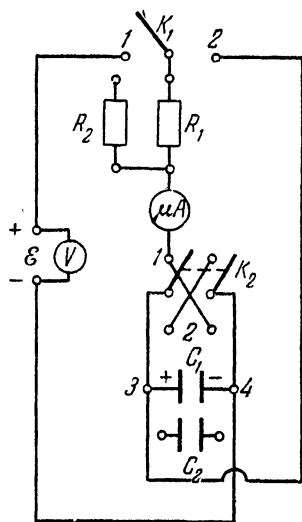


Рис. 2.

Микроамперметр показывает силу тока в цепи зарядки конденсатора. Его показания отмечают через каждые 15 сек в течение первых 1,5 мин, последующие измерения производят через каждые 30 сек вплоть до убывания тока до нуля. По окончании измерений по возможности быстро (так как возможна утечка зарядов с конденсатора) размыкают ключ K_1 , переводят переключатель K_2 в положение 2, после чего замыкают K_1 на клемму 2, одновременно пуская в ход секундомер, и измеряют аналогично ток в процессе разрядки конденсатора.

Следует произвести измерения для двух пар известных R и C с одинаковым значением произведения RC . Каждая кривая снимается два раза.

Средние значения результатов измерений представляют в виде графика $I = f_1(t)$. Обе кривые наносят на один график. После этого в схему включают неизвестные R и C , производят такие же, как и раньше, измерения тока зарядки и разрядки конденсатора, берут их среднее значение.

Результат представляют в виде графика $\ln I = \varphi_1(t)$. Неизвестное сопротивление можно найти, пользуясь законом Ома, зная I_0 и поданное в схему напряжение \mathcal{E} . Внутреннее сопротивление микроамперметра можно не учитывать, так как оно мало по сравнению с R .

Начальную силу тока I_0 в момент $t = 0$ при этих измерениях отметить не удастся. Ее можно измерить в процессе зарядки, соединив накоротко проводником клеммы 3 и 4 (оба ключа в положении 1), или графически, экстраполируя прямую $\ln I(t)$ для точки $t = 0$.

Из графика определяют τ — время релаксации. Зная τ и R , находят емкость конденсатора

$$C = \frac{\tau}{R}. \quad (3)$$

Более точно значение τ и I_0 можно определить, если воспользоваться методом наименьших квадратов (см. Введение к т. I). Прологарифмировав уравнение (1), получим линейную зависимость логарифма силы тока от времени:

$$y = \ln I = \ln I_0 - \frac{1}{RC}t = a - bt, \quad (4)$$

где $a = \ln I_0$, а $b = \frac{1}{RC} = \frac{1}{\tau}$. Однако измеренные величины I_n (а следовательно, и $y_n = \ln I_n$) для данного значения t_n всегда отличаются от вычисленных по формуле (4), при точных значениях параметров a и b , из-за ошибок измерений.

Метод наименьших квадратов позволяет по результатам измерений определить наиболее вероятные значения параметров a и b .

Они находятся из условия, что сумма квадратов ошибок измерений отдельных точек должна быть наименьшей. Ошибка равна разности между измеренной и рассчитанной величинами

$$\Delta y_n = y_n - (a - bt), \quad \Sigma (\Delta y_n)^2 = \Sigma [y_n - (a - bt)]^2. \quad (5)$$

Условие минимума заключается в требовании:

$$\frac{\partial \Sigma \Delta y^2}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial \Sigma \Delta y^2}{\partial b} = 0.$$

Таким образом, получаем два уравнения для определения a и b :

$$\Sigma y_n = na - b \Sigma t_n, \quad (6)$$

$$\Sigma (t_n y_n) = a \Sigma t_n - b \Sigma (t_n^2). \quad (7)$$

Решая их, получим

$$a = \frac{\Sigma (t_n^2) \Sigma y_n - \Sigma (t_n y_n) \Sigma t_n}{n \Sigma (t_n^2) - (\Sigma t_n)^2} = \ln I_0, \quad (8)$$

$$b = \frac{\Sigma t_n \Sigma y_n - n \Sigma (t_n y_n)}{n \Sigma (t_n^2) - (\Sigma t_n)^2} = \frac{1}{RC} = \frac{1}{\tau}. \quad (9)$$

Полученные значения I_0 и τ наиболее близки к действительным. Отсюда можно рассчитать наиболее точные значения неизвестных R и C .

Легко оценить точность определения времени релаксации системы τ методом наименьших квадратов. В процессе измерения обе величины ток I и время t измерены с ошибками. Однако для упрощения задачи можем не учитывать ошибку измерения времени Δt и считать, что время, соответствующее каждому данному измерению, определено абсолютно точно. Такое предположение допустимо, так как если измеренный момент t'_n отличается на некоторую величину Δt от отмеченного в таблице точного значения t_n , то это приведет к увеличению разброса значений I_n и соответственно к увеличению Δy_n . Пользуясь этим упрощением, оценим точность определения постоянной b в уравнении (4) для последующей оценки τ . В формуле (9) в знаменателе стоит выражение, зависящее только от t_n , т. е. являющееся для данных измерений, в соответствии с нашим упрощением, величиной постоянной. Обозначим его D .

Оценка ошибки Δb для $b(y_1, y_2, \dots, y_n)$ сводится к расчету средней квадратичной ошибки функции

$$\Delta b = \sqrt{(\Delta b)^2} = \sqrt{\Sigma \left(\frac{\partial b}{\partial y_n} \right)^2 (\Delta y_n)^2} = \sqrt{(\Delta y)^2} \sqrt{\Sigma \left(\frac{\partial b}{\partial y_n} \right)^2}. \quad (10)$$

Так как все значения y_n получены с одинаковой степенью точности, то $\sqrt{(\Delta y)^2}$ можно вынести за знак суммы. Очевидно, что

$$\frac{\partial b}{\partial y_n} = \frac{nt_n - \Sigma t_n}{D}, \quad \text{а} \quad \Sigma \left(\frac{\partial b}{\partial y_n} \right)^2 = \frac{n}{D^2} \left[n \Sigma t_n^2 - (\Sigma t_n)^2 \right],$$

откуда

$$\sum \left(\frac{\partial b}{\partial y_n} \right)^2 = \frac{n}{D}. \quad (11)$$

Теория ошибок дает для расчета вероятной погрешности измерений расчетную формулу

$$\sqrt{(\Delta y)^2} = \pm 0,675 \sqrt{\frac{\sum (\Delta y_n)^2}{n-1}}. \quad (12)$$

Подставив полученные результаты (11) и (12) в формулу (10), получим окончательно

$$\Delta b = \pm 0,675 \sqrt{\frac{\sum (\Delta y_n)^2}{n-1}} \sqrt{\frac{n}{D}}. \quad (13)$$

После подсчета Δb оценим $\Delta \tau$. Так как $\tau = 1/b$, то

$$\Delta \tau = \pm \frac{\Delta b}{b^2} \quad (14)$$

Следует сравнить точность определения τ , полученную двумя способами: графически и методом наименьших квадратов. Рекомендуется брать для расчета τ 8 или 10 точек с интервалом времени 0,5 мин.

Сравнить значения I_0 , τ , R и C , полученные двумя способами. Для расчета a , b и оценки τ (определения Δb) удобно составить таблицу:

t_n , мин	t_n^2	$y_n = \ln \bar{I}_n$	$t_n y_n$	Δy_n	$(\Delta y_n)^2$
Σt_n	$\Sigma (t_n^2)$	Σy_n	$\Sigma (t_n y_n)$	—	$\Sigma (\Delta y_n)^2$

$$\Delta y_n = \frac{\Sigma |y_n - y_{ni}|}{i}, \text{ где } i \text{ — число измерений } n\text{-й точки, } i \geq 4.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.
2. Физпрактикум. Механика и молекулярная физика, под редакцией В. И. И в е р о н о в о й, «Наука», 1967, Введение.
3. К. П. Я к о в л е в, Математическая обработка результатов измерений, Гостехиздат, 1950.

ЗАДАЧА 92

ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ ПРИ ПОМОЩИ МОСТОВОЙ СХЕМЫ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

В настоящей задаче для определения емкости конденсатора используется то обстоятельство, что конденсатор, включенный в цепь переменного тока, создает в этой цепи определенное сопротивление¹⁾. Простая количественная связь между величиной емкости C и значением соответствующего ей емкостного сопротивления

$$Z = -\frac{j}{C\omega} \quad (1)$$

(где $j = \sqrt{-1}$) позволяет свести измерение емкости к измерению емкостного сопротивления. Эксперимент в настоящей задаче заключается в сравнении емкостных сопротивлений эталонного и неизвестного конденсаторов.

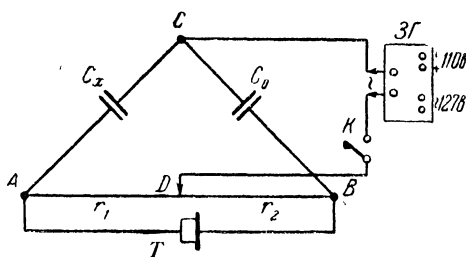


Рис. 1.

Известно, что одним из простейших способов измерения сопротивлений является использование мостовых схем (см. задачи 69—72 и 94). Эти схемы позволяют производить сравнения сопротивлений, включенных в плечи схемы. В данной задаче используется мостовая схема, питаемая переменным током от звукового генератора (рис. 1). На этой схеме C_x — неизвестная емкость, C_0 — известная емкость, r_1 и r_2 — сопротивления плеч проволоочного реохорда (в общем случае это безындукционные магазины сопротивлений).

Для того чтобы в мосте (цепь телефона T) не было тока, необходимо, как и всегда в случае переменного тока, чтобы напряжения на концах мостика были равны и по амплитуде и по фазе. Как доказывается в теории переменных токов, оба эти условия выполняются одновременно, если комплексные сопротивления плеч мостовой схемы Z образуют пропорцию

$$Z_1 : Z_x = Z_2 : Z_0.$$

Индексы при Z в этой пропорции соответствуют индексам при емкостях и сопротивлениях на рис. 1. В нашем частном случае

$$Z_1 = r_1, \quad Z_2 = r_2, \quad Z_x = -\frac{j}{C_x\omega}, \quad Z_0 = -\frac{j}{C_0\omega}.$$

¹⁾ Совершенно иной способ измерения емкости описан в задаче 84.

Подставляя эти значения Z в пропорцию и сокращая множители ω и j , находим соотношение между C_x , C_0 , r_2/r_1 , при котором нет тока (звука) в мостике (телефоне):

$$C_x = C_0 \frac{r_2}{r_1}. \quad (2)$$

Таким образом, если мы, включив в мостовую схему неизвестную емкость C_x и эталонный конденсатор C_0 , путем подбора значения r_2/r_1 добились отсутствия тока в мосте (звука в телефоне), то тогда мы вправе воспользоваться соотношением (2) для определения емкости C_x . В качестве известной емкости C_0 употребляется магазин емкостей, устройство которого схематически изображено на рис. 2. Включение той или иной емкости достигается в нем путем перестановки штепселя из внутреннего ряда отверстий в наружный. Измеряемыми емкостями являются два конденсатора в несколько десятых микрофарады.

Измерения. Собрав схему согласно рис. 1 и включив звуковой генератор ЗГ, устанавливают движок реохорда на середину его шкалы и подбирают в магазине C_0 такую емкость, чтобы звук в телефоне был минимальный, а затем, передвигая движок в ту или иную сторону, добиваются по возможности полного исчезновения звука.

По полученным таким образом значениям длин плеч и емкости магазина вычисляют при помощи формулы (2) емкость измеряемого конденсатора.

Для исключения возможной ошибки вследствие неправильности магазина емкостей рекомендуется повторить указанные выше измерения, изменив на 10—20% величину включенной в нем емкости.

Измерения надлежит произвести с двумя конденсаторами, сначала включая их порознь, а затем с обоими сразу, соединяя их параллельно и последовательно и проверяя тем самым законы соединения емкостей.

Технические данные установки. В задаче использован реохорд, низковольтный магазин емкостей с пределами от 0,001 до 0,5 мкф, телефон, звуковой генератор, изготовленный в мастерской физического факультета,

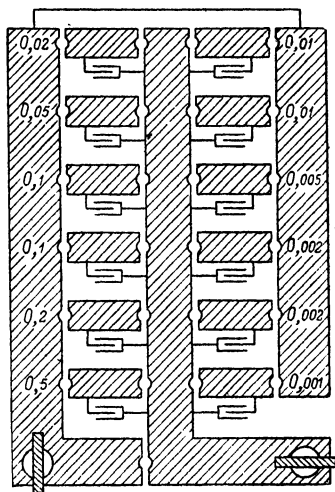


Рис. 2.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.
2. Курс физики, под редакцией Н. Д. П а п а л е к с и н, т. II, Гостехиздат, 1948.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

3. Е. А. С в и р с к и й, Общий курс электрических и магнитных измерений, Оборонгиз, 1939; см. также [3] к задаче 94.
4. Курс электрических измерений, под редакцией В. Г. П р ы т к о в а и А. В. Т а л и ц к о г о, Госэнергоиздат, 1960.

ЗАДАЧА 93

ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ МОСТОВЫМ МЕТОДОМ
С УЧЕТОМ УТЕЧКИ В КОНДЕНСАТОРАХ

Для измерения емкости конденсатора часто пользуются мостовым методом. Принципиальная схема такого моста изображена на рис. 1 (см. также рис. 1 в задаче 92). Здесь R_1 и R_2 — переменные сопротивления, C_0 — эталонный конденсатор, C_x — конденсатор, емкость которого нужно определить.

Если исследуемый конденсатор обладает утечкой, то при достаточно точном измерении необходимо учитывать влияние этой утечки. Схема в этом случае должна быть дополнена еще одним переменным сопротивлением r , включенным последовательно с эталонным конденсатором (рис. 1). Конденсатор с утечкой обычно представляют эквивалентной схемой, в которой к идеальному конденсатору емкостью C параллельно подключено некоторое сопротивление утечки R .

Однако если утечка небольшая (сопротивление утечки достаточно велико), то тот же конденсатор в ряде случаев удобнее представлять как некоторый идеальный конденсатор емкостью C_1 с последовательно подключенным сопротивлением r_1 . Оба представления эквивалентны. Действительно, согласно первой схеме комплексная проводимость конденсатора с утечкой равна

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + j\omega C, \quad \text{где } j = \sqrt{-1},$$

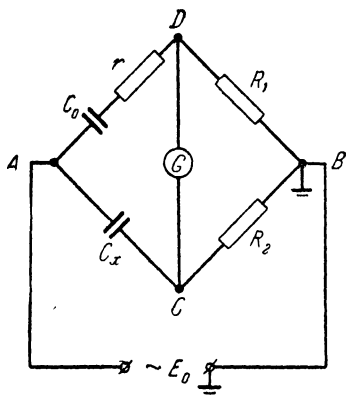


Рис. 1.

откуда

$$Z = \frac{1}{\omega^2 C^2 R} - j \frac{1}{\omega C};$$

$$1 + \left(\frac{1}{\omega CR} \right)^2;$$

в последнем выражении мнимую часть можно рассматривать как комплексное сопротивление некоторого эквивалентного конденсатора емкостью C_1 :

$$\frac{-j \frac{1}{\omega C}}{1 + \frac{1}{(\omega CR)^2}} = -j \frac{1}{\omega C_1},$$

а действительную часть как последовательно подключенное сопротивление

$$\frac{1}{\omega^2 C^2 R} = r_1.$$

$$1 + \left(\frac{1}{\omega CR} \right)^2$$

При этом отношение действительной части Z к мнимой части по модулю равно $1/\omega CR$. В большинстве случаев в пределах требуемой точности можно пренебречь $(1/\omega CR)^2$ по сравнению с единицей, тогда

$$C_1 = C \text{ и } r_1 = \frac{1}{\omega^2 C^2 R}.$$

Следовательно, комплексное сопротивление конденсатора с утечкой будет

$$Z = r_1 - j \frac{1}{\omega C}.$$

Если разность потенциалов между точками C и D в каждый момент времени равна нулю, то мост находится в равновесии. В общем случае условие равновесия моста переменного тока записывается как

$$\frac{Z_0}{Z_1} = \frac{Z_x}{Z_2},$$

где Z_0 , Z_x , Z_1 и Z_2 — комплексные сопротивления соответствующих плечей моста. В нашем случае (рис. 1)

$$Z_0 = r - j \frac{1}{\omega C_0}, \quad Z_x = r_1 - j \frac{1}{\omega C_x}, \quad Z_1 = R_1 \text{ и } Z_2 = R_2,$$

r_1 — эквивалентное сопротивление, учитывающее утечку исследуемого конденсатора. На рисунке оно не обозначено. Условие равновесия примет вид

$$\frac{r - j \frac{1}{\omega C_0}}{R_1} = \frac{r_1 - j \frac{1}{\omega C_x}}{R_2}.$$

Приравнявая в последнем выражении действительные и мнимые части, получим

$$C_x = C_0 \frac{R_1}{R_2} \quad \text{и} \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{r}{r_1}. \quad (1)$$

В отличие от моста, работающего на постоянном токе, условие равновесия в данном случае содержит два равенства. Это вызвано тем, что напряжения на R_1 и R_2 должны совпадать не только по амплитуде, но и по фазе. Только в этом случае разность потенциалов между точками C и D будет равна нулю в каждый момент времени.

При измерении небольших емкостей часто сказываются емкостные связи между различными точками моста и корпусами магазинов, устранить которые полностью не всегда возможно. На рис. 2 эти «паразитные» емкости между двумя вершинами моста и корпусами магазинов обозначены пунктиром. Наличие их означает, что точки A и B соединены между собой через «паразитные» емкости и корпуса магазинов, помимо явным образом введенных сопротивлений и емкостей. Емкостные связи часто мешают настройке моста и приводят к неточному результату. Чтобы частично устранить их действие, точка B и корпуса всех магазинов соединяются между собой.

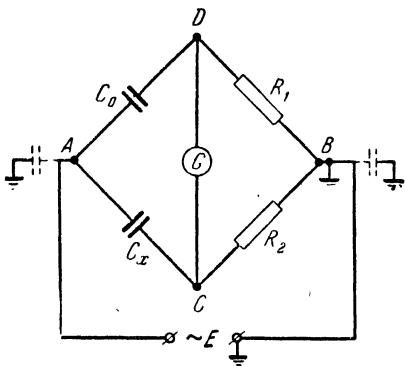


Рис. 2.

При этом точку B можно подключить лишь к той клемме сети переменного тока, которая заземлена. В результате соединения точки B с корпусом емкость « B — корпус» будет закорочена, а емкость « A — корпус» окажется включенной параллельно источнику питания и не будет влиять на условие равновесия моста. Емкостные связи точек C и D с корпусом в этом случае останутся неустранимыми. Однако влияние их в данной установке оказывается незначительным, так как они фактически присоединены параллельно R_1 и R_2 , которые малы по сравнению с емкостными сопротивлениями связей.

В качестве индикаторного устройства, с помощью которого можно установить, что разность потенциалов между точками C и D равна нулю, применяется вибрационный гальванометр. В основе устройства вибрационного гальванометра лежит воздействие, оказываемое переменным магнитным полем на очень маленький постоянный магнит, подвешенный на упругой нити. Напряженность переменного магнитного поля пропорциональна измеряемому току.

Под действием переменного магнитного поля магнит совершает крутильные колебания. С подвижным магнитом связано зеркальце. На зеркальце падает луч света и, отражаясь от него, попадает на экран, образуя световой зайчик. При колебании магнита световой зайчик размывается. Размах колебаний магнита при одной и той же величине измеряемого тока получается наибольший, когда частота собственных колебаний магнита совпадает с частотой переменного поля. Для настройки гальванометра в резонанс используется постоянное магнитное поле, создаваемое вторым постоянным магнитом. Напряженность постоянного магнитного поля можно изменять в некоторых пределах. На рис. 3 направление напряженности постоянного магнитного поля обозначено стрелками, линии напряженности переменного магнитного поля изображены пунктиром. NS — подвижной магнит, ось крутильных колебаний которого перпендикулярна рисунку и изображена точкой. При отсутствии переменного магнитного поля подвижной магнит устанавливается в положении равновесия, определяемом тем, что противодействующий момент, т. е. суммарный момент сил, действующих на магнит со стороны упругой нити и постоянного магнитного поля, равен нулю. Настройка гальванометра в резонанс осуществляется путем изменения постоянного магнитного поля, что приводит к изменению противодействующего момента, а следовательно, и частоты собственных колебаний подвижного магнита.

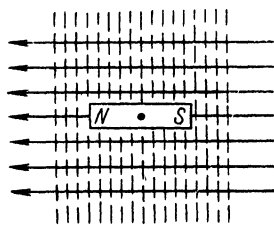


Рис. 3.

Гальванометр имеет ступенчатый переключатель чувствительности, позволяющий ослаблять ток, идущий через обмотку электромагнита, создающего переменное магнитное поле.

Измерения. Собрать схему, изображенную на рис. 1. В качестве R_1 , r , R_2 используются магазины безреактивных сопротивлений, индуктивность и емкость которых полагаются равными нулю. При этом R_1 можно изменять от нуля до 11 111,10 ом через каждые 0,01 ом , r — от нуля до 11 100 ом через каждые 10 ом , R_2 — от нуля до 10 000 ом через каждые 1000 ом , C_0 — магазин емкостей (0,001—1,11 мкф). В задаче определяются емкости воздушных конденсаторов, практически не обладающих утечкой. Для изучения влияния утечки на работу моста параллельно одному из конденсаторов подключено достаточно большое сопротивление R , имитирующее утечку в конденсаторе.

Питание моста осуществляется от сети переменного тока через специально выведенную розетку, причем точка B подключается к заземленному гнезду.

Так как в задаче измеряются емкости порядка тысячных долей микрофарады, то C_0 также должно быть соответственно мало.

Удобно эталонную емкость установить равной $C_0 = 0,01$ мкф, а сопротивление $R_2 = 10\,000$ ом. В этом случае на мост можно подавать переменное напряжение до ~ 120 в, так как сопротивления плечей моста ACB и ADB будут достаточно большими. Эталонные емкости больше указанной вводить не следует, так как через магазины сопротивлений может пойти ток, превышающий допустимые значения.

Переключатель чувствительности гальванометра вначале должен быть в положении, соответствующем минимальной чувствительности. Только по мере уравнивания моста можно постепенно переходить на более высокую чувствительность.

В процессе работы необходимо убедиться, что гальванометр настроен в резонанс. Гальванометр настроен в резонанс, если при вращении ручки с надписью «настройка» в ту или другую сторону ширина размытия светового зайчика уменьшается. В противном случае необходимо вращать ручку настройки до достижения максимума размытия. Если гальванометр очень сильно расстроен, то для нахождения положения резонанса ручку настройки следует вращать в каком-либо одном направлении.

Процесс настройки моста заключается в последовательном подборе сопротивлений R_1 и r , при которых мост оказывается полностью уравновешенным. Настройку моста необходимо начинать при выведенном сопротивлении r : В качестве исходного значения R_1 следует взять $10\,555,55$ ом, набранное так, что на первой декаде включено $10\,000$ ом, на второй 500 ом и т. д. Такое исходное положение удобно в двух отношениях. Во-первых, после грубого подбора R_1 на первой декаде с точностью до 1000 ом с помощью второй декады это сопротивление для получения более точного значения может быть изменено как в ту, так и в другую сторону. Во-вторых, если сопротивление на первой декаде окажется полностью выведенным, R_1 не обратится в нуль.

При определении емкости конденсатора с утечкой необходимо сначала подобрать значение R_1 , при котором величина размытия светового зайчика будет наименьшей. После этого следует ввести r , добиваясь дальнейшего уменьшения размытия. Затем следует уточнить значение R_1 . Такой последовательный подбор R_1 и r со все возрастающей точностью производится до тех пор, пока гальванометр не будет показывать отсутствие тока при максимальной чувствительности. После того, как мост полностью уравновешен, емкость исследуемого конденсатора вычисляется по формуле (1).

В задаче требуется определить емкость двух конденсаторов, один из которых с искусственной утечкой, затем емкость при параллельном и последовательном соединении обоих конденсаторов. В заключение необходимо оценить ошибку измерений.

Технические данные установки. В задаче использованы два магазина безреактивных сопротивлений МСРБ-48, магазин емкостей МЕ-3 и вибрационный

гальванометр типа ВГ. Один из магазинов сопротивлений МСРБ-48 несколько переоборудован, что позволяет использовать его в качестве двух независимых сопротивлений (R_2 и r).

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. Е. А. С в и р с к и й, Общий курс электрических и магнитных измерений, Оборонгиз, 1939.

3. Курс электрических измерений, под редакцией В. Т. П р ы т к о в а и А. В. Т а л и ц к о г о, Госэнергоиздат, 1960.

З А Д А Ч А 94

ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ КАТУШЕК ПРИ ПОМОЩИ МОСТОВОЙ СХЕМЫ

Поставим задачу измерения индуктивности L_1 и сопротивления r_{L1} некоторой катушки. Для этого в условиях задачи применяется мостовая схема, изображенная на рис. 1. На этой схеме r_3 и r_4 обозначают практически безындуктивные сопротивления плеч реохорда. Буквами r_1 и r_2 обозначены безындуктивные магазины сопротивлений в плечах моста, L_2 и r_{L2} обозначают известные значения индуктивности и сопротивления эталона индуктивности, включенного в одно из плеч моста. В схему можно включать либо источник переменного тока, либо источник постоянного тока. Соответственно включенному источнику тока в диагональ схемы включается либо телефон, либо гальванометр. Целесообразность включения в схему разных источников тока будет разъяснена ниже.

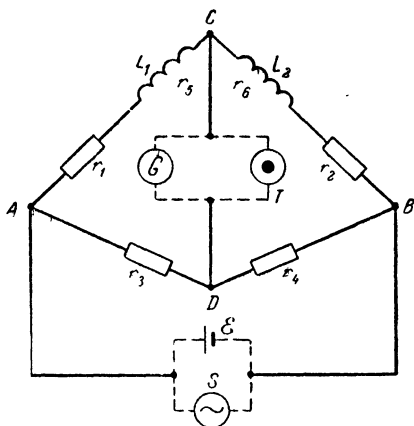


Рис. 1.

Рассмотрим условия отсутствия тока в телефоне при питании схемы переменным током частоты ω . Очевидно, что тока в диагонали моста не будет в том случае, если переменные напряжения в точках схемы C и D будут одинаковы и по амплитуде, и по фазе.

Это условие проще всего найти, пользуясь методом комплексных сопротивлений. Обозначим комплексные сопротивления плеч моста через Z . Индекс у Z для каждого плеча схемы соответствует индексам, стоящим у сопротивлений и индуктивностей той же ветви. В этих обозначениях условие равновесия моста запишется так:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}. \quad (1)$$

В нашем случае $Z_3 = r_3$ и $Z_4 = r_4$, т. е. представляют собой величины действительные, следовательно, отношение $\frac{Z_3}{Z_4} = \frac{r_3}{r_4}$ есть также величина действительная. Но Z_1 и Z_2 — комплексные величины вида $r + j\omega L$, где $j = \sqrt{-1}$. Применим условие (1) к нашей схеме, но положим сначала r_1 и r_2 равными нулю; такое предположение позволит нам легче выяснить в дальнейшем необходимость введения в схему этих сопротивлений

$$\frac{r_{L_1} + j\omega L_1}{r_{L_2} + j\omega L_2} = \frac{r_3}{r_4}.$$

Так как правая часть равенства есть величина действительная, то для удовлетворения написанного условия необходимо, чтобы были соблюдены одновременно два равенства $\frac{r_{L_1}}{r_{L_2}} = \frac{r_3}{r_4}$ и $\frac{L_1}{L_2} = \frac{r_3}{r_4}$, т. е. активные сопротивления катушек самоиндукции должны находиться между собой в том же отношении, как и индуктивности этих катушек. Легко понять, что эти два условия в общем случае невыполнимы. Сопротивление катушки зависит от материала, длины и сечения провода, из которого катушка сделана, а индуктивность катушки зависит от ее формы и способа намотки. Поэтому уравновесить мост переменного тока при рассмотренных условиях невозможно.

Для того чтобы уравновешивание моста сделать возможным, в индуктивные ветви моста введены магазины сопротивлений r_1 и r_2 . При наличии этих сопротивлений условие (1) запишется так:

$$\frac{r_1 + r_{L_1} + j\omega L_1}{r_2 + r_{L_2} + j\omega L_2} = \frac{r_3}{r_4}.$$

Теперь для соблюдения этого равенства должны иметь место две пропорции:

$$\frac{r_1 + r_{L_1}}{r_2 + r_{L_2}} = \frac{r_3}{r_4}, \quad (2)$$

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{r_3}{r_4}. \quad (3)$$

Поскольку значениям сопротивлений, установленным в магазинах r_1 и r_2 , мы можем придать необходимые значения, эти две пропорции могут быть выполнены одновременно. Существующая в общем случае непропорциональность между сопротивлениями и индуктивностями катушек теперь не является помехой для уравнивания моста. В этом значении магазинов сопротивлений, включенных в плечи моста последовательно с катушками самоиндукции.

Очевидно, что равенство (2) может быть удовлетворено не только при значениях r_1 и r_2 , одновременно отличных от нуля. В частности, равенству (2) можно удовлетворить, добавив только сопротивление r_1 к величине r_{L1} и положив $r_2 = 0$, или, наоборот, взяв нужное значение $r_2 \neq 0$ и положив $r_1 = 0$. Другими словами, для одновременного сбалансирования моста и на постоянном и на переменном токе дополнительное активное сопротивление можно включить только в одну из ветвей моста. Но, конечно, выбор этой ветви моста не является произвольным. Он определяется соотношением между включенными в мост индуктивностями и их активными сопротивлениями.

Ввиду того, что при измерениях всевозможных индуктивностей значения их активных сопротивлений наперед неизвестны, то запасные магазины сопротивлений бывают введены в обе ветви моста, но фактически дополнительное сопротивление r_1 или r_2 можно включать только в одном из этих магазинов. Это удобнее и повышает точность измерений.

Итак, если схема уравновешена на переменном токе (ток в мосте равен нулю), то имеют силу пропорции (2) и (3). Из пропорции (2) можно найти активное сопротивление r_{L1} исследуемой катушки L_1 . Из пропорции (3) можно найти индуктивность этой же катушки. Индуктивность катушки L_2 и ее сопротивление r_{L2} считаем известными. Поэтому экспериментальная задача, казалось бы, сводится лишь к уравниванию моста на переменном токе. В принципе это верно, но вопрос в том, как реализовать условие равновесия схемы на переменном токе.

Как видно из написанных пропорций, в данном случае необходим подбор значений r_1 (или r_2) и отношения r_3/r_4 в условиях, когда в плечах моста уже есть неизменные сопротивления $r_{L1} + j\omega L_1$ и $r_{L2} + j\omega L_2$. Эта задача не так проста, как уравнивание моста на постоянном токе, когда можно свободно варьировать сопротивление одного из плеч и отношение r_3/r_4 на реохорде.

Кроме того, возможно получение минимумов тока в мосте (минимумов звука в телефоне) и в том случае, когда обе пропорции не выполнены. Это будут условия не обращения в нуль тока в мосте, но условия минимумов тока в мосте, что не одно и то же. Поясним, что это значит. Схема питается переменным током, перемещая движок на реохорде, мы находим минимум звука в телефоне, т. е. условие минимума амплитуды напряжения между точками C и D . Это

будет минимум напряжения на мосте при фиксированной разности фаз напряжений в точках C и D . На значение этой разности фаз перемещение движка по реохорду не влияет (в первом приближении). Расчет минимальной в таких условиях амплитуды напряжения на концах мостика не представляет трудности. Можно написать

$$V_D = V_{D_0} \sin \omega t, \quad V_C = V_{C_0} \sin (\omega t - \varphi).$$

Отсюда

$$V_{CD} = V_{C_0} \sin (\omega t - \varphi) - V_{D_0} \sin \omega t,$$

следовательно,

$$|V_{CD}|^2 = V_{C_0}^2 + V_{D_0}^2 - 2V_{C_0}V_{D_0} \cos \varphi.$$

Ищем минимум этого выражения, приравнявая $\frac{\partial |V_{CD}|^2}{\partial V_{D_0}} = 0$. Из этого условия находим наивыгоднейшее значение амплитуды напряжения в точке D :

$$V_{D_0} = V_{C_0} \cos \varphi. \quad (4)$$

Подставляя это значение в выражение V_{CD} , находим его минимальное значение

$$(V_{CD})_{\min} = V_{C_0} \sin \varphi.$$

Для полного же отсутствия звука в телефоне необходимо было бы иметь $V_{CD} = 0$. Другими словами, условие минимума тока в телефоне при неравенстве фаз напряжений на концах моста означает, что векторная диаграмма, построенная из векторов напряжений на первом индуктивном плече схемы, на первом плече реохорда и на мосте, должна образовывать прямоугольный треугольник.

Для правильного экспериментального решения задачи надо суметь перейти от подобного минимума напряжения на концах моста к условию равенства его нулю, когда будут справедливы сразу обе пропорции (2) и (3). Вот почему непосредственное уравнивание схемы на переменном токе не может быть сразу однозначно выполнено. Тем более, что мы практически никогда не будем, конечно, иметь полного отсутствия звука в телефоне, но будем иметь только один минимум звука более глубокий, чем остальные. Это дополнительно затрудняет измерения. Искомые условия, однако, можно найти, прибегая к вспомогательному уравниванию схемы на постоянном токе. Для этого предусмотрена возможность включения в схему не только переменного, но и постоянного тока.

Поясним, как используется в схеме постоянный ток. При включении в схему постоянного тока индуктивные сопротивления в схеме равны нулю. Если мы уравниваем схему при помощи гальванометра, то мы находим в общем случае отношение

$$\frac{r_1 + r_{L_1}}{r_2 + r_{L_2}} = \frac{r_3}{r_4}.$$

Если окажется, что значение этого отношения $(r_3/r_4)_{\text{пост}}$ такое же, как и отношения $(r_3/r_4)_{\text{перем}}$, то это означает, что мы на переменном токе нашли искомый (наиболее глубокий) минимум тока в мосте, при котором автоматически и должно иметь место сохранение значения отношения r_3/r_4 при обоих токах, как явствует из пропорций (2) и (3). Таким образом, смысл включения в схему постоянного тока заключается прежде всего в том, чтобы отличить искомый глубокий минимум (в пределе нуль) на переменном токе от множества возможных дополнительных минимумов, имеющих место при несоблюдении пропорций (2) и (3).

Но как мы сейчас увидим, включение в схему постоянного тока позволяет не только проверять, достигнут ли искомый самый глубокий минимум, но и рационально искать этот глубокий минимум на переменном токе. Рассмотрим порядок действий при поочередном включении в схему переменного и постоянного тока. Пусть, собрав схему, включив в магазинах некоторые сопротивления r_1 и r_2 и перемещая движок на реохорде, мы нашли его положение, соответствующее минимуму звука в телефоне. Этому положению движка будет соответствовать некоторое отношение плеч реохорда $(r_3/r_4)_{\text{перем}}$. Переключим теперь схему на постоянный ток и на гальванометр. Как правило, мы обнаружим при этом ток через гальванометр; схема не будет уравновешена. Перемещая движок по реохорду, сдем к нулю ток через гальванометр. Этому условию будет соответствовать другое значение отношения плеч реохорда $(r_3/r_4)_{\text{пост}}$.

Оказывается, что знак неравенства, которое можно теперь составить между значениями $(r_3/r_4)_{\text{перем}}$ и $(r_3/r_4)_{\text{пост}}$, может указать нам способ действий к тому, чтобы добиться равенства этих величин, что безусловно необходимо для решения задачи. Пусть, например, значение $(r_3/r_4)_{\text{перем}} > (r_3/r_4)_{\text{пост}}$. Это означает, что при положении движка на реохорде, найденном для равновесия мостика на постоянном токе, амплитуда переменного напряжения в точке D мала по сравнению с тем значением, которому она должна удовлетворять при минимуме на переменном токе (см. выражение (4)). Поэтому для минимума звука в телефоне и приходится ставить движок на большие значения r_3 , чем при нуле тока через гальванометр. Для того чтобы сблизить значения отношений r_3/r_4 для обоих токов, надо несколько изменить распределение напряжений в индуктивной ветви моста. Это достигается путем изменения сопротивлений r_1 и r_2 . О том, в какую сторону они должны быть изменены, сказано в описании порядка измерений.

Измерения и их обработка. Для практического применения описанного метода измерений пользуются схемой, изображенной на рис. 2. Источником переменного тока в этой схеме является ламповый генератор звуковой частоты. Питание измерительной схемы постоянным током осуществляется от аккумуляторной батареи.

Собирают схему при r_1 и r_2 , равных нулю, и подают в нее переменный ток от звукового генератора. Перемещая движок на реохорде, отыскивают минимум звука в телефоне.

Записав соответствующие этому условию значения длин плеч реохорда, находят величину отношения последних, т. е. $(r_3/r_4)_{\text{перем}}$.

Переключают всю схему на постоянный ток и путем перемещений движка на реохорде добиваются отсутствия тока через гальванометр. Записывают длины плеч на реохорде при этом условии и находят величину отношения этих плеч $(r_3/r_4)_{\text{пост}}$.

Сравнивают величины отношения плеч реохорда в первом и во втором случаях. Знак неравенства между величинами этих двух отношений нам важен для дальнейшей работы.

Оставляя схему под постоянным током, ставят движок на реохорде в положение минимума звука для переменного тока и изменением сопротивления магазинов r_1 (или r_2) в соответствии со знаком неравенства приводят показания гальванометра к нулю. Если $(r_3/r_4)_{\text{перем}} > (r_3/r_4)_{\text{пост}}$, то надо увеличивать значение r_1 , оставляя $r_2 = 0$. При обратном знаке неравенства надо увеличивать r_2 , оставляя $r_1 = 0$.

После этого переключают схему опять на переменный ток. Теперь

положение движка на реохорде в результате изменения значений r_1 и r_2 , произведенных при приведении гальванометра к нулю, не будет (в общем случае) отвечать минимуму звука в телефоне. Вновь находят перемещением движка минимум звука и, сравнивая соответствующее ему отношение $(r_3/r_4)_{\text{перем}}$ с $(r_3/r_4)_{\text{пост}}$, начинают все операции в прежнем порядке¹⁾. Их надо продолжать до тех пор, пока схема не будет уравновешена и на постоянном, и на переменном токе при одном и том же положении движка на реохорде и при одном и том же значении сопротивлений r_1 и r_2 . После этого из пропорций (2) и (3) находят значения L_1 и r_{L1} . Если исследуемая катушка имеет несколько клемм, то необходимо произвести измерения, поочередно включая в схему катушку полностью и все ее отдельные секции.

¹⁾ Легко убедиться в том, что теперь расхождение значений r_3/r_4 при обоих токах будет меньше, чем в первый раз. Изменения значений r_1 и r_2 , переместившие точку равновесия движка на постоянном токе в сторону увеличения значения r_3/r_4 , сместят в ту же сторону (но на меньшую величину) точку равновесия на переменном токе.

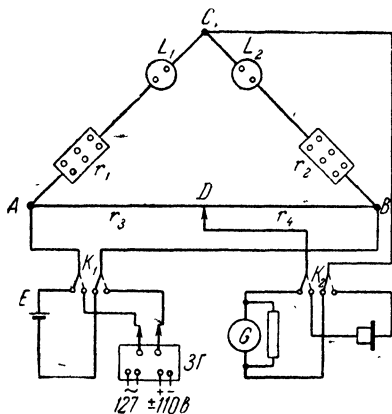


Рис. 2.

Технические данные установки. Установка включает в себя три штепсельных магазина сопротивлений КМС-6, один из которых шунтирует гальванометр при грубой балансировке моста. Кроме того, в установке имеется эталонная катушка индуктивности типа КИ-1, измеряемая катушка индуктивности, телефон и стрелочный гальванометр типа ГМП с чувствительностью 0,5 мка на деление. Используемый в схеме звуковой генератор изготовлен в мастерских физического факультета МГУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.
2. Курс физики, под редакцией Н. Д. П а п а л е к с и, т. II, Гостехиздат, 1948.
3. А. И. Т у д о р о в с к и й, Электричество и магнетизм, ч. II, ОНТИ, 1935.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

4. Е. А. С в и р с к и й, Общий курс электрических и магнитных измерений, Оборонгиз, 1939.
5. Курс электрических измерений, под редакцией В. Т. П р ы т к о в а и А. В. Т а л и ц к о г о, Госэнергиздат, 1960.

ЗАДАЧА 95

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ МОСТОВЫМ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ

Краткая теория. Для измерения коэффициента самоиндукции часто пользуются различными мостовыми схемами. Включение исследуемой катушки в одно из плеч моста приводит к тому, что в этом плече возникает некоторая разность фаз между током и напряжением. Если в остальные плечи моста включены лишь чисто активные сопротивления (т. е. сдвиг фаз между током и напряжением на остальных участках равен нулю), то никаким подбором этих сопротивлений нельзя уравновесить мост. Для того чтобы можно было уравновесить мост, необходимо дополнительно включить в соответствующее плечо моста какую-либо индуктивность или емкость. При этом индуктивность необходимо включать в прилегающее (по отношению к исследуемой катушке) плечо моста (см. задачу 94), а емкость в противоположное плечо моста ¹⁾.

Схема с использованием постоянной емкости приведена на рис. 1. Здесь R_4 , R_0 , R_1 — чисто активные сопротивления, C_0 — постоянная емкость, r_x и L_x — активное сопротивление и индуктивность

¹⁾ Переменная емкость может быть включена в одно плечо с исследуемой катушкой. В этом случае мост можно уравновесить, если выполнено условие резонанса (сдвиг фаз между током и напряжением равен нулю).

исследуемой катушки. Комплексные сопротивления или проводимости отдельных плеч моста будут

$$Z_1 = R_1, \quad \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R_0} + j\omega C_0,$$

$$Z_3 = r_x + j\omega L_x, \quad Z_4 = R_4.$$

Условие равновесия моста $\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$ в нашем случае примет вид

$$\frac{R_1}{R_0} + j\omega C_0 R_1 = \frac{r_x}{R_4} + j\omega \frac{L_x}{R_4}. \quad (1)$$

Одинаковые знаки при мнимых частях уравнения равновесия моста обеспечиваются включением индуктивности и емкости в противоположные плечи моста.

Приравнявая в последнем выражении действительные и мнимые части, получим

$$L_x = R_1 R_4 C_0, \quad r_x = \frac{R_1 R_4}{R_0}. \quad (2)$$

В отличие от моста постоянного тока условие равновесия в данном случае содержит два равенства, поэтому мост нельзя уравновесить, изменяя только один параметр схемы. Последнее обстоятельство вызвано тем, что при равновесии моста напряжения на плечах Z_1 и Z_3 должны совпадать как по амплитуде, так и по фазе.

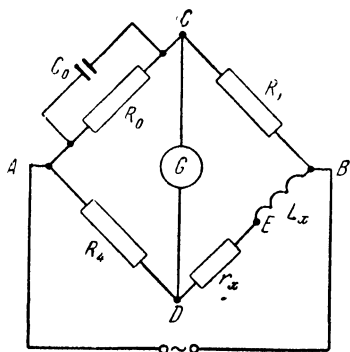


Рис. 1.

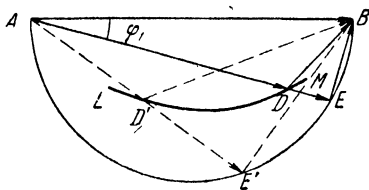


Рис. 2.

Для уяснения процесса уравновешивания моста рассмотрим векторную диаграмму напряжений на участке моста ADB . При этом будем пренебрегать током, идущим через гальванометр. Пусть вектор \vec{AB} (рис. 2) изображает напряжение между точками A и B . Так как рассматриваемый участок содержит активные сопротивления и индуктивность, то ток на участке ADB будет отставать по фазе от напряжения между точками A и B на некоторый угол $\varphi < 90^\circ$. Напряжение на участке активных сопротивлений ADE , совпадающее по фазе с током, будет изображаться вектором \vec{AE} , а напряжение на участке AD изобразится вектором \vec{AD} , который яв-

ляется частью вектора \overline{AE} . Напряжение на участке EB изобразится вектором \overline{EB} , повернутым на 90° относительно вектора \overline{AE} . Так как разделение активной и реактивной части сопротивления катушки является условным, т. е. непосредственно измерить можно лишь напряжение на концах катушки, то векторы \overline{DE} и \overline{EB} часто заменяют суммарным вектором \overline{DB} .

Если изменять сопротивление R_4 , то точка E будет перемещаться по дуге окружности $AE'EB$, а точка D по некоторой кривой LM .

Аналогичную векторную диаграмму напряжений можно построить для второй ветви моста ACB . Ток в этой ветви опережает по фазе напряжение на некоторый угол $\varphi_2 < 90^\circ$. Вектор \overline{AC} на диаграмме (рис. 3) изображает напряжение на участке AC , вектор \overline{CB} — напряжение на участке CB , которое совпадает по фазе с током

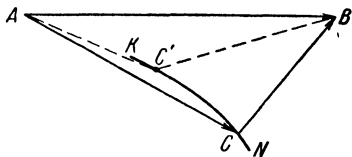


Рис. 3.

в ветви ACB . Угол между векторами \overline{AC} и \overline{CB} меньше 90° . Если изменять сопротивление R_0 , то точка C будет перемещаться по некоторой кривой KN .

На рис. 4 обе диаграммы приведены совместно. Если мост не уравновешен, т. е. между точками C и D имеется разность потенциалов, то точки C и D на диаграмме не совпадают. Так как мост можно уравновесить, то кривые LM и KN должны пересекаться. Процесс уравновешивания моста будет заключаться в том, чтобы

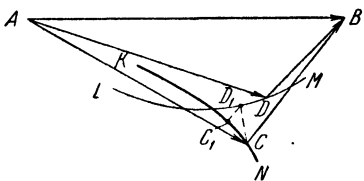


Рис. 4.

методом последовательного приближения свести разность потенциалов между точками C и D к нулю. Для этого необходимо, изменяя R_4 , добиться минимума разности потенциалов между точками C и D . Это будет означать, что вектор падения напряжения на участке AD будет \overline{AD}_1 , где точка D_1

есть ближайшая точка кривой LM к точке C . Изменяя затем сопротивление R_0 , необходимо добиться нового минимума тока. В этом случае вектор напряжения на участке моста AC будет \overline{AC}_1 , где C_1 — ближайшая точка кривой KN к точке D_1 . Этот процесс последовательного приближения нужно продолжать до тех пор, пока мост не будет полностью уравновешен, т. е. пока разность потенциалов между точками C и D моста не будет равна нулю в любой момент времени.

Измерения. Собрать схему моста, приведенную на рис. 1. В качестве R_4 , R_0 и R_1 используются магазины безреактивных

сопротивлений. При этом R_4 можно менять от нуля до 11 111,10 *ом* через каждые 0,01 *ом*, R_0 — от нуля до 11 111,0 *ом* через каждые 0,1 *ом*, R_1 — от нуля до 1000 *ом* через каждые 100 *ом*, C_0 — магазин емкостей от 0,001 до 1,11 *мкф*. В качестве индикаторного устройства в данной задаче применяется вибрационный гальванометр типа ВГ. Принцип действия этого гальванометра и правила обращения с ним смотрите в описании задачи 93. Мост питается переменным током через специально выведенную розетку. Так как перед розеткой включено большое сопротивление, то напряжение, подаваемое на мост, составляет несколько вольт. Тем не менее нужно помнить, что магазины сопротивлений должны быть включены на достаточно большое сопротивление, иначе через них может пойти ток больше допустимого. Поэтому настройку моста необходимо начинать с больших сопротивлений, постепенно уменьшая их.

Постоянное сопротивление R_1 нужно установить равным 100 *ом*, эталонную емкость $C_0 = 1$ *мкф*. В качестве исходных значений R_4 и R_0 удобнее взять $R_4 = 10\,555,55$ *ом* и $R_0 = 10\,555,5$ *ом* (см. задачу 93).

Для того чтобы уравновесить мост, необходимо, уменьшая R_4 , найти такое его значение, при котором ток, идущий через гальванометр, будет минимальным, затем, изменяя R_0 , нужно добиться более глубокого минимума тока. После этого необходимо уточнить значение R_4 и т. д., пока мост не будет полностью уравновешен. По полученным значениям R_4 и R_0 с помощью формул (2) вычисляются L_x и r_x .

В задаче требуется определить коэффициенты самоиндукции двух индуктивно связанных катушек, а также общую индуктивность при «прямом» и «обратном» соединении этих катушек, т. е. когда магнитные потоки складываются и когда вычитаются.

Если некоторое последовательное соединение катушек является «прямым», то для получения «обратного» соединения достаточно провода, подходящие к клеммам одной из катушек, поменять местами.

Индуктивности в этих двух случаях равны

$$L^{(+)} = L_1 + L_2 + 2M, \quad L^{(-)} = L_1 + L_2 - 2M,$$

где L_1 и L_2 — индуктивности первой и второй катушек, а M — коэффициент взаимной индукции. Зная $L^{(+)}$ и $L^{(-)}$, нужно определить коэффициент взаимной индукции

$$M = \frac{L^{(+)} - L^{(-)}}{4}.$$

Технические данные установки. В задаче использованы два магазина безреактивных сопротивлений МСРБ-48, магазин емкостей МЕ-3 и вибрационный гальванометр типа ВГ. Один из магазинов сопротивлений МСРБ-48 несколько переоборудован, что позволяет использовать его в качестве двух независимых сопротивлений (R_0 и R_1).

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. Е. А. С в и р с к и й, Общий курс электрических и магнитных измерений, Оборонгиз, 1939.
 3. Курс электрических измерений, под редакцией В. Т. П р ы т к о в а и А. В. Т а л и ц к о г о, Госэнергоиздат, 1960.

ЗАДАЧА 96

**ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА САМОИНДУКЦИИ,
 ЕМКОСТИ И ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОМА ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Краткая теория. Если к концам проводника с активным сопротивлением R_0 приложена переменная электродвижущая сила, величина которой в каждый момент времени t определяется уравнением

$$E = E_0 \sin \omega t, \quad (1)$$

где E_0 — амплитуда, а ω — круговая частота, то в нем возникает переменный электрический ток, сила которого в тот же момент определяется по закону Ома

$$I = \frac{E}{R_0} = \frac{E_0}{R_0} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t, \quad \text{где } I_0 = \frac{E_0}{R_0}. \quad (2)$$

Если же помимо сопротивления R_0 в цепи имеется индуктивность, характеризующая коэффициентом самоиндукции L , то под действием той же электродвижущей силы возникает ток силой

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi), \quad \text{где } I_0 = \frac{E}{\sqrt{R_0^2 + \omega^2 L^2}}, \quad (3)$$

а φ — сдвиг фаз между током и напряжением, определяемый из формулы

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega}{R_0}. \quad (4)$$

Из сопоставления уравнений (1) и (3) следует, что в этом случае ток отстает по фазе от напряжения:

Величина $R_1 = \sqrt{R_0^2 + \omega^2 L^2}$ носит название сопротивления, так как она играет в формуле (4) ту же роль, что и обычное активное сопротивление R_0 в формуле закона Ома. Величина же ωL называется индуктивным сопротивлением.

Если вместо самоиндукции в цепь переменного тока включена емкость C , то сила тока выражается формулой

$$I = I_0 \sin(\omega t + \varphi), \quad (5)$$

где

$$I_0 = \frac{E_0}{\sqrt{R_0^2 + \frac{1}{C^2\omega^2}}}, \quad (6)$$

а

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{R_0 C \omega}.$$

В этом случае сила тока опережает по фазе напряжение. Сопротивление цепи R_2 теперь запишется так: $R_2 = \sqrt{R_0^2 + \frac{1}{C^2\omega^2}}$, причем величина $1/C\omega$ называется *емкостным сопротивлением*.

Наконец, в случае, когда в цепь включены последовательно все три величины R_0 , L и C , сила тока в цепи может быть записана выражением

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi), \quad \text{где} \quad I_0 = \frac{E_0}{\sqrt{R_0^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}, \quad (7)$$

а

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R_0};$$

полным сопротивлением при этом является

$$R = \sqrt{R_0^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}. \quad (7')$$

Выражение (7) носит название формулы закона Ома для переменного тока.

В формулы (2), (3), (5) и (7) входят I_0 и E_0 — максимальные значения токов и напряжений. Но так как измеряемые приборами эффективные значения этих величин $I_{\text{эфф}}$ и $E_{\text{эфф}}$ связаны с максимальными посредством формул

$$I_0 = I_{\text{эфф}} \sqrt{2} \quad \text{и} \quad E_0 = E_{\text{эфф}} \sqrt{2},$$

то, подставляя отсюда I_0 и E_0 в вышеуказанные формулы, получим

$$I_{\text{эфф}} = \frac{E_{\text{эфф}}}{R_0}, \quad (8)$$

$$I_{\text{эфф}} = \frac{E_{\text{эфф}}}{\sqrt{R_0^2 + L^2\omega^2}} = \frac{E_{\text{эфф}}}{R_1}, \quad (9)$$

$$I_{\text{эфф}} = \frac{E_{\text{эфф}}}{\sqrt{R_0^2 + \frac{1}{C^2\omega^2}}} = \frac{E_{\text{эфф}}}{R_2}, \quad (10)$$

$$I_{\text{эфф}} = \frac{E_{\text{эфф}}}{\sqrt{R_0^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}} = \frac{E_{\text{эфф}}}{R}. \quad (11)$$

Во всех этих формулах под R_0 следует подразумевать сумму всех активных сопротивлений цепи (в том числе и катушки самоиндукции), на концах которой измеряется электродвижущая сила. Если разность потенциалов измеряется непосредственно на зажимах катушки, то R_0 есть сопротивление одной лишь катушки.

Упражнение 1

Измерение коэффициента самоиндукции

Описание прибора. Из формулы (10) следует, что

$$L = \frac{\sqrt{R_1^2 - R_0^2}}{\omega}, \quad \text{где } R_1 = \frac{E_{\text{эфф}}}{I_{\text{эфф}}}, \quad (12)$$

и R_0 — активное сопротивление,

$$R_0 = \frac{E_{\text{пост}}}{I_{\text{пост}}} \quad (13)$$

и ω — круговая частота.

Определив величины R_1 , R_0 , ω , найдем, очевидно, и L . Для этого катушка с неизвестной самоиндукцией L и активным сопротивлением R_0 , реостат r , амперметр A соединяются последовательно (рис. 1) и приключаются к средним клеммам перекидного рубильника K , к крайним клеммам которого подведены с разных сторон постоянный и переменный токи. Параллельно катушке и амперметру приключается вольтметр V . Оба прибора, вольтметр и амперметр, должны быть пригодны для измерений как постоянного, так и переменного тока.

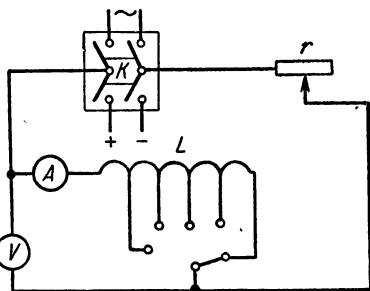


Рис. 1.

Для определения ω необходимо знать период переменного тока.

Если этот ток берут от городской сети, то для большинства городов СССР $T = \frac{1}{50}$ сек и, следовательно,

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 100\pi \approx 314 \text{ сек}^{-1}.$$

Измерения. 1. Для измерения активного сопротивления катушки устанавливают ползунок реостата на максимум сопротивления ¹⁾

¹⁾ Это необходимо делать в целях предохранения приборов от порчи, так как в противном случае сила тока при замыкании рубильника может оказаться больше предельной для данного амперметра и он может перегореть.

и, присоединив вольтметр, замыкают рубильник K на постоянный ток. Медленно передвигая ползунок реостата, устанавливают его в такое положение, чтобы стрелка амперметра дала достаточное для отсчета отклонение.

Измерив затем по приборам силу тока $I_{\text{пост}}$ и напряжение $E_{\text{пост}}$, изменяют переключением контактов число работающих витков катушки и производят дальнейшие измерения.

Проделав эти операции для каждого контакта не менее трех раз, подставляют средние результаты измерений в формулу (13) и вычисляют значения активных сопротивлений для каждого из контактов катушки.

При измерениях необходимо иметь в виду следующее: а) рубильник не следует держать включенным дольше, чем это необходимо для производства отсчетов, так как в противном случае катушка нагреется и сопротивление ее значительно изменится; б) переключение витков катушки L следует производить при полностью введенном в цепь сопротивлении реостата.

2. Для определения полного сопротивления катушки L замыкают рубильник K на переменный ток.

Изменяя положение движка реостата, устанавливают, как и прежде, достаточное отклонение стрелки амперметра. Произведя соответствующие отсчеты, изменяют число работающих витков катушки и, действуя далее совершенно аналогично предыдущему, получают для каждого контакта необходимые значения $I_{\text{эфф}}$ и $E_{\text{эфф}}$, подставляя которые в формулу (12), вычисляют соответствующие значения сопротивления R_1 .

Определяя таким образом значения R_0 и R_1 , находят при помощи формулы (12) значения L , а затем при помощи (4) — значения φ для каждого из контактов катушки.

Упражнение 2

Измерение емкости конденсаторов

Из формулы (11) следует

$$C = \frac{1}{\omega \sqrt{R_2^2 - R_0^2}},$$

где R_2 и R_0 — суммарное и чисто активное сопротивления цепи. В случае когда напряжение $E_{\text{эфф}}$ измеряется непосредственно на обкладках конденсатора, формула эта значительно упрощается, ибо активное сопротивление в цепи отсутствует ($R_0 = 0$). В этом случае

$$C = \frac{1}{\omega R_2}. \quad (14)$$

Для определения R_2 поступают следующим образом: соединяют последовательно измеряемый конденсатор C , амперметр A и реостат

r и приключают их к средним клеммам рубильника K (рис. 2). Параллельно конденсатору присоединяют вольтметр. Реостат r служит здесь лишь предохранителем на случай пробоя и короткого замыкания обкладок конденсатора и должен быть включен на максимальное сопротивление.

Измерения. Замыкают рубильник на переменный ток и отсчитывают по приборам силу тока $I_{\text{эфф}}$ и напряжение $E_{\text{эфф}}$. Определив R_2 по формуле

$$R_2 = \frac{E_{\text{эфф}}}{I_{\text{эфф}}}, \quad (15)$$

подставляют это значение R_2 в формулу (14) и вычисляют C . Измерения производят сначала отдельно для каждой из двух секций батареи конденсаторов, а затем при параллельном и последовательном их соединении, проверяя тем самым формулы соединений конденсаторов.

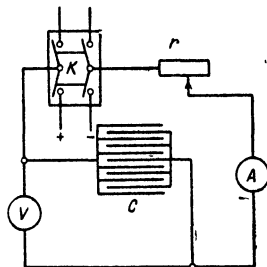


Рис. 2.

Упражнение 3

Проверка полного закона Ома для переменного тока

Из формулы (7') для случая последовательно включенных сопротивлений, самоиндукции и емкости имеем

$$R = \sqrt{R_0^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2} = \frac{E_{\text{эфф}}}{I_{\text{эфф}}}. \quad (16)$$

Для проверки этой формулы в цепь переменного тока включают последовательно: катушку самоиндукции с известным активным сопротивлением R_0 и коэффициентом самоиндукции L , конденсатор с известной емкостью C (секции которого соединены параллельно), регулирующее сопротивление (реостат) r и амперметр A (рис. 3). Параллельно части цепи, содержащей катушку и конденсатор, приключают вольтметр V .

Измерения. Установив реостат r на максимум сопротивления, замыкают рубильник K на переменный ток. Изменяя затем сопротивление реостата, добиваются достаточных показаний приборов и производят отсчет $I_{\text{эфф}}$ и $E_{\text{эфф}}$. Полученные результаты подставляют в правую часть формулы (16) и вычисляют R . С другой стороны, R определяется вычислением после

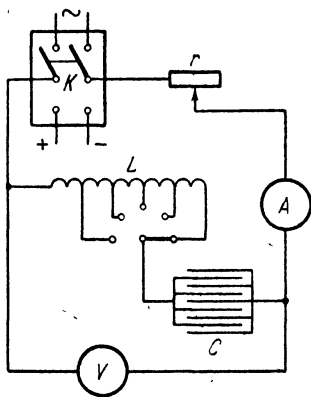


Рис. 3.

подстановки в левую часть формулы известных величин R_0 , L и C .

Полученные результаты сравнивают для проверки справедливости формулы полного закона Ома для переменного тока. Отчет по задаче представляют в виде таблицы измеренных и вычисленных величин сопротивлений участков цепи для переменного тока.

Технические данные установки. В задаче использованы астатический вольтметр типа АМВ с пределами измерений 7,5; 15; 30 и 60 в, астатический вольтметр типа АСТВ с пределами измерений 150 и 300 в, астатический миллиамперметр АСТ с пределами измерений 250 и 500 мА, батарея конденсаторов типа КБТ-МН емкостью 1 мкФ каждый, катушка самоиндукции с индуктивностью $\sim 0,01$ гн с 7 секциями, два реостата сопротивлением 200 и 400 ом на 2 а.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева, Курс общей физики, т. II, Физматгиз, 1962.
2. Курс физики, под редакцией Н. Д. Папалекси, т. II, Гостехиздат, 1948.
3. С. Г. Калашников, Электричество, «Наука», 1964.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

4. Е. А. Свирский, Общий курс электрических и магнитных измерений, Оборонгиз, 1939.
5. Курс электрических измерений, под редакцией В. Т. Прыткова и А. В. Талцкого, Госэнергоиздат, 1960.
6. Г. П. Шкурин, Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам, Воениздат, 1956.

ЗАДАЧА 97

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И СДВИГА ФАЗ МЕЖДУ ТОКОМ И НАПРЯЖЕНИЕМ

Упражнение 1

Измерение мощности и сдвига фаз при помощи ваттметра

Описание и краткая теория прибора. Как известно из теории переменного тока, средняя мощность, развиваемая током $I_{\text{эфф}}$ в участке цепи, на котором падение напряжения равно $V_{\text{эфф}}$, выражается соотношением

$$W = I_{\text{эфф}} V_{\text{эфф}} \cos \varphi, \quad (1)$$

где $I_{\text{эфф}}$ и $V_{\text{эфф}}$ — так называемые эффективные значения силы тока и напряжения, равные соответственно

$$I_{\text{эфф}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \quad \text{и} \quad V_{\text{эфф}} = \frac{V_{\text{max}}}{\sqrt{2}},$$

получающиеся при усреднении по времени квадрата мгновенного значения силы тока и напряжения синусоидального переменного тока. Угол φ есть угол сдвига фаз между током и напряжением, зависящий от сопротивления цепи R , ее самоиндукции L , емкости C и частоты тока ω .

Настоящая задача состоит в исследовании значений $\cos \varphi$ в различных цепях переменного тока. Если W , $I_{\text{эфф}}$ и $V_{\text{эфф}}$ экспериментально определены, то $\cos \varphi$ может быть вычислен из соотношения (1). Способы измерения величин $I_{\text{эфф}}$ и $V_{\text{эфф}}$ считаются известными, поэтому остановимся только на способе измерения величины W .

Среднее значение мощности может быть измерено при помощи специальных приборов — ваттметров. Существует ряд конструкций последних, ниже приводится описание ваттметра электродинамической системы.

Устройство и способ включения электродинамического ваттметра ясны из рис. 1 и 2. Ваттметр состоит из двух катушек — неподвижной катушки I с малым сопротивлением, включаемой в цепь переменного тока последовательно с тем участком, в котором надо произвести измерение мощности, и вращающейся катушки II с большим сопротивлением, включаемой параллельно исследуемому участку цепи. Вращающаяся катушка снабжена направляющими пружинами aa аналогично рамке всякого технического электроизмерительного прибора.

Разность потенциалов между концами катушки II равна разности потенциалов между концами исследуемой цепи и может быть записана в виде $V = V_{\text{max}} \sin \omega t$, а ток в катушке II в виде $i = (V_{\text{max}} \sin \omega t) / R$. По катушке I и исследуемой цепи течет ток, который в общем случае находится не в фазе с разностью потенциалов и выражается соотношением $I = I_{\text{max}} \sin (\omega t + \varphi)$. Из общих положений о взаимодействии проводников, обтекаемых токами, следует, что мгновенное значение вращательного момента электродинамических сил, приложенных к подвижной рамке ваттметра, будет

$$M = KI_{\text{max}} \frac{V_{\text{max}}}{R} \sin (\omega t + \varphi) \sin \omega t.$$

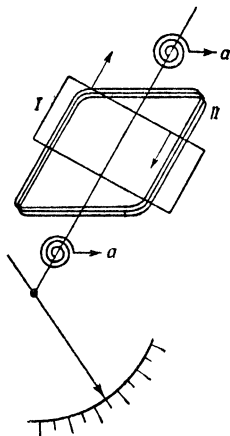


Рис. 1.

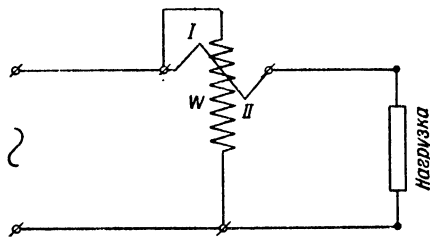


Рис. 2.

Из этой формулы видно, что M есть функция времени того же вида, что и известное выражение для мгновенного значения мощности переменного тока.

Вращающаяся система ваттметра обладает большим периодом и значительным затуханием. Ее устойчивое отклонение от положения равновесия при прохождении тока через рамку определяется равенством момента сил пружинок и среднего значения момента электродинамических сил

$$\begin{aligned}\bar{M} &= \frac{1}{T} \int_0^T M dt, \\ \bar{M} &= \frac{K}{T} \int_0^T I_{\max} V_{\max} \sin(\omega t + \varphi) \sin \omega t dt = \\ &= A \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} \cos \varphi = A I_{\text{эфф}} V_{\text{эфф}} \cos \varphi = AW. \quad (2)\end{aligned}$$

Таким образом, среднее за период значение момента сил, определяющее угол поворота подвижной рамки, пропорционально средней мощности, развиваемой переменным током в том участке цепи,

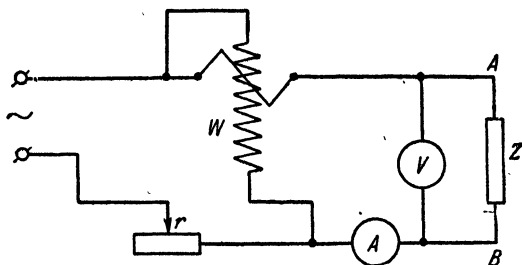


Рис. 3.

к которому приключен ваттметр. Колебания энергии, происходящие в цепи переменного тока без расхода на совершение внешней работы, не влияют на показания ваттметра, учитывающего только так называемую ваттную (расходуемую) мощность переменного тока.

Собрав цепь переменного тока по схеме, изображенной на рис. 3, можно, пользуясь измеренными значениями W , $I_{\text{эфф}}$ и $V_{\text{эфф}}$, вычислить $\cos \varphi$.

Измерения этих же величин позволяют найти полное сопротивление участка цепи переменному току, равное

$$Z = \frac{V_{\text{эфф}}}{I_{\text{эфф}}}.$$

Из выражения

$$R' = \frac{W}{I_{\text{эфф}}^2}$$

можно определить то активное сопротивление, в котором выделяется переменным током джоулево тепло. Пользуясь значениями Z и R' и законом Ома для переменного тока, можно составить выражения

$$\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2 = Z^2 - R'^2 = \frac{V_{\text{эфф}}^2}{I_{\text{эфф}}^2} - \frac{W^2}{I_{\text{эфф}}^4},$$

или

$$L\omega - \frac{1}{C\omega} = \frac{\sqrt{I_{\text{эфф}}^2 V_{\text{эфф}}^2 - W^2}}{I_{\text{эфф}}^2}, \tag{3}$$

а также

$$W'^2 = I_{\text{эфф}}^2 V_{\text{эфф}}^2 - W^2, \tag{4}$$

позволяющие найти индуктивное и емкостное сопротивления цепи и так называемую безваттную мощность W' .

Измерения. 1. В схему, изображенную на рис. 3, включают на место Z поочередно комбинации нагрузок, изображенные на

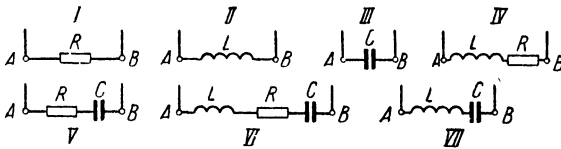


Рис. 4.

рис. 4, и с разрешения преподавателя производят измерения всех нужных величин. Результаты измерений записывают в следующую таблицу, в которую помещают также и значения вычисленных величин.

Включено	$I_{\text{эфф}}$	$V_{\text{эфф}}$	$I_{\text{эфф}}^2 V_{\text{эфф}}$	W	W'	$\cos \varphi$	Z	R'	L	C
R'										
Z										
C, L										
R, C										
и т. д.										

2. Определив значения $\cos \varphi$ и мощности W , развиваемой переменным током в разных схемах, изучают зависимость $\cos \varphi$ от одного определенного параметра цепи. В данном случае исследуют зависимость $\cos \varphi$ от величины индуктивного сопротивления цепи при

включении в нее переменной самоиндукции. Последняя изготовлена в виде катушки с выдвижным железным сердечником.

В схему включают сопротивление R и катушку самоиндукции L последовательно, как изображено на рис. 4 (IV). Силу тока доводят до 2—5 а и в катушку постепенно вдвигают железный сердечник. Для каждого положения сердечника вышеописанным способом определяют значения $\cos \varphi$ и индуктивного сопротивления катушки ωL . Результаты наблюдений записывают в таблицу, образец которой приведен ниже. Затем строят график зависимости $\cos \varphi$ от $L\omega$.

$I_{\text{эфф}}$	$V_{\text{эфф}}$	$I_{\text{эфф}}$	$V_{\text{эфф}}$	W	$\cos \varphi$	$L\omega$	$R = \text{const}$

Указания к выполнению работы. 1. В схеме имеются вспомогательные реостаты r . При первом включении каждого нового варианта схемы эти реостаты должны быть полностью введены.

2. Вторая часть упражнения выполняется при более сильном токе, чем первые измерения, поэтому измерение силы тока производится другим амперметром.

3. Сильный ток должен включаться на короткое время, так как нагревание катушки самоиндукции будет вызывать изменение ее активного сопротивления.

Упражнение 2

Измерение сдвига фаз и мощности с помощью электронного осциллографа

Описание и теория метода. Электронный (катодный) осциллограф может быть применен для наглядного исследования сдвига фаз между током и напряжением в цепях переменного тока, а также для измерения мощности переменного тока. Этот метод чаще всего применяется в радиотехнике, где не представляется возможным использовать на высоких частотах измерительные приборы обычной электротехники. В данном случае в задаче идет речь о принципиальном применении метода, поэтому он использован в наиболее простых условиях городского переменного тока.

На рис. 5 приведена схема участка цепи переменного тока, подлежащего исследованию, и принципиальная схема включенного в этот участок катодного осциллографа (описание катодного осциллографа см. в задаче 109). Одна пара пластин осциллографа (например, горизонтальная) включена параллельно исследуемому участку. Вторая пара пластин осциллографа при всех опытах неизменно

соединена параллельно с эталонным конденсатором C_0 , введенным в схему специально для измерительных целей. Значение этого конденсатора для измерений будет разъяснено ниже.

Средняя мощность, развиваемая переменным током на участке C, R, L , задается формулой (1). Для измерения мощности при помощи осциллографа необходимо обеспечить подачу на его пластины отклоняющих напряжений, пропорциональных величинам, входящим в формулу (1). Проанализируем с этой точки зрения работу схемы, изображенной на рис. 5.

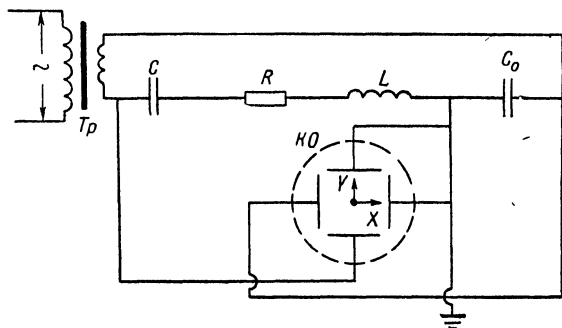


Рис. 5.

Осциллограф работает при выключенной временной развертке. Напряжение, поданное на горизонтальные пластины, пропорционально величине $V_{R,L,C}$. Следовательно, отклонение катодного луча в направлении оси Y будет

$$y = \frac{V_{R,L,C}}{q} = \frac{V_0}{q} \sin \omega t, \quad (5)$$

где q — вольтовая чувствительность луча осциллографа в направлении Y . Величина q выражается в в/см ; это — переменная величина, зависящая от используемого в данных условиях коэффициента усиления осциллографа.

Величина отклонения луча в направлении X пропорциональна напряжению на эталонном конденсаторе. Легко видеть, что это напряжение в свою очередь пропорционально силе тока в цепи. В самом деле, сила тока, заданная формулой (5), приведет к наличию на конденсаторе заряда

$$e = \int I_0 \sin(\omega t + \varphi) dt = -\frac{I_0}{\omega} \cos(\omega t + \varphi),$$

а следовательно, и разности потенциалов

$$V_{C_0} = \frac{e}{C_0} = -\frac{I_0}{C_0 \omega} \cos(\omega t + \varphi),$$

пропорциональной амплитуде силы тока.

Следовательно, введение в цепь эталонного конденсатора позволяет подать на вертикальные пластины осциллографа напряжение, пропорциональное амплитуде силы тока в цепи. Если чувствительность осциллографа в горизонтальном направлении есть ρ , то отклонение луча по оси X можно записать так:

$$x = \frac{V_{C_0}}{\rho} = -\frac{I_0}{\rho C_0 \omega} \cos(\omega t + \varphi). \quad (6)$$

Таким образом, на пластины осциллографа будут поданы два синусоидальных напряжения с равными частотами, но с разными амплитудами и фазами. Эти напряжения пропорциональны множителям, входящим в формулу мощности (1).

Известно, что в результате сложения двух перпендикулярных гармонических колебаний с равными частотами суммарное колебание является в общем случае движением по эллиптической траектории. Следовательно, в данном случае катодный луч должен вычерчивать на экране осциллографа эллипс. Уравнение этого эллипса будет иметь вид

$$\frac{x^2}{B^2} + \frac{y^2}{A^2} - \frac{2xy \sin \varphi'}{AB} = \cos^2 \varphi, \quad \text{где } B = \frac{I_0}{\rho C_0 \omega_0} \quad \text{и} \quad A = \frac{V_0}{q}.$$

Легко установить связь параметров этого эллипса с мощностью переменного тока и сдвигом фазы между током и напряжением. Сначала покажем, что площадь эллипса пропорциональна развиваемой током мощности. Элемент площади эллипса

$$\begin{aligned} dS &= y dx = y \frac{I_0}{\rho C_0} \sin(\omega t + \varphi) dt = \\ &= \frac{V_0}{q} \frac{I_0}{\rho C_0} \sin(\omega t + \varphi) \sin \omega t dt = \frac{1}{\rho q C_0} W dt, \end{aligned}$$

где W — мощность тока. Но

$$W_{\text{средн}} = \frac{1}{T} \int_0^T W dt = \nu \int_0^T W dt,$$

где $\nu = 1/T$ есть частота тока. Следовательно,

$$W_{\text{средн}} = \nu C_0 \rho q \int_S dS = \nu C_0 \rho q S, \quad (7)$$

где S — площадь эллипса.

Частота $\nu = 50$ гц. Величины ρ и q определяются из значений, используемых при работе усилений по прилагаемым к осциллографу специальным графикам. Емкость эталонного конденсатора известна ($C_0 = 2$ мкф). Таким образом, для измерения мощности остается найти из опыта площадь эллипса, получающегося на экране осциллографа. Площадь эллипса, как известно, выражается соотноше-

нием $S = \pi ab/4$, где a и b — длины осей эллипса; они-то и подлежат измерению на экране осциллографа.

Наблюдения того же эллипса позволяют определить и $\cos \varphi$, а затем вычислить W несколько иначе, чем в первый раз. Это можно сделать из следующих соображений.

Очевидно, что ориентация эллипса по отношению к осям координат зависит от угла φ . Так, например, при $\varphi = 0, \pi/2, \pi$ и т. д. оси эллипса совпадают с осями координат. Из формулы (6), дающей смещение луча по оси X , видно, что при $\omega t = 0, \pi, 2\pi, \dots, n\pi$ можно найти $\cos \varphi$ из выражения

$$\cos \varphi = -\frac{x}{x_0}, \quad (8)$$

где x_0 — амплитуда колебаний по оси X , а x — координата точки пересечения эллипса с осью абсцисс (рис. 6).

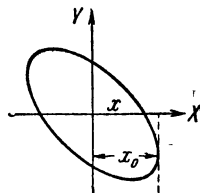


Рис. 6.

В связи с определением сдвига фаз между током и напряжением заметим следующее. Напряжение (5), поданное на горизонтальные пластины осциллографа и отклоняющее электронный луч вдоль оси y , будет в фазе с исследуемым напряжением $V_{R,L,C}$. Но напряжение (6), отклоняющее электронный луч вдоль оси x , будет (в результате применения вспомогательного конденсатора) смещено по фазе относительно силы тока на $3\pi/2$. Это обстоятельство надо иметь в виду во избежание недоразумений. Так, например, при синфазности тока и напряжения в исследуемой цепи отклонения электронного луча по x и по y будут иметь между собой сдвиг фаз $3\pi/2$ и на экране осциллографа вместо прямой линии получится эллипс, главные оси которого будут ориентированы по осям координат x и y . В частности, этот эллипс может обратиться в окружность. Если бы вспомогательным элементом цепи, с которого снимается напряжение, пропорциональное силе тока, было (вместо конденсатора) активное сопротивление, то это обстоятельство не имело бы места. Выбор в качестве вспомогательного элемента цепи конденсатора (вместо сопротивления) определяется исключительно практическими соображениями об удобном соотношении величин напряжений, подаваемых на пластины осциллографа при используемых параметрах установки и режиме цепи. Резюмируя это замечание, можно сказать, что на настоящей установке непосредственно *наблюдаемый* сдвиг фаз между колебаниями электронного луча вдоль оси x и вдоль оси y является дополнительным (до $\pi/2$) по отношению к искомому сдвигу фаз между током и напряжением в исследуемой цепи переменного тока, но расчет, произведенный по формуле (8) на основании измерений x и x_0 , дает, разумеется, истинное значение $\cos \varphi$.

Найденное значение $\cos \varphi$ позволяет определить развиваемую током мощность еще через эффективные значения силы тока и напряжения, входящие в формулу (1). Действительно, амплитудные значения силы тока и напряжения можно найти по амплитудным значениям x_0 и y_0 :

$$V_0 = qy_0, \quad I_0 = p\omega C_0 x_0,$$

после чего величина W вычисляется из выражения

$$W = \frac{1}{2} pqC_0 y_0 x_0 \omega \cos \varphi. \quad (9)$$

Описание установки. Монтажная схема задачи изображена на рис. 7. Исследуемым участком цепи переменного тока являются последовательно соединенные конденсатор C , реостат R и катушка самоиндукции L , хотя возможны и другие виды соединений.

В целях расширения диапазона изменения сдвига фаз φ , а следовательно, и вариации потребляемой мощности W возможны изменения величины емкости, что делается путем различных включений (параллельно, последовательно) двух имеющихся в схеме

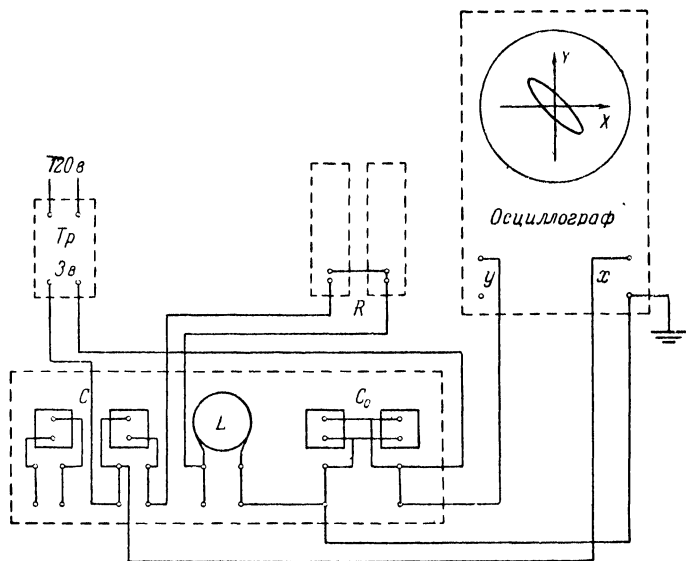


Рис. 7.

конденсаторов (емкость каждого 1 мкф) и величины сопротивлений двух реостатов (сопротивление каждого равно 2800 ом); изменение величины самоиндукции L не предусмотрено.

Питание цепи осуществляется 50-периодным током ($\nu = 50 \text{ гц}$) через понижающий трансформатор Tr , дающий 3 в . В работе применяется электронный осциллограф типа ЭО-5.

Измерения. Перед началом измерений, после того как собрана схема, устанавливают светящуюся точку на экране осциллографа на его середину так, чтобы она совпала с точкой пересечения средних линий на координатной сетке. Однако нельзя долго держать яркую точку на одном месте, так как это портит экран осциллографической трубки. Затем включают трансформатор, получив разрешение преподавателя или лаборанта.

Действуя усилителями осциллографа, можно получить эллипс, растянутый в том или ином направлении, но не следует делать, од-

нако, так, чтобы отклонение кривой от центральной точки экрана было меньше 1 см и больше 2,5 см. Для определения мощности первым способом надо измерить длины осей эллипса a и b и воспользоваться формулой (7).

Для определения величины сдвига фаз φ по формуле (8) и мощности вторым способом необходимо измерить величины x и x_0 . Величину $2x$ измеряют непосредственно на эллипсе как отрезок его секущей (см. рис. 6); для измерения x_0 отключают от схемы и входа горизонтальной пластины осциллографа соединяющий их проводник и измеряют длину получившейся на экране горизонтальной развертки, ее длина теперь равна $2x_0$. Аналогично находят величину y_0 . Все измерения проделывают несколько раз и вычисляют средние значения измеряемых величин. Опыт проделывают при нескольких значениях сопротивления R и емкости C , указанных на установке. Величины W и $\cos \varphi$ для каждого случая вычисляют по формулам (8) и (9).

Точность измерений W и φ описанным в задаче методом связана со стабильностью градуировки усилителей осциллографа. Выполняющий задачу берет величины p и q из графиков, дающих связь чувствительности осциллографа с отсчетами на ручках усилителей. Эти графики помещены на лабораторном столе задачи.

Очевидно, что описанное применение осциллографа для измерения сдвига фаз основано на предположении, что усилители этого прибора не вносят дополнительной разности фаз между подаваемыми на них напряжениями. В условиях задачи это требование удовлетворено. О контроле работы осциллографа в этом отношении см. раздел «Измерения» задачи 109.

Технические данные. В задаче использован осциллограф типа ЭО-5, астатический ваттметр типа АСТД на 450 и 750 *вт*, астатический вольтметр типа АМВ с пределами измерений 75, 150, 300 и 600 *в*, астатический амперметр АСТ на 2,5 и 5 *а*, батарея конденсаторов типа КБГ-МН по 4 *мкф*, 2 реостата: один сопротивлением 54 *ом* (ток 4 *а*) и второй сопротивлением 200 *ом* (ток 2 *а*), катушка самоиндукции с выдвижным сердечником.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука»; 1964.
2. Е. А. С в и р с к и й, Общий курс электрических и магнитных измерений, Оборонгиз, 1939.
3. Г. А. Р е м е з и С. Г. И т к и н, Радиоизмерения и радиоизмерительная аппаратура, Воениздат, 1947.
4. Г. П. Ш к у р и н, Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам, Воениздат, 1956.
5. Курс электрических измерений, под редакцией В. Г. П р ы т к о в а и А. В. Т а л ь ц к о г о, Госэнергоиздат, 1960.

ЗАДАЧА 98

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТИТАНАТА БАРИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ

В последние годы большое практическое значение приобрели вещества с высокой диэлектрической проницаемостью. В связи с этим большой интерес представляет исследование диэлектрических свойств этих веществ.

В данной задаче исследуются диэлектрические свойства титаната бария (BaTiO_3). По своим электрическим свойствам титанат бария относится к группе сегнетоэлектриков.

Сегнетоэлектриками называются вещества, которые ниже некоторой температуры, называемой точкой Кюри, или в некотором интервале температур имеют области — домены — спонтанной (самопроизвольной) поляризации. Следствием существования областей спонтанной поляризации у сегнетоэлектриков является наличие у них свойств, аналогичных свойствам ферромагнетиков: большие значения диэлектрической проницаемости, характерная кривая зависимости диэлектрической проницаемости от температуры с резким пиком в точке Кюри и гистерезис в зависимости заряда на обкладках конденсатора с сегнетоэлектриком от напряженности поля в области сильных полей при температурах ниже точки Кюри.

Изменение свойств при переходе через эту точку является следствием изменения кристаллической структуры сегнетоэлектрика в этой точке. Например, титанат бария выше точки Кюри имеет кубическую решетку, ниже — тетрагональную. Изучаемое фазовое превращение титаната бария является фазовым превращением второго рода, по-видимому, близким к первому роду. Описание структуры титаната бария выше и ниже точки Кюри см. т. I, задача 58.

При внесении сегнетоэлектрика в электрическое поле последний поляризуется. Электрическая индукция, для сегнетоэлектрика складывается из трех составляющих:

$$D = E + 4\pi P + 4\pi P_0, \quad (1)$$

где E — среднее макроскопическое поле в сегнетоэлектрике, P — средний электрический момент единицы объема, обусловленный поляризацией ионного смещения и смещения электронных оболочек и пропорциональный в слабых полях напряженности электрического поля, P_0 — электрический момент спонтанной поляризации.

Векторы E и P имеют одинаковое направление, а вектор P_0 в общем случае имеет другое направление. Полная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика, обусловленная поляризацией, вызываемой внешним полем и спонтанной, равна отношению D/E .

Из уравнения (1) получаем

$$\varepsilon = 1 + 4\pi \frac{P}{E} + 4\pi \frac{P_0 E}{E}. \quad (2)$$

Здесь P_{0E} есть проекция P_0 на направление поля E . В общем случае, когда P_{0E} и P не пропорциональны напряженности поля, можно определить лишь так называемую дифференциальную проницаемость:

$$\varepsilon = 1 + 4\pi \frac{\partial P_{0E}}{\partial E} + 4\pi \frac{\partial P}{\partial E}. \quad (3)$$

С увеличением внешнего поля полный электрический момент единицы объема $P_{\text{полн}}$ может увеличиваться по двум причинам: во-первых, в результате роста электрического момента поляризации смещения P , во-вторых, вследствие возрастания числа доменов, направление электрического момента спонтанной поляризации которых совпадает с направлением внешнего поля или образует с ним острые углы.

Процесс поляризации сегнетоэлектрика носит необратимый характер. Сегнетоэлектрики обладают гистерезисом. Сущность гистерезиса заключается в том, что поляризация сегнетоэлектрика определяется не только значением напряженности поля, но и зависит от предшествовавших состояний поляризации.

При изменении поля от $+E$ до $-E$ и от $-E$ до $+E$ индукция и поляризация в сегнетоэлектрике описывают замкнутую кривую, называемую петлей гистерезиса (рис. 1).

В общем случае и спонтанная поляризация и поляризация смещения являются нелинейными функциями напряженности поля. Однако в области не очень сильных полей поляризация смещения пропорциональна напряженности поля. В этой области можно разделить полную поляризацию на две составляющие следующим образом: экстраполируют ветвь насыщения петли гистерезиса (рис. 1) к значению поля, равному нулю. Отрезок KL соответствует поляризации смещения P , отрезок LO — спонтанной поляризации P_0 . Действительно, при насыщении можно считать, что ориентация доменов закончена, и дальнейший линейный рост поляризации с увеличением напряженности поля осуществляется за счет возрастания поляризации смещения. Поскольку она линейно зависит от напряженности поля, то экстраполяция ветви насыщения до оси P дает отрезок KL , соответствующий поляризации смещения. Отрезок OM соответствует остаточной поляризации, а ON — коэрцитивной напряженности E_k .

Гистерезис можно наблюдать, подводя к образцу сегнетоэлектрика с посеребренными поверхностями (сегнетоконденсатору) переменное напряжение. Часть электрической энергии, которая при

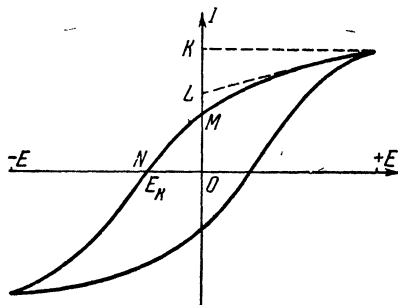


Рис. 1.

переменном напряжении в диэлектрике переходит в тепло, называют диэлектрическими потерями. Диэлектрические потери в сегнетоконденсаторе можно характеризовать тангенсом угла диэлектрических потерь, который выражается так:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{2\pi} \frac{W_{\tau}}{W}. \quad (4)$$

Здесь W_{τ} — энергия, перешедшая в тепло в единице объема диэлектрика за время одного периода, W — максимальная плотность энергии, запасенной в конденсаторе.

Угол диэлектрических потерь δ дополняет угол сдвига фаз между током и напряжением до 90° . Считая, что диэлектрические потери обусловлены только гистерезисом, найдем величину потерь энергии в единице объема W_{τ} по формуле

$$W_{\tau} = \frac{1}{4\pi} \oint E dD. \quad (5)$$

Максимальная плотность энергии конденсатора определяется по известной формуле

$$W = \frac{1}{8\pi} E_0 D_0, \quad (6)$$

где E_0 и D_0 — амплитуды напряженности поля и индукции. Подставляя (5) и (6) в (4), найдем тангенс угла диэлектрических потерь:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\oint E dD}{\pi E_0 D_0}. \quad (7)$$

Упражнение 1

Изучение зависимости диэлектрической проницаемости титаната бария от температуры

Измерение температурного хода диэлектрической проницаемости титаната бария сводится к измерению температурного хода емкости образца, представляющего собой небольшой диск из титаната бария с посеребрёнными плоскостями. Этот образец закрепляется в контактной рамке и вместе с рамкой помещается в печь. Емкость образца измеряется в интервале температур от 20 до 180°C с помощью моста переменного тока. Измерение температуры производится с помощью термопары, подключенной к вольтметру со шкалой до 10 мв. Градуировочная кривая термопары прилагается.

Пока изменения емкости в зависимости от температуры малы, измерения можно производить через каждые 20° , в области же быстрого изменения емкости (120 — 170°) измерения необходимо производить через каждые 5° . Результаты следует занести в таблицу и представить графически. Общая схема установки приводится на рис. 2.

В задаче применяется мост Е-12-2, общий вид которого схематически дается на рис. 3. Мостом Е-12-2 можно измерять емкости в семи диапазонах: от 10 до 500 пф, от 500 до 5000 пф, от 5000 до 50 000 пф и т. д.

Перед началом измерений нужно включить мост в сеть переменного тока напряжением 220 в и дать ему прогреться в течение 15 мин. Ручку «рег. напряж.» при этом повернуть влево до отказа. Исследуемый конденсатор подключается к клеммам R—C—L, переключатель «вид измерения» ставится в положение «С», переключатель «Q—tg δ» — в положение «tg δ». До включения печи

следует измерить емкость при комнатной температуре. Измерение емкости производится следующим образом. Поворотом ручки «уст. нуля» при нажатой кнопке «нажать» установить стрелку микро-

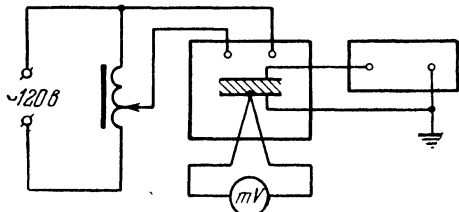


Рис. 2.

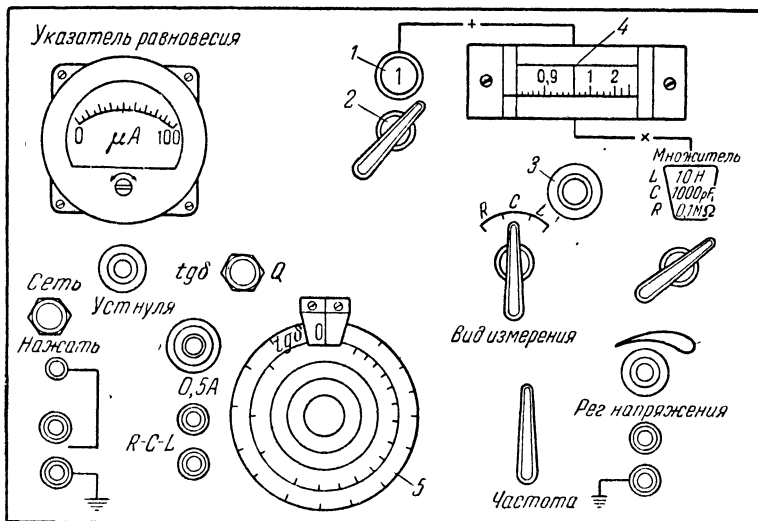


Рис. 3.

амперметра, являющегося указателем равновесия, на нуль. Ручкой «рег. напряжения» установить стрелку микроамперметра на участке от 80 до 100 делений шкалы. Ручкой переключателя отсчета (2 на рис. 3) установить в окошечке 1 цифру 1, ручкой потенциометра отсчета (3) — цифру 0,5 на шкале 4. Шкалу от-

счета тангенса угла потерь (5) установить в положение 0,002 — 0,005. Поворачивая ручку «множитель», добиться минимального отклонения стрелки микроамперметра. Ручками отсчета 2 и 3, а также поворотом шкалы 5 уравновесить мост, т. е. добиться наименьшего отклонения стрелки указателя равновесия.

Величина измеряемой емкости равна сумме показаний по шкалам 2 и 4, умноженной на величину множителя. При комнатной температуре емкость образца составляет несколько сотен пикофарад. Измерив емкость образца при комнатной температуре, включают печь и производят измерения его емкости при более высоких температурах.

Упражнение 2

Изучение явления гистерезиса у титаната бария

Исследование гистерезиса в зависимости заряда на обкладках конденсатора от приложенного напряжения производится с помощью схемы, изображенной на рис. 4. Напряжение от сети переменного тока ~ 127 в подается на трансформатор, повышающий напряжение до 700 в, а с него на делитель напряжения, состоящий из сопротивлений $r_1 = 7$ Мом и $r_2 = 660$ ком. Параллельно делителю включены две последовательно соединенные емкости: образец C_x и эталонный конденсатор $C = 0,1$ мкф, причем $C \gg C_x$. Непосредственно из схемы видно, что горизонтальные отклонения электронного луча на экране осциллографа пропорциональны напряжению, приложенному к образцу. Вертикальные отклонения пропорциональны напряжению на эталонном конденсаторе C . Напряжение на конденсаторе C пропорционально заряду Q_x на образце:

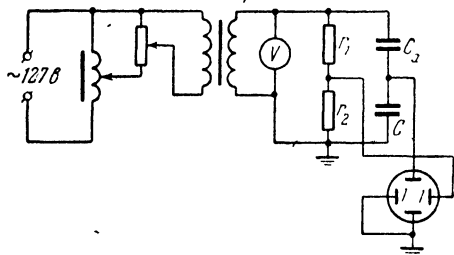


Рис. 4.

$$V_C = \frac{V_x C_x}{C} = \frac{Q_x}{C}. \quad (8)$$

При прохождении переменным напряжением полного цикла изменения электронный пучок опишет замкнутую кривую $Q = f(y)$ зависимости заряда на конденсаторе C_x от приложенного к нему напряжения. Эта кривая представляет собой петлю гистерезиса. Поскольку напряжение на эталонном конденсаторе пропорционально также поляризации P и индукции D , то наблюдаемая на экране кривая изображает также зависимость поляризации и индукции от напряженности поля. Масштабы, разумеется, во всех случаях различны. Для перевода вертикального отклонения y электронного луча в линейных единицах в единицы напряжения V слу-

жит график (рис. 5). Пользуясь этим графиком и формулой (8), можно перевести вертикальные отклонения электронного луча в единицы заряда.

В задаче электрическая схема для изучения гистерезиса смонтирована на специальной панели (рис. 6). Напряжение ~ 127 в подводится к клеммам, соединенным с потенциометром 1, который позволяет регулировать напряжение в первичной цепи повышающего трансформатора 2. Напряжение на вторичной обмотке трансформатора измеряется вольтметром 3. Образец крепится в держателе 4. Клеммы X и Y служат для подключения горизонтальной и вертикальной пластин осциллографа (см. рис. 4).

Для того чтобы по наблюдаемой на экране осциллографа петле гистерезиса произвести расчет некоторых величин, последнюю необходимо сфотографировать или скопировать.

Для фотографирования петли гистерезиса к осциллографу ЭО-6 сделана фотоприставка, позволяющая фотографировать на фотопленку размером 6×9 см.

Измерения. 1. Собрать схему, включить осциллограф в сеть 220 в и наблюдать на осциллографе петлю гистерезиса при различных напряжениях на образце.

2. Сфотографировать петли гистерезиса, получаемые при различных напряжениях на образце.

Для этого установить фотоприставку и убедиться, что на матовом стекле наблюдается четкое изображение петли гистерезиса. Установить максимальную яркость луча. Затем снять матовое стекло и вместо него поставить заряженную кассету. Открыв кассету и затвор, произвести фотографирование петли с экспозицией 90 сек. Выключив напряжение на входе вертикального усилителя, сфотографировать на ту же пленку горизонтальную ось координат. Затем сфотографировать вертикальную ось. Затем изменить напряжение на образце, поставить вторую кассету и сфотографировать картину и т. д. Фотографии следует делать при пяти напряжениях на образце: 350, 400, 450, 500 и 550 в.

3. Вычислить по формуле (7) тангенс угла диэлектрических потерь при пяти напряжениях на образце. Для этого формулу (7) целесообразно несколько преобразовать. Пусть чувствительность осциллографа по оси x составляет α в/мм, а по оси y — β в/мм.

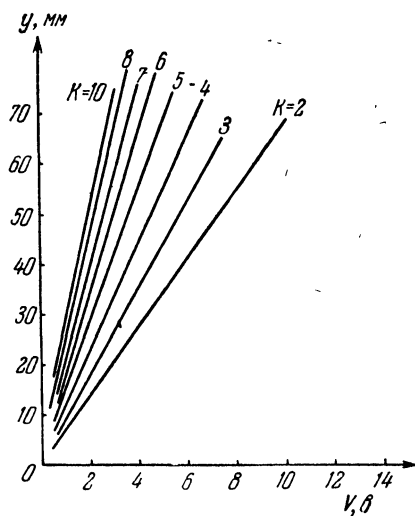


Рис. 5.

Тогда, производя замену

$$E = \alpha x \frac{1}{d}, \quad D = \beta y \frac{1}{d}, \quad \oint E dD = \frac{\alpha\beta}{d^2} \oint x dy = \frac{\alpha\beta}{d^2} S_{xy}$$

(здесь x, y — отклонения луча на экране осциллографа, d — толщина образца, а S_{xy} — площадь кривой петли гистерезиса), получим вместо (7) $\operatorname{tg} \delta = \frac{S_{xy}}{\pi x_0 y_0}$.

Величину S_{xy} можно выразить в квадратных миллиметрах, а максимальные отклонения по осям x_0 и y_0 — в миллиметрах. Для

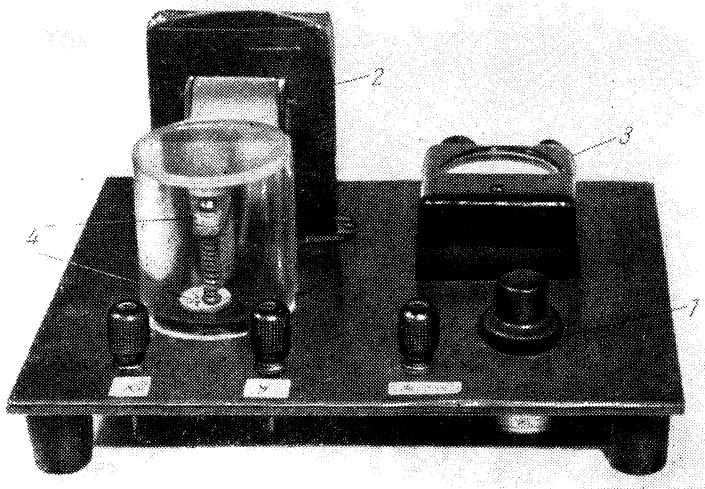


Рис. 6.

облегчения измерения площади петли ее можно вырезать и взвесить на демферных весах. Зная все единицы площади пленки, легко определить площадь петли.

Следует также построить график зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от напряженности поля в образце (толщина образца равна 1,91 мм).

4. По петле гистерезиса, снятой при напряжении на образце 450 в, найти полную поляризацию $P_{\text{полн}}$, поляризацию смещения P и спонтанную P_0 . Чтобы выразить эти величины в соответствующих единицах (например, СГСЭ/см²), нужно выразить отклонение луча по вертикали в абсолютных электростатических единицах заряда и разделить на площадь пластин сегнетоконденсатора $S = 0,828 \text{ см}^2$.

При выполнении работы следует помнить, что на образце подается высокое напряжение, и соблюдать правила техники безопасности при работе с высоким напряжением.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. Калашников, Электричество, «Наука», 1964, гл. V, гл. XI, §§ 122, 123, 132.
2. Р. В. Телеснин и В. Ф. Яковлев, Курс физики. Электричество, Учпедгиз, 1960, гл. III, § 132, гл. XI, §§ 133, 134, 135, 136.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

3. Г. И. Сканава, Физика диэлектриков (область слабых полей), Гостехиздат, 1949, гл. II, § 17, гл. IV, § 1 (а, б), стр. 317—331.
4. Н. С. Новосильцев и А. Л. Ходаков, Специальный практикум по сегнетоэлектрикам, Ростов н/Д, 1957.

ЗАДАЧА 99

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Введение. Полупроводниковым выпрямителем называется устройство, состоящее из двух различных металлических электродов, между которыми заключен слой полупроводника, и обладающее тем свойством, что его сопротивление зависит как от величины, так и от направления приложенного к нему напряжения (см. также задачу 101). Другими словами, такое устройство обладает выпрямительным или детекторным свойством. Иногда это свойство называют вентильным.

В настоящее время полупроводниковые выпрямители получили широкое распространение в различных областях электротехники, радиотехники и автоматики. Мощные выпрямители применяются, например, для преобразования тока промышленной частоты в постоянный на электровозах для питания двигателей постоянного тока. Менее мощные выпрямители служат для создания выпрямителей небольшой мощности, применяемых для питания различных радиотехнических устройств, а также для выпрямления токов высокой частоты. Полупроводниковые диоды с точечным контактом (кристаллические детекторы) применяются для детектирования слабых сигналов сверхвысоких частот, например в радиолокации.

Типичными примерами полупроводниковых выпрямителей являются германиевые, кремниевые, селеновые и меднозакисные выпрямители.

Все типы полупроводниковых выпрямителей имеют в принципе аналогичное устройство. При этом в выпрямителях с высокой выпрямительной способностью выпрямление может происходить на границе полупроводника с одним из электродов, а на границе того же слоя полупроводника со вторым электродом выпрямление оказывается незначительным или отсутствует полностью. Поэтому при обсуждении свойств полупроводниковых выпрямителей обычно

рассматривают контакт одного электрода с полупроводником, считая, что у второго электрода выпрямление отсутствует. Во многих случаях выпрямление имеет место на границе двух областей полупроводника, обладающих разными типами проводимости (электронной и дырочной), образующих электронно-дырочный контакт или переход.

Действие полупроводниковых выпрямителей основано на способности контактов какого-либо металла и полупроводника или контакта двух полупроводников с разными типами проводимости проводить ток в одном направлении лучше, чем в другом. При этом эффективное выпрямление имеет место, как правило, только в том случае, если в выпрямляющем контакте на границе металла с полупроводником или на границе двух полупроводников с различным типом проводимости имеется очень тонкий слой с резко повышенным сопротивлением, т. е. запирающий слой.

В настоящей работе студенты знакомятся со свойствами полупроводниковых выпрямителей на примере селеновых выпрямителей.

Селеновый выпрямитель. Селеновый выпрямитель, схематический разрез которого представлен на рис. 1, состоит из двух различных металлических электродов и тонкого слоя кристаллического

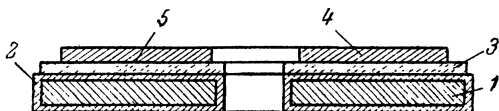


Рис. 1.

селена, заключенного между ними. Слой селена 3 имеет толщину 0,05—0,1 мм. Одним из электродов является железная шайба 1, покрытая слоем никеля 2; она обычно называется контактным электродом. Второй электрод представляет собой тонкий слой, например, тройного сплава легкоплавких металлов — кадмия, висмута и олова и называется вентильным электродом (4). На границе вентильного электрода и селена возникает запирающий слой 5.

Типичная зависимость плотности тока j через выпрямитель от приложенного к нему напряжения U изображена на рис. 2. Направление тока, соответствующее малому сопротивлению, называется прямым или пропускным. Противоположное направление тока, соответствующее большому сопротивлению, называется обратным или запирающим. В зависимости от направления тока напряжение и сопротивление выпрямителя называются прямыми или обратными. На рис. 2 ясно выражена нелинейная зависимость тока от величины приложенного напряжения как в прямом, так и в обратном направ-

влениях, а также несимметричность характеристики относительно направления тока или напряжения.

У селеновых выпрямителей прямое направление соответствует движению электронов от вентильного электрода через селен к контактному, т. е. соответствует полярности: плюс — на железной шайбе, минус — на слое сплава.

В прямом направлении сопротивление выпрямителя R , измеренное как функция приложенного напряжения, быстро уменьшается, стремясь к постоянной величине. В обратном направлении — сопротивление выпрямителя



Рис. 2.

вначале растет, достигает максимума и затем уменьшается. Типичная зависимость сопротивления выпрямителя от приложенного напряжения изображена на рис. 3.

Свойства выпрямителя часто характеризуются коэффициентом выпрямления, т. е. отношением токов, прямого к обратному, измеренных при одинаковых по величине прямом и обратном напряжениях. На рис. 4 изображена зависимость коэффициента выпрямления K от абсолютной величины напряжения, приложенного к выпрямителю. С увеличением напряжения коэффициент выпрямления быстро растет, достигает максимума, а затем уменьшается. Уменьшение коэффициента выпрямления с дальнейшим ростом напряжения вызывается быстрым возрастанием тока в обратном направлении.

В селеновом выпрямителе запирающий слой, а следовательно, и выпрямление имеет место на границе слоя селена с вентильным электродом. Эффективность выпрямления зависит от свойств поверхности слоя селена. Поэтому для достижения высокой выпрямительной способности перед нанесением вентильного электрода поверхность слоя подвергают различным специальным обработкам. На границе слоя селена с контактными электродами выпрямление практически отсутствует. Роль этого электрода заключается в осуществлении хорошего электрического контакта со слоем селена. Это

достигается подбором материала электрода. Никель дает наилучший невыпрямляющий контакт.

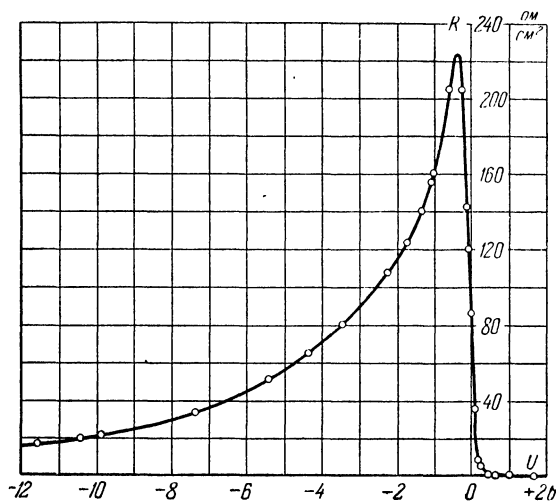


Рис. 3.

В технике качество выпрямителя обычно характеризуется не коэффициентом выпрямления, измеренным при каком-либо напря-

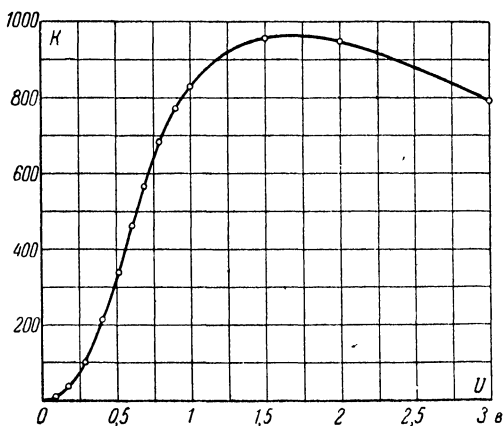


Рис. 4

жении, а величинами прямого и обратного напряжений, измеренными, например, при плотности прямого тока 40 ма/см^2 и плотности обратного тока 4 ма/см^2 . Чем выше обратное напряжение и ниже

прямое при указанных плотностях токов, тем выше качество выпрямителя.

При использовании выпрямителей в схемах на одну выпрямительную пластину подается напряжение, обычно не превышающее 20—25 в. В случае необходимости получения более высоких выпрямленных напряжений выпрямительные пластины собираются последовательно из расчета 20—25 в амплитудного напряжения на пластину. Для удобства сборки селеновые пластины изготавливаются в виде шайб с центральным отверстием. При сборке пластины нанизываются на изолированный болт попеременно с пружинящими латунными шайбами, обеспечивающими, с одной стороны, контакт с вентильным электродом одной пластины и, с другой стороны, с контактным электродом следующей выпрямительной пластины. Принцип сборки ясен из рис. 5.

Селеновые выпрямители нагружаются током из расчета не более 50 ма/см^2 при естественном охлаждении. При искусственном охлаждении нагрузка может быть повышена. При необходимости получения более сильных токов пластины включаются параллельно.

Изготавливают селеновые выпрямители следующим образом. На никелированную железную шайбу, нагретую до 270—280° С, наносят слой расплавленного селена и затем шайбу со слоем быстро охлаждают. Затвердевший селен имеет вид черного непрозрачного стекла (аморфный селен). Далее шайбу с затвердевшим на ней слоем аморфного селена подвергают горячей прессовке при температуре 140° С. В процессе прессовки слой селена размягчается, выравнивается и кристаллизуется.

В аморфном состоянии селен является хорошим изолятором, после же кристаллизации его сопротивление уменьшается примерно в 10^6 раз, достигая 1000—2000 $\text{ом} \cdot \text{см}$.

Шайбы с закристаллизованным слоем селена подвергают термической обработке, т. е. прогревают в печах при температуре 214—216° С в атмосфере воздуха. В результате такого прогрева сопротивление слоя селена уменьшается еще в 2—3 раза, что улучшает выпрямительные свойства. Для дальнейшего усиления выпрямительного свойства шайбы после термической обработки подвергаются прогреву в печи при температуре около 140—150° С в атмосфере паров серы. В результате такой обработки на поверхности слоя

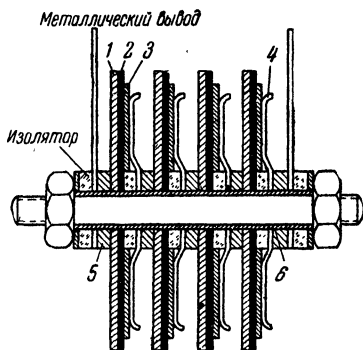


Рис. 5. Схема сборки селеновых пластин.

1 — контактный электрод выпрямительной пластины, 2 — слой селена, 3 — вентильный электрод выпрямительной пластины, 4 — пружинящая контактная шайба, 5 — металлические шайбы, 6 — изоляционная трубка.

селена образуется очень тонкая изолирующая пленка серы и ее сплава с селеном, т. е. искусственный запирающий слой. На обработанные таким образом шайбы пульверизацией расплавленного легкоплавкого сплава наносится металлический слой — вентильный электрод.

Полученную выпрямительную пластину подвергают электрической формовке. Для этого через выпрямительную пластину в течение нескольких десятков минут пропускают сильный ток обратного направления. В результате такой формовки выпрямительные свойства пластины резко улучшаются и стабилизируются.

Теория выпрямления. Как уже указывалось выше, выпрямление на границе металла с полупроводником имеет место в том случае, когда на границе существует тонкий слой с высоким сопротивлением, т. е. запирающий слой, играющий роль потенциального барьера между обоими телами. Возникновение слоя с повышенным сопротивлением связано с существованием контактной разности потенциалов между двумя соприкасающимися телами.

Как известно, при соприкосновении двух тел, обладающих разными работами выхода, происходит перетекание электронов так, что тело с меньшей работой выхода заряжается положительно, а тело с большей работой выхода — отрицательно, т. е. на границе между двумя телами возникает двойной электрический слой и, следовательно, потенциальный барьер. Возникающая между телами разность потенциалов называется контактной разностью потенциалов.

Образовавшиеся при этом заряды располагаются не строго на поверхностях (как это принято считать в электростатике), а распределены в пограничных слоях некоторой толщины. В металлах из-за большой плотности электронов в них этот заряд сосредоточивается почти точно на поверхности (в пределах одного-двух атомных слоев), в полупроводниках же вследствие их малой проводимости он простирается на значительно большую глубину. Эффективная толщина слоя объемного заряда в полупроводниках может на несколько порядков превышать расстояние между атомами (постоянную решетки).

Пусть металл находится в контакте с электронным полупроводником¹⁾, работа выхода электронов из кото-

¹⁾ Все полупроводники делятся на два типа: электронные полупроводники и «дырочные» полупроводники. В полупроводниках первого типа электропроводность осуществляется носителями электричества с отрицательным знаком — электронами; в полупроводниках же второго типа электропроводность осуществляется носителями электричества с положительным знаком, которые принято называть «дырками».

Выпрямление может существовать и на границе металла с дырочным полупроводником. Для этого необходимо другое соотношение между работами выхода металла и полупроводника. Направление выпрямления при этом будет противоположно направлению выпрямления для электронных полупроводников. Для

рого меньше, чем работа выхода электронов из металла. В этом случае при образовании контакта после установления динамического равновесия металл заряжается отрицательно, а в полупроводнике в результате уменьшения концентрации электронов вблизи границы образуется равный по величине положительный заряд. Поскольку плотность электронов в пограничном с металлом слое полупроводника оказывается меньше, чем в глубине его, то и сопротивление в области контактного объемного заряда будет больше, чем в глубине полупроводника. Таким образом, только в результате соприкосновения с металлическим электродом в пограничной области полупроводника возникает слой с повышенным сопротивлением. Этот слой, возникающий в результате обеднения пограничного слоя полупроводника электронами, обычно называется физическим или контактным запирающим слоем.

Запирающий слой на границе металла с электронным полупроводником возникает только при указанном соотношении работ выхода, т. е. если работа выхода из металла больше, чем работа выхода из полупроводника с электронной проводимостью.

Если же работа выхода из электронного полупроводника будет больше, чем из контактирующего с ним металла, то потенциальный барьер, а вместе с ним и слой с повышенным сопротивлением не образуются. Вследствие того, что теперь полупроводник заряжается отрицательно, в пограничном слое возникает избыточная концентрация электронов, и следовательно слой с пониженным сопротивлением. Такой контакт не будет действовать как выпрямитель, так как пониженное сопротивление слоя толщиной 10^{-5} — 10^{-6} см практически не скажется на полном сопротивлении обычно более толстого слоя полупроводника, заключенного между электродами выпрямителя.

Рассмотрим влияние поля, наложенного на запирающий слой. Пусть разность потенциалов приложена к контакту металла с полупроводником в направлении, противоположном контактной разности потенциалов, т. е. плюс — на металле, минус — на полупроводнике. При этом поле в приконтактной области ослабнет, и объемный положительный заряд в пограничном слое полупроводника уменьшится. Это приведет к уменьшению толщины, а следовательно и сопротивления запирающего слоя. При достижении напряжения, равного по величине (но противоположного по знаку) контактной разности потенциалов, объемный заряд, а вместе с ним слой повышенного сопротивления исчезнут, и сопротивление

электронных полупроводников прямое направление соответствует движению электронов от полупроводника к металлу, для дырочных же прямое направление соответствует движению электронов от металла в полупроводник.

Селеновые выпрямители являются примером полупроводниковых выпрямителей с дырочным полупроводником. Германиевые же выпрямители, диоды и детекторы обычно являются выпрямителями с электронным полупроводником.

выпрямителя будет равно омическому сопротивлению полупроводника. Дальнейшее увеличение тока будет происходить по линейному закону. Это направление поля соответствует пропускному или прямому направлению.

При приложении разности потенциалов обратного направления, совпадающей с направлением контактной разности потенциалов, область положительного объемного заряда, т. е. область пониженной концентрации электронов, расширяется. Это приводит к увеличению сопротивления заборного слоя.

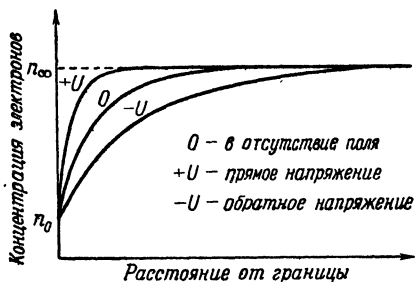


Рис. 6.

Таким образом, изменение концентрации электронов в приконтактной области полупроводника в зависимости от величины и направления приложенного напряжения позволяет качественно объяснить выпрямительное свойство контакта металла с полупроводником.

На рис. 6 изображены графики распределения плотности электронов n в полупроводнике вблизи контактирующего с ним металла в отсутствие напряжения (0) и при наличии прямого ($+U$) и обратного ($-U$) напряжений.

Теоретические вычисления зависимости тока от напряжения приводят к формуле вида

$$I = I_0 (e^{\alpha U_c} - 1), \quad (1)$$

где I_0 — константа, зависящая от свойств полупроводника и контактной разности потенциалов между металлом и полупроводником, U_c — разность потенциалов, приложенная к заборному слою:

$$\alpha = \theta \frac{e}{kT},$$

где e — заряд электрона, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, θ — коэффициент, зависящий от строения заборного слоя; при комнатной температуре для однородного тонкого заборного слоя ($\theta = 1$)

$$\alpha = \frac{4,8 \cdot 10^{-10}}{1,38 \cdot 10^{-16} \cdot 290 \cdot 300} \approx 40 \frac{1}{\text{см}}.$$

Так как последовательно с заборным слоем всегда оказывается включенным слой полупроводника, а практически измеряется полное падение напряжения на выпрямителе (а не на заборном слое), то формулу (1) следует переписать в виде

$$I = I_0 (e^{\alpha(U - IR_s)} - 1), \quad (2)$$

где U — напряжение, приложенное ко всему выпрямителю, IR_s — падение напряжения на слое полупроводника с сопротивлением R . Согласно формулам (1), (2) в прямом направлении ($U_c > 0$) при достаточно большом напряжении величина $e^{\alpha U_c} \gg 1$, $U \approx U_c$, и формулы могут быть записаны в виде

$$I = I_0 e^{\alpha U_c} = I_0 e^{\alpha U}, \quad (3)$$

т. е. ток растет экспоненциально с увеличением напряжения.

При еще большем напряжении, когда падение напряжения на толще слоя полупроводника становится соизмеримым с падением напряжения на выпрямителе, характеристику следует записывать в виде

$$I = I_0 e^{\alpha(U - IR_s)}. \quad (4)$$

При большом прямом токе характеристика становится линейной, т. е. дифференциальное сопротивление выпрямителя стремится к постоянной величине, что следует из формулы

$$R = \frac{dU}{dI} = \frac{1}{\frac{dI}{dU}} = \frac{1}{\alpha} + R_s, \quad (5)$$

которую можно получить, дифференцируя (2) по U и исключая из производной dI/dU напряжение U с помощью выражения (2).

Зависимость в виде формулы (3) удобна для сравнения с экспериментальными характеристиками. Построение экспериментального графика в системе координат ($\lg I; U$) должно дать прямую

$$\lg I = \lg I_0 + \alpha U \lg e$$

с угловым коэффициентом $\alpha = \frac{\Delta \lg I}{\Delta U} \frac{1}{\lg e}$, если теоретический характер зависимости совпадает с экспериментальным, и можно пренебречь падением напряжения в толще полупроводника.

В обратном направлении (при отрицательном U) с увеличением напряжения согласно формуле (1) или (2) сила тока стремится к насыщению, т. е. к постоянной величине I_0 . На опыте сила тока в обратном направлении при малых напряжениях действительно увеличивается с замедлением, т. е. сопротивление растет. Однако с некоторого достаточно высокого напряжения начинается быстрое возрастание обратного тока, что объясняется эффектами сильного поля, возникающими в запирающем слое. Например, вследствие большой напряженности поля, которая может достигать величины 10^5 — 10^6 в/см, электроны могут приобрести достаточно высокую энергию за время свободного пробега между соударениями и вызвать увеличение концентрации электронов вследствие ударной ионизации атомов решетки полупроводника. Это приводит к возрастанию обратного тока и уменьшению сопротивления (см. рис. 2 и 3).

Коэффициент полезного действия выпрямителя. Коэффициент полезного действия выпрямителя характеризует эффективность преобразования мощности W_{\sim} , потребляемой из сети переменного тока, в мощность постоянного тока W_{-} , выделяемую в нагрузку, т. е. выражается отношением

$$\eta = \frac{W_{-}}{W_{\sim}}$$

Однако вследствие того, что выпрямленный ток (в отсутствие сглаживающих фильтров) является пульсирующим, полная мощность, выделяемая в нагрузку, отличается от мощности постоянного тока. Это следует из того, что выпрямленный пульсирующий ток можно представить в виде суммы постоянной и переменных составляющих (гармоник разных частот) тока.

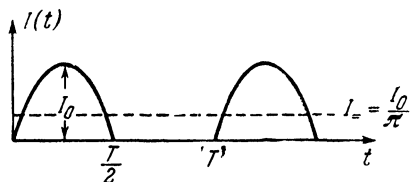


Рис. 7.

Для выяснения различия между полной мощностью и мощностью постоянного тока вычислим мощность, выделяемую в сопротивлении R , если через него течет пульсирующий ток, зависимость которого от времени имеет вид полусинусоид, отстоящих друг от друга на полупериода переменного тока (рис. 7). Математически эта зависимость может быть представлена следующим образом:

$$I(t) = I_0 \sin \omega t \quad \text{при} \quad 0 \leq t \leq \frac{T}{2},$$

$$I(t) = 0 \quad \text{при} \quad \frac{T}{2} \leq t \leq T.$$

Полная мощность, выделяемая в нагрузочном сопротивлении R таким током, по определению равна средней мощности за период переменного тока, т. е.

$$W_T = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) I(t) dt.$$

Согласно закону Ома $U(t) = RI(t)$, поэтому

$$W_T = \frac{1}{T} R \int_0^T I^2(t) dt.$$

Так как ток идет только в течение полупериода $0 \leq t \leq T/2$, то

$$W_T = \frac{1}{T} R \int_0^{T/2} I_0^2 \sin^2 \omega t dt = \frac{RI_0^2}{4}.$$

Пульсирующий ток полусинусоидальной формы (рис. 7) имеет постоянную составляющую, которую можно найти, усреднив его значение за период. Это дает

$$I_- = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_0 \sin \omega t dt = \frac{I_0}{\pi}.$$

Таким образом, постоянная составляющая выпрямленного тока или средний ток I_- в π раз меньше амплитудного значения тока I_0 .

Постоянный ток I_- , идущий по сопротивлению R , создает на нем постоянное падение напряжения $U_- = RI_-$. Поэтому мощность, развиваемая постоянной составляющей тока, $W_- = U_- I_- = RI_-^2 = = RI_0^2/\pi^2$. Следовательно, мощность W_- , развиваемая в сопротивлении R постоянной составляющей I_- выпрямленного пульсирующего тока, в $\pi^2/4$ раз меньше полной мощности W_T .

Мощность, развиваемая постоянной составляющей выпрямленного тока, может быть определена путем измерения постоянных составляющих тока и напряжения магнитоэлектрическими приборами. Известно, что показания магнитоэлектрических приборов пропорциональны средней величине тока или напряжения, т. е. величинам их постоянных составляющих.

Полная мощность, выделяемая в нагрузке, а также мощность, потребляемая из сети переменного тока, может быть измерена электродинамическим ваттметром. Показания электродинамического ваттметра пропорциональны среднему значению мгновенной мощности за период переменного тока (см. задачу 97). Для определения коэффициента полезного действия выпрямителя необходимо измерить полную мощность W_{\sim} , потребляемую выпрямителем вместе с нагрузкой из сети переменного тока. Для этого вольтметровую обмотку ваттметра подключают непосредственно к сети переменного тока, а амперметровую обмотку ваттметра включают последовательно с выпрямителем и нагрузкой. Так как показания ваттметра пропорциональны средней величине произведения тока на напряжение в его обмотках независимо от формы тока, то мощность, измеряемая электродинамическим ваттметром, является полной мощностью W_{\sim} , потребляемой из сети переменного тока. Она может быть представлена в виде суммы мощностей, развиваемых постоянной и гармоническими составляющими пульсирующего выпрямленного тока.

Для выпрямителя как источника постоянного тока полезной является только постоянная составляющая тока, тогда как гармонические составляющие являются бесполезными. Мощность, развиваемая выпрямителем по постоянному току W , важна в тех случаях, когда выпрямитель используется как источник постоянного напряжения, например для зарядки аккумуляторов, в гальванотехнике, для питания приборов, работающих только от источников

постоянного тока, и т. п. В тех случаях, когда нагрузкой выпрямителя является сопротивление, в котором мощность выделяется в виде тепла, для определения мощности, идущей на нагревание сопротивления, важна полная мощность W_T , выделяемая пульсирующим током.

Коэффициент полезного действия выпрямителя зависит от типа схемы. Очевидно, что коэффициент полезного действия двухполупериодной схемы больше, чем однополупериодной, так как в первом случае постоянная составляющая выпрямленного тока в два раза больше, чем во втором.

Упражнение 1

Получение вольтамперной характеристики селенового выпрямителя и ее изучение

1. Собрать схему для снятия вольтамперной характеристики согласно рис. 8. Здесь E — источник постоянного тока на 24 в, R_1 и R_2 — реостаты по 100 ом. Схема включения реостатов позволяет осуществить плавную регулировку тока в большом интервале значений. V — вольтметр постоянного тока. При малых напряжениях (до 1,5 в) рекомендуется использовать вольтметр со шкалой на 3—5 в. При более высоких напряжениях можно использовать

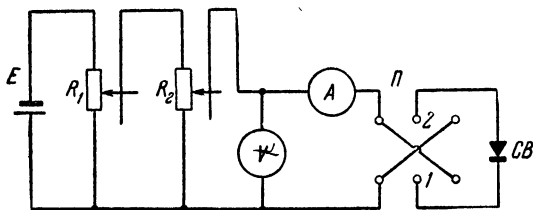


Рис. 8.

вольтметр со шкалой до 30—50 в. P — двухполюсный переключатель, CB — исследуемый элементарный выпрямитель, например селеновая выпрямительная пластина или столбик, собранный из нескольких пластин.

2. После сборки схемы снять полную вольтамперную характеристику столбика из выпрямительных пластин.

Снятие характеристики рекомендуется начинать с максимального тока в обратном направлении (не более 50 ма для пластин диаметром 35 мм). Затем, уменьшая величину тока до нуля, переменить направление тока (переключателем P) и производить дальнейшее снятие характеристики в прямом направлении, постепенно увеличивая ток до 0,5 а.

Так как величина тока через выпрямитель зависит от напряжения на нем по экспоненциальному закону, то удобнее при снятии

характеристики прямого направления задавать определенные значения величины тока, а величины получающихся напряжений отсчитывать по вольтметру. Рекомендуется задавать значения прямого тока примерно по экспоненциальному закону, например: 1, 1,5, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 150, 200, 300, 500 *ма*. Для получения характеристики обратного направления удобно задавать величины напряжений (примерно по линейному закону), а отсчитывать значения тока.

Для получения правильных значений напряжения на выпрямителе необходимо учесть падение напряжения на миллиамперметре. Для этого необходимо знать сопротивление миллиамперметра ¹⁾.

Результаты измерений для прямого и обратного направлений удобно свести в таблицы с графами:

<i>I</i> , <i>ма</i>	<i>U</i> измеренное, <i>в</i>	ΔU поправка, <i>в</i>	<i>U</i> исправленное, <i>в</i>	<i>R</i> , <i>ом</i>	$\lg I$	$\lg R$

3. Построить характеристики в линейных и полулогарифмических координатах.

В случае линейных координат по осям откладываются ток в *ма* и напряжение в *в*; характеристики прямого и обратного направлений наносятся на одной координатной сетке, причем прямой ток и напряжение считаются положительными, обратный ток и обратное напряжение — отрицательными. В случае полулогарифмических координат по оси ординат откладываются десятичные логарифмы абсолютных значений обратного и прямого токов, а по оси абсцисс — абсолютная величина напряжения в вольтах.

4. По полулогарифмической кривой для работы выпрямителя в прямом направлении найти параметры α и I_0 уравнения (3).

5. Построить график зависимости сопротивления *R* выпрямителя в прямом и обратном направлениях от напряжения в координатах ($\lg R, |U|$); здесь $R = U/I$.

Упражнение 2

Получение характеристики выпрямителя с помощью осциллографа

1. Собрать схему согласно рис. 9 (с работой осциллографа следует познакомиться по описанию задачи 109). Здесь *РАТ* — регулируемый автотрансформатор, часто называемый «вариак»

¹⁾ В случае, если сопротивление миллиамперметра мало и падение напряжения на нем не превышает 5% полного напряжения, то поправки вводить не следует.

(включается согласно обозначениям на его клеммной панели; перед включением в сеть указатель движка следует поставить в начальное положение, подобно движку в реостатах при потенциометрическом включении)¹⁾, T — понижающий трансформатор со средней точкой во вторичной обмотке, R — реостат на 200 ом (включается на крайние клеммы, без движка), B — исследуемые выпрямительные пластины, O — осциллограф типа ЭО-4.

Напряжение на сопротивлении R , пропорциональное току, идущему через выпрямитель, подводится к клеммам β вертикального отклонения осциллографа. Напряжение с выпрямителя подается на клеммы ε горизонтального отклонения осциллографа.

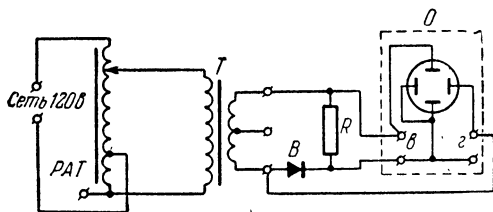


Рис. 9.

Поэтому луч при своем движении по экрану чертит характеристику выпрямителя в системе координат: по вертикали — ток, а по горизонтали — напряжение.

2. Включив осциллограф, следует включить схему и, увеличивая постепенно напряжение, получить на осциллографе характеристику.

Меняя величину чувствительности осциллографа и величину напряжения на выпрямителе, подобрать наиболее удобно наблюдаемую картину. Зарисовать характеристику на кальку или сфотографировать.

Если характеристика на экране осциллографа оказывается неудобно повернутой, то переключением проводов у осциллографа и у выпрямителя нужно добиться обычной ориентации характеристики относительно осей координат (такой же, как на рис. 2).

Сравнить полученную характеристику с вычерченной в линейном масштабе по точкам.

Упражнение 3

Исследование выпрямительных схем с помощью осциллографа

1. Собрать схему согласно рис. 10. Здесь PAT — регулируемый автотрансформатор, T — понижающий трансформатор со средней точкой, R — реостат на 200 ом (включается без движка), BC —

¹⁾ Вместо регулируемого автотрансформатора можно воспользоваться подходящими реостатами.

выпрямительный столбик, собранный по двухполупериодной схеме (две половинки столбика включены навстречу друг другу), Π — двухполюсный переключатель, O — осциллограф, V — вольтметр переменного тока на 150 в, A — амперметр постоянного тока (магнитоэлектрической системы) на 0,5 а.

В этом упражнении осциллограф используется с разверткой по времени для наблюдения формы напряжения на нагрузочном сопротивлении, т. е. вида зависимости тока через выпрямитель от времени.

2. Включив осциллограф, включить автотрансформатор или реостат, повысить напряжение до 120 в.

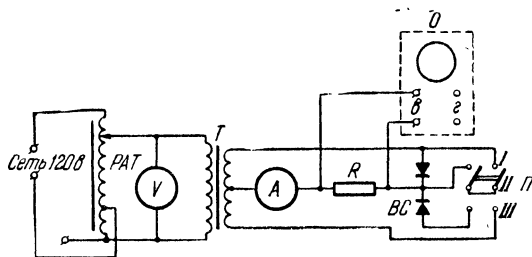


Рис. 10.

Если поставить переключатель Π в положение I , то одна половина выпрямительного столбика будет замкнута накоротко, а вторая отключена: выпрямление отсутствует; на осциллографе должна наблюдаться синусоида; при этом амперметр показывает нуль (т. е. выпрямленный ток отсутствует). Когда переключатель поставлен в положение II , то включены одна половина выпрямительного столбика и одна половина вторичной обмотки трансформатора. Получается простейшая схема однополупериодного выпрямления. На осциллографе должна наблюдаться синусоида со срезанными отрицательными (нижними) полупериодами¹⁾. Необходимой ориентации изображения можно добиться переключением концов на входе осциллографа.

Если поставить переключатель в положение III , то будут включены обе половины выпрямительного столбика и обе половины вторичной обмотки трансформатора. Получается схема двухполупериодного выпрямления со средней точкой.

Перекидывая переключатель в положение I , II , III , следует произвести зарисовку или фотографирование осциллограмм и записать показание амперметра.

¹⁾ Вопросы сглаживания выпрямленного напряжения подробно рассмотрены в описании задачи 101, где рассматривается кенотронный выпрямитель.

Упражнение 4

Измерение коэффициента полезного действия
селенового выпрямителя

1. Собрать схему однополупериодного выпрямления согласно рис. 11. Здесь *PAT* — регулируемый автотрансформатор¹⁾,

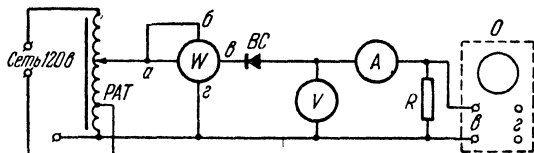


Рис. 11.

W — ваттметр (включается по схеме, изображенной на рис. 12; шкала соответствует 150 *вт*), *BC* — выпрямительный столбик, собранный для однополупериодной схемы, *V* — вольтметр постоянного тока, *A* — амперметр постоянного тока с переключателем, *R* — нагрузочное сопротивление (реостат на 200 *ом*), *O* — осциллограф.

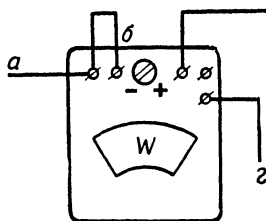


Рис. 12.

2. Включив осциллограф и автотрансформатор, медленно увеличивая напряжение, снять зависимость показаний амперметра I_{-} и вольтметра

U_{-} от мощности переменного тока W_{\sim} . При измерениях сила тока не должна превышать 0,5 *а*.

Результаты измерений свести в таблицу с графами:

W_{\sim} , <i>вт</i>	I_{-} , <i>ма</i>	U_{-} , <i>в</i>	W_{-} , <i>вт</i>	η , %

где W_{\sim} — мощность на переменном токе, измеренная ваттметром, W_{-} — мощность по постоянному току, равная $I_{-}U_{-}$, а η — коэффициент полезного действия, равный W_{-}/W_{\sim} .

3. Зарисовать или сфотографировать вид осциллограмм при выпрямленных токах в 0,2 и 0,5 *а*.

¹⁾ Вместо автотрансформатора можно использовать подходящий реостат (150—200 *ом*).

4. Построить зависимость выпрямленного тока I_{\sim} , выпрямленного напряжения U_{\sim} , выпрямленной мощности W_{\sim} и коэффициента полезного действия η (%) от мощности переменного тока W_{\sim} .

5. Собрать схему для двухполупериодного выпрямления (схема Греча) согласно рис. 13 (обозначения те же, что и на рис. 11). В этой схеме используются те же приборы, что и в предыдущей. Применяется выпрямительный столбик, собранный по двухполупериодной схеме.

6. Снять зависимость выпрямленного тока и напряжения от мощности переменного тока до значения выпрямленного тока 0,5 а.

Зарисовать или сфотографировать осциллограммы при выпрямленных токах в 0,2 и 0,5 а.

7. Построить зависимость выпрямленного тока I_{\sim} , выпрямленного напряжения U_{\sim} , выпрямленной мощности W_{\sim} и коэффициента полезного действия η от переменной мощности W_{\sim} . Зависимость построить на тех же графиках, что и для схемы однополупериодного выпрямления.

Технические данные установки. Селеновые выпрямительные столбики, собранные из выпрямительных пластин диаметром 35 мм или 45 мм. Необходимо иметь три столбика: 1) столбик, собранный по однополупериодной схеме, 2) столбик, собранный по двухполупериодной схеме, и 3) столбик, собранный по схеме Греча. Число шайб в столбиках может быть различным. В первом столбике желательно иметь не более трех пластин. Изменение переменных токов и напряжений в процессе измерений можно производить с помощью подходящих реостатов, однако лучше для этого воспользоваться регулируемым автотрансформатором (например, ЛАТР-2). Для наблюдения вольтамперных характеристик можно применить осциллографы типа ЭО-4 или ЭО-7. Для измерения постоянного тока и постоянного напряжения необходимы амперметр и вольтметр магнитоэлектрической системы. Желательно применить многошкальные приборы. Необходимо указать сопротивление амперметра для всех используемых шкал. Схемы упражнений 2 и 3 могут быть собраны без регулировки напряжения автотрансформатором или реостатом; в этом случае трансформатор должен быть рассчитан на включение в сеть, например, 127 в и иметь необходимое напряжение во вторичной обмотке 10—20 в.

Кроме того, необходимо иметь двухполюсный переключатель, ваттметр переменного тока, два реостата на 150—200 ом, постоянное сопротивление или реостат на 200 ом, 0,5 а.

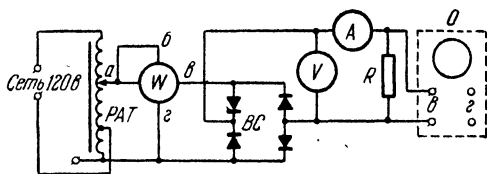


Рис. 13.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. И. Х. Г е л л е р и С. С. М е с к и н, Полупроводниковые выпрямители, Сборник статей «Полупроводники в науке и технике», т. 1, Изд. АН СССР, 1957.

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ И ТРИОДОВ

Введение. Свойства контакта двух полупроводников. Опытным путем было установлено, что во многих случаях контакт полупроводника с металлом, а также контакт двух полупроводников обладает свойствами проводить ток преимущественно в одном направлении (например, кристаллические детекторы).

Известно, что в полупроводниках возможны два различных процесса электропроводности — электронный и дырочный. Если концентрация электронов в полупроводнике больше концентрации дырок, то такой полупроводник обладает электронной проводимостью и называется полупроводником n -типа, если преобладает концентрация дырок, то такой полупроводник называется полупроводником p -типа.

Рассмотрим процессы, происходящие на границе двух полупроводников с разными типами проводимости (рис. 1). Так как концентрация свободных электронов в n -области больше, чем в p -области, то электроны диффундируют через контакт в сторону p -области. В обратном направлении диффундируют дырки. Попадая в область с противоположной проводимостью,

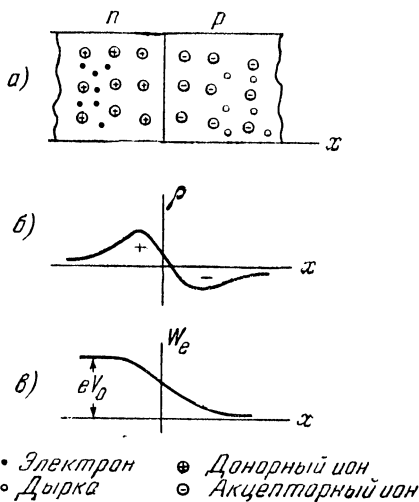


Рис. 1.

электроны рекомбинируют с дырками, и вблизи контакта наблюдается уменьшение концентрации свободных электронов и дырок (рис. 1, а). Так как атомные остатки в p -области заряжены отрицательно, а в n -области — положительно, то вблизи границы n -области накапливается положительный заряд, а в p -области — отрицательный (рис. 1, б), т. е. на границе образуется двойной электрический слой.

Возникающая между двумя областями разность потенциалов V_0 (рис. 1, в) препятствует дальнейшей диффузии через границу основных носителей тока, т. е. электронов из n -области и дырок из p -области. В то же время возникшее на границе поле способствует движению через переход неосновных носителей (электронов из p -области и дырок из n -области). Так как при тепловом движении существует распределение электронов по скоростям, то всегда имеется некоторое количество электронов, кинетическая энергия

W_k которых превышает величину потенциального барьера $W_0 = eV_0$; такие электроны (и дырки соответственно) будут проникать через барьер. Динамическое равновесие наступит тогда, когда среднее число заряженных частиц, движущихся против поля, возникшего на границе, будет уравновешено зарядами, пересекающими

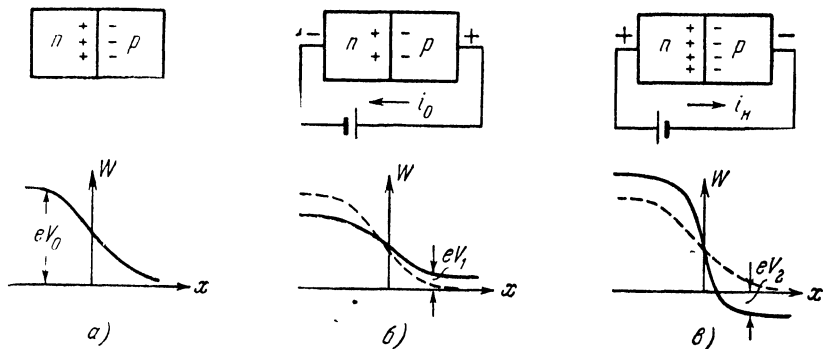


Рис. 2.

границу в противоположном направлении. Величина потенциального барьера eV_0 при этом должна быть порядка средней энергии теплового движения электронов ($3/2 kT$) и, следовательно, сильно зависит от температуры.

Если полупроводник включит в электрическую цепь так, что внешнее поле будет направлено против поля на границе (рис. 2, а и б), то высота потенциального барьера уменьшится на величину eV_1 . При этом нарушится динамическое равновесие и через контакт между p и n снова потечет ток основных носителей. Такое включение называется прямым или проводящим.

Если направление внешнего электрического поля совпадает с направлением поля на границе двух областей, то высота потенциального барьера возрастает на величину eV_2 (рис. 2, в). Число носителей тока, имеющих энергию $W_e > e(V_0 + V_2)$, очень мало, и ток основных носителей практически равен нулю. Через полупроводник течет только небольшой ток i_n неосновных носителей, величина которого мало зависит от приложенного напряжения, так как даже при наличии небольшого поля на границе ток неосновных носителей достигает насыщения. Зависимость тока через переход от приложенного напряжения (как в проводящем, так и в непроводящем направлениях) изображена на рис. 3.

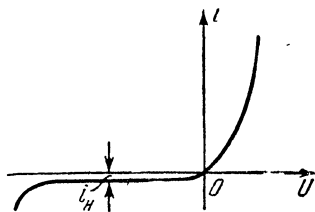


Рис. 3.

I. Изучение работы полупроводникового диода

Принцип действия полупроводниковых диодов основан на выпрямляющем свойстве контакта двух полупроводников с различными типами проводимости. Для промышленного изготовления полупроводниковых выпрямителей — диодов в кристаллах германия или кремния искусственным образом получают n — p - или p — n -переходы. При этом различают два основных типа диодов: точечные и плоскостные.

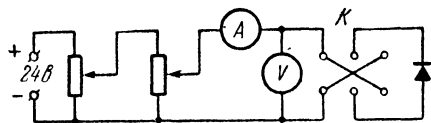
В точечных диодах p — n -переходы образуются в местах соприкосновения тонкой металлической проволоочки с кристаллом германия; эта проволоочка одновременно служит одним из электродов. Второй электрод — металлический штифт, к которому приваривается кристалл германия. Точечные полупроводниковые диоды применяются в качестве маломощных выпрямителей электрического тока, так как через точечный контакт не могут течь большие токи (больше 10—30 *ма*).

В плоскостных диодах p — n -переход изготавливают, например, путем встречной диффузии донорных и акцепторных примесей внутри однородного кристалла германия. Благодаря большой поверхности контакта p — n -полупроводников, через плоскостные диоды можно пропускать большие токи (до 300—500 *ма*) и подавать большие обратные напряжения (до 50—400 *в*). Применение плоскостных диодов ограничено областью низких частот, так как эти диоды обладают значительной емкостью и на высоких частотах внутреннее сопротивление их (при обратном напряжении) сильно падает.

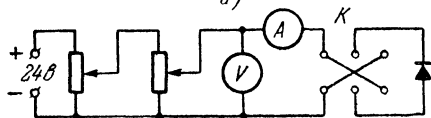
Упражнение 1

Снятие вольтамперной характеристики кристаллического диода

В проводящем направлении. Измерительная схема приведена на рис. 4, а. В схеме используется многопредельный вольтметр, который включается на клемму 3 *в*, ток измеряется миллиамперметром со шкалой 300 *ма*.



а)



б)

Рис. 4.

Переключением ключа K следует найти проводящее направление диода и снять зависимость тока через диод от напряжения на нем.

В непроводящем направлении. Измерительная схема приведена на рис. 4, б. Обратите внимание на порядок включения приборов в цепь! Источник питания и

вольтметр — те же, что и в предыдущем случае, ток измеряется микроамперметром на 75 мка.

Переключив ключ K в положение, соответствующее непроводящему направлению, снять зависимость обратного тока через диод от напряжения (до 3 в).

По полученным данным построить график $I = f(V)$ для проводящего и непроводящего направлений и определить внутреннее сопротивление диода

$$R = \frac{dV}{dI} = f(I).$$

Упражнение 2

Снятие характеристики диода с нагрузкой

Измерительная схема представлена на рис. 5, а. Последовательно с диодом включено сопротивление 2500 ом. Вольтметр включается на клемму 15 в, ток измеряется миллиамперметром на 10 ма.

Построить график $I = f(V)$.

Упражнение 3

Исследование вольтамперной характеристики диода с помощью осциллографа

Схема представлена на рис. 5, б. Через диод и последовательно включенное с ним сопротивление R пропускается переменный ток. Источником питания в схеме служит понижающий трансформатор, включенный на 127 в переменного тока. Так как на одни пластины осциллографа подается напряжение с диода, а на другие — напряжение с сопротивления R , пропорциональное току через диод, то на экране осциллографа можно наблюдать вольтамперную характеристику диода (см. задачи 99 и 101).

Следует зарисовать полученную осциллограмму и сравнить с вольтамперными характеристиками, снятыми в упражнениях 1 и 2.

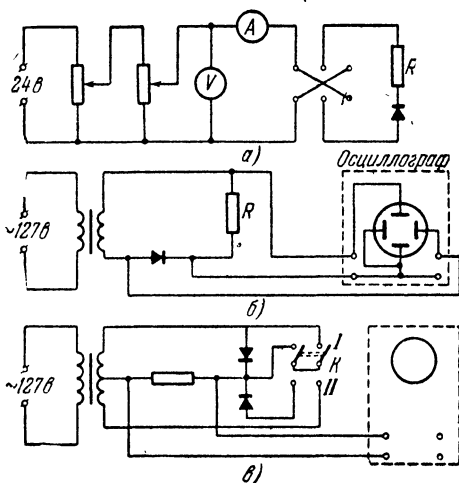


Рис. 5.

Упражнение 4

Исследование выпрямляющих свойств диода
с помощью осциллографа

Схема представлена на рис. 5, в. Как видно из схемы, пользуясь переключателем K , можно наблюдать осциллограммы невыпрямленного тока (положение I) и выпрямленного двухполупериодного тока (положение II).

II. Изучение работы полупроводникового триода

В полупроводниковом плоскостном триоде (транзисторе) используются свойства контакта двух полупроводников с различными типами проводимости.

Транзистор состоит из трех слоев: либо из двух p -областей, разделенных n -областью ($p-n-p$ -триод), либо из двух n -областей и одной p -области ($n-p-n$ -триод).

Рассмотрим работу триода $p-n-p$ -типа. Положение потенциальных барьеров без внешнего смещения в таком триоде показано на рис. 6, б пунктиром.

На левый электрод, называемый эмиттером, подается положительное напряжение $+U_э$ относительно среднего электрода (базы), т. е. переход эмиттер — база включается в проводящем направлении. На третий электрод (коллектор) подается отрицательное напряжение $-U_к$ относительно базы, причем обычно $|U_к| > |U_э|$. Коллекторный переход, таким образом, включен в непроводящем направлении для электронов базового слоя и дырок коллекторного слоя.

Изменение высоты потенциальных барьеров при таком включении внешних источников э. д. с. показано на рис. 6, б сплошной линией.

Рассмотрим, какие токи протекают через транзистор (рис. 6, а). Ток эмиттера складывается из дырочного тока i_1 , текущего с эмиттера в сторону базы, и электронного тока i_2 — с базы на эмиттер. Часть дырок, проходя через базовую область, рекомбинирует там с электронами, однако большая часть диффундирует сквозь узкую базовую область и попадает в поле коллекторного перехода. Коллектор-

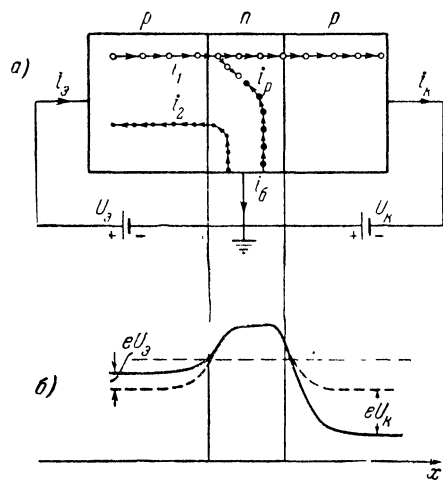


Рис. 6

ный переход закрыт для электронов n -области, но для дырок электрическое поле, существующее в области коллекторного перехода, является ускоряющим. Ток коллектора, таким образом, будет равен току i_1 , за вычетом тока рекомбинации i_p .

Таким образом, $i_3 = i_1 + i_2$, $i_6 = i_2 + i_p$, $i_k = i_1 - i_p$. Соотношение между i_1 и i_2 зависит от концентрации дырок в эмиттерной области и электронов в базовой. Обычно при изготовлении транзисторов концентрацию основных носителей в эмиттерной области делают много больше, чем в базовой. При этом $i_1 \gg i_2$ и ток рекомбинации тоже очень мал: $i_p \ll i_1$.

Если каким-нибудь путем изменить ток эмиттера, то изменится и коллекторный ток. Отношение приращения тока коллектора к приращению тока эмиттера при включении транзистора по схеме, приведенной на рис. 7, а (схема с заземленной базой), называется коэффициентом усиления по току. Если пренебречь током рекомбинации, то

$$\alpha = \frac{\Delta i_k}{\Delta i_3} = \frac{\Delta i_1}{\Delta i_1 + \Delta i_2}.$$

Величина α бывает порядка 0,92 ÷ 0,99, но всегда меньше единицы.

Часто применяют другую схему включения транзистора — схему с общим (заземленным) эмиттером (рис. 7, б). В этом случае токи будут такие же, как в схеме рис. 7, а, но коэффициент усиления по току β будет определяться отношением тока коллектора к току базы. Если пренебречь током рекомбинации, то

$$\beta = \frac{\Delta i_k}{\Delta i_6} \approx \frac{\Delta i_k}{\Delta i_3 - \Delta i_k} = \frac{\frac{\Delta i_k}{\Delta i_3}}{1 - \frac{\Delta i_k}{\Delta i_3}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

Величина β всегда больше единицы и изменяется от 20 до 100.

Для расчета радиосхем необходимо знать их характеристики. В схемах с заземленным эмиттером такими характеристиками являются зависимость напряжения на коллекторе от тока коллектора при постоянном токе базы (семейство коллекторных характеристик) и зависимость напряжения на базе от тока базы при постоянном токе коллектора (семейство базовых характеристик). Эти характеристики, в частности, позволяют определить коэффициент усиления транзистора.

Схема для получения характеристик триода. Принципиальная схема для получения характеристик полупроводникового триода содержит следующие элементы (рис. 8): генератор тока I , задающий

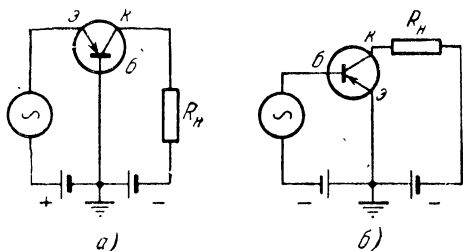


Рис. 7.

ток базы; генератор тока 2, задающий ток коллектора; измерительные приборы. Генератором тока называется прибор, дающий постоянный ток на выходе независимо от величины нагрузки.

Если сопротивление нагрузки мало и не может превышать некоторого определенного значения, то в качестве генератора тока

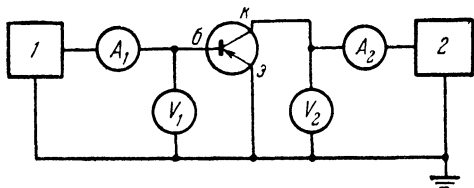


Рис. 8.

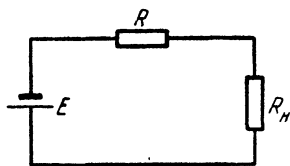


Рис. 9.

можно использовать батарею, соединенную последовательно с достаточно большим сопротивлением R (рис. 9), причем величина этого сопротивления должна быть значительно больше максимального значения сопротивления нагрузки.

Действительно, ток в этой цепи будет равен

$$i = \frac{E}{R + R_n} \approx \frac{E}{R} = \text{const}, \text{ если } R \gg R_n.$$

Так как сопротивление база — эмиттер очень мало, то генератор тока 1 (рис. 8) собран именно по такой схеме. В качестве батареи используется источник постоянного напряжения 110 в.

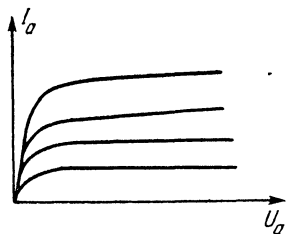


Рис. 10.

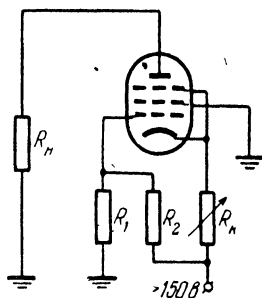


Рис. 11.

Для задания тока коллектора указанная схема непригодна, так как сопротивление коллектор — эмиттер велико (порядка 10^5 ом), и условие $R \gg R_n$ практически невозможно выполнить. В этом случае в качестве дополнительного сопротивления R используется пентод. Анодный ток пентода очень слабо зависит от анодного напряжения (задача 80) (вольтамперные характеристики на рис. 10). Следовательно, внутреннее сопротивление пентода достаточно ве-

лико, что используется в генераторе тока, схема которого приведена на рис. 11. Величину тока в этой схеме можно изменять, меняя сопротивление R_k .

Для измерения напряжений на коллекторе и базе требуются вольтметры с очень большим внутренним сопротивлением. В

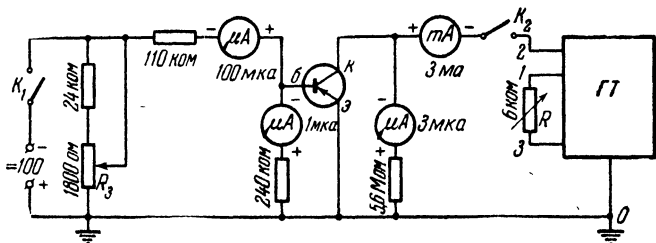


Рис. 12.

качестве таких вольтметров используются микроамперметры с последовательно включенными добавочными сопротивлениями.

Для получения значений напряжения в вольтах необходимо умножить показания микроамперметра на величину соответствующего добавочного сопротивления (внутреннее сопротивление микроамперметра мало по сравнению с добавочным сопротивлением). Величины сопротивлений указаны на схеме рис. 12.

Упражнение 1

Снятие коллекторных характеристик

1. Собрать схему согласно рис. 12, подсоединив предварительно к клеммам 1 и 3 реостат R .

2. Включить ключ K_1 (ток базы), затем K_2 .

3. Установить с помощью сопротивления R_3 ток базы, равный 10 мкА, и снять зависимость напряжения коллектор — эмиттер от тока коллектора. Изменение тока коллектора производится с помощью переменных сопротивлений R_1 (грубая регулировка) и R (точная регулировка). Ток базы должен поддерживаться постоянным.

4. Снять коллекторные характеристики при токах базы $I_b = 15, 20, 30$ и 50 мкА.

Упражнение 2

Снятие базовых характеристик

Установить ток коллектора равным 0,1, 0,2, 0,5 и 2 мА и снять зависимость напряжения база — эмиттер от тока базы при постоянном токе коллектора.

По полученным характеристикам определить

$$\beta = \frac{\Delta i_k}{\Delta i_g}; \quad \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}; \quad R_{к. б} = \left(\frac{\Delta U_k}{\Delta i_k} \right)_{i_g = \text{const}};$$

$$R_{э. б} = \left(\frac{\Delta U_g}{\Delta i_g} \right)_{i_k = \text{const}}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964, §§ 166—168, 231—234.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. Л о у, Э н д р е с и д р., Основы полупроводниковой электроники, «Советское радио», 1958.

3. А. Ф. И о ф ф е, Физика полупроводников, Изд. АН СССР, 1957.

З А Д А Ч А 101

ИЗУЧЕНИЕ КЕНОТРОННОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Основной частью кенотронного выпрямителя является кенотрон — электронный прибор с накаливаемым катодом и холодным анодом (двухэлектродная катодная лампа-диод). Электрический ток через кенотрон может идти лишь в одном направлении, когда

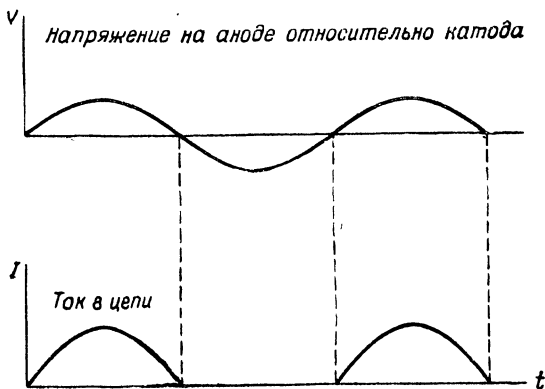


Рис. 1.

электроны через вакуумный промежуток двигаются от катода к аноду. Поэтому если включить кенотрон последовательно в цепь переменного тока, то ток в нем пойдет лишь в течение тех полупериодов, когда на аноде кенотрона оказывается плюс, а на катоде — минус напряжения. Такой ток называется пульсирующим (рис. 1).

Кенотронные выпрямители чрезвычайно удобны в технике слабых токов. Особенно часто кенотроны употребляются в радиотехнике, где бывает необходимость получить выпрямленное напряжение в несколько сотен вольт при токе в несколько десятков или сотен миллиампер. В современных рентгеновских установках кенотроны также получили широкое распространение, так как ток в рентгеновской трубке невелик.

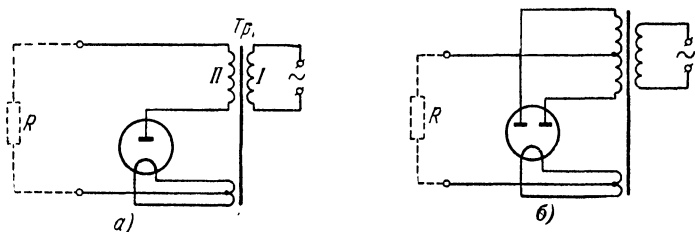


Рис. 2.

Кенотрон обычно включается во вторичную обмотку повышающего трансформатора (рис. 2, а). От дополнительной понижающей обмотки того же трансформатора питается обыкновенно и накал кенотрона.

Для того чтобы использовать оба полупериода переменного напряжения, применяют так называемое двухполупериодное выпрямление, для чего обычно используется кенотрон, имеющий два анода. Простейшая схема его включения изображена на рис. 2, б.

При такой схеме включения ток через кенотрон может идти в течение обоих полупериодов. Электроны с катода через вакуумный промежуток попадают на тот анод, который в данный момент находится под положительным напряжением относительно катода. Цепь тока замыкается через среднюю точку вторичной обмотки трансформатора и нагрузку R .

Очевидно, при такой схеме напряжение между катодом и анодом равно половине всего напряжения, создаваемого вторичной обмоткой трансформатора. При двухполупериодной (двухтактной) схеме ток в цепи также течет все время в одном направлении, но сила тока изменяется от нуля до некоторого максимального

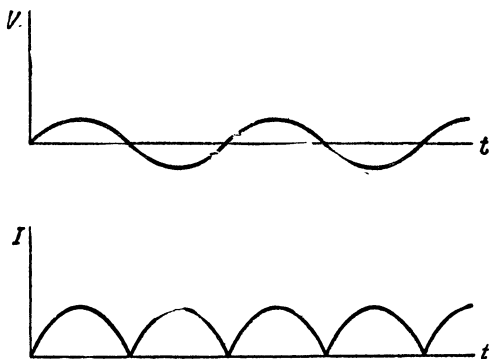


Рис. 3.

значения (рис. 3), т. е. ток по-прежнему имеет пульсирующий характер.

В большинстве случаев, например для питания анодных цепей радиоприемников, пульсирующий ток непригоден; его необходимо предварительно «сгладить». Сглаживание выпрямленного тока производится обычно с помощью катушек самоиндукции с железными

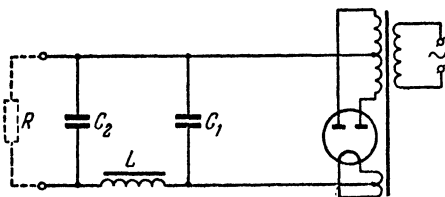


Рис. 4.

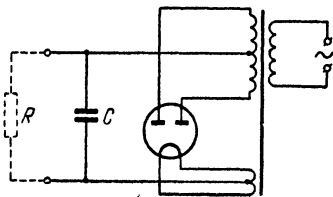


Рис. 5.

сердечниками (дросселей) и емкостей (конденсаторов), включаемых, например, так, как изображено на рис. 4. Совокупность этих дросселей и конденсаторов называется сглаживающим фильтром. При наличии фильтра график силы тока, идущего через кенотрон, существенно отличается от графика, изображенного на рис. 3,

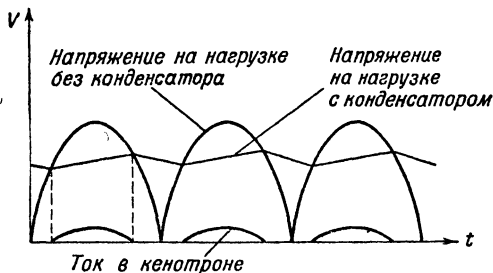


Рис. 6.

и не совпадает с графиком тока, протекающего по нагрузке R (подробнее об этом см. ниже). Для уяснения действия фильтра рассмотрим простейший случай, когда фильтр состоит из одного конденсатора, шунтирующего нагрузку (рис. 5). Очевидно, что в течение того времени, когда через кенотрон течет ток, конденсатор заряжается, в остальное время конденсатор разряжается через нагрузку (если сопротивление нагрузки достаточно велико); в результате этого напряжение на нагрузке при наличии конденсатора имеет значительно менее пульсирующий характер, чем без конденсатора (рис. 6).

Применение второго конденсатора и дросселя еще сильнее уменьшает пульсацию выпрямленного тока.

Напряжение на конденсаторе фильтра направлено навстречу напряжению трансформатора. Следовательно, ток через кенотрон пойдет только тогда, когда мгновенное значение напряжения трансформатора будет больше, чем напряжение конденсатора. В резуль-

тате получается, что и в двухполупериодном кенотроне ток идет не все время, а только в некоторые части периода.

Если полагать для простоты, что напряжение на конденсаторе лишено пульсаций и равно постоянной слагающей выпрямленного напряжения V_{cp} , то процесс прохождения тока через кенотрон можно иллюстрировать кривыми, изображенными на рис. 7. На этом рисунке представлены в одинаковых масштабах по осям три графика: *I* — характеристика кенотрона, *II* — график напряжения на кенотроне в зависимости от времени, *III* — график тока,

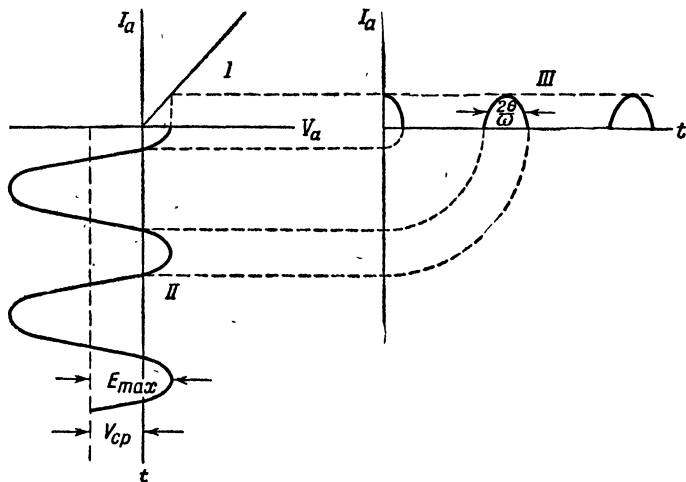


Рис. 7.

идущего через кенотрон в зависимости от времени. График *II* представляет собой косинусоиду, смещенную по оси напряжений на величину напряжения на конденсаторе фильтра. График *III* является производным от первых двух графиков; для удобства его построения все три графика располагаются, как указано на рисунке.

Из рис. 7 видно, что ток через кенотрон I_a имеет форму усеченной косинусоиды, уравнение которой можно написать в виде

$$I_a = SE_{max} (\cos \omega t - \cos \theta), \quad (1)$$

где $S = dI_a/dV_a$ — крутизна характеристики, θ — угол отсечки, равный половине угла, соответствующего полному времени прохождения тока через кенотрон (периоду тока соответствует угол 2π). При этом полагают, что $I_a > 0$ ввиду вентильного действия кенотрона.

Так как ток прекращается в момент равенства напряжений на трансформаторе и на конденсаторе, то

$$V_{cp} = E_{max} \cos \theta. \quad (2)$$

Далее, при $t = 0$ ток I_a достигает своего максимума

$$I_{\max} = SE_{\max} (1 - \cos \theta). \quad (3)$$

Среднее значение тока, проходящего по выпрямителю, будет

$$I_{\text{ср}} = 2 \frac{1}{2\pi} \int_{-\theta}^{+\theta} I_a d(\omega t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\theta} I_a d(\omega t) = \frac{2SE_{\max}}{\pi} (\sin \theta - \theta \cos \theta). \quad (4)$$

Средний ток указывается миллиамперметром выпрямителя. Напряжение на конденсаторе можно измерить высокоомным вольтметром постоянного тока. Деля (4) на (2), получим

$$\frac{I_{\text{ср}}}{V_{\text{ср}}} = \frac{2S}{\pi} (\operatorname{tg} \theta - \theta). \quad (5)$$

С помощью формулы (5) можно найти угол отсечки, так как крутизна характеристики кенотрона легко находится из прилагаемого к прибору графика.

Описание прибора. Выпрямитель, изучаемый в настоящей задаче, представляет собой типичный современный двухполупериодный кенотронный выпрямитель однофазного тока. Особенностью его

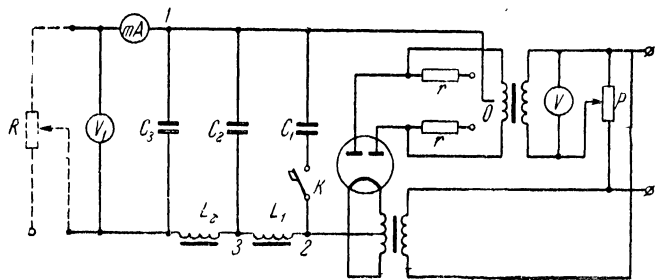


Рис. 8.

является лишь наличие отдельного понижающего трансформатора для накала нити катода, благодаря чему возможно изменять напряжение в первичной цепи главного трансформатора, не изменяя накала нити. Прибор собирается по схеме, изображенной на рис. 8. (Сопровиления rr , приключенные к анодам кенотрона, предназначены для выполнения упражнения 6. Значение ключа в цепи конденсатора C_1 разъясняется в тексте упражнения 1.)

В случае если в качестве емкостей в схеме используются электролитические конденсаторы, то следует иметь в виду, что они полярны и что неправильное их включение влечет пробой конденсаторов и порчу кенотрона.

Прикосновение руками к неизолированным элементам включенной схемы недопустимо.

Упражнение 1

Исследование зависимости напряжения на выходе выпрямителя от силы выпрямленного тока

Устанавливают при помощи делителя напряжения P (рис. 8) величину входного напряжения 110 в. Меняя сопротивление нагрузки R , наблюдают показания высокоомного вольтметра V_1 , соответствующие каждому значению силы тока $I_{\text{ср}}$. Строят график

$$V_{\text{вых}} = f(I_{\text{ср}}).$$

Падение напряжения на выходе выпрямителя при увеличении тока в нагрузке связано с увеличением падения напряжения внутри кенотрона и на дросселях фильтра.

По наклону кривой полученного графика находят величину $\frac{\Delta V_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{ср}}}$, равную сопротивлению выпрямителя. Эту величину следует находить для линейной части графика, соответствующей нормальным нагрузкам выпрямителя. Часть графика, соответствующая малым нагрузкам (токи 5—20 ма), будет нелинейна. Поэтому измерения напряжения на выходе выпрямителя при малых нагрузках надо вести, изменяя значение силы тока небольшими степенями.

Схема опыта допускает также количественное исследование переменной составляющей пульсирующего напряжения на разных участках схемы после кенотрона. Для этой цели используется вольтметр переменного тока (один многошкальный или два на разные диапазоны напряжения), включаемый через разделительный конденсатор. Такой способ включения обеспечивает измерение этим прибором только переменной слагающей напряжения. На схеме (рис. 8) этот вольтметр (и используемый вместе с ним конденсатор) не показан. Вольтметр включается через конденсатор один раз на выход выпрямителя, другой раз на первую ячейку фильтра (точки схемы 1—3), третий раз на входной конденсатор фильтра (точки схемы 1—2).

Для каждого способа включения вольтметра исследуют зависимость его показаний от силы тока на выходе выпрямителя. Результаты измерений представляют в виде графиков. Этим способом удается проследить, как сглаживается напряжение после кенотрона разными элементами фильтра и как это сглаживание ухудшается по мере роста нагрузки выпрямителя.

Использование многошкального прибора (или разных вольтметров) необходимо потому, что значение переменной слагающей напряжения на разных участках схемы будет резко различным. Процент пульсаций напряжения оценивается как отношение амплитуды пульсаций к постоянному напряжению на выходе.

Все вышеуказанные в настоящем параграфе измерения проделывают при замкнутом ключе K (рис. 8) в цепи входного конденсатора фильтра C_1 . Это соответствует емкостному входу фильтра. Размыкая ключ K , можно сделать вход фильтра индуктивным. Рекомендуется повторить исследования переменных слагающих напряжения для случая фильтра с индуктивным входом. Выясняющееся на опыте различие в действии фильтров с разными входами самостоятельно истолковывается выполняющими работу студентами.

Упражнение 2

Определение угла отсечки выпрямителя

Присоединяют высокоомный вольтметр к клеммам конденсатора C_1 при нормальном входном напряжении, равном 110 в, и при различных нагрузках наблюдают $V_{ср}$ и $I_{ср}$. По формуле (5) вычисляют $\operatorname{tg} \theta$ — θ и по таблице (в конце данной задачи) находят θ . Составляют график $\theta = f(I_{ср})$.

Знание угла отсечки позволяет произвести подсчет выпрямленного напряжения на конденсаторе C_1 , даваемого формулой (2). Для этого необходимо знать еще напряжение вторичной обмотки трансформатора (напряжение на половине обмотки). Искомое напряжение определяется по напряжению на первичной обмотке и коэффициенту трансформации. Коэффициент трансформации находят из таблицы, приложенной к прибору.

Примечание. В связи с большим падением напряжения на дросселе L_1L_2 фильтра (рис. 8) при нагрузке выпрямителя напряжение на выходе выпрямителя значительно отличается от напряжения на конденсаторе.

Осциллографическое исследование работы кенотронного выпрямителя. Дальнейшее более наглядное исследование работы выпрямителя и выяснение роли отдельных элементов сглаживающего фильтра выполняется при помощи двухлучевого осциллографа.

Двухлучевой электронный осциллограф, установленный для задачи, позволяет наглядно на экране электронно-лучевой трубки видеть развертку во времени напряжений между различными точками схемы выпрямителя. На данном приборе одновременно можно видеть две осциллограммы, что весьма удобно, когда сравниваются два напряжения или наблюдается сдвиг фаз между двумя напряжениями.

Описание однолучевого осциллографа дано в задаче 109, описание ручек управления двухлучевого осциллографа приводим здесь.

На рис. 9 показана передняя панель двухлучевого осциллографа. Рукоятки A_1 и A_2 — вертикальное смещение первого и второго лучей, B_1 и B_2 — горизонтальное смещение первого и второго лучей, B_1 и B_2 — регулировка яркости лучей, Γ_1 и Γ_2 — фокусировка лучей, D — экран трубки с сеткой, E — переключатель диапазонов частоты развертки, $Ж$ — плавная регулировка частоты генератора развертки, $З$ — переключатель синхронизации, $И$ — регулировка степени (глубины) синхронизации, K — регулировка амплитуды развертки, L — сетевой выключатель осциллографа, M_1 и M_2 — регулировка усиления вертикальных усилителей первого и второго лучей, H_1 и H_2 — шкалы усилителей первого и второго лучей, O_1 и O_2 — входные гнезда первого и второго лучей, P_1 и P_2 — входные гнезда, соединенные с корпусом осциллографа (земля), первого и второго лучей.

Порядок включения осциллографа. Включить шнур питания прибора в гнезда 120 в на щитке питания (на задней стенке). При этом надо помнить, что прибор нельзя включать на постоянный ток, ибо это ведет к его гибели. Повернуть ручку Л (рис. 9) выключателя на передней панели в положение «включено». Когда лампы прибора нагреются, на экране появятся две светящиеся линии. Положение этих линий на экране меняется ручками A_1 , A_2 , B_1 , B_2 в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Линии фокусируются, т. е. становятся прямыми с резко очерченными границами, при помощи наружных ручек Γ_1 и Γ_2 . Длина линий регулируется ручкой К — «амплитуда».

Яркость изображения регулируется внутренними ручками B_1 и B_2 . Необходимо установить минимально требуемую яркость и ни в коем случае не оставлять яркое и сфокусированное изображение без развертки, так как экран трубки может быть прожжен.

Исследуемое напряжение включается между гнездом Π_1 или Π_2 (земля) и одним из гнезд входа усилителя на приборе O_1 или O_2 (вход $Y1$; вход $Y2$). Усиление, т. е. в конечном счете размер изображения на экране осциллографа, регулируется ручками M_1 и M_2 на входе каждого усилителя. Изображение на экране можно сделать неподвижным, синхронизовав генератор развертки осциллографа с исследуемым напряжением. Для этого пользуются ручкой «синхронизация». Последнюю нужно вводить на минимальную требуемую для спокойного наблюдения картины величину, ибо чрезмерная синхронизация, как и слишком большое усиление, ведет к искажению формы кривой, наблюдаемой на экране.

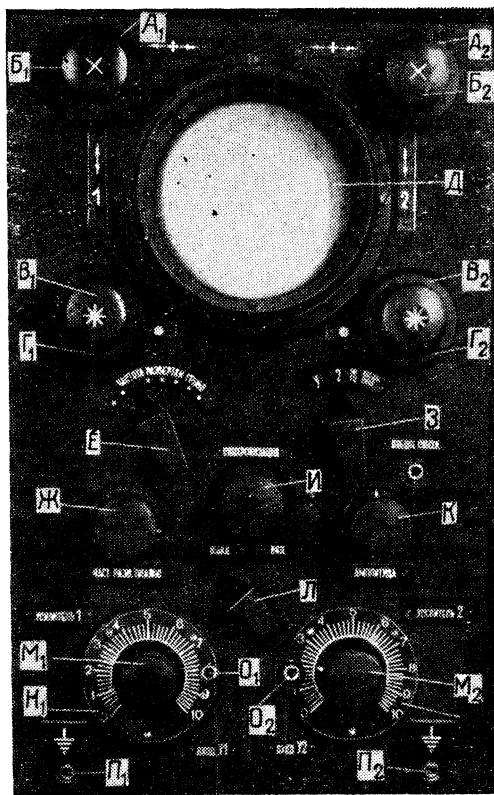


Рис. 9.

Необходимо помнить, что изображение на экране будет неподвижным при частоте развертки, не только совпадающей с частотой исследуемого напряжения, но и при частоте, в 2, 3 и вообще в целое число раз меньшей. На экране будут тогда умещаться 2, 3 и соответственно большее число периодов.

Упражнение 3

Наблюдение разности фаз напряжений на анодах кенотрона

Для наблюдения разности фаз напряжений на анодах кенотрона гнездо P_1 (земля прибора) соединяют с гнездом O на панели выпрямителя (рис. 9), а гнезда O_1 и O_2 соединяют с анодами кенотрона. Зарисовывают картину, получающуюся на экране осциллографа.

При этом упражнении, в целях безопасности работы, напряжение на выходе выпрямителя поддерживают не более 100 в.

Упражнение 4

Сравнение частоты пульсаций выпрямленного напряжения на выходе фильтра с частотой напряжения на анодах

Для сравнения напряжения на выходе фильтра с напряжением на аноде кенотрона переключают один из усилителей осциллографа с анода кенотрона к гнезду на выходе фильтра выпрямителя, оставив для сравнения второй усилитель включенным к одному из анодов кенотрона. Зарисовывают картину, получающуюся на экране осциллографа.

Упражнение 5

Наблюдение формы напряжения между различными точками фильтра

Форму кривой напряжения между различными точками фильтра выпрямителя можно наблюдать, включая поочередно вход усилителя осциллографа к гнездам, выведенным после первой ячейки и после второй ячейки фильтра. При этом для сравнения другой вход усилителя осциллографа остается включенным на вход фильтра.

Наблюдения производятся при различных нагрузках выпрямителя, т. е. при различных значениях выходного тока. Очевидно, что содержание настоящего упражнения представляет собой наглядное повторение количественных исследований переменных слагающих напряжения после кенотрона, выполняемых при помощи вольтметра переменного тока с разделительным конденсатором (упражнение 1).

Упражнение 6

Наблюдение формы тока, проходящего через кенотрон

Последовательно с каждым анодом кенотрона включают сопротивления rr (рис. 8), на которых при прохождении тока через кенотрон происходит падение напряжения, форма которого совпадает с формой тока через кенотрон. Для наблюдения этой кривой клемму Π_1 (земля) и один из входов O_1 или O_2 (рис. 9) включают к концам одного из сопротивлений. В это время другой вход усилителя отключают от схемы.

При этом упражнении ток, даваемый выпрямителем, должен быть около 10—15 ма, тогда падение напряжения на сопротивлении в аноде кенотрона — около 1 в. Для наблюдения такого напряжения ручку усиления на приборе обычно приходится полностью вводить.

Дополнительные указания. 1. Представляет существенный интерес проделать все описанные в настоящей задаче упражнения также с однополупериодным выпрямителем. Для этого надо повторить измерения, отключив от схемы один из анодов кенотрона.

Значения θ в зависимости от $(\operatorname{tg} \theta - \theta)$

$\operatorname{tg} \theta - \theta$	θ		$\operatorname{tg} \theta - \theta$	θ		$\operatorname{tg} \theta - \theta$	θ	
	в радианах	в градусах		в радианах	в градусах		в радианах	в градусах
0,00001	0,03	1,72	0,00755	0,28	16,04	0,05592	0,53	30,37
0,00002	04	2,29	0,00841	29	16,62	0,05943	0,54	30,94
0,00004	05	2,86	0,00934	0,30	17,19	0,06311	0,55	31,51
0,00007	06	3,44	0,01033	31	17,76	0,06695	0,56	32,09
0,00011	07	4,01	0,01139	32	18,33	0,07097	0,57	32,66
0,00017	08	4,58	0,01252	33	18,91	0,07517	0,58	33,23
0,00024	09	5,16	0,00000	34	19,48	0,07944	0,59	33,80
0,00033	0,10	5,73	0,01503	35	20,05	0,08408	0,60	34,38
0,00045	11	6,30	0,01640	36	20,63	0,08892	0,61	34,95
0,00058	0,12	6,38	0,01786	37	21,20	0,09391	0,62	35,42
0,00074	13	7,45	0,01941	38	21,77	0,09911	0,63	36,10
0,00092	14	8,02	0,02105	39	22,35	0,10454	0,64	36,67
0,00114	15	8,59	0,02279	0,40	22,92	0,11020	0,65	37,24
0,00138	16	9,17	0,02463	41	23,49	0,11610	0,66	37,82
0,00166	17	9,74	0,02657	42	24,06	0,12225	0,67	38,39
0,00197	18	10,31	0,02862	43	24,64	0,12866	0,68	38,96
0,00232	19	10,89	0,03078	44	25,21	0,13534	0,69	39,53
0,00271	20	11,46	0,03306	45	25,78	0,14229	0,70	40,11
0,00314	0,21	12,03	0,03545	46	26,36	0,14953	0,71	40,68
0,00362	22	12,61	0,03797	47	26,93	0,15707	0,72	41,25
0,00414	23	13,18	0,04061	48	27,50	0,16492	0,73	41,83
0,00472	24	13,75	0,04339	49	28,07	0,17302	0,74	42,40
0,00534	25	14,31	0,04680	0,50	28,65	0,18160	0,75	42,97
0,00602	26	14,88	0,04931	51	29,22	0,18996	0,76	43,50
0,00676	27	15,47	0,05256	0,52	29,79	0,19963	0,77	44,12

2. Применяемая в задаче схема выпрямителя допускает, как видно из сказанного выше, исследование ее работы при многих режимах. Продолжительность выполнения всех описанных измерений не позволяет провести их в течение одного занятия в практике. Поэтому минимальный комплекс измерений, необходимый для ознакомления с кенотронным выпрямителем, устанавливается преподавателем специально для каждого выполняющего работу.

Технические данные установки. В работе используются кенотрон 5Ц4С, двухлучевой электронный осциллограф, астатический вольтметр на 300 в, конденсаторы электролитические емкостью 2—4 мкф, дроссели с железным сердечником с индуктивностью около 5 мкгн.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Вологдин, Выпрямители, Госэнергоиздат, 1936.
2. М. А. Спицын, Выпрямитель, Связьрадиоиздат, 1938.
3. И. Л. Каганов, Электронные и ионные преобразователи, ч. 3, Госэнергоиздат, 1956.

ЗАДАЧА 102

ИЗУЧЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В КОНТУРЕ

Краткое описание явления и его теория. Собственные колебания происходят в изолированной системе после подействовавшего на нее внешнего возмущения («толчка»). Название собственные колебания означает, что процесс колебаний в этом случае определяется (в основном) свойствами самой системы. Энергия колебаний доставляется системе извне в начальный момент возбуждения колебаний.

В настоящей задаче изучаются собственные электромагнитные колебания в электрическом контуре, состоящем из конденсатора C , индуктивности L и активного сопротивления R (рис. 1). Собственные колебания в такой системе могут возникнуть при различных начальных условиях: например, 1) цепь контура замыкается, а конденсатор предварительно заряжен; 2) контур предварительно замкнут, через индуктивность контура идет постоянный ток от некоторого внешнего источника, цепь которого затем внезапно разрывается где-то вне контура; 3) конденсатор контура предварительно заряжен, цепь контура не замкнута, в индуктивности идет постоянный ток, затем замыкается цепь контура и одновременно вне контура разрывается цепь постоянного тока. Первый и второй случаи начальных усло-

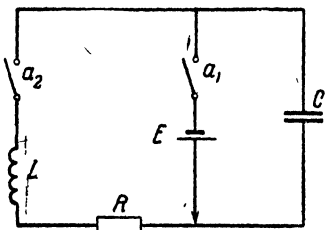


Рис. 1.

вий легко себе представить, рассматривая схему на рис. 1 и разные возможности замыкания и размыкания ключей в этой схеме.

Начальные условия, при которых возникают собственные колебания, определяют начальную фазу процесса и амплитуду колебаний. Характер же процесса собственных колебаний, как следует из данного выше определения этого типа колебаний, зависит от свойств самой системы. Напомним вкратце ход процесса электромагнитных колебаний в нашем контуре, имеющий место при любых начальных условиях. Процесс колебаний в таком контуре заключается в периодической перезарядке конденсатора и в протекании переменного тока в цепи, замыкающей пластины конденсатора. При этих колебаниях электростатическая энергия поля заряженного конденсатора периодически переходит в энергию магнитного поля тока, протекающего в цепи конденсатора, т. е. в контуре, составленном из последовательно соединенных емкости C и самоиндукции L . В результате наличия в контуре неизбежного активного сопротивления первоначальный запас энергии системы расходуется на выделение тепла в проводах, составляющих контур и индуктивность L . Поэтому разряд конденсатора через такой контур не является процессом вполне периодическим. Амплитуда напряжения на конденсаторе после каждой его перезарядки становится все меньше; амплитуда тока также убывает.

Сила тока в контуре связана с зарядом и разностью потенциалов на конденсаторе соотношением

$$i = -\frac{dq}{dt} = -C \frac{dV}{dt},$$

где $q = CV$ есть заряд конденсатора; знак минус указывает на то, что положительным мы считаем то направление тока, которое соответствует убыли разности потенциалов на пластинах конденсатора. Изменение силы этого тока во времени вызывает электродвижущую силу самоиндукции, равную

$$E = -L \frac{di}{dt} = LC \frac{d^2V}{dt^2}.$$

Согласно второму закону Кирхгофа имеем $V + E - iR = 0$.

Подставляя значения E и i , получим

$$V + LC \frac{d^2V}{dt^2} + CR \frac{dV}{dt} = 0, \quad \text{или} \quad \frac{d^2V}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dV}{dt} + \frac{V}{LC} = 0. \quad (1)$$

Уравнение (1) есть уравнение собственных колебаний в контуре, составленном из L , C и R . Его решение будет иметь вид

$$V = V_0 e^{-bt} \sin(\omega t + \varphi), \quad \text{где} \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, \quad b = \frac{R}{2L}, \quad (2)$$

а V_0 и φ — константы, зависящие от начальных условий колебательного процесса.

Из решения видно, что V с течением времени изменяется. Ординаты кривой, изображающей уравнение (2), получаются из ординат синусоиды

$$V = V_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

умножением их на непрерывно убывающий множитель e^{bt} . Общий вид кривой, приведенный на рис. 2, изображает этот процесс, называемый затухающим гармоническим колебанием. Период T этого колебания выражается формулой

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}. \quad (4)$$

Если R достаточно мало по сравнению с L , то членом $R^2/4L^2$ можно пренебречь; мы получим формулу

$$T_0 = 2\pi\sqrt{LC}, \quad (5)$$

определяющую период колебаний в контуре без затухания.

Величина h , определяющая степень затухания, называется коэффициентом затухания. На практике вместо нее обыкновенно употребляется другая мера затухания, а именно

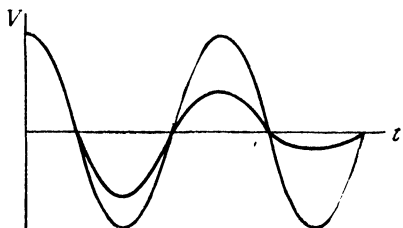


Рис. 2.

$$\gamma = \ln \frac{V_n}{V_{n+1}}, \quad (6)$$

где V_n и V_{n+1} — величины последовательных амплитуд, отстающих друг от друга на один период. Величина γ носит название логарифмического декремента затухания. Ее связь с b можно установить следующим образом.

Так как

$$V_{n+1} = V_n e^{-bT}, \quad \text{то} \quad \frac{V_n}{V_{n+1}} = e^{bT}$$

и

$$\gamma = \ln \frac{V_n}{V_{n+1}} = bT = \frac{R}{2L} T. \quad (6')$$

Отсюда видно, что чем меньше R и чем больше L , тем меньше затухание, тем ближе подходит кривая (2) к синусоиде (3), а вместе

¹⁾ Понятие периода к функции вида (2), строго говоря, неприменимо. Здесь имеется в виду промежуток времени между двумя нулевыми значениями V , имеющими один знак производной dV/dt . Так и надо понимать в дальнейшем слово период, встречающееся в описании задачи. Строгий смысл периода процесса имеет величина T_0 , определяемая ниже выражением (5).

с тем период ближе к величине T_0 , определяемой по формуле (5). Наоборот, при значительном возрастании R затухание, так же как и период, увеличивается. При $R = 2\sqrt{L/C}$, когда выражение (4) обращается в бесконечность, разряд будет изображаться кривой, приведенной на рис. 3; начиная с этого значения R при дальнейшем его увеличении, процесс будет аperiodическим.

В основу метода экспериментальной проверки всего, изложенного выше, положены следующие соображения.

Вести наблюдение непрерывно за ходом процесса колебательного разряда конденсатора во времени является экспериментом, достаточно сложным и требующим специальной аппаратуры. Поэтому существенно применить такой метод изучения явления, который позволил бы путем измерений, проводимых на определенных этапах хода разряда, воспроизвести по отдельным точкам кривую хода разряда во времени. Настоящее соображение положено в основу описываемого эксперимента.

Электрический колебательный контур (рис. 1), состоящий из конденсатора C , самоиндукции L и сопротивления R (под которым подразумевается также и активное сопротивление катушки L), может разрываться в точке a_2 . Для зарядки конденсатора параллельно ему присоединяется элемент E , цепь которого может разрываться в точке a_1 .

Вначале обе цепи замкнуты, и по контуру $ERLa_2a_1$ течет постоянный ток. Конденсатор C при этом заряжен до некоторой определенной разности потенциалов V_0 . Пусть в некоторый начальный момент времени контакт a_1 размыкается. Конденсатор C , постоянная разность потенциалов на котором до размыкания поддерживалась элементом E , начнет разряжаться через цепь RLa_2 . При этом электростатическая энергия, запасенная вначале в конденсаторе, будет превращаться в энергию магнитного поля тока. Наконец конденсатор разрядится целиком, V станет равно нулю и контур будет обладать лишь энергией магнитного поля тока, которая достигнет при этом своего максимума. В следующие промежутки времени пластины конденсатора начнут вновь заряжаться, но уже зарядами другого знака. Магнитная энергия начнет вновь переходить в электростатическую, причем этот процесс будет происходить до тех пор, пока вся магнитная энергия (в том числе энергия магнитного поля постоянного тока, протекающего в катушке до начала разряда) не превратится в электростатическую. Таким образом, максимальная разность потенциалов конденсатора V_{\max} может быть больше начальной V_0 .

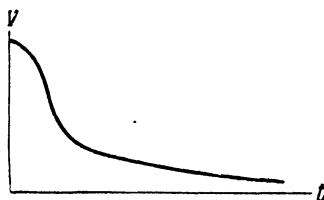


Рис. 3.

В дальнейшем процесс будет периодически повторяться с постепенно уменьшающейся амплитудой V . Быстрота убывания величины V будет зависеть от значения сопротивления R .

Если по прошествии некоторого промежутка времени от начала колебательного разряда мы разомкнем контакт a_2 , т. е. оборвем процесс на какой-либо фазе, и затем измерим оставшуюся на конденсаторе разность потенциалов, то получим одну из точек, лежащих на кривых рис. 2 и 3.

Проделав целый ряд таких измерений для различных промежутков времени, мы сможем по полученным точкам построить график хода во времени колебательного разряда конденсатора.

Хотя каждая точка на этом графике и будет результатом изучения хода нового процесса, совершенно не зависящего от предыдущего, но так как начальные условия для всех этих процессов тождественны, то каждое явление будет протекать совершенно так же, как и предыдущее. Следовательно, производя эти измерения, мы в сущности будем изучать течение во времени одного и того же процесса.

Запись изменения напряжения на конденсаторе в течение однократного процесса разряда также возможна, но для этого надо пользоваться катодным осциллографом и фотографировать кривую развертки разряда во времени. В данной задаче изучение хода колебательного разряда производится описанным выше методом.

Описание прибора. Конденсатор C , аккумулятор E , катушка самоиндукции L , магазин сопротивлений R и зеркальный гальванометр G соединяются между собой согласно схеме, изображенной на рис. 4, и присоединяются к особому механизму, служащему для размыкания цепей зарядки и разрядки конденсатора.

Присоединенный к контуру для его замыкания и размыкания механизм должен обеспечить размыкание контура через наперед заданные промежутки времени после начала разряда. Следовательно, этот механизм должен содержать какой-то движущийся элемент, могущий в нужные моменты размыкать цепь источника тока и сам контур. Роль такого механизма может с успехом выполнить обыкновенный тяжелый маятник, который при колебаниях может разрывать контакты контуров. Устройство этого механизма с маятником таково.

На укрепленных в изолирующей подставке (рис. 4) стойках вращаются на осях три контакта: A , A_1 и A_2 . Контакт A_1 замыкает цепь батареи, питающей колебательный контур. Контакт A_2 замыкает цепь самого колебательного контура. При помощи этих контактов можно либо замыкать соответствующие цепи, либо оставлять их разомкнутыми. Контакт A отличается по своему устройству от контактов A_1 и A_2 : в одном положении он замыкает одну из обкладок конденсатора с батареей и колебательным контуром (на рисунке изображено именно это положение контакта), в другом —

соединяет параллельно конденсатор и гальванометр. Это положение контакта, обозначенное на рисунке пунктиром, предусмотрено для измерения остаточного заряда на конденсаторе, что необходимо при изучении хода разряда описанным методом.

Контакты A и A_2 установлены на движке, который перемещает их относительно контакта A_1 . Перемещение можно измерить при помощи делений, нанесенных на головке N микрометрического

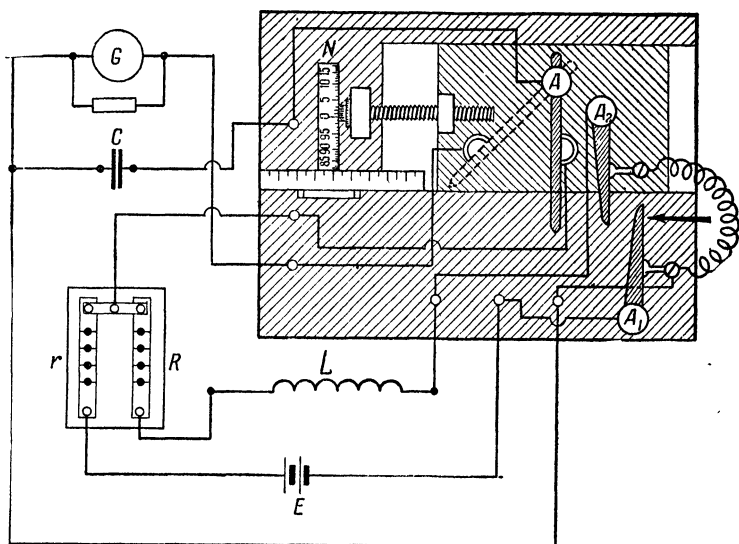


Рис. 4.

винта, передвигающего движок с контактами. Число полных оборотов винта отсчитывается по шкале, укрепленной вблизи головки микрометрического винта.

Разрыв контактов A_1 и A_2 и переключение контакта A производятся механическим маятниковым приспособлением (см. ниже), движущимся в направлении стрелки, указанной на рисунке. Изменение расстояния между контактами A_1 и A_2 приводит к тому, что разрыв этих контактов может осуществляться в разные моменты времени, варьируя тем самым промежуток времени между началом изучаемого колебательного разряда (разрыв контакта A_1) и его обрывом на той или иной фазе (разрыв контакта A_2).

Весь механизм укреплен на горизонтальной консоли под точкой подвеса тяжелого жесткого маятника, имеющего вид треугольника, подвешенного вдоль одного из ребер. На своем нижнем конце маятник имеет эбонитовый стержень, который при движении маятника в направлении стрелки размыкает по очереди контакты A_1 , A_2 , A

и переводит последний в новое положение (указанное на рис. 4 пунктиром).

Если расстояние между контактами A_1 и A_2 невелико по сравнению с амплитудой первого колебания маятника и контакты находятся вблизи точки равновесия маятника, то можно считать, что он движется на протяжении этого расстояния с постоянной скоростью. Благодаря этому отсчет времени можно заменить пропорциональными ему расстояниями A_1A_2 , измеряемыми в оборотах винта.

Сбоку от маятника на правой стороне консоли имеется приспособление для спуска маятника, состоящее из крючка, зацепляющегося за одну из перекладин фермы и отпускающего ее при дергании за шнурок. Контакты A_1 , A_2 снабжены пружинками, не позволяющими им после прохождения маятника самостоятельно вернуться в первоначальное положение и вновь замкнуть электрические цепи. Пружинка контакта A обеспечивает его замыкание в новом положении. По укреплении же маятника вновь на пусковом крючке контакты возвращаются в исходное положение вручную экспериментатором.

При работе необходимо постоянно следить за чистотой контактов прерывателя и за тем, чтобы они всегда достаточно плотно прилегали друг к другу. Неисправность контактов в громадном большинстве случаев является основной причиной, искажающей получаемые результаты.

Для измерения изучаемой величины — разности потенциалов на конденсаторе — служит баллистический гальванометр, отбросы которого пропорциональны заряду на конденсаторе, а следовательно, при неизменной емкости его пропорциональны разности потенциалов на конденсаторе (см. задачу 84). Включение гальванометра производится, как было уже указано, при помощи контакта A после разрыва контактов A_1 и A_2 (и контакта A в его первом положении).

Часть r магазина сопротивлений включена в цепь зарядки конденсатора и служит для регулировки начальных значений заряда на конденсаторе и силы тока в катушке L так, чтобы они соответствовали чувствительности данного гальванометра. Остальная часть этого магазина R , входящая в состав колебательного контура, определяет сопротивление контура, вызывающее затухание колебаний.

Упражнение 1

Исследование собственных колебаний с малым затуханием

Измерения. Собрав схему согласно рис. 4, устанавливают при помощи винта N контакты A_1 и A_2 в одной плоскости с тем, чтобы обе цепи размыкались по возможности одновременно. В магазине сопротивлений включают сопротивление r , соответствующее чув-

ствительности данного гальванометра, а R делают равным нулю. Зацепив маятник за спусковой крючок и установив осветитель гальванометра так, чтобы световой указатель примерно совпал с серединой отсчетной шкалы гальванометра, записывают его показание и готовятся к производству отсчетов.

Спускают маятник с пускового крючка и тотчас по размыкании им обоих контактов A_1 и A_2 наблюдают и записывают первый отброс гальванометра. Измерения повторяют раза три. Если отдельные отсчеты будут заметно различаться между собой, то число отсчетов увеличивают. В дальнейшем для построения хода кривой разряда используется среднее значение отбросов.

Поворачивая винт N на полтора оборота, увеличивают этим расстояние между контактами и повторяют тот же процесс измерения. Таким образом получают вторую точку кривой.

Продолжая дальше такими же этапами увеличивать расстояние между контактами, производят измерения до тех пор, пока не получат для будущего графика зависимости хода разряда от времени по крайней мере «целой волны». О том, что она получена, можно судить по двукратной смене направлений отбросов указателя гальванометра на шкале.

Определяют период колебаний маятника τ , отсчитав по секундомеру время его десяти полных колебаний. Определяют амплитуду колебаний маятника, измерив при помощи линейки расстояние между контактом A_1 и концом маятника, когда последний укреплен на пусковом крючке. Эти данные используются для определения периода разряда.

Обработка результатов опыта. Результаты опыта представляются в виде графика, изображающего ход изменения во времени разности потенциалов на пластинах конденсатора. Для построения этого графика откладывают по оси абсцисс отрезки, пропорциональные расстоянию между контактами в моменты их разрывов. Эти расстояния пропорциональны промежуткам времени, протекающим с момента начала разряда. Расстояние между контактами можно условно выражать на графике непосредственно в оборотах винта. На оси ординат графика откладывают средние значения отбросов указателя гальванометра для каждого положения контактов. Опыт позволяет также произвести определение периода колебаний разряда и сравнить найденную величину периода с ее значением, вычисленным по формуле (5). Последнее делается следующим образом.

Уравнение движения маятника, совершающего гармонические колебания, имеет, как известно, вид

$$x = A \sin \frac{2\pi}{\tau} t,$$

где A — амплитуда колебания, а τ — период колебания маятника.

Скорость маятника получим дифференцированием этого выражения:

$$u = \frac{dx}{dt} = A \frac{2\pi}{\tau} \cos \frac{2\pi}{\tau} t.$$

Вблизи положения равновесия

$$\cos \frac{2\pi}{\tau} t \approx 1 \quad \text{и} \quad u = \frac{2\pi A}{\tau}.$$

С другой стороны, зная l — ход винта, — можно определить B — расстояние — в сантиметрах между контактами, соответствующее одному периоду электрических колебаний:

$$B = nl,$$

где n — то же расстояние в оборотах винта. Тогда период электрических колебаний $T = B/u = n\tau/2\pi A$.

Полученное по этой формуле значение периода сравнивается со значением, вычисленным по формуле (5).

Упражнение 2

Исследование собственных колебаний со значительным затуханием и определение декремента затухания

Измерения. В магазине сопротивлений включают сопротивление R около 60—70 ом. Затем повторяют все измерения совершенно так же, как в упражнении 1. Результаты измерений опять иллюстрируют графиком хода разряда во времени.

Вычисления. Логарифмический декремент затухания определяется по формуле (6), причем вместо V_n и V_{n+1} берутся пропорциональные им величины отбросов в первом и втором максимумах полученного графика зависимости разности потенциалов на конденсаторе от времени.

Упражнение 3

Изучение аperiodического разряда конденсатора

Измерения. Измерения производятся так же, как в упражнении 2, лишь сопротивлению R дается значение около 160 ом. Результаты измерений опять иллюстрируют графиком хода разряда во времени.

Технические данные установки. Маятник с пусковым механизмом и тройным прерывателем изготовлен в мастерских физического факультета университета. В работе используется низковольтный конденсатор емкостью 10—20 мкф, магазин сопротивлений до 1000 ом, индуктивность около 0,3 гн, баллистический гальванометр марки М-21/2, аккумулятор на 1,2 в, секундомер.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.
2. Курс физики под редакцией Н. Д. П а п а л е к с и, т. II, Гостехиздат, 1948.
3. А. И. Т у д о р о в с к и й, Электричество и магнетизм, ч. II, ОНТИ, 1935.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

4. С. П. С т р е л к о в, Введение в теорию колебаний, Гостехиздат, 1950.

ЗАДАЧА 103

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ,
ВОЗБУЖДАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ МУЛЬТИВИБРАТОРА В КОНТУРЕ,
СОДЕРЖАЩЕМ ИНДУКТИВНОСТЬ, ЕМКОСТЬ И СОПРОТИВЛЕНИЕ**

В этой задаче проводится исследование затухающих электрических колебаний в контуре, содержащем индуктивность, емкость и сопротивление, возбуждаемых периодически повторяющимися короткими импульсами тока. Для получения импульсов, возбуждающих колебания в контуре, используется мультивибратор. В отличие от задачи 102, в которой исследуются затухающие колебания в контуре лишь в отдельные моменты колебательного процесса (посредством измерения заряда конденсатора баллистическим гальванометром), в данной задаче наблюдается временная развертка этих колебаний на экране осциллографа.

Упражнение 1

Изучение затухающих колебаний в контуре, содержащем L , C и R

Если конденсатор с емкостью C (рис. 1) зарядить до напряжения U_0 и затем замкнуть через индуктивность L и сопротивление R , то наступающий при этом разряд конденсатора при достаточно малой величине R будет иметь колебательный характер.

При $R \leq 2\sqrt{L/C}$ напряжение на обкладках конденсатора будет затухать по закону

$$U(t) = U_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

где

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, \quad (2)$$

$$\delta = \frac{R}{2L}, \quad (3)$$

а U_0 и φ_0 определяются начальными условиями (способом возбуждения колебаний в контуре). Величина $\omega/2\pi$ называется

собственной частотой колебаний контура, а δ — коэффициентом затухания. Для измерения затухания обычно используют логарифмический декремент затухания, определяемый формулой

$$\vartheta = \ln \frac{U(t)}{U(t+T)}, \quad (4)$$

где $T = 2\pi/\omega$. Логарифмический декремент затухания ϑ связан с параметрами L , C и R контура соотношением

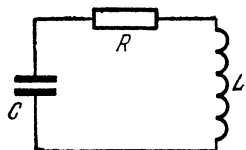


Рис. 1.

$$\vartheta = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{L}{CR^2} - \frac{1}{4}}}, \quad (5)$$

которое получается непосредственно из (4), (1), (2) и (3). При $R > 2\sqrt{L/C}$ частота ω становится мнимой, и колебательный разряд конденсатора переходит в аperiodический:

$$U = Ae^{-(\delta + \sqrt{\delta^2 - 1/LC})t} + Be^{-(\delta - \sqrt{\delta^2 - 1/LC})t}; \quad (6)$$

коэффициенты A и B здесь определяются начальными условиями.

Используемая в настоящей задаче установка состоит из изучаемого колебательного контура K , мультивибратора M для генерации электрических колебаний прямоугольной формы, устройства D для преобразования этих колебаний в кратковременные импульсы и осциллографа O (скелетная схема установки дана на рис. 2). Мультивибратор M и преобразователь D смонтированы в одном приборе, являющемся источником кратковременных импульсов. Возбуждаемые этими импульсами затухающие колебания в колебательном контуре подаются на

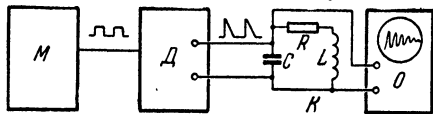


Рис. 2.

электронный осциллограф С1-1 (к клеммам входа Y). На экране осциллографа наблюдается временная развертка этих колебаний.

Генератор развертки осциллографа синхронизируется переменным напряжением с частотой повторений импульсов (50 гц). В этом случае изображения на экране осциллографа отдельных цугов затухающих колебаний, повторяющиеся через промежуток времени, равные периоду синхронизирующего напряжения, будут накладываться друг на друга, и мы будем видеть неподвижные изображения временной развертки затухающих колебаний.

Измерения. К клеммам прибора K_5 , K_6 подсоединяют колебательный контур K (рис. 3). В этом контуре в качестве переменных параметров L , C и R используются магазины индуктивностей, емкостей и сопротивления. Тумблер Π_2 должен быть перекинут в положение

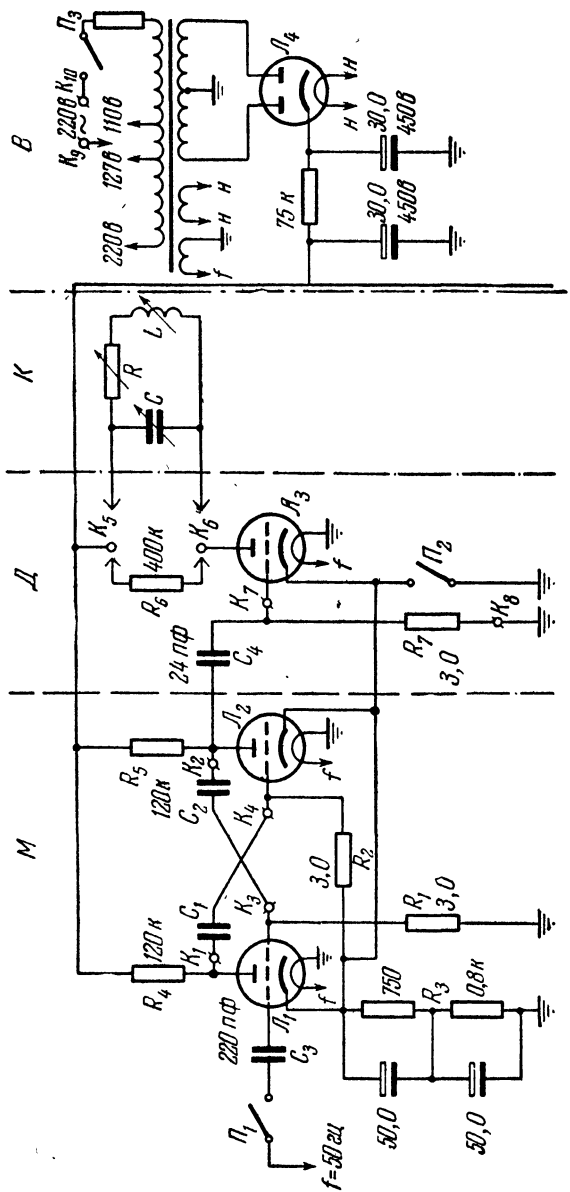


Рис. 3.

«выключено», тумблер Π_1 — в положение «включено», а к клеммам K_1 , K_4 и K_2 , K_3 присоединены конденсаторы C_1 и C_2 емкостью по 500 нф. Тумблером Π_3 включают питание прибора и соединяют конденсатор C контура с клеммами входа осциллографа СИ-1. Вращением ручек «диапазоны частот», «частота плавно» и «амплитуда синхронизации» осциллографа добиваются, чтобы на его экране было изображение одного цуга затухающих колебаний (рис. 4). Переключатель «синхронизации» ставится при этом в положение «от сети». Масштаб временной развертки колебаний регулируют вращением ручки «горизонт. усилитель» так, чтобы период синхронизации (0,02 сек) соответствовал ста делениям горизонтальной шкалы на сетке экрана осциллографа.

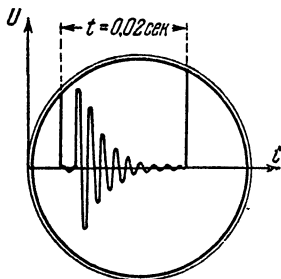


Рис. 4.

Определяя по этой шкале число делений, соответствующих возможно большему числу n различных на экране осциллографа полных колебаний цуга, находят «период» T затухающих колебаний.

«Амплитуды» затухающих колебаний измеряют по вертикальной шкале на сетке экрана осциллографа. Для большей точности этих измерений следует максимально, в пределах экрана осциллографа, увеличить изображение. Это производится вращением ручки «вертик. усилитель» осциллографа.

Измерив по установленной таким образом вертикальной шкале экрана осциллографа отношение соседних «амплитуд» затухающих колебаний, находят по формуле (4) логарифмический декремент затухания. Эти измерения, а также измерение продолжительности n полных затухающих колебаний следует производить, начиная со второго «полупериода» затухающих колебаний.

Измерение частоты собственных колебаний и логарифмического декремента затухания производят для $C = 0,25$ мкф, нескольких различных значений коэффициента самоиндукции и сопротивления контура. Для каждого значения коэффициента самоиндукции находят критическое сопротивление $R_{кр} = 2\sqrt{L/C}$ контура, т. е. сопротивление, при котором колебательный разряд конденсатора переходит в аperiodический. Зарисовывают на кальку временную развертку затухающих колебаний при малом и большом затухании аperiodического разряда, а также разряда при критическом значении сопротивления контура.

Результаты измерений частоты и логарифмического декремента затухания представляют в виде графиков зависимости этих величин от самоиндукции и сопротивления контура. На том же листке, пользуясь формулами (2) и (5), строят соответствующие теоретические кривые.

Упражнение 2

Ознакомление с генератором кратковременных импульсов

Качественная теория. На рис. 5 приведена принципиальная схема мультивибратора. Рассмотрение схемы показывает, что мультивибратор представляет собой двухкаскадный усилитель на сопротивлениях, у которого анод второй лампы (Λ_2) связан с сеткой первой лампы (Λ_1) через конденсатор C_2 . Таким путем осуществляется обратная связь, заключающаяся в том, что переменное напряжение, усиленное первым и вторым каскадами, вновь подается на вход первого каскада. Если переменное напряжение, подаваемое со второго каскада на вход первого, находится в фазе с исходным усиливаемым напряжением и в результате сложения увеличивает последнее, то обратная связь называется положительной. Обратная связь называется отрицательной, если напряжение, подаваемое с выхода усилителя на вход первого каскада, находится в противофазе с входным напряжением, и тем самым уменьшает его.

В нашем случае обратная связь будет положительной. В самом деле, каждый каскад усилителя поворачивает фазу на 180° (повышение потенциала на сетке лампы увеличивает анодный ток и уменьшает потенциал анода за счет роста падения напряжения на сопротивлении анодной нагрузки), и в результате двух таких сдвигов фаза напряжения на аноде второго каскада окажется в фазе с напряжением на сетке первого каскада. При этом если положительная обратная связь будет достаточно большой, то система окажется в неустойчивом состоянии, так как любые небольшие изменения на электродах ламп вызовут дальнейшее увеличение этих изменений и возникнут автоколебания. Вследствие отсутствия специального элемента, ограничивающего изменения напряжений на электродах ламп, амплитуда этого изменения будет определяться лишь нелинейностью характеристики самой лампы. Напряжение на аноде будет изменяться от минимального напряжения, соответствующего насыщению анодного тока, до максимального, когда лампа заперта. При этом колебания анодного напряжения будут иметь форму, близкую к прямоугольной (рис. 6, а). Период этих колебаний T определяется временем перезарядки конденсаторов C_1 и C_2 .

Разберем несколько подробнее работу мультивибратора в течение одного цикла колебаний. Допустим, в рассматриваемый

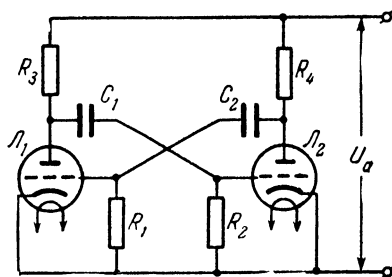


Рис. 5.

момент времени лампа L_1 заперта, а лампа L_2 проводит (см. схему рис. 3), причем в предшествующий момент лампа L_2 была заперта, а лампа L_1 проводила и произошло «опрокидывание» (лампы практически мгновенно поменялись состояниями). Потенциал анода запертой до опрокидывания лампы L_2 относительно катода был равен анодному напряжению U_a , т. е. напряжение на аноде второй лампы $U_{a_2} = U_a$, а на аноде проводящей лампы L_1 $U_{a_1} = U_a - \Delta U_1$, где ΔU_1 — падение напряжения на сопротивлении R_3 . Если это состояние до опрокидывания сохранялось в течение достаточно длительного времени, то конденсатор C_2 к моменту опрокидывания был заряжен до напряжения U_a , а конденсатор C_1 — до напряжения $U_a - \Delta U_1$. В момент опрокидывания аноды ламп L_1

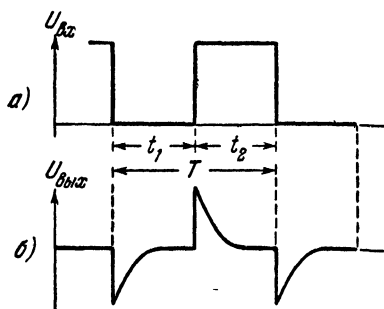


Рис. 6.

и L_2 скачкообразно обмениваются потенциалами, так что в рассматриваемый нами момент потенциал на аноде лампы L_1 будет $U_{a_1} = U_a$, а на аноде лампы L_2 будет $U_{a_2} = U_a - \Delta U_2$.

Вследствие наличия емкостей это изменение потенциалов будет иметь несколько другое значение. Рассмотрим, например, изменение потенциала на аноде лампы L_1 . Несмотря на то, что она после опрокидывания заперта, вследствие

перезарядки конденсатора C_1 по сопротивлению R_3 все же будет протекать ток. Поэтому потенциал на аноде лампы L_1 будет отличаться от U_a . Однако если $R_2 \gg R_3$, то это отличие будет ничтожным. В практических схемах мультивибратора это условие обычно выполняется: $R_2 \gg R_3$ и $R_1 \gg R_4$.

Изменение потенциалов на анодах влечет перезарядку конденсаторов C_1 и C_2 : конденсатор C_1 заряжается, а C_2 разряжается. Протекающий при перезарядке конденсаторов через сопротивление R_1 и R_2 ток создает на этих сопротивлениях падение напряжения, за счет которого сетка лампы L_1 имеет отрицательный потенциал относительно катода, а сетка лампы L_2 — положительный. Это поддерживает лампу L_1 в запертом, а лампу L_2 — в проводящем состоянии. Однако по мере приближения напряжений конденсаторов к величинам U_a и $U_a - \Delta U$ ток через сопротивления R_1 и R_2 уменьшается, а вместе с этим уменьшается и падение напряжения на этих сопротивлениях. При этом отрицательное смещение на сетке лампы L_1 делается по абсолютной величине меньше значения напряжения, запирающего лампу. Лампа L_1 начинает проводить ток, и потенциал на аноде лампы L_1 падает.

Конденсатор C_1 начинает разряжаться, направление тока через сопротивление R_2 меняется и сетка лампы L_2 получает отрицатель-

ный потенциал. Лампа L_2 запирается и потенциал на ее аноде возрастает. Начинается заряд конденсатора C_2 , направление тока через сопротивление R_1 меняется, потенциал сетки лампы L_1 резко возрастает и анодный ток лампы L_1 достигает насыщения. Это значит, что произошло опрокидывание. После этого вновь начинается перезарядка конденсаторов и весь процесс повторяется в обратном направлении.

Из этого рассмотрения видно, что благодаря положительной обратной связи процесс опрокидывания происходит очень быстро, он имеет лавинообразный характер. Напряжения на анодах ламп в первом приближении изменяются скачком. Такие колебания, у которых колеблющаяся величина (в нашем случае напряжение на анодах ламп) или ее производная является разрывной функцией времени, называются *разрывными* или *релаксационными*. Колебания мультивибратора являются типичными релаксационными колебаниями.

На рис. 3 приведена принципиальная схема экспериментальной установки. Она содержит мультивибратор M , устройство D для преобразования колебаний мультивибратора в кратковременные импульсы, колебательный контур K , возбуждаемый этими импульсами, и кенотронный выпрямитель B питания схемы. Мультивибратор смонтирован на двойном триоде типа 6Н7, причем один из триодов (L_1) заперт. Мультивибратор может синхронизироваться переменным напряжением частоты 50 *гц*, которое подается при замыкании тумблера Π_1 . Генерируемое мультивибратором напряжение прямоугольной формы дифференцируется на емкости C_4 и сопротивлении R_7 , образующих ячейку с малой (по сравнению с периодом колебаний мультивибратора) постоянной времени ($R_7 C_4 \ll T$).

Процесс дифференцирования заключается в следующем. Изменение напряжения $\Delta U_{вх}$ на входе дифференцирующей ячейки (рис. 7) вызывает перезарядку конденсатора C . Проходящий при этом через соединенное с конденсатором сопротивление R ток создает на последнем падение напряжения $U_{вых}$, уменьшающееся по мере заряда конденсатора по экспоненциальному закону

$$U_{вых} = \Delta U_{вх} e^{-\frac{t}{RC}}.$$

В результате этого, когда на вход ячейки подается переменное напряжение прямоугольной формы, оно преобразуется в периодически повторяющиеся кратковременные импульсы с чередующейся полярностью (рис. 6, б). Полученные в результате дифференцирования импульсы отпирают лампу L_3 на время, соответствующее длительности импульса. В нормальном состоянии лампа L_3 заперта благодаря значительному отрицательному смещению на сетке.

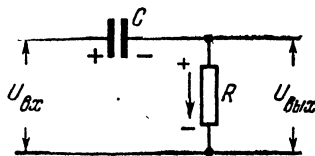


Рис. 7.

Наблюдение напряжений, генерируемых мультивибратором и генератором кратковременных импульсов. К клеммам K_1 , K_4 и K_3 , K_2 на панели экспериментальной установки (см. рис. 3) подсоединяют два конденсатора C_1 и C_2 емкостью по 500 нф.

Затем, закратив сопротивление автоматического смещения тумблером Π_2 и отсоединив от мультивибратора синхронизирующую цепь тумблера Π_1 , включают напряжение питания тумблером Π_3 (перед включением напряжения питания проверить, что сетевой переключатель на силовом трансформаторе установлен на напряжение в сети).

Подсоединяя входные клеммы осциллографа С1-1 к аноду одной из ламп мультивибратора (клемма K_2) и к «земле» (клемма K_8), наблюдают и зарисовывают на кальке, прикладываемой к экрану осциллографа, форму напряжения на аноде. Аналогичным же способом наблюдают форму напряжения на аноде другой лампы мультивибратора и убеждаются, что форма напряжения на анодах обеих ламп совпадает. Затем наблюдают и зарисовывают форму напряжения на сетках ламп, подсоединяя осциллограф поочередно к клеммам K_3 , K_8 и K_4 , K_8 .

После этого знакомятся с дифференцированием прямоугольных колебаний при помощи цепочки C_4R_7 .

Присоединяя осциллограф С1-1 поочередно к клеммам K_2 , K_8 и K_7 , K_8 , наблюдают, как колебания мультивибратора, близкие по форме к прямоугольным, преобразуются в кратковременные импульсы. Запертая в нормальном состоянии лампа L_3 может рассматриваться как анодный детектор. В то время как на сетку лампы L_3 подаются импульсы чередующейся полярности, на ее аноде остаются импульсы только одного знака, в чем убеждаются, подсоединяя осциллограф к клеммам K_6 , K_8 . При этом к клеммам K_5 , K_6 вместо колебательного контура подсоединено сопротивление $R_6 = 100$ ком. Зарисовывают на кальку последовательно развертку во времени колебаний мультивибратора, импульсы после дифференцирования, а также продетектированные импульсы. Графики изменения напряжения во времени зарисовывают один под другим, отмечая продолжительность прямоугольного импульса t_2 и продолжительность интервала между импульсами t_1 (см. рис. 6, а).

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева, Курс общей физики, т. 2, Физматгиз, 1962.
2. Г. С. Горелик, Колебания и волны, Физматгиз, 1959.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

3. К. Ф. Теодорчик, Автоколебательные системы, Гостехиздат, 1952.
4. А. М. Бонч-Бруевич, Радиоэлектроника в экспериментальной физике, «Наука», 1966.
5. Генерирование колебаний спецформы, т. 1, «Советское радио», 1949.

ЗАДАЧА 104

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА СИНУСОИДАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТИПА «RC»

Введение. В современной радиоизмерительной аппаратуре звукового диапазона частот широко распространены генераторы типа «RC».

Такое название эти генераторы получили потому, что в них отсутствует обычный колебательный контур, а частота генерируемых колебаний определяется свойствами цепи обратной связи, состоящей из емкостей и сопротивлений.

Основными достоинствами RC-генератора являются простота схемы, надежность в работе, удобство настройки в широком диапазоне частот и отсутствие в схеме сложных и громоздких деталей.

Принцип работы генератора состоит в следующем: Пусть мы имеем ламповый усилитель, вход и выход которого соединены цепью обратной связи¹⁾. На рис. 1 дана блок-схема усилителя с обратной связью, где U — напряжение внешнего источника, U_1 — входное напряжение усилителя (без обратной связи), U_{II} — выходное напряжение усилителя, равное входному напряжению цепи обратной связи, U_{III} — напряжение на выходе цепи обратной связи.

Введем следующие обозначения:

$U_{II}/U_1 = K$ — коэффициент усиления усилителя без обратной связи.

$U_{III}/U_{II} = \beta$ — коэффициент обратной связи.

$U_{II}/U = K'$ — коэффициент усиления усилителя с обратной связью.

Тогда из равенства $U_1 = U + U_{III}$ получим

$$K' = \frac{K}{1 - K\beta}. \quad (1)$$

В формуле (1), если фазы U и U_{III} совпадают, то β положительно, а если фазы противоположны, то β отрицательно. Заметим, что если в цепи обратной связи отсутствуют какие-либо э. д. с. (цепь пассивна), то $0 \leq |\beta| \leq 1$.

Из анализа формулы (1) следует, что при $\beta > 0$ $K \leq K' \leq \infty$. Значение $K' = \infty$ получается при $\beta = 1/K$. Это значение β будем называть критическим.

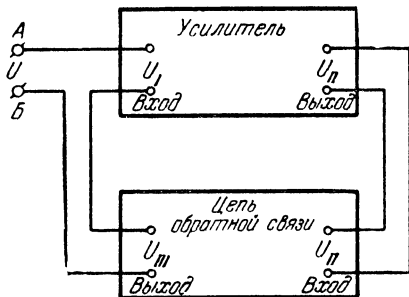


Рис. 1.

¹⁾ С работой лампового усилителя можно познакомиться по описанию задачи 110

Усилитель с положительной обратной связью, большей критической ($\beta > 1/K$), и замкнутыми накоротко входными клеммами А и Б способен к автоколебаниям, т. е. является генератором незатухающих колебаний.

Действительно, если во входной цепи такого усилителя по какой-нибудь случайной причине (например, тепловые флуктуации)

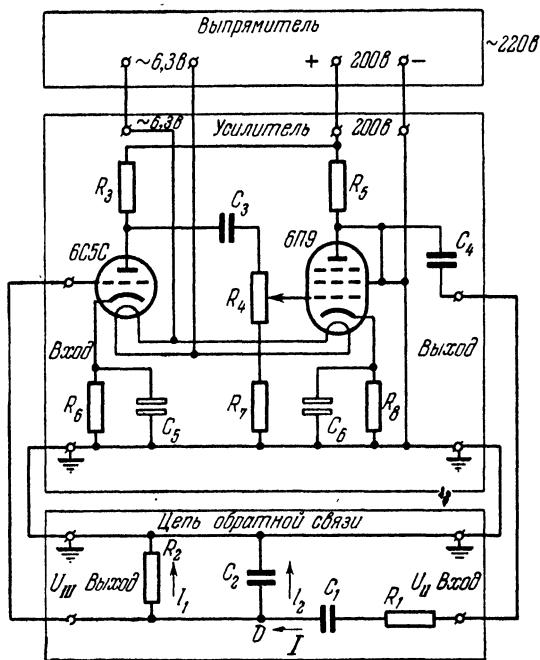


Рис. 2. Схема двухлампового генератора.

R_1 и R_2 — смежные сопротивления, $R_3 = 2$ ком, $R_4 = 200$ ком, $R_5 = 300$ ом, $R_6 = 470$ ом; C_1 и C_2 — смежные емкости, $C_3 = 0,2$ мф, $C_4 = 0,2$ мф, $C_5 = 100$ мф, $C_6 = 1000$ мф.

возникают, хотя бы и весьма слабые, электрические колебания, то, пройдя через усилитель и цепь обратной связи, они вернутся на вход усилителя уже усиленными (так как при $\beta > 1/K$ $U_{III} > U_I$).

Такой процесс поведет к нарастанию амплитуды колебаний в усилителе до тех пор, пока она не окажется ограниченной нелинейностью характеристик ламп. Следовательно, для возникновения и существования в генераторе незатухающих колебаний необходимо выполнение двух условий. Во-первых, фаза напряжения на выходе цепи обратной связи должна совпадать с фазой входного напряжения усилителя (обратная связь положительна). Во-вторых, ампли-

туда напряжения на выходе цепи обратной связи должна превышать амплитуду первичного входного напряжения.

Эти условия называют условиями самовозбуждения генератора: первое — *условием баланса фаз*, второе — *условием баланса амплитуд*.

Для того чтобы генератор генерировал колебания, близкие по форме к гармоническим, необходимо, чтобы условия самовозбуждения для него выполнялись в узком интервале частот.

Теперь, ознакомившись с общим принципом действия RC-генератора, разберем более подробно работу одной, широко распространенной схемы двухлампового генератора (рис. 2).

В этой схеме применен двухкаскадный усилитель. Такой усилитель для средней части своей частотно-амплитудной характеристики практически не поворачивает фазу напряжения. Входное сопротивление усилителя велико по сравнению с выходным сопротивлением цепи обратной связи, так как в первой лампе отсутствуют сеточные токи, а ее входная емкость мала по сравнению с C_2 .

Напротив, выходное сопротивление усилителя мало по сравнению с входным сопротивлением цепи обратной связи. Это обеспечивается выбором выходной лампы с большой крутизной сеточной характеристики и применением в качестве ее анодной нагрузки малого сопротивления.

Исследование работы схемы будем проводить, используя метод комплексных амплитуд. Для этого заранее предположим, что в генераторе установились синусоидальные электрические колебания с циклической частотой ω . Комплексные амплитуды напряжения на входе и выходе цепи обратной связи обозначим соответственно \dot{U}_{II} и \dot{U}_{III} .

Применим первое правило Кирхгофа в точке D (рис. 2):

$$I = I_1 + I_2, \quad \text{где } I_1 = \frac{\dot{U}_{III}}{R_2}, \quad \text{а } I_2 = \dot{U}_{III} j\omega C_2$$

или

$$I = \dot{U}_{III} \left(\frac{1}{R_2} + j\omega C_2 \right). \quad (2)$$

Здесь \dot{I} , \dot{I}_1 , \dot{I}_2 — комплексные амплитуды токов в соответствующих участках цепи, а j — мнимая единица.

Теперь применим второе правило Кирхгофа к контуру, включающему R_1 , C_1 , а также вход и выход цепи обратной связи:

$$\dot{U}_{II} = I \left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) + \dot{U}_{III}.$$

Подставим сюда \dot{I} из уравнения (2):

$$\dot{U}_{II} = \dot{U}_{III} \left[\left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) \left(\frac{1}{R_2} + j\omega C_2 \right) + 1 \right],$$

откуда

$$\dot{U}_{II} = \dot{U}_{III} \left[\frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} + 1 + j \left(\omega C_2 R_1 - \frac{1}{\omega C_1 R_2} \right) \right]. \quad (3)$$

Так как усилитель не поворачивает фазу напряжения, то условие баланса фаз будет выполняться, если цепь обратной связи также не будет поворачивать фазу, т. е. фазы U_{II} и U_{III} будут совпадать. Последнее будет иметь место, когда коэффициент при \dot{U}_{III} в формуле (3) будет действительным числом. Для этого необходимо, чтобы

$$\omega C_2 R_1 - \frac{1}{\omega C_1 R_2} = 0.$$

Разрешив это равенство относительно ω^2 , получим

$$\omega^2 = 1/(R_1 R_2 C_1 C_2) \quad \text{и} \quad \nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}. \quad (4)$$

Таким образом, мы определили частоту ν , для которой выполняется условие баланса фаз.

Коэффициент обратной связи при соблюдении условия баланса фаз из уравнения (3) будет равен

$$\beta = \frac{U_{III}}{U_{II}} = \frac{\dot{U}_{III}}{\dot{U}_{II}} = \frac{1}{\frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} + 1}.$$

Условие баланса амплитуд $\beta \geq 1/K$ для нашего случая запишется так:

$$\frac{1}{\frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} + 1} \geq \frac{1}{K}, \quad \text{или} \quad K \geq \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} + 1.$$

Предельным значением для K , начиная с которого в генераторе смогут возникнуть автоколебания, очевидно, будет

$$K = \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} + 1. \quad (5)$$

При значениях K , близких к предельному, генерируемое напряжение будет по своей форме близко к синусоидальному, так как при этом условия самовозбуждения будут выполняться для узкого диапазона частот.

Выше мы считали, что коэффициент усиления усилителя K не зависит от величины входного сигнала. Эта так называемая линейная теория генератора дает возможность получить правильные выражения для условий самовозбуждения. Однако эта теория не дает возможности вычислить амплитуду колебаний. Вопрос об амплитуде решается нелинейной теорией генератора, рассмотрение которой выходит за рамки настоящей задачи.

Измерения. Выполнение задачи состоит в опытной проверке правильности выведенных выше теоретических формул условий самовозбуждения генератора.

Двухламповый усилитель и цепь обратной связи смонтированы на отдельных панелях в соответствии с рис. 2. Элементы цепи обратной связи (емкости и сопротивления) сделаны сменными.

Все измерения рекомендуется произвести для шести комбинаций значений элементов цепи обратной связи (по указанию преподавателя). Для этого пользуются имеющимся набором сменных деталей. При выполнении измерений рационально соблюдать следующий порядок: сначала проделать все упражнения с одними параметрами цепи обратной связи, затем изменить эти параметры и снова проделать все упражнения и т. д. (п. г упражнения 1 следует проделать только для одной комбинации параметров цепи обратной связи).

Упражнение 1

Сборка установки и наблюдение осциллограмм генерируемого напряжения

а) Собирают установку согласно блок-схеме, приведенной на рис. 3. Звуковой генератор при этом к осциллографу не подключается. Осциллограф работает в режиме собственной развертки.

б) Плавным вращением ручки потенциометра R_4 увеличивают коэффициент усиления усилителя до тех пор, пока не возникнет

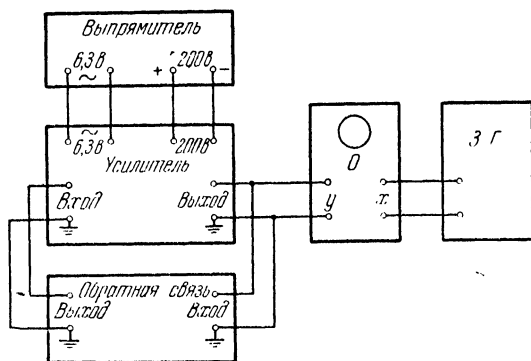


Рис 3.

генерация, в чем убеждаются с помощью осциллографа (при использовании осциллографа ЭО-5 при всех измерениях усиление $У$ -канала держат максимальным). Устанавливают амплитуду синусоиды на экране приблизительно равной 1 см и после этого в продолжение всех измерений с данной цепью обратной связи R_4 больше не регулируют.

в) Подбором соответствующих частоты развертки и синхронизации добиваются получения на экране неподвижного изображения

временного графика генерируемого напряжения. Убеждаются, что это напряжение действительно гармоническое.

г) Полученную осциллограмму переносят на кальку. Для этого накладывают на экран осциллографа кусок кальки и обводят карандашом контуры осциллограммы (осциллограмма прилагается к отчету).

Упражнение 2

Проверка условия баланса фаз

Для проверки условия баланса фаз измеряют частоту генерируемого напряжения и сравнивают ее с вычисленной по формуле (4). Измерение частоты выполняют следующим образом:

а) Приключают звуковой генератор $ZГ$ к осциллографу O согласно блок-схеме, приведенной на рис. 3.

б) Переключают осциллограф на внешнюю развертку. Подбирая соответствующие частоту звукового генератора и усиление X -канала осциллографа, добиваются получения на экране неподвижного изображения эллипса, что свидетельствует о равенстве частот исследуемого и измерительного генераторов.

Частоту отсчитывают по шкале частот измерительного звукового генератора.

Упражнение 3

Проверка условия баланса амплитуд

Для проверки условия баланса амплитуд измеряют коэффициент усиления K , при котором возникает генерация, и сравнивают его с вычисленным по формуле (5).

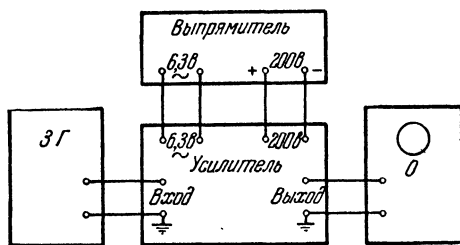


Рис. 4.

Измерение коэффициента усиления выполняют так:

а) Производят переключения в опытной установке согласно блок-схеме рис. 4. Осциллограф при этом работает в режиме собственной развертки. Частота звукового генератора $ZГ$ та же, что и при проверке условий баланса фаз.

б) Амплитуду напряжения, подаваемого со звукового генератора на вход усилителя, делают такой, чтобы наблюдаемая на ос-

циллографе синусоида занимала по вертикали приблизительно 0,8 диаметра экрана.

в) Отключают развертку и измеряют длину линии на экране с помощью сетки.

г) Не меняя никаких установок звукового генератора и осциллографа, отключают вход Y -канала осциллографа от выхода усилителя и приключают его ко входу усилителя. Снова измеряют длину вертикальной линии. Отношение длин этих двух линий равно коэффициенту усиления K .

Обработка результатов измерений. Для тех же значений параметров цепи обратной связи, для которых производились измерения, вычисляют значения ν и K по теоретическим формулам (4) и (5).

Результаты вычислений и измерений сводят в таблицу. Возможное несовпадение вычисленной и измеренной частот (в пределах 15%) может быть объяснено тем, что усилитель немного поворачивает фазу напряжения (особенно при сравнительно высоких частотах).

№	R_1	R_2	C_1	C_2	ν	K	ν	K
					Измеренные		Вычисленные	

Технические данные установки. Схемы усилителя и цепи обратной связи и спецификации к ним даны в тексте описания. Перечень сменных емкостей и сопротивлений указан на установке. Для питания установки может быть применен любой кенотронный или полупроводниковый выпрямитель с фильтром на выходе, лучше стабилизированный, обеспечивающий постоянное напряжение 200 в при токе 50 ма и переменное напряжение 6,3 в при токе 2 а. Можно использовать любой измерительный генератор звукового диапазона частот (20—20 000 гц) с непрерывным изменением частоты и выходным напряжением порядка 10 в, например ГЗ-33 и ГЗ-35, а также любой универсальный электронный осциллограф, имеющий непрерывную развертку в звуковом диапазоне частот и канал вертикального отклонения луча с регулируемым усилением, экран которого снабжен координатной сеткой, например: ЭО-5, СИ-1, С1-1.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. А. М. Б о н ч - Б р у е в и ч, Радиозлектроника в экспериментальной физике, «Наука», 1966.
3. Н. Н. К р ы л о в, Теоретические основы радиотехники, Изд-во «Морской транспорт», 1961.

ТИРАТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР РЕЛАКСАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Введение. В задаче изучаются характер и условия возникновения релаксационных колебаний в тиратронном генераторе.

Краткие сведения о тиратроне. Простейший тиратрон — это трехэлектродная лампа, наполненная газом при низком давлении. Если анодное напряжение тиратрона недостаточно для ионизации газа в нем, то ток через тиратрон подчиняется законам, справедливым для вакуумного триода. При повышении анодного напряжения до напряжения зажигания в тиратроне возникает дуговой разряд. Развитие дугового разряда происходит с нарастающей скоростью — лавинно. Однако для возникновения лавины необходимо наличие некоторой определенной начальной ионизации. Когда анодное напряжение близко к напряжению зажигания, в тиратроне существует предразрядный ток. Этот ток создается за счет электронной эмиссии катода, а также за счет начальной ионизации газа — тихий или тлеющий разряд.

Так как электрическое поле в тиратроне определяется не только его анодным напряжением, но и его сеточным напряжением, то и напряжение зажигания зависит от сеточного напряжения тиратрона. Кривая зависимости напряжения зажигания от сеточного напряжения называется пусковой характеристикой тиратрона; она имеет вид, показанный на рис. 1.

Анодное напряжение горящего тиратрона U_T не сильно отличается от потенциала ионизации газа и почти не зависит от тока через тиратрон. В процессе зажигания анодное напряжение падает от напряжения зажигания до значения U_T . Следовательно, сопротивление тиратрона в стадии зажигания отрицательное, а в стадии горения близко к нулю.

Анодное напряжение, при котором в тиратроне прекращается дуговой разряд, называется *напряжением гашения*. Напряжение гашения слабо зависит от сеточного напряжения. Это объясняется тем, что при наличии разряда ионный слой, создающийся у поверхности отрицательно заряженных проводников сетки, экранирует их от окружающего поля. При погасании тиратрон еще некоторое время сохраняет способность проводить ток за счет оставшихся после разряда ионов. Процесс исчезновения такой проводимости называется деионизацией тиратрона.

Принцип действия и основные свойства генератора. Принципиальная схема генератора приведена на рис. 2 (R — сопротивление, C — конденсатор, T — тиратрон).

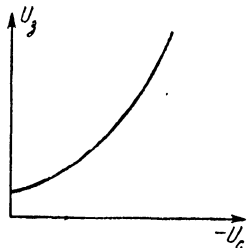


Рис. 1.

Принцип действия генератора состоит в следующем: при включении в схему источника постоянного электрического напряжения U_n конденсатор C заряжается через сопротивление R . Когда напряжение на конденсаторе U_c станет равным напряжению зажигания $U_з$, тиратрон зажжется и конденсатор практически мгновенно разрядится через него до напряжения гашения U_r . При этом тиратрон погаснет, и конденсатор снова станет заряжаться. Описанный процесс станет повторяться периодически. График зависимости напряжения на конденсаторе от времени будет иметь вид, представленный на рис. 3.

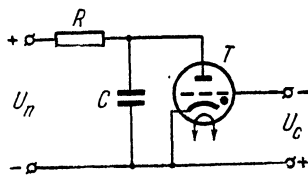


Рис. 2

Колебания подобного вида, сильно отличающиеся по своей форме от гармонических, часто называют срывными или релаксационными.

Для возникновения и существования колебаний в рассмотренной схеме необходимо выполнение следующих условий (условий самовозбуждения):

$$U_з < U_n \text{ и } U_n - I_0 R < U_r,$$

где I_0 — величина установившегося тока в сопротивлении при горящем тиратроне. Первое из этих условий самоочевидно. Второе усло-

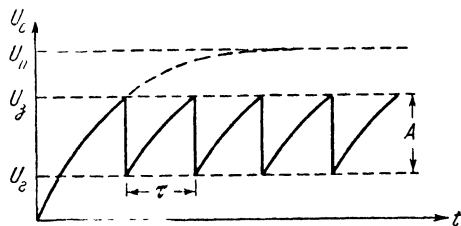


Рис. 3.

вие равносильно утверждению, что в генераторе не может существовать такой стационарный режим, при котором напряжение на конденсаторе было бы выше напряжения гашения тиратрона. Последнее условие для генераторов с тиратроном всегда выполняется, так как сопротивление горящего тиратрона весьма мало.

Период колебаний генератора τ , как это видно из рис. 3, равен времени зарядки конденсатора C через сопротивление R от напряжения U_r до напряжения $U_з$. Для вычисления периода напишем второе правило Кирхгофа для цепи генератора при погашенном тиратроне

$$U_n = RI + U_c = RC \frac{dU_c}{dt} + U_c.$$

Преобразовав это выражение, получим

$$-RC \frac{d(U_n - U_c)}{U_n - U_c} = dt.$$

Проинтегрировав в пределах от U_r до U_3 , получим период

$$\tau = RC \ln \frac{U_n - U_r}{U_n - U_3}.$$

Следует, однако, отметить, что полученная формула является неточной. У реальных генераторов период всегда несколько больше вычисленного (расхождение может доходить до 15—20%). Такое

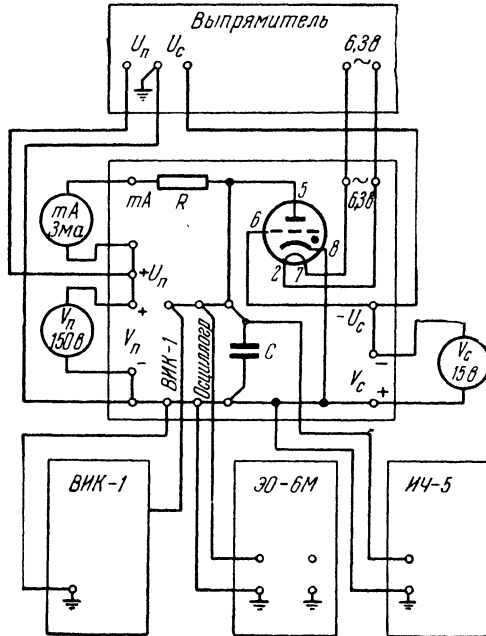


Рис. 4.

расхождение объясняется тем, что при вычислении периода не были учтены предразрядные токи тиратрона. Действительно, когда напряжение на конденсаторе становится близким к напряжению зажигания, часть тока, проходящего через сопротивление R , ответвляется через тиратрон (предразрядный ток) и зарядка конденсатора замедляется. Кроме того, на величине периода колебаний сказывается также и то, что при релаксационных колебаниях разрядка конденсатора происходит до напряжения более низкого, чем напряжение гашения тиратрона, определенное из измерений в статическом режиме.

Этот факт легко объяснить, если учесть, что в тиратроне, после того как перестанут существовать условия для образования дугового разряда, ток все еще продолжается до тех пор, пока не произойдет полная деионизация.

Сборка установки и подготовка аппаратуры к измерениям. Схема релаксационного генератора собрана на отдельной панели (рис. 4). В схеме применен тиратрон (ТГ1-0,1/0,3) с аргоновым наполнением. Конденсатор C и сопротивление R сделаны сменными. В комплекте

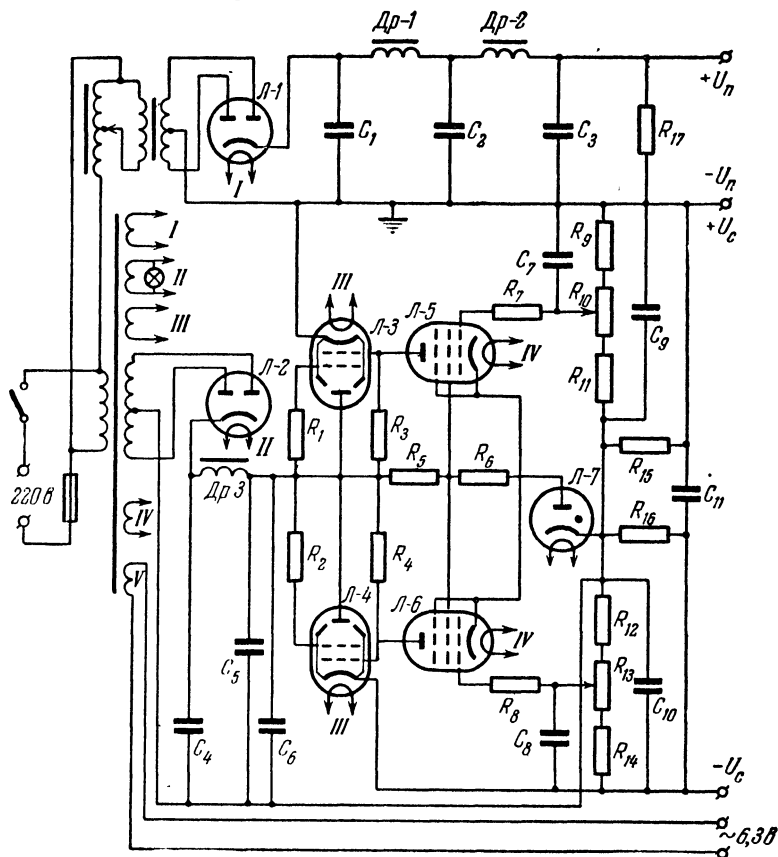


Рис. 5. Схема выпрямителя.

Л-1 — 5Ц4С, Л-2 — 5Ц4С, Л-3 — 6ПЗС, Л-4 — 6ПЗС, Л-5 — 6Ж8, Л-6 — 6Ж8, Л-7 — 6ГЗС, Др-1 — 4 гн, 100 ма; Др-2 — 4 гн, 100 ма; Др-3 — 4 гн, 100 ма; $C_1 = 4$ мкф, 400 в; $C_2 = 4$ мкф, 400 в; $C_3 = 30$ мкф, 300 в; $C_4 = 2$ мкф, 600 в; $C_5 = 10$ мкф, 450 в; $C_6 = 10$ мкф, 450 в; $C_7 = 0,1$ мкф, 200 в; $C_8 = 0,1$ мкф, 200 в; $C_9 = 2$ мкф, 200 в; $C_{10} = 2$ мкф, 200 в; $C_{11} = 30$ мкф, 300 в; $R_1 = 1,5$ ком, 0,25 вт; $R_2 = 1,5$ ком, 0,25 вт; $R_3 = 680$ ком, 0,25 вт; $R_4 = 680$ ком, 0,25 вт; $R_5 = 7$ ком, 0,25 вт; $R_6 = 7$ ком, 0,25 вт; $R_7 = 200$ ом, 0,25 вт; $R_8 = 200$ ом, 0,25 вт; $R_9 = 150$ ком, 0,50 вт; $R_{10} = 25$ ком, 0,5 вт; $R_{11} = 100$ ком, 0,5 вт; $R_{12} = 150$ ком, 0,5 вт; $R_{13} = 15$ ком, 0,5 вт; $R_{14} = 100$ ком, 0,5 вт; $R_{15} = 3$ ком, 5,0 вт; $R_{16} = 3$ ком, 5,0 вт; $R_{17} = 15$ ком, 2,0 вт

имеется два конденсатора емкостью 0,025 мкф и 0,05 мкф и два сопротивления 100 ком и 200 ком.

Для питания генератора используется специальный двухканальный выпрямитель, схема которого дана на рис. 5. Канал «На-

пряжение питания» представляет собой двухполупериодный кенотронный выпрямитель с фильтром, выходное напряжение которого регулируется автотрансформатором, включенным в первичную обмотку повышающего трансформатора. Канал «сеточное напряжение» питается от отдельного кенотронного выпрямителя с фильтром. Электронный стабилизатор этого канала, построенный по разностной схеме, позволяет плавно регулировать сеточное напряжение. Одновременно он является ограничителем тока в цепи сетки тиратрона, препятствующим развитию дугового разряда между сеткой и анодом. Ручки регулировки напряжения питания и сеточного напряжения выведены на переднюю панель выпрямителя.

В задаче используются стандартные осциллограф ЭО-6М, измеритель частоты ИЧ-5, импульсный катодный вольтметр ВИК-1 и электроизмерительные приборы. С ними следует познакомиться по заводским описаниям.

Для выполнения задачи собирают опытную установку согласно блок-схеме, приведенной на рис. 4. В схему включают $R = 100 \text{ ком}$ и $C = 0,025 \text{ мкф}$.

Затем производят подготовку приборов к измерениям в следующем порядке:

1) В ы п р я м и т е л ь. Ставят ручки регулировки напряжения питания и сеточного напряжения в крайнее левое положение. Включают тумблер «сеть» и, плавно вращая ручки регулировок напряжений, убеждаются по соответствующим вольтметрам в исправности работы выпрямителя. Ручки ставят в исходные положения.

2) О с ц и л л о г р а ф. Ставят ручки регулировок в следующие положения:

Ручка	Положение
«Ослабление»	1 : 10
«Синхронизация»	Внутренняя
«Горизонт. отклонение»	«Непрерывная развертка»
«Диапазоны развертки»	«20—200 гц»
«Синхронизация, горизонт. усиление»	Цифра «1»
«Вертикальное усиление»	Цифра «0»

Включают тумблер «сеть» и, регулируя яркость и фокусировку луча, добиваются на экране тонкой четкой линии (яркость не должна быть слишком большой). Ручками вертикального и горизонтального смещения луча (ось X и ось Y) ставят ее на середину экрана. Затем устанавливают на выпрямителе $U_c = -8 \text{ в}$ и $U_n = 140 \text{ в}$. При этом в генераторе возникнут релаксационные колебания. Для наблюдения их вводят вертикальное усиление и ручкой «частота плавно» добиваются получения на экране неподвижной картины. Если осциллограмма недостаточно устойчива, несколько увеличивают синхронизацию. Изменяя U_n и U_c , наблюдают (качественно)

изменения формы и частоты колебаний, после чего $U_{\text{п}}$ и $U_{\text{с}}$ возвращают к первоначальным значениям $U_{\text{с}} = -8 \text{ в}$ и $U_{\text{п}} = 140 \text{ в}$.

3) Измеритель частоты. Устанавливают переключатель «операции» в положение 10 кГц, а переключатель «множитель» в положение 100. Включают сеть тумблером «включено-выключено», и дают прибору прогреться в течение 5 мин. Затем ручкой «установка 10 кГц» устанавливают положение стрелки гальванометров точно на конец шкалы. При этом при переключении переключателя «множитель» в положение 200, 500 и 1000 показания гальванометра должны быть соответственно 50, 20, 10 делений.

Для измерения частоты релаксационного генератора ставят переключатель «множитель» в положение 1000, а переключатель «операции» в положение «вход». Вращая переключатель «множитель» против часовой стрелки, добиваются показаний гальванометра больше чем 40 делений шкалы.

Проверяют правильность работы прибора. Для этого переключатель «операции» ставят в положение «контроль». При этом показания гальванометра не должны меняться более чем на 2 деления. Измеряемая частота получается перемножением показаний гальванометра на число, которое указывает переключатель «множитель».

4) Импульсный вольтметр. Устанавливают переключатель шкал импульсного вольтметра на шкалу 300 в. Включают тумблер «сеть». Отключают входные клеммы вольтметра от тиратронного генератора и замыкают между собою их проводником. Нажимают кнопку «контроль» и отпускают. Ручкой «установка нуля» устанавливают стрелку прибора на нуль шкалы и ждут две минуты. Если стрелка изменит свое положение, то нуль устанавливают снова.

После установки нуля вольтметр вновь подключают к тиратронному генератору. Стрелка прибора покажет отклонение.

5) Электроизмерительные приборы. В задаче используются магнитоэлектрические измерительные приборы (вольтметры и миллиамперметр). Приборы имеют зеркальную шкалу. Для правильного измерения нужно, чтобы в момент отсчета стрелка и ее изображение в зеркале совпадали. Когда приборы не включены, их стрелки должны стоять на нуле шкалы. При работе стрелки должны перемещаться плавно, без заедания.

В случае обнаружения ненормальности в работе какого-либо из приборов следует немедленно обратиться к дежурному лаборанту для устранения замеченной неисправности.

Упражнение 1

Снятие пусковой характеристики

В упражнении используется основная схема установки полностью. Сопротивление $R = 100 \text{ ком}$ и емкость конденсатора $C = 0,025 \text{ мкф}$.

Упражнение выполняют в следующем порядке: устанавливают определенное значение U_c и, плавно увеличивая U_n , замечают по экрану осциллографа момент возникновения колебаний. Значение U_n в этот момент, согласно приведенному выше условию, должно быть равно U_3 . Опыт повторяют для значений U_c от -14 до -4 в через один вольт (всего 11 значений). Полученные таким образом значения U_3 заносят в табл. 1 и наносят на график пусковой характеристики.

Т а б л и ц а 1

№	$U_c, \text{ в}$	$U_3, \text{ в}$	$U_n = 140 \text{ в}, C = 0,25 \text{ мкф}, R = 100 \text{ ком}$				Примечания
			$A, \text{ в}$	$U_{\min}, \text{ в}$	$\nu_{\text{изм}}, \text{ гц}$	$\nu_{\text{выч}}, \text{ гц}$	
1	-14						
2	-13						
3	-12						
4	-11						
5	-10						
6	-9						
7	-8						
8	-7						
9	-6						
10	-5						
11	-4						

В этом упражнении удобнее разверткой осциллографа не пользоваться. Для этого переключатель «горизонтальное отклонение» ставят в положение «усилитель», а ручку регулировки горизонтального усиления поворачивают влево до отказа. Яркость луча при этом должна быть уменьшена.

Упражнение 2

Определение напряжения, до которого разряжается конденсатор при релаксационных колебаниях, и проверка формулы для частоты при условии $RC = \text{const}$

Будем наибольшее изменение напряжения на конденсаторе при релаксационных колебаниях называть условной амплитудой этих колебаний и обозначать буквой A (см. рис. 3). Тогда напряжение, до которого разряжается в процессе релаксационных колебаний конденсатор C , будет равно: $U_{\min} = U_3 - A$.

Ввиду наличия послеразрядной проводимости $U_{\min} < U_r$. При определении U_{\min} напряжение зажигания U_3 берут из пусковой характеристики, а условную амплитуду A измеряют с помощью импульсного катодного вольтметра ВИК-1.

Частоту релаксационных колебаний измеряют частотомером ИЧ-5, как это описано в разделе «Сборка установки и подготовка аппаратуры к измерениям».

Измерения ν и U_{\min} производят для тех же значений U_c , R и C , которые были использованы в первом упражнении. Напряжение питания U_n при этом поддерживается равным 140 в. Полученные значения заносят в табл. 1. Кривую зависимости U_{\min} от U_c наносят на график пусковой характеристики.

Кроме того, производят вычисления ν по формуле

$$\nu_{\text{выч}} = \frac{1}{\tau_{\text{выч}}} = \frac{1}{RC \ln \frac{U_n - U_{\min}}{U_n - U_c}} \quad ^1)$$

для значений параметров, соответствующих измеренным ν .

Результаты вычисления заносят также в табл. 1. Необходимые для вычисления данные берут из предыдущих упражнений. При вычислении натуральных логарифмов можно воспользоваться табл. 3, приведенной в конце описания.

Упражнение 3

Изучение зависимости частоты генератора релаксационных колебаний от величин R и C

Устанавливают $U_n = 140$ в, а $U_c = -8$ в и производят измерения ν для величин R и C , указанных в табл. 2.

Таблица 2

№	$U_n = 140$ в		$U_c = -8$ в	
	R , ком	C , мкф	$\nu_{\text{изм}}$, гц	$\nu_{\text{выч}}$, гц
1	100	0,025		
2	100	0,05		
3	200	0,025		
4	200	0,05		

Результаты измерений и вычислений заносят в табл. 2. Измеренные значения ν сравнивают с вычисленными.

Упражнение 4

Определение времени деионизации тиратрона

Для выполнения упражнения используется основная схема установки в следующем режиме: $R = 100$ ком, $U_n = 140$ в, $U_c = -8$ в. Конденсатор C снимают совсем. Роль емкости

¹⁾ При вычислении ν можно считать, что $U_{\min} = 0$ (см. упражнение 4).

Значения e^x для x от 0,00 до 5,99

x	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	1,0000	1,0101	1,0202	1,0305	1,0408	1,0513	1,0618	1,0725	1,0833	1,0942
0,1	1,1052	1,1163	1,1275	1,1388	1,1503	1,1618	1,1735	1,1853	1,1972	1,2093
0,2	1,2214	1,2337	1,2461	1,2586	1,2712	1,2840	1,2969	1,3100	1,3231	1,3364
0,3	1,3499	1,3634	1,3771	1,3910	1,4049	1,4191	1,4333	1,4477	1,4623	1,4770
0,4	1,4918	1,5068	1,5220	1,5373	1,5527	1,5683	1,5841	1,6000	1,6161	1,6323
0,5	1,6487	1,6653	1,6820	1,6989	1,7160	1,7333	1,7507	1,7683	1,7860	1,8040
0,6	1,8221	1,8404	1,8589	1,8776	1,8965	1,9155	1,9348	1,9542	1,9739	1,9939
0,7	2,0138	2,0340	2,0544	2,0751	2,0959	2,1170	2,1383	2,1598	2,1815	2,2034
0,8	2,2255	2,2479	2,2705	2,2933	2,3164	2,3396	2,3632	2,3869	2,4109	2,4351
0,9	2,4596	2,4843	2,5093	2,5345	2,5600	2,5857	2,6117	2,6379	2,6644	2,6912
1,0	2,7183	2,7456	2,7732	2,8011	2,8292	2,8577	2,8864	2,9154	2,9447	2,9743
1,1	3,0042	3,0344	3,0649	3,0957	3,1268	3,1582	3,1899	3,2220	3,2544	3,2871
1,2	3,3201	3,3535	3,3872	3,4212	3,4556	3,4903	3,5254	3,5609	3,5966	3,6328
1,3	3,6693	3,7062	3,7434	3,7810	3,8190	3,8574	3,8962	3,9354	3,9749	4,0149
1,4	4,0552	4,0960	4,1371	4,1782	4,2207	4,2631	4,3060	4,3492	4,3929	4,4371
1,5	4,4817	4,5267	4,5722	4,6182	4,6646	4,7115	4,7588	4,8066	4,8550	4,9037
1,6	4,9530	5,0028	5,0531	5,1039	5,1552	5,2070	5,2593	5,3122	5,3656	5,4195
1,7	5,4739	5,5290	5,5845	5,6407	5,6973	5,7546	5,8124	5,8709	5,9299	5,9895
1,8	6,0496	6,1104	6,1719	6,2339	6,2965	6,3598	6,4237	6,4883	6,5535	6,6194
1,9	6,6859	6,7531	6,8210	6,8895	6,9588	7,0287	7,0993	7,1707	7,2427	7,3155
2,0	7,3891	7,4633	7,5383	7,6141	7,6906	7,7679	7,8460	7,9248	8,0045	8,0849
2,1	8,1662	8,2482	8,3311	8,4149	8,4994	8,5849	8,6711	8,7583	8,8463	8,9352
2,2	9,0250	9,1157	9,2073	9,2999	9,3933	9,4877	9,5831	9,6794	9,7767	9,8749
2,3	9,9742	10,074	10,176	10,278	10,381	10,486	10,591	10,697	10,805	10,913
2,4	11,023	11,134	11,246	11,359	11,473	11,588	11,705	11,822	11,941	12,061
2,5	12,182	12,305	12,429	12,554	12,680	12,807	12,936	13,066	13,197	13,330
2,6	13,464	13,599	13,736	13,874	14,013	14,154	14,296	14,440	14,585	14,732
2,7	14,880	15,029	15,180	15,333	15,487	15,643	15,800	15,959	16,119	16,281
2,8	16,445	16,610	16,777	16,945	17,116	17,288	17,462	17,637	17,814	17,993
2,9	18,174	18,357	18,541	18,728	18,916	19,106	19,298	19,492	19,688	19,886
3,0	20,086	20,287	20,491	20,697	20,905	21,115	21,328	21,542	21,758	21,977
3,1	22,198	22,421	22,646	22,874	23,104	23,336	23,571	23,807	24,047	24,288
3,2	24,533	24,779	25,028	25,280	25,534	25,790	26,050	26,311	26,576	26,843
3,3	27,113	27,385	27,660	27,938	28,219	28,503	28,789	29,079	29,371	29,660
3,4	29,964	30,265	30,569	30,877	31,187	31,500	31,817	32,137	32,460	32,786
3,5	33,115	33,448	33,784	34,124	34,467	34,813	35,163	35,517	35,874	36,234
3,6	36,598	36,966	37,338	37,713	38,092	38,475	38,861	39,252	39,646	40,045
3,7	40,447	40,854	41,264	41,679	42,098	42,521	42,948	43,380	43,816	44,256
3,8	44,701	45,150	45,604	46,063	46,525	46,993	47,465	47,942	48,424	48,911
3,9	49,402	49,899	50,400	50,907	51,419	51,935	52,457	52,985	53,517	54,055
4,0	54,598	55,147	55,701	56,261	56,826	57,397	57,974	58,557	59,145	59,740
4,1	60,340	60,947	61,559	62,178	62,803	63,434	64,072	64,715	65,366	66,023
4,2	66,686	67,357	68,033	68,717	69,408	70,105	70,810	71,522	72,240	72,966
4,3	73,700	74,440	75,189	75,944	76,708	77,478	78,257	79,044	79,838	80,640
4,4	81,451	82,269	83,096	83,931	84,775	85,627	86,488	87,357	88,235	89,121
4,5	90,017	90,922	91,836	92,759	93,691	94,632	95,583	96,544	97,514	98,494

Продолжение табл. 3

x	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
4,6	99,484	100,48	101,49	102,51	103,54	104,58	105,64	106,70	107,77	108,85
4,7	109,95	111,05	112,17	113,30	114,43	115,58	116,75	117,92	119,10	120,30
4,8	121,51	122,73	123,97	125,31	126,47	127,74	129,02	130,32	131,63	132,95
4,9	134,29	135,64	137,00	138,38	139,77	141,17	142,59	144,03	145,47	146,94
5,0	148,41	149,90	151,41	152,93	154,47	156,02	157,59	159,17	160,77	162,39
5,1	164,02	165,67	167,34	169,02	170,72	172,43	174,16	175,91	177,68	179,47
5,2	181,27	183,09	184,93	186,79	188,67	190,57	192,48	194,42	196,37	198,34
5,3	200,34	202,35	204,38	206,44	208,51	210,61	212,72	214,86	217,02	219,20
5,4	221,41	223,63	225,88	228,15	230,44	232,76	235,10	237,46	239,85	242,26
5,5	244,69	247,15	249,64	252,14	254,68	257,24	259,82	262,43	265,07	267,74
5,6	270,43	273,14	275,89	278,66	281,46	284,29	287,15	290,03	292,95	295,89
5,7	298,87	301,87	304,90	307,97	311,06	314,19	317,35	320,54	323,76	327,01
5,8	330,30	333,62	336,97	340,36	343,78	347,23	350,72	354,25	357,81	361,41
5,9	365,04	368,71	372,41	376,15	379,93	383,75	387,61	391,51	395,44	399,41

генераторе при этом играют входные емкости осциллографа, измерителя частоты, катодного вольтметра и емкость монтажа. Осциллограф работает в режиме непрерывной развертки. Получают осциллограмму напряжения на выходе тиратронного генератора. Она будет иметь вид, показанный на рис. 6. Интервал времени, соответствующий отрезку τ_d , является временем деионизации тиратрона. В течение этого времени зарядка конденсатора не происходит, так как тиратрон находится в проводящем состоянии.

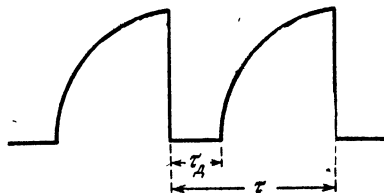


Рис. 6.

Для определения τ_d измеряют с помощью измерителя частоты ИЧ-5 частоту релаксационного генератора ν . Затем по сетке осциллографа измеряют отношение $\frac{\tau_d}{\tau} = n$ и из полученных данных определяют $\tau_d = \frac{\tau}{\nu} \cdot n = \frac{n}{\nu}$. Величину τ_d выражают в микросекундах.

Технические данные установки. В работе могут быть использованы следующие приборы заводского изготовления: осциллограф ЭО-6М или СИ-1, импульсный катодный вольтметр ВИК-1 или ВЛИ-2, измеритель частоты ИЧ-5, вольтметры для измерения постоянного напряжения на 150 в и 15 в любого типа, например ЛМ-1.

Панель релаксационного генератора и блок питания к нему (выпрямитель) должны быть изготовлены согласно схемам и спецификациям к ним.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.
2. Г. С. Г о р е л и к, Колебания и волны, Физматгиз, 1959.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

3. Г. П. Ш к у р и н; Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам, Воениздат, 1960.

ЗАДАЧА 106

**ОЗНАКОМЛЕНИЕ С РАБОТОЙ ЛАМПОВОГО ГЕНЕРАТОРА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ
И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ
В КОНТУРАХ С РАЗНОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ ¹⁾**

Автоколебательная система, в которой могут возникать и самостоятельно поддерживаться электромагнитные колебания, носит название генератора электромагнитных колебаний. В первой части настоящей задачи рассматривается работа одного из простейших

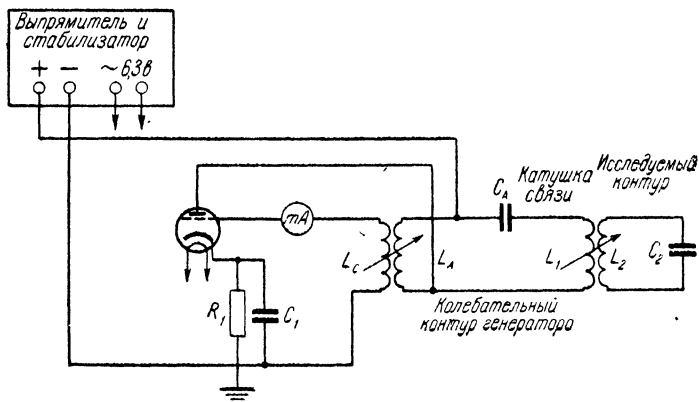


Рис. 1.

генераторов с одной электронной лампой. Схема используемого генератора изображена на рис. 1.

Как видно из этой схемы, в анодную цепь лампы включен колебательный контур генератора. Колебательный контур состоит из конденсатора C_A и двух катушек самоиндукции L_A и L_1 . Первая из этих катушек вместе с конденсатором образует колебательный

¹⁾ Задачу рекомендуется выполнять после задачи 102 и 79, проделав которые, можно ознакомиться с процессом колебаний в простейшем контуре и с принципами действия электронной лампы.

контур. Включенная последовательно с первой катушкой и конденсатором малая катушка с $L_1 \ll L_A$ введена в схему только для обеспечения индуктивной связи генератора с другим колебательным контуром, изображенным в правой части рисунка. Эта индуктивная связь используется для возбуждения колебаний во втором резонансном контуре, очень слабо связанном с первым и потому не имеющем прямого отношения к работе основного генератора (см. упражнение 2).

Считая известным общий ход процесса колебаний в контуре, состоящем из емкости и индуктивности, остановимся только на механизме поддержания в нем незатухающих колебаний.

В схеме генератора имеется катушка L_C , включенная в цепь сетки лампы и индуктивно связанная с основной катушкой колебательного контура. Назначение этой катушки и лампы состоит в том, чтобы обеспечить за счет анодной батареи периодическое пополнение запаса энергии в контуре, расходуемого в процессе колебаний на выделение тепла в проводах и на излучение электромагнитных волн. Для пополнения энергии контура необходимо, чтобы значение переменного управляющего напряжения на сетке лампы всегда содействовало ходу колебательных процессов в контуре генератора. Для этого фаза переменного напряжения на сетке лампы должна быть противоположна фазе переменного напряжения на аноде лампы.

Подача на сетку лампы нужного напряжения обеспечивается индуктивной связью сеточной катушки с катушкой колебательного контура. Эта связь носит название обратной связи колебательного контура с сеткой лампы, управляющей анодным током. Для того чтобы индуцированное в сеточной катушке напряжение было в нужной фазе, существенно направление намотки катушки или порядок присоединения ее концов между катодом и сеткой лампы. В зависимости от этого условия обратная связь может быть положительной, т. е. поддерживающей колебания в контуре или отрицательной, т. е. препятствующей развитию колебаний в контуре. Последнее будет иметь место при нарушении указанного выше фазового соотношения. Амплитуда колебаний в генераторе зависит от величины обратной связи сетки лампы с колебательным контуром. Поэтому индуктивная связь сеточной и анодной катушек делается иногда регулируемой. Регулировка обратной связи в нашем случае осуществляется изменениями взаимной ориентации двух катушек (рис. 2) сетки и колебательного контура. Величина обратной связи колебательного контура с сеткой лампы (т. е. коэффициент взаимной

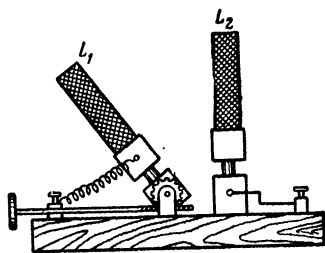


Рис. 2.

индукции их катушек) должна быть, разумеется, достаточна для того, чтобы импульсы анодного тока компенсировали потери энергии колебательным контуром.

Наличие в катушке сетки индуцированных напряжений при работе генератора приводит к возникновению тока в цепи сетки лампы, когда мгновенные значения напряжения между сеткой и катодом положительны. Среднее значение силы этого тока может быть измерено с помощью прибора постоянного тока, включенного в цепь сетки. Наличие этого тока может быть использовано в качестве простейшего индикатора работы генератора. Отсутствие сеточного тока в условиях настоящей задачи говорит обычно о неправильном включении в схему концов сеточной катушки. Постоянство значения силы сеточного тока может служить указанием на стабильность амплитуды колебаний в генераторе.

Самостоятельным элементом в схеме генератора (рис. 1) являются параллельно соединенные конденсатор C_1 и сопротивление R_1 , включенные в цепь катода лампы. Присутствие этих элементов в схеме генератора связано с выбором определенного режима работы лампы.

Режим работы лампы обычно выбирается так, чтобы при отсутствии колебаний напряжение на управляющей сетке было отрицательным, по отношению к катоду. Это необходимо для лучшего использования линейного участка характеристики лампы и для уменьшения начального значения анодного тока. Для создания отрицательного сеточного напряжения в настоящей задаче используется так называемое *автоматическое смещение* потенциала сетки за счет падения напряжения на дополнительном сопротивлении R_1 в цепи катода (рис. 1). При протекании постоянной слагающей анодного тока лампы через это сопротивление катод приобретает положительный потенциал относительно сетки. Чтобы этот потенциал практически не изменялся при наличии в анодном токе переменной составляющей, параллельно этому сопротивлению включен конденсатор C_1 достаточно большой емкости.

Условия генерирования колебаний в контуре являются одним из важнейших вопросов физики колебательных процессов. Разбор этих условий, однако, выходит за рамки настоящего руководства.

Выполняющие задачу могут ознакомиться с этим вопросом по указанной специальной литературе.

Упражнение 1

Сборка и включение лампового генератора

Все основные детали схемы размещены на лабораторном столе. Необходимо ознакомиться с этими деталями и привести их в соответствие с обозначениями на схеме. Затем надо собрать схему и включить ее (после проверки преподавателем).

Необходимо добиться возникновения колебаний в генераторе (частота 120 кГц). Для этого сначала устанавливают достаточно сильную обратную связь. Если прибор, включенный в цепь сетки, не дает показаний, то необходимо переключить концы сеточной катушки для того, чтобы обеспечить необходимое фазовое соотношение между переменными напряжениями на сетке и на аноде лампы. Очевидно, что цель может быть достигнута только переключением концов на клеммах сеточной катушки, но не перестановкой и поворотом катушки в гнездах панельки.

После того как появился сеточный ток и удалось убедиться, что его сила зависит от индуктивной связи между сеточной катушкой и колебательным контуром, выключают генератор и приступают к сборке резонансного контура.

Упражнение 2

Исследование вынужденных колебаний и явления резонанса в контурах с разной добротностью

В настоящем упражнении исследуются вынужденные колебания в контуре, индуктивно связанном с контуром генератора (рис. 1). Исследуемый контур состоит из катушки самоиндукции L_2 , безындукционного сопротивления R (на рисунке не показано) и прокалиброванного конденсатора переменной емкости C_2 . Кроме того, для исследования колебаний в контуре в него должен быть включен измерительный прибор. (Он не показан на рис. 1, чтобы не загромождать схемы, но изображен отдельно ниже, на рис. 4.)

Колебания в контуре возбуждаются электродвижущей силой, наводимой генератором через посредство катушки связи L_1 в индуктивности контура L_2 . Амплитуда этой электродвижущей силы \mathcal{E}_0 определяется значением коэффициента взаимной индукции M катушек L_2 и L_1 и амплитудой производной по времени от силы тока в генераторе di/dt . Таким образом, $\mathcal{E}_0 = M |di/dt| = M\omega i_0$. Частота этой электродвижущей силы есть, очевидно, частота ω генератора.

При исследовании вынужденных колебаний представляет всегда большой практический и теоретический интерес изучение зависимости интенсивности колебаний от соотношения между частотой вынуждающего воздействия и собственной частотой системы. Это соотношение между частотами можно изменять двумя способами. Можно либо изменять частоту внешнего воздействия на систему ω (в данном случае частоту генератора)¹⁾, либо изменять собственную частоту системы посредством изменения значений параметров системы. В настоящей задаче используется второй способ, т. е.

¹⁾ С этим способом можно познакомиться в задачах 107 и 108.

частота генератора остается неизменной, но изменяются параметры исследуемого контура.

Частота колебаний в контуре определяется в основном его емкостью и индуктивностью. В настоящем упражнении изменяется один параметр контура — его емкость. Поэтому в контур включен прокалиброванный конденсатор переменной емкости. Калибровочная кривая конденсатора прилагается непосредственно к используемому прибору.

Амплитуда силы тока в контуре

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}}$$

(закон Ома для переменного тока) имеет максимальное значение $I_{\text{рез}} = \frac{\mathcal{E}_0}{R}$ при резонансе, когда $\omega^2 = \frac{1}{LC}$, т. е. когда частота внешней электродвижущей силы ω равна частоте свободных колебаний в контуре. Для того чтобы исследование значения амплитуды силы тока имело более общий характер, удобно ввести безразмерную величину

Для того чтобы исследование значения амплитуды силы тока имело более общий характер, удобно ввести безразмерную величину

$$y = \left(\frac{I_0}{I_{\text{рез}}}\right)^2 = \frac{R^2}{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}.$$

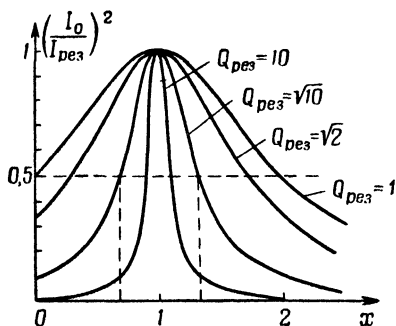


Рис. 3.

Последнее соотношение представляет собой уравнение резонансной кривой в безразмерной форме. Преобразуем его так, чтобы можно было удобно проследить зависимость y от одного из

главных параметров контура, в нашем случае от емкости контура. (Заметим, что все последующие рассуждения можно совершенно так же провести для случая изменения индуктивности; окончательные результаты будут в обоих случаях одинаковыми.) Обозначим через $C_{\text{рез}}$ значение емкости при резонансе, через x — отношение $\frac{C_{\text{рез}}}{C}$ и через $Q_{\text{рез}}$ добротность контура $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ при резонансе. Тогда уравнение резонансной кривой примет вид

$$y = \left(\frac{I_0}{I_{\text{рез}}}\right)^2 = \frac{1}{(1-x^2)Q_{\text{рез}}^2 + 1}. \quad (1)$$

Резонансная кривая (рис. 3) в этом случае будет симметричной относительно точки $x = 1$.

Нетрудно найти связь так называемой *п о л у ш и р и н ы* резонансной кривой со значением добротности контура при резонансе $Q_{\text{рез}}$. Так как кривая симметрична, то можно назвать половиной относительной ширины резонансной кривой величину изменения переменного параметра Δx , при которой энергия колебаний (квадрат амплитуды) уменьшится в два раза против резонансного значения. Тогда из (1) следует уравнение для определения $Q_{\text{рез}}$:

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{(\Delta x)^2 Q_{\text{рез}}^2 + 1},$$

откуда

$$Q_{\text{рез}} = \frac{1}{\Delta x}. \quad (2)$$

Таким образом, добротность при резонансе равна обратной величине *п о л о в и н ы* относительной ширины резонансной кривой для квадратов амплитуд (в отличие от резонансной кривой при переменной частоте, когда добротность системы обратна относительной ш и р и н е резонансной кривой для квадратов амплитуд).

Экспериментальная часть настоящего упражнения заключается в исследовании зависимости амплитуды силы тока в резонансном контуре от значения включенной в этот контур емкости.

До выполнения измерений следует обратить внимание на то, что все развитые теоретические соображения относились к случаю, когда на исследуемый контур действует электродвижущая сила *п о с т о я н н о й* амплитуды. Между тем связь контура с генератором может отражаться на режиме работы последнего. Вблизи резонанса даже при слабой связи генератор будет отдавать значительную энергию резонансному контуру, и амплитуда силы тока в генераторе может заметно уменьшиться. Это обстоятельство приведет к искажению формы резонансной кривой, так как от амплитуды силы тока в генераторе зависит амплитуда действующей в контуре электродвижущей силы. Поэтому для того чтобы иметь возможность изучать экспериментально рассмотренный теоретически случай, надо поддерживать *п о с т о я н с т в о* амплитуды силы тока в контуре генератора.

Контроль за значением этой величины можно осуществить, включив в контур генератора последовательно с конденсатором и катушкой связи высокочастотный токоизмерительный прибор. Таким в условиях задачи может служить вакуумный термэлемент (описание прибора см. ниже). Поддержание постоянства показаний этого прибора осуществляется путем изменения режима работы генератора, когда сила тока в его колебательном контуре начинает падать вблизи резонанса. Изменяя *о б р а т н у ю* связь между сеткой лампы генератора и его колебательным контуром, можно поддерживать постоянство амплитуды силы тока в колебательном контуре.

Обратимся к рассмотрению способа измерения силы тока в резонансном контуре. Ток в контуре (в условиях задачи) имеет малую амплитуду (порядка 10^{-4} а) и высокую частоту (120 кгц), поэтому для его измерений в контур включается в вакуумный термоэлемент (рис. 4), сделанный из тонких ($\approx 10^{-2}$ мм) проволочек медь — константан или железо — константан¹). Два конца этого термоэлемента поданы на стрелочный гальванометр. Измерения тока высокой частоты становятся возможными потому, что ток в контуре нагревает спай термоэлемента, а возникающая термоэлектродвижущая сила создает постоянный ток в цепи гальванометра²). Термо-

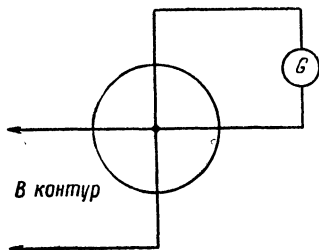


Рис. 4.

спай находится в вакууме для того, чтобы уменьшить тепловые потери при нагревании его током; это очень существенно при измерении слабых токов³). Показания гальванометра в такой системе нелинейно связаны с амплитудой силы тока в контуре. Поэтому данная система термоэлемент — гальванометр подвергается совместной калибровке. В данном случае эта калибровка выполнена предварительно, и прибор снабжен калибровочным графиком, расположенным около него.

Включив генератор, медленно и плавно изменяют включенную в контур емкость. При этом наблюдают за стрелкой гальванометра, включенного в цепь термоэлемента. (Следует иметь в виду, что измерительная система термоэлемента и гальванометра инерционна, и поэтому надо выждать установления показаний гальванометра после каждого изменения емкости конденсатора.) Когда гальванометр начинает давать показания, то это означает, что в исследуемом контуре происходят вынужденные колебания. Очень медленным вращением ручки конденсатора отыскивают максимум силы тока через гальванометр. Затем, не изменяя настройки конденсатора, регулируют связь между контуром и генератором так, чтобы стрелка гальванометра отклонялась почти на всю шкалу этого прибора⁴). После этого можно приступить к измерениям.

¹) Напомним, что на основной схеме задачи (рис. 1) этот прибор не показан (как в цепи генератора, так и в цепи резонансного контура).

²) Устройство термоэлементов для этих целей бывает весьма различным. Здесь описан случай, когда измеряемый ток высокой частоты проходит непосредственно через спай; в других случаях он проходит только через тоненький проводник, находящийся вблизи спаия и подогревающий этот спай.

³) Способ помещения термоспая в вакуум был впервые использован П. Н. Лебедевым в его известных опытах по измерению величины светового давления.

⁴) Как следует из изложенного выше, надо стараться работать при слабой связи контура с генератором. Для усиления тока в контуре можно увеличивать обратную связь в генераторе, увеличивая тем самым амплитуду силы тока в катушке связи.

Приводят конденсатор к нулевому делению его шкалы и затем снимают резонансную кривую при неизменной связи контура с генератором и при неизменном режиме работы генератора. Для снятия кривой последовательно ставят ручку конденсатора на все возрастающие деления его шкалы, записывают их и показания гальванометра, соответствующие каждому используемому значению емкости конденсатора. Когда вблизи резонанса отклонения гальванометра начинают резко расти, ведут измерения через небольшие интервалы значений емкости конденсатора. Вдали от резонанса интервалы изменений емкости могут быть крупнее. Особенно существенно найти значение емкости, соответствующее вершине резонансной кривой.

В процессе этих и дальнейших измерений поддерживают постоянство показаний токоизмерительного прибора в цепи генератора.

Далее переходят к измерениям для контура с разными значениями дополнительного активного сопротивления, включая для этого в контур сопротивление от 25 до 50 ом.

Сделав после измерений необходимые расчеты, строят графики резонансных кривых. Из каждой полученной кривой находят при помощи формулы (2) значения добротности контура при резонансе $Q_{рез}$. Добротность контура связана с декрементом затухания¹⁾ колебаний в контуре γ соотношением $\gamma = \frac{\pi}{\sqrt{Q^2 - \frac{1}{4}}}$, принимаю-

щим при больших добротностях вид $\gamma \approx \frac{\pi}{Q}$. Из значений добротности находят значения декремента затухания контура для каждого резонансного максимума.

Упражнение 3

Использование явления резонанса в колебательном контуре для измерений емкостей и самоиндукции

Измерение неизвестных параметров — емкости C_x , коэффициентов самоиндукции L_x и коэффициента взаимной индукции M — производится по методу замещения. В этом случае сопротивление в резонансный контур не включается.

Параллельно прокалиброванному конденсатору переменной емкости, использованному в упражнении 2, в резонансный контур включается второй конденсатор переменной емкости, цена делений шкалы которого неизвестна. Вращающаяся система этого конденсатора устанавливается последовательно в нескольких положениях. Для каждого положения диска неизвестного конденсатора находится

¹⁾ См. задачу 102.

вершина резонансной кривой ¹⁾ путем вращения диска прокалиброванного конденсатора.

Так как частота генератора остается во всех упражнениях неизменной, то очевидно, что при неизменной индуктивности резонансного контура резонанс будет иметь место, когда сумма емкостей обоих конденсаторов примет значение, равное емкости $C_{рез}$, установленной на прокалиброванном конденсаторе во втором упражнении задачи:

$$C_x + C' = C_{рез}.$$

Отсюда

$$C_x = C_{рез} - C',$$

где C' — емкость, введенная в калиброванном конденсаторе в новых условиях резонанса.

Измерение коэффициентов самоиндукции L_x и взаимной индукции M производится на основании тех же соображений. Именно в резонансный контур теперь включают неизвестную катушку самоиндукции, вводя ее в цепь последовательно с основной катушкой резонансного контура ²⁾, индуктивность которой L_0 должна быть указана.

После этого вновь отыскивают вершину резонансной кривой. Она будет соответствовать опять новому отсчету C'' на прокалиброванном конденсаторе.

Из условия постоянства периода вынуждающего генератора имеем

$$L_0 C_{рез} = (L_x + L_0) C''.$$

Отсюда

$$L_x = L_0 \left(\frac{C_{рез}}{C''} - 1 \right).$$

Таким образом, может быть измерен коэффициент самоиндукции нескольких катушек.

Этим же приемом можно воспользоваться и для измерения коэффициента взаимной индукции двух индуктивно связанных катушек.

Коэффициент взаимной индукции двух катушек определяется, как известно, величиной магнитного потока, пронизывающего контур одной из катушек, когда по другой катушке идет ток силой в единицу. Поэтому коэффициент взаимной индукции катушек за-

¹⁾ В настоящей задаче используется приближенный метод измерения емкости и самоиндукции по определению положения вершины резонансной кривой, что не может быть сделано точно. Точный метод измерения по ширине резонансной кривой описан в задачах 107 и 108.

²⁾ Индуктивной связи между катушками нет.

висит от геометрического расположения катушек и от магнитной проницаемости среды, в которой они расположены (рис. 5).

Измерение проводится следующим образом. Две из числа промеренных в отдельности катушек включаются в цепь резонансного контура последовательно друг с другом и с основной катушкой этого контура. Исследуемые катушки ставятся в особом держателе. В этих условиях опять прежним методом отыскивается значение емкости C_I калиброванного конденсатора, соответствующее вершине резонансной кривой на калиброванном конденсаторе резонансного контура. Затем переключаются концы у одной из этих двух катушек. Тогда, очевидно, коэффициент взаимной индукции сохранит прежнее значение, но общая индуктивность контура уменьшится из-за изменения направления магнитного потока,

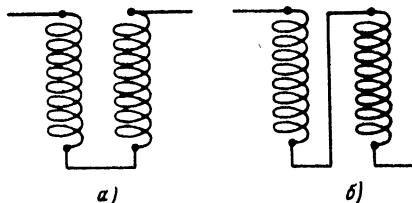


Рис. 5.

пронизывающего катушки. После этого вновь отыскивается значение емкости C_{II} калиброванного конденсатора для вершины резонансной кривой.

Из условия неизменности частоты генератора можно написать

$$(L_0 + L_1 + L_2 + 2M) C_I = (L_0 + L_1 + L_2 - 2M) C_{II}.$$

Отсюда

$$M = \frac{L_0 + L_1 + L_2}{2} \frac{C_{II} - C_I}{C_{II} + C_I}.$$

Очевидно, что порядок измерений при условиях параллельности или антипараллельности общего магнитного потока в катушках их собственным магнитным потокам не играет роли. Важно лишь, чтобы взаимный наклон катушек не менялся при переключении концов у одной из них (для второго измерения).

В этом упражнении нет надобности снимать всю резонансную кривую при каждом измерении емкости или индуктивности. Важно лишь сделать несколько отсчетов для точек, расположенных на ее вершине, а также до и после положения максимума резонансной кривой. Эти точки дают возможность построить вершину кривой и убедиться в правильном ходе измерений.

Технические данные установки. В схеме генератора используется лампа 6С5. Индуктивности сотовых катушек и емкости конденсаторов подбираются так, чтобы частота генератора составляла несколько сотен килогерц.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.
2. Г. С. Г о р е л и к, Колебания и волны, Физматгиз, 1959.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

3. С. П. Стрелков, Введение в теорию колебаний, «Наука», 1964.

4. А. М. Бонч-Бруевич, Радиоэлектроника в экспериментальной физике, «Наука», 1966.

ЗАДАЧА 107

ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ И ЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСА В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

В настоящей задаче исследуются вынужденные колебания в колебательном контуре, соединенном с источником электродвижущей силы переменной частоты. Источник может быть соединен с простейшим колебательным контуром последовательно (рис. 1, а) или параллельно (рис. 1, б). В настоящей задаче применяется первый способ включения источника.

При исследовании вынужденных колебаний большой интерес представляет изучение зависимости интенсивности колебаний от соотношения между частотой вынуждающего воздействия ω и собственной частотой незатухающих колебаний в системе

$$\left(\omega_0^2 = \frac{1}{LC}\right).$$

Интенсивность установившихся вынужденных электромагнитных колебаний в контуре может быть охарактеризована разными величинами: 1) амплитудой силы тока, 2) амплитудой разности потенциалов на пластинах конденсатора, 3) амплитудой напряжения на индуктивности контура и т. д. Амплитуда каждой из этих величин выражается особой функцией отношения $\gamma = \omega/\omega_0$. Каждая из этих функций, носящих общее название уравнений резонансных кривых, имеет характерный максимум (если добротность контура

$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ не слишком мала) при своем значении величины γ (рис. 2).

Соотношение между частотами ω и ω_0 может изменяться двумя способами: его можно варьировать либо путем изменения значения ω_0 (т. е. путем изменения параметров контура L и C), либо путем изменения частоты ω , действующей в контуре электродвижущей силы. С применением первого способа, аналогичного процессу настройки радиоприемника на частоту определенной радиостанции, можно познакомиться в описании задачи 106. В настоящей задаче контур не настраивается, но изменяется частота вынуждающей

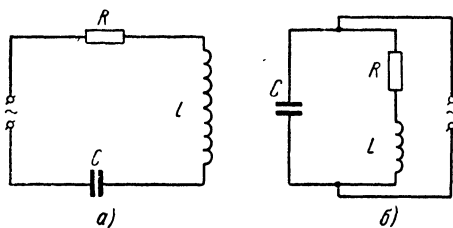


Рис. 1.

электродвижущей силы. Источником электродвижущей силы переменной частоты служит генератор стандартных сигналов (модель ГСС-6). Его применение объяснено ниже в описании приборов и измерений.

В задаче исследуется зависимость амплитуды U_0 переменного напряжения на конденсаторе от величины $\gamma = \omega/\omega_0$. Уравнение резонансной кривой для величины V_0 может быть получено следующим образом. Напишем уравнение вынужденных колебаний в нашем контуре

$$L \frac{dI}{dt} + RI + \frac{e}{C} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$$

(второй закон Кирхгофа).

Учитывая, что сила тока $I = de/dt$ (где e — заряд на конденсаторе), можно написать

$$L \frac{d^2e}{dt^2} + R \frac{de}{dt} + \frac{e}{C} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t,$$

где \mathcal{E}_0 — амплитуда включенной в контур электродвижущей силы. Решением этого уравнения будет (мы рассматриваем только установившиеся вынужденные колебания) функция

$$e = e_0 \sin(\omega t + \varphi), \quad \text{где } e_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{R^2\omega^2 + L^2(\omega^2 - \omega_0^2)^2}},$$

в чем можно убедиться непосредственной ее подстановкой в уравнение колебаний. Воспользовавшись обозначениями

$$\gamma = \frac{\omega}{\omega_0} \quad \text{и} \quad \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = Q$$

(добротность контура), получим

$$e_0 = \frac{\mathcal{E}_0 C}{\sqrt{(1 - \gamma^2)^2 + \frac{\gamma^2}{Q^2}}}.$$

Нас интересует амплитуда напряжения на конденсаторе $U_0 = e_0/C$, следовательно,

$$U_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{(1 - \gamma^2)^2 + \frac{\gamma^2}{Q^2}}}.$$

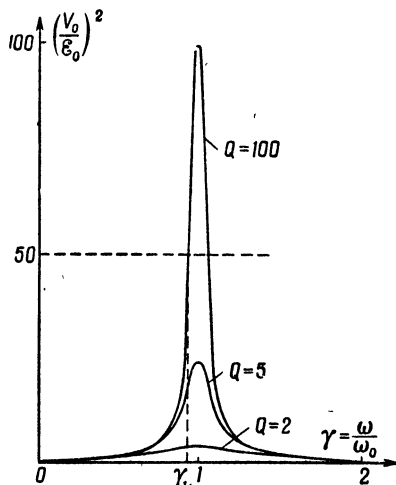


Рис. 2.

Последнее соотношение есть искомое уравнение резонансной кривой для амплитуды напряжения на конденсаторе. Для дальнейшего исследования этой кривой и для сопоставления ее графика с результатами опыта удобнее написать ее уравнение в безразмерной форме

$$y = \left(\frac{U_0}{\mathcal{E}_0}\right)^2 = \frac{1}{(1 - \gamma^2)^2 + \frac{\gamma^2}{Q^2}} = \frac{Q^2}{Q^2(1 - \gamma^2)^2 + \gamma^2}.$$

Функция эта имеет максимум при значении

$$\gamma = \gamma_{\text{рез}} = \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}.$$

Из полученного выражения легко найти, что резонанс для U_0 наступает при частоте внешней электродвижущей силы

$$\omega_{\text{рез}}^2 = \omega_0^2 - \frac{1}{2} \frac{R^2}{L^2} = \frac{1}{LC} - \frac{1}{2} \frac{R^2}{L^2},$$

откуда получаем, что при малом затухании в контуре (добротность контура $Q \gg 1$)

$$\omega_{\text{рез}} \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Подставляя значение $\omega_{\text{рез}}$ в выражение для V_0 , находим максимальное (резонансное) значение этой величины

$$U_{\text{рез}} = \frac{\mathcal{E}_0}{CR \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}.$$

В случае малого затухания в контуре

$$U_{\text{рез}} \approx \frac{\mathcal{E}_0}{CR} \sqrt{LC} = \mathcal{E}_0 Q.$$

Отсюда видно, что при резонансе амплитуда напряжения на конденсаторе может быть больше значения амплитуды, включенной в контур электродвижущей силы. Исходя из последнего выражения для $U_{\text{рез}}$, можно дать определение величины добротности контура ($Q = U_{\text{рез}}/\mathcal{E}_0$) как отношения амплитуды напряжения на конденсаторе при резонансе к амплитуде электродвижущей силы.

Безразмерные резонансные кривые для напряжения на конденсаторе изображены на рис. 2. По ним нетрудно определить добротность контура, входящую как параметр в уравнение резонансной кривой. Это делается следующим образом.

Найдем значение $\gamma = \gamma_{1/2}$, при котором квадрат амплитуды напряжения на конденсаторе уменьшается вдвое по сравнению с его

значением при резонансе. Из условия $Q^2(1 - \gamma_{1/2}^2)^2 - \gamma_{1/2}^2 = 2$ находим

$$\gamma_{1/2}^2 = 1 - \frac{1}{2Q^2} \pm \frac{1}{Q} \sqrt{1 + \frac{1}{4Q^2}}$$

или, пренебрегая членами порядка $1/Q^2$ (т. е. имея в виду контуры, для которых $Q \gg 1$), получим

$$\gamma_{1/2}^2 = 1 \pm \frac{1}{Q} \quad \text{или} \quad \gamma_{1/2} = 1 \pm \frac{1}{2Q}.$$

Как следовало ожидать, существует два значения $\gamma_{1/2}$ по обе стороны максимума резонансной кривой, при которых отношение $(U_0/\mathcal{E}_0)^2$ в два раза меньше своего максимального значения. При сделанном предположении о том, что $Q \gg 1$, эти два значения лежат симметрично относительно точки $\gamma = 1$; обозначим их через $\gamma'_{1/2}$ и $\gamma''_{1/2}$. Тогда добротность контура

$$Q = \frac{1}{\gamma'_{1/2} - \gamma''_{1/2}}. \quad (1)$$

Следовательно, если на экспериментально полученном графике резонансной кривой $(U_0/\mathcal{E}_0)^2 = f(\gamma)$ провести на уровне $\frac{1}{2}(U_0/\mathcal{E}_0)^2$ прямую, параллельную оси γ , то абсциссы точек пересечения этой прямой с резонансной кривой дадут значения $\gamma'_{1/2}$ и $\gamma''_{1/2}$. Затем, воспользовавшись выражением (1), можно найти величину Q .

Целью настоящей задачи является получение экспериментальным путем нескольких резонансных кривых для разных контуров и определение по ним добротности этих контуров при помощи соотношения (1).

Описание приборов. При измерениях используются три основных устройства: исследуемые контуры, катодный вольтметр ВКС-7, генератор сигналов ГСС-6. Различные контуры создаются в ходе выполнения задачи путем соединения одной катушки с разными конденсаторами и путем включения разных сопротивлений (3—45 ом).

Напряжение на конденсаторе контура измеряется при помощи катодного вольтметра ВКС-7. С работой такого вольтметра можно познакомиться по литературе, указанной в конце задачи, и по имеющемуся в практикуме заводскому описанию прибора. В условиях данной задачи катодный вольтметр необходим, так как измерения происходят на высокой частоте, и нужен прибор не только высокочастотный, но и такой, который не шунтирует заметным образом конденсатор исследуемого контура.

Используемый в задаче генератор стандартных сигналов ГСС-6¹⁾ позволяет получать синусоидальные колебания в широком

¹⁾ Познакомиться с устройством генератора можно по имеющемуся в практикуме заводскому описанию этого прибора.

диапазоне частот — от 100 кГц до 26 МГц. На рис. 3 дана фотография передней панели генератора, на которой расположены ручки управления и показывающие приборы. В данной задаче генератор используется частично, поэтому ниже дается описание лишь той части его, которая необходима в работе.

Генератор включается в сеть переменного тока (120 в), с помощью шнура, идущего от гнезда 1 (рис. 3). После перекидывания тумблера 2 в верхнее положение загорается сигнальная лампочка 3;

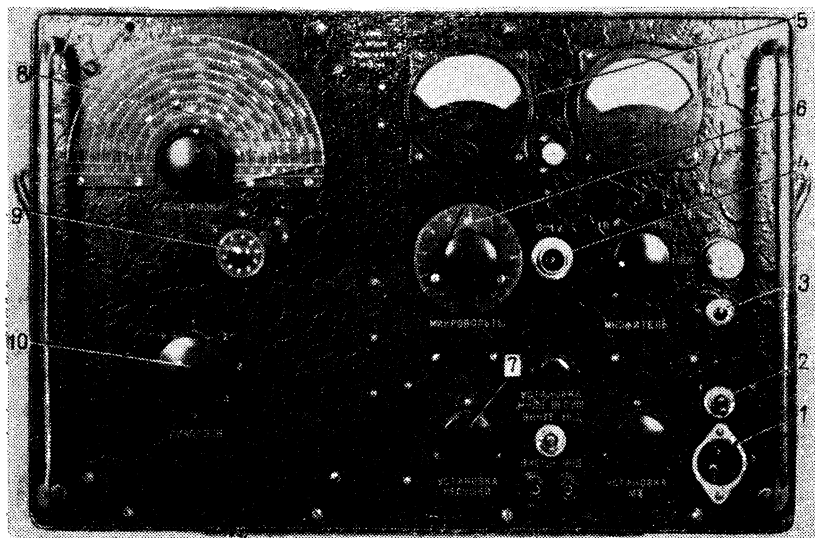


Рис. 3.

это значит, что прибор включен в сеть. Исследуемая схема подключается к генератору с помощью шнура, идущего от гнезда 4 и имеющего на конце два штекера и наконечник для присоединения брони шнура к земле.

С генератора можно снимать напряжения до 1,5 в; величину напряжения показывает прибор 5. Регулировка напряжения производится ручками 6 и 7. Например, для того чтобы на выходе генератора было напряжение в 1 в, необходимо поставить ручку 6 на положение 10 по ее шкале, а затем вращением ручки 7 добиться того, чтобы стрелка прибора 5 показала 1 в (вся шкала прибора соответствует 1,5 в).

Напряжение на выходе генератора изменяется с перестройкой его частоты, поэтому при работе нужно все время следить за показанием прибора 5 и поддерживать постоянное напряжение. При работе используется на выходе генератора напряжение 0,8 в.

Шкала настройки 8, вращаемая с помощью ручки 9, разделена на 8 поддиапазонов, переключение которых производится ручкой 10. На ручке имеется указатель, который следует поставить против цифры, указывающей диапазон. Рекомендуемые для работы диапазоны частот указаны непосредственно на установке.

После окончания работы генератор выключают перекидыванием тумблера 2 вниз.

Измерения и их обработка. Собрав схему и включив катодный вольтметр, надо включить генератор и, убедившись в том, что вся система работает, можно приступить к измерениям.

Указанным выше способом составляют разные контуры из одной и той же индуктивности и разных емкостей (сопротивления пока не включают). Снимают резонансные кривые для каждого контура. При этом приходится варьировать частоту генератора от 100 до 500 кГц. Особенно малыми ступенями надлежит изменять частоту генератора вблизи вершины резонансной кривой. Напряжение на выходе генератора необходимо поддерживать все время неизменным (0,8 в). На основании сделанных измерений выбирают контур с максимальной добротностью, т. е. контур, дающий максимальное значение напряжения на конденсаторе. Затем, вводя в этот контур последовательно возрастающие безындукционные сопротивления (3—45 ом), понижают добротность выбранного контура и снимают резонансные кривые для каждого значения сопротивления. Таким образом изучается влияние добротности контура на форму его резонансной кривой.

Полученные результаты всех измерений представляют в виде графиков, безразмерных резонансных кривых, строя зависимости $(U_0/\mathcal{E}_0)^2$ от γ . Необходимое для определения величины γ значение ω_0 полагают равным той частоте генератора, для которой изучаемый контур до введения в него дополнительных сопротивлений давал максимальную амплитуду напряжения на конденсаторе.

Из всех построенных графиков резонансных кривых определяют добротность контуров. Используя связь с добротностью декремента затухания колебаний в контуре $\delta \approx \pi/Q$, находят декременты затухания для каждого контура. Для каждого графика указывают величину $\gamma'_{1/2} - \gamma''_{1/2}$, т. е. относительную ширину резонансной кривой. Необходимо построить еще резонансные кривые зависимости $(U_0/\mathcal{E}_0 Q)^2$ от γ , т. е. резонансные кривые, вершина которых пронормирована к единице. На них особенно наглядно видна зависимость остроты резонанса от добротности контура Q .

Технические данные установки. В задаче используются: генератор стандартных сигналов ГСС-6, катодный вольтметр ВКС-7; данные об используемых контурах и частотах приведены в тексте описания.

ЛИТЕРАТУРА

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. С. П. Стрелков, Введение в теорию колебаний, «Наука», 1964.
3. Г. С. Горелик, Колебания и волны, Физматгиз, 1959.
4. Н. Н. Малов, Курс электротехники и радиотехники, Физматгиз, 1959.
5. А. М. Бонч-Бруевич, Радиоэлектроника в экспериментальной физике, «Наука», 1966.

ЗАДАЧА 108

**ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЙ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ,
ВКЛЮЧЕННОМ ПАРАЛЛЕЛЬНО
ИСТОЧНИКУ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ**

В настоящей задаче изучаются явления, имеющие место при включении колебательного контура параллельно источнику внешней электродвижущей силы (рис. 1) ¹⁾.

Рассмотрим сопротивление Z , которое представляет этот контур переменному току. Воспользуемся для этого методом комплексных сопротивлений

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{r + j\omega L} + j\omega C$$

или

$$Z = \frac{r + j\omega L}{j\omega C(r + jx)},$$

где

$$x = L\omega - \frac{1}{C\omega};$$

окончательно

$$Z = \frac{1}{\omega C Z_0^2} [r(\omega L - x) - j(r^2 + \omega Lx)],$$

где

$$Z_0^2 = r^2 + x^2.$$

Как и следовало ожидать, значение величины Z оказывается зависящим от частоты тока ω . Разберем эту зависимость подробнее.

Представляет интерес найти частоту, при которой модуль сопротивления контура $|Z|$ принимает максимальное значение. Можно показать, что для контуров с большим значением добротности ($Q = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}} \gg 1$) условие максимума для $|Z|$ как функции ω прак-

¹⁾ См. также задачу 107, в которой рассматривается другой способ включения контура в цепь источника тока.

тически равнозначно требованию, чтобы мнимая часть Z обращалась в нуль. Приравнявая мнимую часть Z нулю, имеем

$$r^2 + \omega Lx = 0.$$

На основании сказанного выше находим из этого уравнения частоту ω_0 , при которой $|Z|$ принимает максимальное значение, становясь одновременно величиной действительной. При этом падение напряжения на контуре находится в фазе с суммарным током, идущим через контур. Итак,

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} - \frac{r^2}{L^2} = \frac{1}{LC} \left(1 - \frac{1}{Q^2}\right).$$

Значение частоты ω_0^2 , найденное таким способом, отличается от значения частоты, найденного из строгого требования обращения $|Z|$ в максимум, на величину, по порядку не большую чем $\omega_0^2/6Q^4$. Значение частоты ω_0 называют иногда резонансной частотой, а приближение $|Z|$ к максимуму при $\omega \rightarrow \omega_0$ называют *резонансом сопротивлений*. При выборе этого названия исходят из аналогии между зависимостью $|Z|$ от ω и стремлением к максимуму амплитуды силы тока при определенном значении частоты внешней электродвижущей силы в том случае, когда контур включен последовательно в цепь источника электродвижущей силы (см. описание задачи 107). Однако, как мы увидим дальше, существует значительное различие между этим явлением и процессами, рассматриваемыми в настоящей задаче. Поэтому термин «резонанс сопротивлений» применяется не всегда.

Подставляя величину ω_0^2 в выражение для Z , находим максимальное значение Z_{\max} (активное сопротивление):

$$Z_{\max} = \frac{r}{\omega_0 C Z_0^2} (\omega_0 L - x) = \frac{L}{Cr} = rQ^2,$$

так как в этом случае

$$Z_0^2 = r^2 \left(1 + \frac{r^2}{\omega_0^2 L^2}\right) \quad \text{и} \quad x_0 = -\frac{r^2}{\omega_0 L}.$$

Из вышеизложенного следует: 1) если контур последовательно с некоторым сопротивлением (рис. 1) включен в цепь источника электродвижущей силы с фиксированной амплитудой, но с изменяющейся частотой, то при приближении частоты источника к значению ω_0 сила тока в цепи будет падать и станет тем ближе к нулю, чем меньше активное сопротивление контура r . Падение напряжения на контуре будет при этом расти и, наконец, станет близким к значению

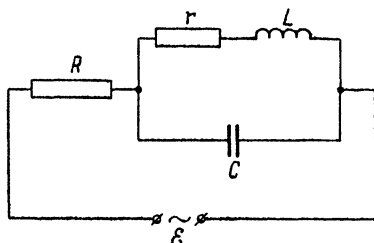


Рис. 1.

электродвижущей силы источника; 2) если в той цепи, в которую включен контур, поддерживается неизменное по амплитуде значение силы тока i_0 , частота которого, однако, изменяется, то будет изменяться и величина падения напряжения на контуре. В самом деле, падение напряжения на контуре будет равно произведению

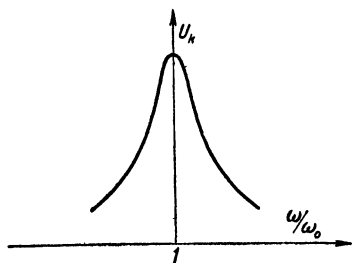


Рис. 2.

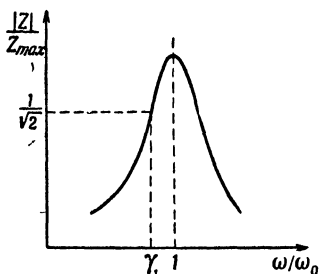


Рис. 3.

$Z \cdot i_0 \sin \omega t$, и его величина будет изменяться по амплитуде вместе с изменением $|Z|$ в зависимости от частоты тока. Амплитуда падения напряжения на контуре достигнет максимума при $\omega \approx \omega_0$, когда величина $|Z|$ близка к максимальной. Поэтому экспериментальное исследование величины падения напряжения на контуре (рис. 2) как функции частоты тока (амплитуда которого поддерживается постоянной) позволяет проследить зависимость $|Z|$ от частоты (рис. 3). Такое исследование составляет основное содержание настоящей задачи.

Кроме того, в задаче исследуется сдвиг фаз φ между суммарным током через контур и падением на нем напряжения. (Значение $\operatorname{tg} \varphi$ будет выражаться отношением мнимой части сопротивления Z к его действительной части.) Величина сдвига фаз будет, разумеется, функцией частоты тока ω . Согласно вышеизложенному φ равно нулю при частоте $\omega = \omega_0$. Мы не

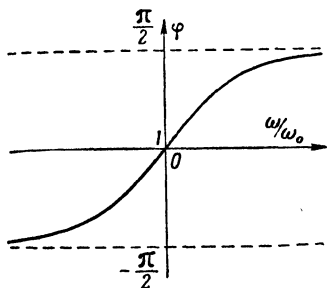


Рис. 4.

будем исследовать аналитически вид функции $\varphi(\omega/\omega_0)$, но изобразим ее ход графиком (рис. 4). Подобные графики должны быть получены экспериментально в ходе выполнения задачи.

Прежде чем переходить к описанию эксперимента, выполняемого в настоящей задаче, рассмотрим явления в самом контуре в зависимости от частоты тока, проходящего через контур. До сих пор мы не касались этой стороны дела и характеризовали контур лишь значением его сопротивления. При включении контура параллельно источнику переменного тока в двух ветвях контура (индуктивной и емкостной) будут течь токи, различные и по амплитуде, и по фазе.

В случае если индуктивная ветвь контура не содержит активного сопротивления, ток в этой ветви будет противоположен по фазе току в емкостной ветви. Суммарный ток в неразветвленной части цепи будет равен разности сил токов в двух ветвях контура. Напряжение на контуре будет сдвинуто по фазе на $\pi/2$ относительно силы тока в неразветвленной цепи; иными словами; сопротивление контура будет чисто мнимым. Если при этом частота внешней электродвижущей силы станет равной $\Omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ (т. е. частоте собственных незатухающих коле-

баний в контуре), то, как легко видеть, амплитуды сил токов в индуктивной и емкостной ветвях станут равными, и суммарная сила тока в цепи источника обратится в нуль. Однако в ветвях контура токи будут течь; в контуре будут происходить колебания. В этом случае контур может играть роль фильтра по отношению к переменному току частоты Ω_0 . Это означает следующее: если контур включен в такую цепь переменного тока, в которой действуют электродвижущие силы нескольких частот и в том числе частоты Ω_0 , то благодаря наличию контура компоненты силы тока с частотой Ω_0 практически в цепи не будут.

Если контур содержит активное сопротивление (контур имеет затухание), то условие равенства амплитуд токов в двух ветвях контура и условие противоположности этих токов по фазе будут нарушены. Следовательно, результирующая сила тока в цепи не будет равна нулю; ток, текущий в неразветвленной части цепи, будет в этом случае обеспечивать приток энергии к контуру, которая расходуется в активном сопротивлении контура на выделение тепла. Минимальное значение амплитуды силы тока будет иметь место вблизи рассчитанного нами выше значения частоты ω_0 . Однако это падение амплитуды силы тока будет иметь место при подаче на контур напряжения фиксированной амплитуды (первый режим). Если же поддерживать в цепи источника второй режим, т. е. постоянную амплитуду силы тока, то в этом случае придется непрерывно увеличивать подводимое к контуру напряжение по мере приближения ω к ω_0 .

Весь описанный круг явлений, рассматриваемый с точки зрения значений амплитуд сил токов в ветвях контура и амплитуды силы тока во внешней цепи в зависимости от частоты, нередко называют резонансом токов. Как видно из изложенного, два разных названия — «резонанс токов» и «резонанс сопротивлений» — соответствуют рассмотрению одного и того же явления, но с различных точек зрения.

Измерения и их обработка. 1. Как сказано выше, исследование зависимости $|Z|$ от ω заменяется исследованием зависимости амплитуды напряжения на контуре от частоты при $i_0 = \text{const}$. Измерения производятся при помощи осциллографа, используемого в качестве вольтметра. Для этого измеряемое напряжение подается на горизонтальные пластины осциллографа; вертикальные пластины осциллографа при этом замкнуты на землю, развертка выключена. Напряжение измеряют по высоте вертикальных отклонений луча от его исходного (по возможности центрального) положения. Если необходимо знать абсолютные значения измеряемых напряжений, то предварительно отклонения луча калибруют в вольтах ¹⁾. В нашем случае калибровку осциллографа не производят, так как

¹⁾ Это делают путем последовательной подачи на вход осциллографа известных значений напряжения и путем одновременных измерений соответствующих этим напряжениям отклонений луча. Разумеется, это производят при том же значении усиления осциллографа и на той же частоте, при которых он в дальнейшем используется в качестве вольтметра.

абсолютные значения напряжений не измеряются. Соблюдается лишь условие работы в такой области усиления, для которой при всех используемых частотах имеет место линейная зависимость между амплитудой сигнала и вертикальным отклонением луча.

Перед началом измерений с целью установления наиболее выгодных условий работы на горизонтальные пластины осциллографа подают напряжение непосредственно с ГСС-6¹⁾; на генераторе устанавливают частоту около $\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 2,5 \cdot 10^5 \text{ гц}^2)$ и напряжение на выходе 0,2 в (по вольтметру генератора). Регулировкой усилителя устанавливают вертикальное отклонение луча приблизительно на $\frac{2}{3}$ диаметра экрана. (После этого положение ручки усилителя не изменяется.) Затем собирают схему согласно рис. 5.

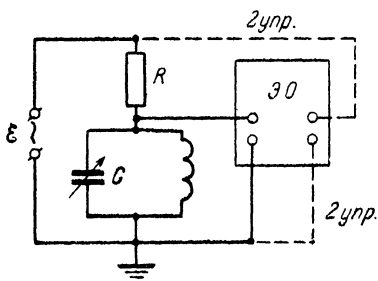


Рис. 5.

Необходимое для измерений постоянство амплитуды тока в условиях данной задачи реализуется следующим образом. Последовательно с контуром (параметры: $L = 0,4 \text{ мгн}$, $C = 730-1280 \text{ нф}$, $r = 5 \text{ ом}$) включено большое сопротивление $R \approx 1 \text{ Мом}$. Величина этого сопротивления $R \geq 10 |Z|_{\text{max}}$

при всех частотах, поэтому если на выходе генератора поддерживать постоянное по амплитуде напряжение, то условие постоянства амплитуды тока будет практически выполнено для всех частот, несмотря на значительные изменения $|Z|$. На выходе генератора поддерживается напряжение 1,5 в.

Изменяя частоту генератора, записывают отклонения луча осциллографа³⁾. Результаты записи представляют в виде графика зависимости $|Z|/Z_{\text{max}}$ от ω/ω_0 . Здесь ω_0 — экспериментально определенное значение частоты, соответствующей максимуму напряжения на контуре. Измерения выполняют для трех значений емкости контура, притом каждый раз в значительном интервале частот. Выбор интервала частот определяется условием, чтобы на краях этого интервала значение $|Z|$ было бы в несколько раз меньше Z_{max} для больших добротностей контура.

Построенные графики зависимости $|Z|/Z_{\text{max}}$ от ω/ω_0 (рис. 3) позволяют легко найти значения добротности контура, если она велика ($Q \gg 1$).

¹⁾ См. описание задачи 107.

²⁾ Параметры контура даны ниже; при этом расчете принимаем $C = 10^9 \text{ нф}$.

³⁾ Используемые в этой работе диапазоны частот генератора указаны непосредственно на установке.

Рассмотрим значение $|Z|$, выразив его через $\gamma = \omega/\Omega_0$, где $\Omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, и через Q .

$$|Z| = r \sqrt{\frac{1 + \gamma^2 Q^2}{(1 - \gamma^2)^2 + \frac{\gamma^2}{Q^2}}}$$

Для больших значений Q (например, $Q \geq 10$)

$$|Z| = r \sqrt{\frac{\gamma^2 Q^2}{(1 - \gamma^2)^2}} = r \frac{\gamma Q}{1 - \gamma^2} \quad \text{и} \quad \gamma = \frac{\omega}{\Omega_0} \approx \frac{\omega}{\omega_0}$$

Составим отношение $|Z|/Z_{\max}$ и приравняем его (см. задачу 107) к $1/\sqrt{2}$ (такая величина этого отношения получится при некотором значении $\gamma = \gamma_1$):

$$\frac{|Z|}{Z_{\max}} = \frac{r\gamma_1 Q}{(1 - \gamma_1^2)^2 r Q^2} = \frac{\gamma_1}{(1 - \gamma_1^2) Q} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Отсюда найдем

$$Q = \frac{\sqrt{2} \gamma_1}{1 - \gamma_1^2}$$

Легко убедиться в том, что то же самое значение отношения $\frac{|Z|}{Z_{\max}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ получится и при значении $\gamma = \gamma'_1 = 1/\gamma_1$. Пользуясь этим, можно показать, что

$$Q = \frac{\sqrt{2}}{\gamma_1 - \gamma'_1}$$

т. е. добротность пропорциональна обратной величине так называемой относительной ширины резонансной кривой (см. задачу 107). В самом деле, значения γ_1 и γ'_1 соответствуют значениям $|Z|$, уменьшившимся в $1/\sqrt{2}$ раз по сравнению с его максимальным значением. Разность $\gamma_1 - \gamma'_1$ дает ту величину, которую по определению принято называть относительной шириной резонансной кривой.

Исходя из последнего выражения для Q , численное значение добротности можно легко найти по полученному графику (рис. 3); величина, обратная длине отрезка $\gamma_1 - \gamma'_1$, дает значение добротности. Произведя, таким образом, обработку каждого графика, надо выписать на нем значение добротности, относительной ширины резонансной кривой и ширины резонансной кривой $((\gamma_1 - \gamma'_1) \omega_0)$. Сопоставляя найденные значения Q с шириной соответствующих резонансных кривых, необходимо обсудить вопрос о пригодности контуров в качестве частотных фильтров в зависимости от значений их добротности.

2. Принцип измерения сдвига фаз двух колебаний при помощи электронного осциллографа описан в задаче 97. Измерения заключаются в определениях параметров эллипса, получающегося на

экране в результате сложения двух колебаний, различных по фазе и амплитуде.

Предварительно, однако, надо проконтролировать, не вносят ли фазовых искажений усилители осциллографа. Для этого надо подать одно и то же напряжение на оба входа осциллографа. Если усилители не изменяют фазы усиливаемых сигналов, то на экране должна получиться прямая линия; ее наклон зависит от амплитуд складываемых колебаний. Если они вносят сдвиг фаз, то на экране получается эллипс. В данном случае надо для контроля присоединить к контуру оба входа осциллографа, а в контуре создать нормальный режим работы при частоте ω , близкой к ω_0 . Если ни при каком значении усиления на экране не получается прямой, то осциллограф нуждается в корректировке усилителей, которая выполняется уже не студентами, а сотрудниками практикума.

По окончании проверки усилителей осциллограф присоединяют к схеме согласно рис. 5 (сплошные и пунктирные линии) и определяют искомый сдвиг фаз между напряжением на контуре и суммарным током через контур. Для этого производят обмер эллипсов согласно указаниям, содержащимся в задаче 97. Найденные значения величины φ изображают графиком зависимости φ от ω/ω_0 .

Следует обратить внимание на то, что способ включения осциллографа, указанный на рис. 5 для измерения сдвига фаз между током и напряжением, не безупречен. Как видно из схемы, один из входов осциллографа включается на контур, а другой (вертикальные пластины) — параллельно ГСС-6. На самом деле второй вход осциллографа следовало бы включить параллельно безындукционному сопротивлению R , напряжение на котором в фазе с током. Однако такое включение осциллографа невозможно по техническим причинам. Дело в том, что у осциллографа соединены между собой и поданы на землю нижние клеммы обоих входов, а у ГСС-6 подан на землю один из проводов выходного напряжения. Таким образом, присоединить приборы для фазовых измерений иначе, чем это изображено на схеме, невозможно. Но это не вносит больших искажений в результат измерения величины φ . По условию $R \geq 10|Z|$; поэтому ток в неразветвленной цепи практически в фазе с электродвижущей силой, и мы можем вместо сдвига фаз между суммарным током и напряжением на контуре измерять сдвиг фаз между напряжением на контуре и внешней электродвижущей силой.

Технические данные установки. В работе используются генератор стандартных сигналов ГСС-6 и осциллограф марки ЭО-4.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. С. П. С т р е л к о в, Введение в теорию колебаний, «Наука», 1964.

3. Г. С. Г о р е л и к, Колебания и волны, Физматгиз, 1959.

4. Н. Н. М а л о в, Курс электротехники и радиотехники, Физматгиз, 1959.

5. А. М. Б о н ч - Б р у е в и ч, Радиоэлектроника в экспериментальной физике, «Наука», 1966.

6. Г. П. Ш к у р и н, Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам, Военизг, 1956.

ЗАДАЧА 109

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Введение. Целью настоящей задачи является изучение принципов действия электронного осциллографа.

Осциллограф в основном применяется для следующих целей:

1. Для исследования напряжения или тока быстропеременных процессов в зависимости от времени (форма кривой) или в зависимости от напряжения или тока другого процесса.

2. Для сравнения амплитуд двух напряжений или двух токов.

3. Для сравнения фаз двух токов, двух напряжений или тока и напряжения.

4. Для определения частот колебаний, измерения малых промежутков времени.

Устройство и работа электронного осциллографа. Обычно электронный осциллограф представляет собой прибор, состоящий из электронно-лучевой трубки, усилителей исследуемого сигнала, генератора развертки и выпрямителя.

Электронный осциллограф, используемый в настоящей задаче, отличается от заводских осциллографов отсутствием в схеме предварительного усиления исследуемого сигнала. Он позволяет регистрировать переменные процессы, мгновенное значение напряжения которых составляет несколько десятков вольт.

Электронно-лучевая трубка позволяет получить узкий сфокусированный пучок электронов, который практически является безынерционным. По принципу фокусировки и отклонения электронного луча трубки бывают двух типов: электростатические и магнитные. В трубках первого типа для фокусировки и отклонения луча используется электрическое поле, в трубках второго типа — магнитное поле. Остановимся более подробно на устройстве вакуумной электростатической электронно-лучевой трубки, в которой фокусировка луча осуществляется при помощи двух электронных линз.

На рис. 1 показано схематическое устройство электронно-лучевой трубки. Она состоит из электронной пушки 1 (выделена пунктиром на рисунке), отклоняющих пластин 8 и 9, расположенных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, и флуоресцирующего экрана 10. Управление фокусировкой и яркостью электронного луча в трубке осуществляется напряжением, подаваемым с движков 11 и 12 потенциометра.

Электронной пушкой называется часть трубки, дающая пучок электронов. В эту часть трубки вмонтированы: подогревный катод 3, являющийся источником электронов; фокусирующий цилиндр 5, регулирующий количество электронов, движущихся к экрану: первый (фокусирующий) анод 6 и второй (ускоряющий) анод 7. Напряжение, приложенное к первому и второму анодам, ускоряет электроны и концентрирует их в узкий пучок. Поле между

катодом, фокусирующим цилиндром и первым анодом образует объективную электронную линзу, окулярная электронная линза образуется полем первого и второго анодов.

Плоская торцовая поверхность катода 4 покрывается пленкой оксидированного специального металла, например бария, и подогревается нитью накала 2. Большинство эмитируемых с катода электронов направляется вдоль оси трубки электрическим полем между катодом и фокусирующим цилиндром. Электроны, получившие правильное направление движения, проходят через отверстие фокусирующего цилиндра и под действием электрического поля, которое образуется благодаря напряжениям, приложенным к катоду,

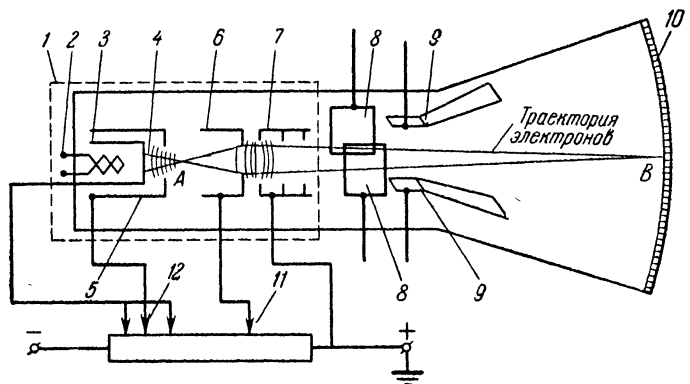


Рис. 1.

управляющей сетке и первому аноду, сходятся в точке *A* вблизи него. После точки *A* электроны расходятся, так как напряженность поля внутри первого анода близка к нулю. В области между первым и вторым анодами поле снова искривляет траектории электронов, приближая их к оси трубки. Траектории электронов после прохождения поля между первым и вторым анодами — более пологи (вследствие большей скорости электронов) и фокусируются в точке *B*. Если эта точка находится на поверхности экрана, то пучок называется сфокусированным.

Аноды, являющиеся частью системы электронных линз, имеют форму цилиндров или дисков с отверстиями в центре или представляют собой комбинацию дисков и цилиндров. Перегородки внутри первого и второго анодов служат для улавливания электронов, не удовлетворяющих условиям фокусировки.

Экран трубки представляет собой слой флуоресцирующего вещества, нанесенного на внутренней стороне трубки. В качестве флуоресцирующих составов используются виллемит, вольфрамвоокислый кальций, фосфористый сульфид цинка. Точка экрана, на которую попадают электроны, светится, и мы видим место попа-

дания электронов. В зависимости от состава экрана пятно может быть белого, зеленого или синего цвета. Испускание света после удара электрона обычно длится в течение долей секунды. Для увеличения времени послесвечения существуют специальные экраны.

Цифрами 8 и 9 отмечены на рис. 1 вмонтированные в трубку горизонтально и вертикально отклоняющие пластины. Если к пластинам какой-либо пары приложено напряжение, то электронный луч отклоняется. Величина этого отклонения пропорциональна напряжению между пластинами. На вертикально расположенные пластины 8 подается обычно напряжение от генератора развертки, которое заставляет пятно двигаться на экране в горизонтальной плоскости. Если на пару горизонтально расположенных пластин 9 подать исследуемое периодически меняющееся напряжение, то пятно будет перемещаться по экрану в вертикальной плоскости. Таким образом, одновременное действие обеих пар пластин на электронный луч позволяет наблюдать на экране изменение исследуемого напряжения во времени.

Если период напряжения развертки равен или кратен периоду исследуемого напряжения, картина за период развертки будет полностью повторяться, и мы увидим на экране неподвижную (застывшую) кривую.

Питание электронно-лучевых трубок. Большинство современных трубок работает при напряжениях 3000—6000 в на последнем аноде (ближайшем к экрану). Однако в последнее время разработаны трубки, работающие при напряжениях 1500 в и менее. На фокусирующий анод обычно подается напряжение порядка $\frac{1}{3}$ — $\frac{1}{6}$ напряжения последнего анода. Если второй анод является фокусирующим, то на первый анод подается напряжение порядка $\frac{1}{10}$ напряжения на последнем аноде. На управляющий электрод (сетку) подается обычно отрицательное напряжение порядка $\frac{1}{30}$ напряжения на последнем аноде.

Анодный ток в электронно-лучевой трубке не превосходит 0,5 ма.

Чувствительность трубки. Чувствительностью трубки к напряжению называют отклонение (в миллиметрах) пятна на экране, вызванное разностью потенциалов в 1 в на отклоняющих пластинах.

Рассчитаем зависимость чувствительности от параметров трубки. Допустим, что управляющие пластины параллельны, а электрическое поле однородно и перпендикулярно к плоскости пластин (рис. 2).

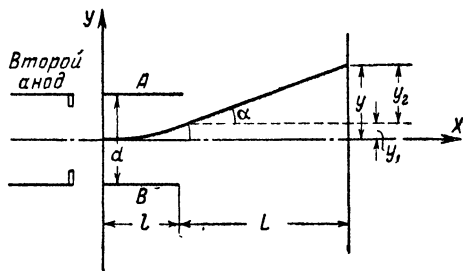


Рис. 2.

Пусть l — длина пластин в см, d — расстояние между пластинами в см, L — расстояние от конца пластин до экрана, V — потенциал второго анода по отношению к катоду, V_d — разность потенциалов между отклоняющими пластинами A и B . Тогда, очевидно, в области между пластинами по оси Y электрон движется равноускоренно, и его смещение по оси Y при выходе из области между пластинами будет равно

$$y_1 = \frac{at_1^2}{2}; \quad (1)$$

ускорение его

$$a = \frac{eE}{m} = \frac{eV_d}{md}. \quad (2)$$

Здесь e и m — заряд и масса электрона, E — напряженность электрического поля между пластинами, t_1 — время пролета электрона между пластинами, определяемое соотношением

$$t_1 = \frac{l}{v_x}, \quad (3)$$

где v_x — горизонтальная составляющая скорости. Эта составляющая скорости определяется из условия

$$\frac{mv_x^2}{2} = eV, \quad \text{откуда} \quad v_x^2 = \frac{2eV}{m}. \quad (4)$$

Подставляя (2) и (3) в (1), получим

$$y_1 = \frac{eV_d l^2}{2dmv_x^2}.$$

Отклонение y_2 в области вне пластин может быть записано в виде

$$y_2 = v_y t_2, \quad (5)$$

где v_y есть скорость по оси Y , которую электрон приобретает при вылете из пространства между пластинами. Очевидно, эта скорость $v_y = at_1$, а время пролета электроном расстояния L равно $t_2 = L/v_x$. Подставляя значения a , t_1 и t_2 в формулу (5), получим для y_2 выражение

$$y_2 = \frac{eV_d l L}{dmv_x^2}, \quad (6)$$

откуда полное отклонение $y = y_1 + y_2$ запишется в виде

$$y = \frac{eV_d l}{dmv_x^2} \left(\frac{l}{2} + L \right) \approx \frac{eV_d l L}{dmv_x^2}.$$

Подставляя v_x^2 из (4), получим

$$y = \frac{V_d l L}{2Vd}, \quad (7)$$

а чувствительность

$$j = \frac{y}{V_d} = \frac{lL}{2V_d} \quad (8)$$

Из формулы (8) видно, что чувствительность зависит от расстояния пластин до экрана и от напряжения на втором аноде.

Вышеприведенный вывод для чувствительности отклонения сделан при упрощающих предположениях. На практике пластины, применяемые в электронно-лучевых трубках, не параллельны, а изогнуты, чтобы уменьшить краевые эффекты.

Генератор пилообразного напряжения ¹⁾. Как уже было установлено, отклонение пятна на экране линейно зависит от величины отклоняющего напряжения, приложенного к соответствующим пластинам трубки (например, вертикальным), т. е. $y = \text{const} \cdot V_d$, где const — величина, зависящая от геометрических параметров трубки и ускоряющего напряжения.

Рассмотрим принцип наблюдения процессов, изменяющихся во времени, на экране.

Предположим, что в момент t_0 к вертикальным пластинам приложено напряжение, линейно изменяющееся во времени, т. е. $dV_d/dt = \text{const}$. Тогда пятно будет двигаться по экрану с постоянной скоростью ($dy/dt = \text{const}$) в горизонтальном направлении. Если в тот же момент t_0 к горизонтальным пластинам подключить исследуемое переменное напряжение $V(t)$, то на экране получится кривая зависимости V от времени в интервале времени от t_0 до t_1 ; t_1 — момент времени, когда пятно достигает края экрана. Если $V(t)$ — периодическая функция с периодом T , равным $t_1 - t_0$, то, заставив луч в момент t_1 мгновенно возвратиться в исходное положение A (рис. 3) и повторив развертку с постоянной скоростью до точки B , мы увидим на экране второй период изменения величины $V(t)$.

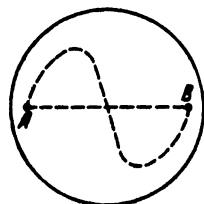


Рис. 3.

Таким образом, смещая луч от точки A до точки B вдоль горизонтальной оси с постоянной скоростью, а потом мгновенно возвращая его от B к A и повторяя такую развертку многократно, мы сможем увидеть на экране неподвижную картину изменения $V(t)$ в течение одного периода, если время движения пятна по экрану от A до B ($t_1 - t_0$) равно периоду изменения $V(t)$. Если $t_1 - t_0 = nT$, где n — целое число, то на экране мы получим n периодов изменения величины $V(t)$.

После всего сказанного нетрудно видеть, что график изменения во времени напряжения развертки должен иметь вид, изображенный

¹⁾ Генератор пилообразного напряжения представляет вариант релаксационного генератора, см. задачу 105.

на рис. 4, т. е. быть пилообразным¹⁾. Для получения такого напряжения в осциллографе смонтирован генератор пилообразного напряжения, принципиальная схема которого показана ниже на рис. 12.

Принцип работы генератора основан на зарядке и разрядке конденсатора. Подключив конденсатор через сопротивление к источнику постоянного напряжения, мы получим нарастание напряжения на его обкладках, причем

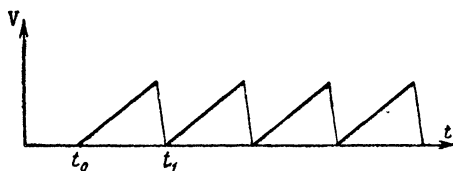


Рис. 4.

$$V_C(t) = \frac{q(t)}{C} = \frac{1}{C} \int_0^t I dt, \quad (9)$$

где q — количество электричества, C — емкость конденсатора. Как известно, в этом случае $V_C(t)$ нарастает по экспоненциальному закону до постоянной величины, равной напряжению источника. Разрядка конденсатора через сопротивление, как известно, происходит тоже по экспоненциальному закону, и если мы в момент t отключим C от источника напряжения и замкнем на сопротивление, то начнется разрядка конденсатора. Как видно из рис. 5, зарядка конденсатора происходит не по линейному закону, а разрядка — не мгновенно.

Для получения напряжения, которое линейно зависит от времени при зарядке конденсатора, как видно из формулы (9), достаточно заряжать его постоянным током I_0 , тогда

$$V_C(t) = \frac{I_0}{C} t. \quad (10)$$

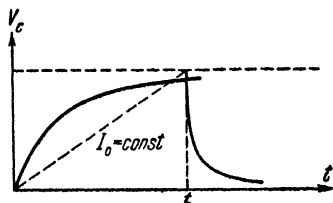


Рис. 5.

При этом наклон зубцов «пилы» зависит от зарядного тока I_0 и величины емкости C .

В нашей схеме генератора развертки (см. рис. 12) для получения линейно зависящего от времени зарядного напряжения используется пентод 6K7²⁾, включенный последовательно с конденсатором в цепь зарядки последнего. Вольтамперные характеристики пентода приведены на рис. 6. Таким образом, пентод позволяет работать в режиме, при котором в широком диапазоне изменения V_a

$$I_a = \text{const.}$$

¹⁾ В задаче описывается подробно метод линейной развертки. Кроме линейной развертки, часто применяются также круговая и спиральная развертки.

²⁾ Об устройстве пентода см. задачу 80.

Для практически мгновенной разрядки конденсатора и для регулирования процессом зарядки — разрядки параллельно конденсатору (C_{29} , C_{30} , C_{31} , рис. 13) подключается тиратрон $TГ1$. (Использование свойств тиратрона для синхронизации будет рассмотрено ниже.) Тиратрон обладает тем свойством, что в зависимости от напряжения на сетке он начинает пропускать анодный ток не при всяком напряжении на аноде V_a , а при $V_a \geq V_z$, где V_z — напряжение зажигания, т. е. минимальное напряжение на аноде, при котором тиратрон начинает пропускать анодный ток при данном напряжении на сетке, причем при $V_a \geq V_z$ ток через тиратрон не зависит от V_a , а внутреннее сопротивление тиратрона R_i очень мало. Если у «зажженного» тиратрона уменьшать анодное напряжение, то тиратрон перестанет пропускать анодный ток не при V_z , а при $V_a < V_z$. Подавая то или иное напряжение на сетку тиратрона, мы можем соответственно повысить или понизить напряжение зажигания V_z .

Теперь непосредственно проследим за работой генератора развертки. пилообразное напряжение для отклоняющих пластин трубки берется с одного из конденсаторов (C_{29} , C_{30} , C_{31} , рис. 13) и подключается к схеме переключателем $П_{34}$ (рис. 13). После включения схемы конденсатор начинает заряжаться через пентод 6К7, причем зарядный ток постоянен и напряжение на конденсаторе V_C растет линейно со временем.

При достижении значения $V_C = V_z$ тиратрон зажигается и, так как его внутреннее сопротивление мало, практически накоротко замыкает конденсатор, который быстро разряжается до потенциала погасания тиратрона, после чего вновь начинается процесс зарядки конденсатора и т. д. Таким образом, с обкладки конденсатора снимается пилообразное напряжение.

Отметим, что в схеме осциллографа, изучаемого в задаче, в отличие от фабричных осциллографов, пилообразное напряжение от генератора подается на пластины трубки без предварительного усиления. Чтобы все же развернуть исследуемый сигнал на большую часть экрана, а следовательно, иметь от генератора достаточно большое напряжение, генератор поставлен в такой режим работы, при котором он дает не вполне линейную развертку. В фабричных осциллографах от генератора развертки используют только линейную часть напряжения «пилы», но зато ее усиливают специальным усилителем.

Регулировка частоты. При данном смещении на сетке тиратрона, т. е. при данном V_z , частота развертки, как видно из рис. 7, зависит от наклона «пилы», т. е. от I_0 и C . Изменяя эти величины,

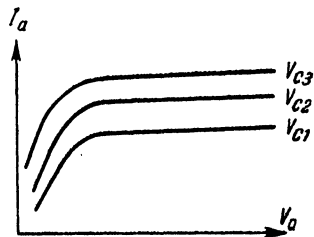


Рис. 6.

можно изменять частоту и перекрыть весь нужный диапазон. Переключатель Π_{34} (рис. 13) грубо меняет частоту, делитель напряжения R_4 — плавно.

Синхронизация. Из рассмотренного ранее ясно, что для получения неподвижного изображения на экране необходимо, чтобы в периоде генератора развертки укладывалось целое число периодов исследуемого процесса, в противном случае картина не будет неподвижна, что видно из рис. 8 и 9. Поэтому исследуемый сигнал с данным периодом T_0 подают на осциллограф и,

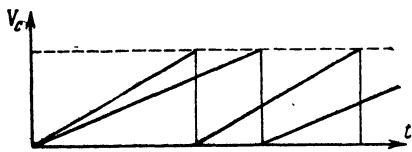


Рис. 7.

меняя период развертки T_1 , подбирают его таким, что $T_1 = nT_0$. Однако вследствие возможной нестабильности частоты генератора развертки нельзя ручаться за сохранение указанного равенства и в дальнейшем. Поэтому колебания генератора развертки синхронизируются с другими, более стабильными колебаниями.

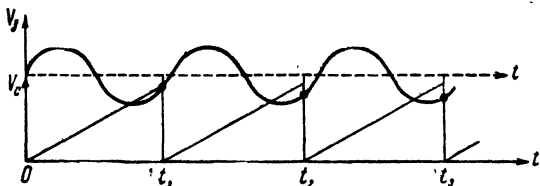


Рис. 8.

В данном осциллографе генератор развертки синхронизируется с исследуемым сигналом, амплитуда которого взята такой, чтобы можно было видеть момент синхронизации внешним сигналом; отсюда некоторое искажение развертки и изменение частоты генератора развертки при работе с ручкой потенциометра R_5 (рис. 13).

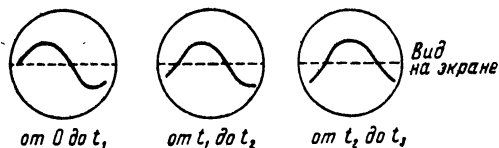


Рис. 9.

Такая синхронизация осуществляется следующим образом. Часть напряжения исследуемого сигнала подается на сетку тиратрона так, чтобы потенциал зажигания тиратрона менялся синхронно с частотой исследуемого сигнала. Рассмотрим график, приведенный на рис. 10.

На рисунке линия, параллельная оси абсцисс, изображает постоянное значение потенциала зажигания $V_{з0}$, обусловленное постоянным напряжением на сетке тиратрона. Синусоидальная жирная кривая дает зависимость от времени потенциала зажигания, обусловленную напряжением сигнала на сетке тиратрона ($V_{сиг}$).

Пусть за счет нестабильности работы генератора развертки его период меняется на $\pm \Delta T_0$. Тогда график зарядки конденсатора изобразится пунктирными прямыми I или II.

Для того чтобы зарядка конденсатора в генераторе прекратилась, надо, чтобы он зарядился до потенциала зажигания, равного теперь $V_{з0} + V_{сиг}$. Но кривая I, соответствующая уменьшению периода развертки, встречает кривую $V_{сиг}$ выше прямой $V_{з0}$, а следовательно, точка их пересечения лежит дальше по оси t . Итак, за счет действия $V_{сиг}$ время зарядки конденсатора увеличивается. Для прямой II, соответствующей увеличению периода развертки, за счет действия $V_{сиг}$ время зарядки уменьшается.

В результате получающееся колебание $2\Delta T'_0$ периода развертки оказывается меньше, чем колебание $2\Delta T_0$ периода генератора, т. е.

$$2\Delta T'_0 < 2\Delta T_0.$$

Это условие соблюдается для синхронизирующего напряжения любой формы.

При исследовании процессов высокой частоты получить без синхронизации устойчивое изображение процесса очень трудно.

Описание установки. Катодный осциллограф в данной задаче для наглядности изучения схемы и работы его собран без усилителей¹⁾ на открытом шасси, и монтаж выполнен цветным проводом. Питание осциллографа производится от специального выпрямителя. Напряжение с него подводится к колодкам осциллографа, смонтированным в задней части шасси. Накал трубки ЛО-709А равен 2,5 в, накал генератора разверток — 6,3 в, анодное напряжение трубок — 900 в и анодное напряжение ламп генератора разверток — 350 в.

¹⁾ Необходимо иметь в виду, что и более совершенные осциллографы, снабженные усилителями (например, описанные дальше ЭО-4 и ЭО-5), в некоторых случаях приходится использовать без усилителей, отключая усилители и подавая исследуемые сигналы непосредственно на отклоняющиеся пластины трубки. Это приходится делать в тех случаях, когда частотная характеристика усилителей неблагоприятна для пропускания через усилители исследуемого сигнала (очень высокие или очень низкие частоты).

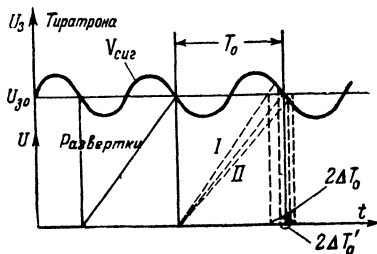
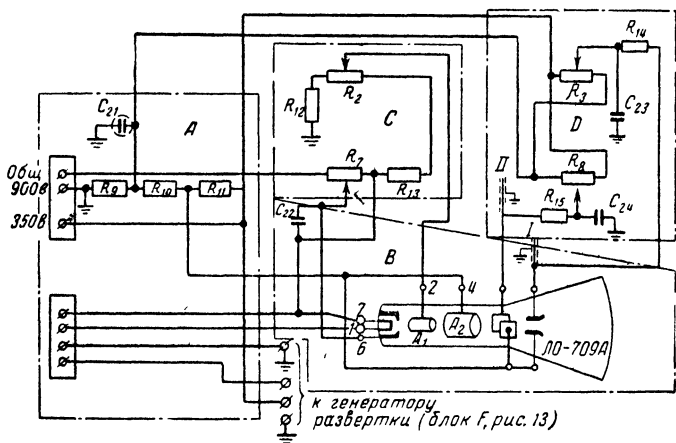


Рис. 10.

Все ручки управления лучом и генератором развертки выведены на передней панели осциллографа. Осциллограф собран отдельными блоками (см. рис. 11—13).

Отключение напряжения с генератора развертки от вертикальных пластин и подключение к ним внешнего напряжения (сеть ~ 50 гц) производится тумблером Π_{33} .

Выводы от горизонтальных и вертикальных пластин подведены к соответствующим клеммам передней панели. С помощью имеющихся ручек управления можно осуществить регулировку яркости,



Цоколевка трубки
Л0-709А



15 ком, $R_{10} = 30$ ком, $R_{11} = 30$ ком, $R_{12} = 220$ ком, $R_{13} = 100$ ком, $R_{14} = 1,5$ Мом, $R_{15} = 10$ Мом, C_{21} — электролитический конденсатор 10 мкф, C_{22} — конденсатор 1 мкф, $C_{23} = 0,5$ мкф, $C_{24} = 0,5$ мкф. Цоколевка трубки Л0-709А: 1 — накал, 2 — 1-й анод A_1 , 3 — пустой, 4 — 2-й анод A_2 , 5 — пустой, 6 — модулятор, 7 — накал и катод.

Рис. 11. Принципиальная схема катодного осциллографа.

фокусировку, смещение луча по вертикали и горизонтали, а также грубую и точную установку частоты генератора развертки и синхронизацию.

Необходимо отметить, что модулятор (6 на рис. 11) может быть использован не только для регулировки вручную общей яркости картины на экране осциллографа. Он может быть и самостоятельно использован для автоматической регулировки яркости луча (так называемый «наружный засвет») отдельным сигналом, подаваемым на независимый вывод сетки модулятора. Вывод этот расположен на задней панели осциллографа и нормально соединен с регулятором яркости, т. е. в сущности с потенциометром, регулирующим напряжение на модуляторе. При использовании модулятора два сигнала или сигнал и развертка его во времени задают движение луча по плоскости экрана трубки, а модулирующий сигнал

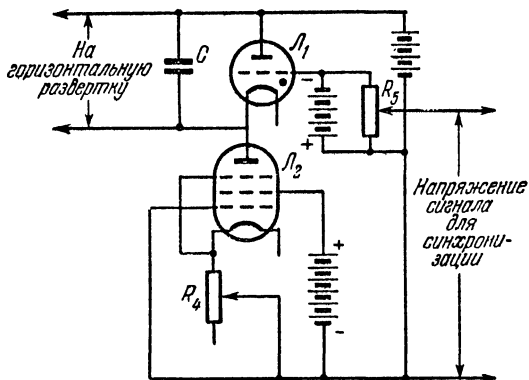
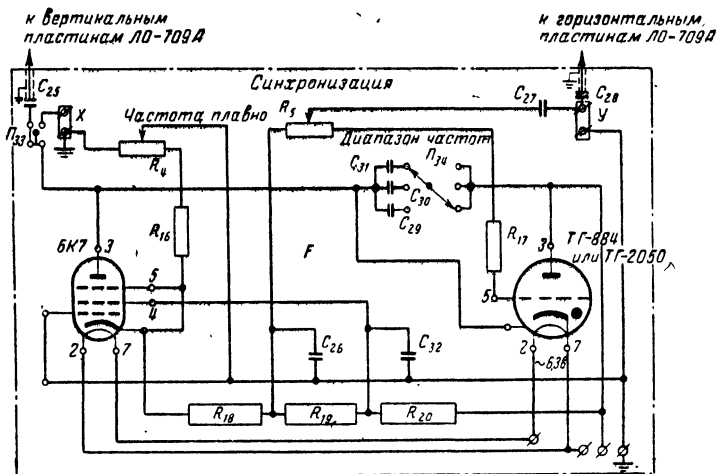


Рис. 12. Принципиальная схема генератора развертки.

L_1 — тиратрон для быстрой разрядки конденсатора, L_2 — токоограничивающий пентод в цепи зарядки конденсатора.



Цоколевка 6К7 и ТГ-884

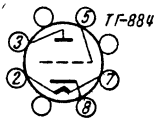
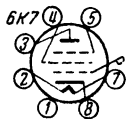


Рис. 13. Схема генератора развертки (блок F).

ТГ-884 — тиратрон, 6К7 — пентод, R_4 — потенциометр 1 ком, $R_5 = 360$ ком, R_{16} — сопротивление 1,5 ком, $R_{17} = 300$ ком, $R_{18} = 6$ ком, $R_{19} = 5$ ком, $R_{20} = 40$ ком, C_{25} — конденсатор 1 мкф, $C_{26} = 1$ мкф, $C_{27} = 0,1$ мкф, $C_{28} = 1$ мкф, $C_{29} = 0,07$ мкф, $C_{30} = 0,025$ мкф, $C_{31} = 0,005$ мкф, $C_{32} = 1$ мкф, Π_{33} — тумблер (выключатель генератора развертки), Π_{34} — переключатель диапазона частот.

определяет яркость наблюдаемой картины, которая может и полностью гаситься модулирующим сигналом (при достаточно большой его амплитуде).

Подобные приемы с превращением посредством периодического «наружного засвета» непрерывной светящейся кривой на экране в светлый «пунктир» применяются, в частности, при использовании осциллографа для измерения коротких промежутков времени (или частоты развертываемого основного сигнала). В таких случаях на отклоняющие пластины осциллографа подается сигнал от стандарт-сигнала или от звукового генератора, и по числу разрывов, вызванных модулятором на непрерывной кривой сигнала известной частоты, можно определить частоту модулирующего сигнала. В этом случае устанавливаются, какую долю непрерывной кривой, например окружности, видимой на экране от стандарт-сигнала, гасит сигнал модулирующий. Надо иметь в виду, что вход модулятора не имеет усилителя, поэтому на модулирующий электрод надо подавать сигналы с напряжением порядка десятков вольт.

Модулирующий электрод используется также при работе осциллографа в режиме «ждушей развертки», а также для гашения обратного хода луча по экрану.

Для получения резкого «пунктира» на модулирующий электрод надо подавать П-образные импульсы запирающего напряжения.

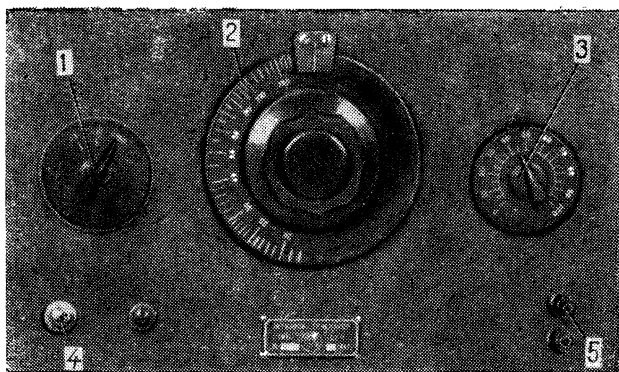


Рис. 14

В качестве источников переменного напряжения используются звуковой генератор (описание см. ниже) и напряжение от сети 120 в. Для использования сетевого напряжения в упражнениях применяется автотрансформатор ЛАТР-1, позволяющий регулировать величину напряжения.

Звуковой генератор (тип ГЗ-1) представляет собой генератор звуковой частоты (20—17 000 гц) синусоидальной формы, работающий по принципу мостиковых RC-генераторов. Фотография его панели приведена на рис. 14.

Шкала частот 2 проградуирована непосредственно в герцах. Отсчет шкалы должен быть умножен на число, указанное на переключателе диапазонов 1. Выходное напряжение генератора снимается с клемм (внизу справа) 5 и регулируется ручкой потенциометра 3,

Прибор включается (тумблер 4) в сеть переменного тока на 120 в.

Практические указания. 1. Для питания трубки осциллографа подается напряжение 900 в, поэтому открывать схему студентам воспрещается.

2. Во избежание порчи экрана трубки нельзя на продолжительное время выключать генератор развертки.

3. Измерение чувствительности следует производить только для горизонтальных пластин.

Упражнение 1

Ознакомление с монтажом и деталями осциллографа и его включение

Не включая осциллографа и пользуясь схемами рис. 1, 11 и 13, изучить монтаж, определить назначение ручек управления, зарисовать панель управления и ознакомиться с устройством трубки ЛО-709А. После этого включить осциллограф и проверить управление лучом.

Упражнение 2

Определение чувствительности трубки осциллографа

Определить чувствительность системы горизонтальных пластин трубки. Для этого при выключенном генераторе развертки следует подать на горизонтальные пластины напряжение от сети через автотрансформатор ЛАТР-1. Подаваемое напряжение измеряется вольтметром; оно не должно превышать 45—50 в.

Чувствительность трубки подсчитывается по формуле

$$\gamma = \frac{L}{2\sqrt{2} V_d},$$

где L — длина световой полоски на экране трубки, измеренная в миллиметрах; V_d — напряжение, подаваемое на горизонтальные пластины трубки, величина которого измеряется вольтметром переменного тока.

Упражнение 3

Определение частотной характеристики входа осциллографа

Подать напряжение от генератора звуковой частоты на горизонтальные пластины (вертикальный вход осциллографа) и, зная чувствительность трубки, снять частотную характеристику осциллографа при максимальной амплитуде напряжения, даваемого генератором, примерно, 20, 200, 800, 2000, 6000, 10 000, 12 000, 14 000 и 15 000 гц. Здесь частотная характеристика будет существенно отличаться от аналогичных характеристик фабричных осциллографов потому, что вертикальный вход его зашунтирован сопротивлением

$R_5 = 360$ ком (см. схему рис. 13), с которого снимается напряжение синхронизации¹⁾.

Измерения следует производить при выключенной синхронизации (крайнее левое положение ручки потенциометра R_5).

Упражнение 4

Определение частоты сигналов методом фигур Лиссажу

Выключив генератор развертки и используя напряжения сети (подаваемое через ЛАТР-1) и звукового генератора, получить и зарисовать устойчивые неподвижные фигуры Лиссажу для соотношений частот: 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, 1 : 5. Подаваемые на осциллограф напряжения не должны превышать 50 в.

Упражнение 5

Определение полосы частот генератора развертки

Определить с помощью звукового генератора частоту генератора развертки осциллографа для каждого положения потенциометра R_4 для всех трех положений переключателя диапазона частот P_{34} .

Совпадение частот определяется по устойчивой картине одного периода синусоиды на экране трубки. Измерения производятся при выключенной синхронизации (крайнее левое положение ручки потенциометра R_5).

Для одной из частот среднего диапазона просмотреть влияние величины напряжения внешнего сигнала на изменение частоты генератора развертки (синхронизация). Для этого включить синхронизацию (среднее и крайнее положения ручки) и, изменяя частоту звукового генератора, получить снова устойчивое изображение синусоиды.

Определить величину изменения частоты генератора развертки под влиянием синхронизации (см. стр. 289).

Технические данные установки. Все необходимые данные установки приведены в тексте описания задачи и в подписях под рисунками.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. Г. В. В о й ш в и л л о, Общий курс радиотехники, Оборонгиз, 1950.
3. Г. А. Р е м е з и С. Г. И т к и н, Радиоизмерения и радиоизмерительная аппаратура, Оборонгиз, 1947.

¹⁾ Элементы синхронизации фабричных осциллографов не ограничиваются одним сопротивлением, как здесь, а связаны с усилителями, входное сопротивление которых колеблется от 2 Мом и выше.

4. Н. Н. Малов, Курс электротехники и радиотехники, Физматгиз, 1959.
5. Г. А. Ремез, Курс основных радиотехнических измерений, Связь-издат, 1955.
6. И. М. Вишенчук, Е. П. Соголовский и Б. И. Швецкий, Электронно-лучевой осциллограф и его применение в измерительной технике, Физматгиз, 1957.
7. Современный катодный осциллограф, Сборник статей, ч. 1, ИЛ, 1951.
8. Современный катодный осциллограф, Сборник статей, ч. 2, ИЛ, 1951.
9. Современный катодный осциллограф, Сборник статей, ч. 3, ИЛ, 1954.
10. А. М. Бонч-Бруевич, Радиоэлектроника в экспериментальной физике, «Наука», 1966.

ДОПОЛНЕНИЕ

Здесь приводятся фотографии и описания панелей фабричных осциллографов ЭО-4 и ЭО-5, нашедших широкое применение, в частности, используемых в задачах 87, 97, 99, 108.

Электронный осциллограф типа ЭО-4 имеет следующие блоки: 1) блок питания с электронным стабилизатором, 2) вертикальный и горизонтальный усилители, 3) генератор развертки на восьми диапазонах, частота которого может меняться от 2 гц до 50 кГц.

Все блоки смонтированы на шасси, закрытом экраном. Ручки управления прибором выведены на переднюю панель шасси. Общий вид панели и ее схемы изображены на рис. 15, где номерами отмечены детали, выведенные на панель.

1 — экран трубки. Для определения амплитуды исследуемого напряжения на экран устанавливается сетка, одно деление которой равно 5 или 2 мм. Ручки от 2 до 7 служат для регулировки луча: 2 — регулировка яркости изображения на экране трубки, 3 — фокусировка луча, 4 — смещение луча по оси Y , 5 — смещение луча по оси X , 6 — включение прибора в сеть, 7 — включение электронного луча. Электронный луч включается через 2—3 минуты после включения прибора в сеть. Это время нужно для прогревания ламп блока питания.

Детали от 8 до 12 служат для регулировки развертки.

8 — переключатель диапазонов (грубое изменение частоты генератора развертки от 2 гц до 50 кГц); каждое положение переключателя определяет полосу частот. Дальнейшая регулировка осуществляется ручкой 9 — «частота плавно». Так, например, если переключатель установлен в положение 7, то ручка регулятора «частота плавно» перекрывает полосу частот от 7 до 30 гц и т. д.

При установке переключателя в положение «выкл.» генератор развертки отключается и горизонтальный усилитель подключается к клеммам входа на пластины оси X .

9 — плавное¹⁾ изменение частоты генератора развертки, 10 — переключатель источника напряжения синхронизации: внешнего, от сети и внутренней синхронизации в цепи генератора развертки, 11 — клемма входа внешней синхронизации, 12 — изменение

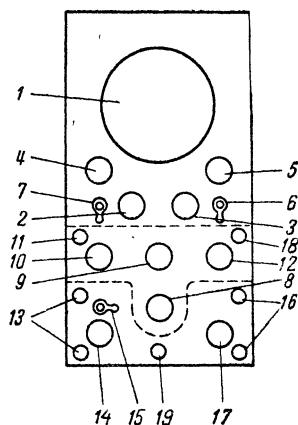
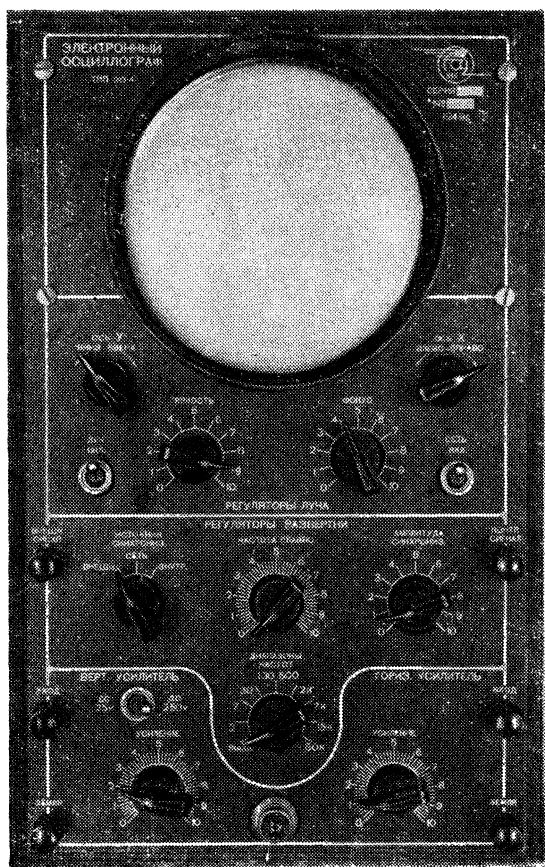


Рис 15.

амплитуды синхронизирующего напряжения для всех способов синхронизации.

Детали от 13 до 19 служат для регулировки усиления: 13 — клеммы входа исследуемого напряжения на вертикально отклоняю-

¹⁾ Указанные на приборах данные о частоте развертки имеют приближенный характер. Точное значение частоты развертки определяется путем калибровки шкалы генератора развертки по надежному генератору стандарт-сигналов.

шие пластины трубки (ось Y) через усилитель, 14 — регулировка этого напряжения на входе усилителя, 15 — переключатель подачи этого напряжения на вход усилителя до 25 в эфф. и до 250 в эфф., 16 — клеммы входа исследуемого напряжения на горизонтально отклоняющие пластины трубки (ось X) через усилитель, 17 — регулировка этого напряжения на входе усилителя, 18 — клемма контрольного сигнала, частота которого равна 50 гц , а амплитуда около 2,5 в, 19 — индикаторная лампочка.

Прямые выводы от отклоняющих пластин электронной трубки в фабричных приборах помещаются обычно на задней или боковой панелях осциллографа. Нормально эти выводы соединены с усилителями. На тех же панелях находится и вывод модулятора луча по интенсивности, обычно соединенный с регулятором яркости луча.

Основные параметры ЭО-4. Чувствительность осциллографа по оси Y — 0,28 см на 1 мв, по оси X — 5 см на 1 в.

Коэффициент усиления вертикального усилителя — 1800; входной импеданс — 2 Мом параллельно с емкостью в 40 пф . Коэффициент усиления горизонтального усилителя — 35; входной импеданс — 5 Мом параллельно с емкостью 35 пф .

Электронный осциллограф типа ЭО-5 смонтирован на шасси, закрытом экраном. Все ручки управления осциллографом выведены на переднюю панель шасси (рис. 16).

1 — экран трубки. Для определения амплитуды исследуемого напряжения на экран устанавливается сетка, одно деление которой равно 2 мм, 2 — регулировка яркости изображения на экране трубки, 3 — фокусировка луча, 4 — смещение луча по оси Y , 5 — смещение луча по оси X , 6 — включение прибора в сеть, 7 — индикаторная лампа, 8 — переключатель диапазонов (грубое изменение частоты генератора развертки от 2 гц до 200 кгц); каждое положение переключателя определяет полосу частот. Дальнейшая регулировка осуществляется ручкой 9 — «частота плавно». Так, например, если переключатель установки в положении «2к», то ручка регулятора «частота плавно» перекрывает полосу частот от 200 гц до 20 кгц и т. д. ¹⁾.

9 — изменение частоты развертки плавно, 10 — переключатель источника напряжения синхронизации: внешнего, от сети и внутренней синхронизации в цепи генератора развертки, 11 — изменение амплитуды синхронизирующего напряжения, когда переключатель (ручка 16) стоит в положении «развертка». Переключатель в положении «усилитель» отключает синхронизацию, и тогда этой ручкой изменяется амплитуда горизонтального усилителя, 12 — клеммы входа внешней синхронизации, 13 — клеммы входа исследуемого напряжения на вертикально отклоняющие пластины трубки (ось Y) через усилитель, 14 — изменение амплитуды этого напряжения на

¹⁾ См. примечание на стр. 296.

входе вертикального усилителя, 15 — клеммы входа исследуемого напряжения на горизонтально отклоняющие пластины трубки (ось X) через усилитель, 16 — переключатель рода работ: влево, положение «развертка», — на горизонтально отклоняющие пластины

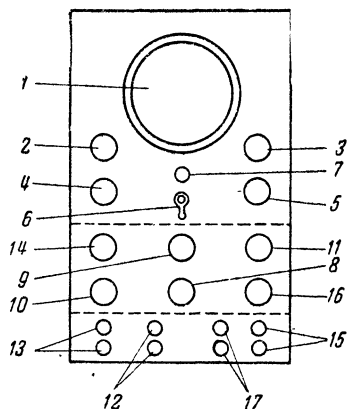
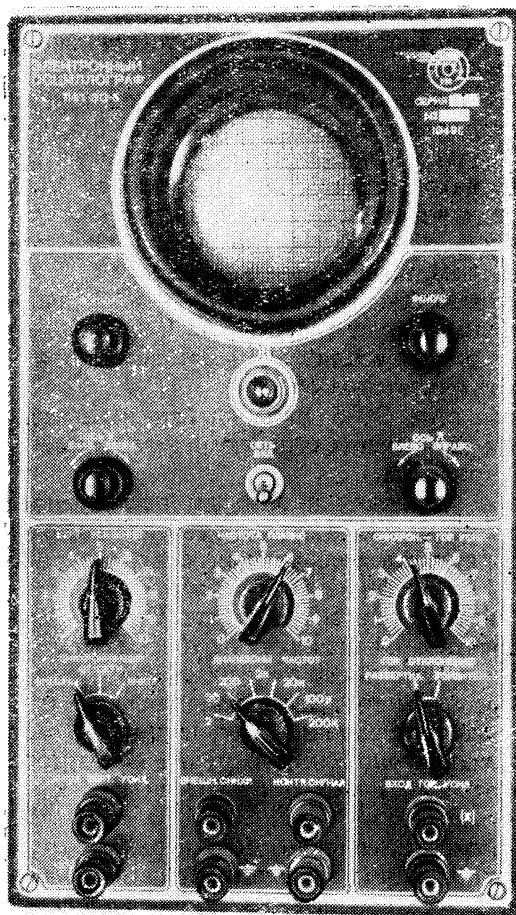


Рис. 16.

трубки подается напряжение от генератора развертки; вправо, положение «усилитель», — генератор развертки отключается, и исследуемое напряжение со входа (клемма 15) через усилитель подается на пластины трубки, 17 — клеммы контрольного сигнала, частота которого равна 50 гц и амплитуда около 6,2 в.

С левой стороны экрана под крышкой находятся клеммы для включения исследуемого сигнала непосредственно на пластины трубки, кроме того, — ряд клемм специального назначения (см. описание, приложенное к данному прибору).

Основные параметры ЭО-5. Чувствительность осциллографа по оси Y — 25 мм на 1 в, по оси X — 25 мм на 1 в. Максимальное входное напряжение на усилители не более 250 в; входной импеданс усилителей — 0,5 Мом параллельно с емкостью 60 пф.

ЗАДАЧА 110

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ НА СОПРОТИВЛЕНИЯХ

В радиотехнике и в физических экспериментах очень часто имеют дело со слабыми электромагнитными колебаниями, которые могут быть использованы или зарегистрированы только после увеличения их амплитуды (усиления). В большинстве случаев важно произвести усиление с сохранением формы колебаний¹⁾. Устройств, выполняющие такое преобразование электрических колебаний, называются усилителями.

В настоящее время широкое применение получили усилители с электронными лампами (триод, пентод). Электронная лампа является основным элементом, обеспечивающим усиление электрических колебаний. Эффект усиления в них связан с тем, что изменение напряжения между управляющей сеткой и катодом (напряжение сетки) вызывает значительно большие изменения анодного тока, чем такие же изменения анодного напряжения. Эти изменения анодного тока дают соответствующее падение напряжения на большом сопротивлении, специально для этого введенном в анодную цепь лампы. Величина этого падения напряжения больше усиливаемого напряжения, подведенного между катодом лампы и ее сеткой.

Целью настоящей работы является изучение основных характеристик однолампового усилителя напряжения низкой (звуковой) частоты. Выполнение студентами этой задачи целесообразно после изучения работы катодной лампы в задаче 79.

Усилитель напряжения звуковой частоты предназначается для усиления напряжения электромагнитных колебаний с частотой от нескольких десятков или сотен герц до 10 000—30 000 гц.

Основным параметром, характеризующим работу усилителя, является его коэффициент усиления (или коэффициент передачи) —

¹⁾ Формой колебаний в данном случае называется зависимость электрической величины от времени.

отношение амплитуды напряжения на выходе усилителя к амплитуде напряжения на входе:

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}. \quad (1)$$

Коэффициент усиления оказывается неодинаковым для сигналов разных частот; это является особенностью всех усилителей. У усилителя на сопротивлениях зависимость коэффициента усиления от частоты слабее выражена, чем у простейших усилителей других типов, что составляет особенность усилителей на сопротивлениях.

Кроме того, отношение амплитуды напряжения на выходе усилителя к амплитуде напряжения на входе даже при фиксированной частоте подаваемого сигнала не есть величина постоянная. При больших амплитудах на входе усилителя напряжение на выходе перестает быть ему пропорциональным; зависимость этих величин становится нелинейной, и усилитель начинает искажать форму поданных на него колебаний. Эти обстоятельства заставляют описывать работу усилителя при помощи характеристик, выражающих зависимость коэффициента усиления от частоты сигналов и от их

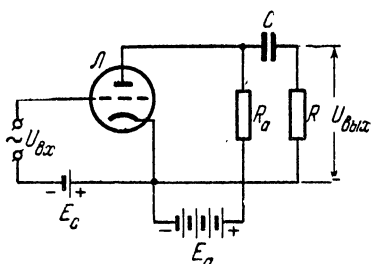


Рис. 1.

амплитуды: частотная характеристика — зависимость коэффициента усиления от частоты колебаний, $K = f(\omega)$; амплитудная характеристика — зависимость амплитуды напряжения на выходе от амплитуды напряжения на входе при фиксированной частоте, $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$. В некоторых случаях большое значение имеет фазовая характеристика — зависимость угла сдвига фазы напряжения на выходе по отношению к фазе напряжения на входе от частоты.

Принципиальная схема однолампового усилителя напряжения на сопротивлениях изображена на рис. 1, где L — электронная лампа — триод; E_c — источник постоянного тока, задающий отрицательное напряжение между сеткой и катодом лампы (смещение сетки); E_a — источник постоянного тока, создающий анодное напряжение; R_a — активное сопротивление (анодная нагрузка); C — разделительный конденсатор; R — активное сопротивление, с которого снимается напряжение усиленных колебаний; $U_{\text{ВХ}}$ — переменное напряжение, подлежащее усилению; $U_{\text{ВЫХ}}$ — напряжение на выходе. Конденсатор C в этой схеме вводится для того, чтобы постоянное напряжение от источника тока E_a не попадало на сопротивление R , т. е. чтобы на нем было только переменное напряжение.

При анализе работы схем в радиотехнике широко используется метод эквивалентных схем, которые получаются из данной схемы

заменой некоторых ее элементов (например, лампы) более простыми, с сохранением основных функций, выполняемых заменяемым элементом. Лампа, работающая в усилителе, может быть заменена генератором переменного тока. При этом если лампа имеет статический коэффициент усиления μ , внутреннее сопротивление R_i и на управляющую сетку ее подается переменное напряжение $U_{вх}$, то заменяющий ее эквивалентный генератор имеет электродвижущую силу, равную $\mu U_{вх}$, и внутреннее сопротивление R_i .

Воспользовавшись такой заменой, можно получить эквивалентную схему для усилителя, изображенного на рис. 1, приняв во внимание, что внутреннее сопротивление источника анодного напряжения мало по сравнению с внутренним сопротивлением лампы R_i

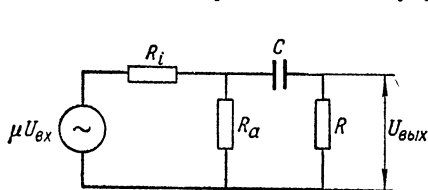


Рис. 2.

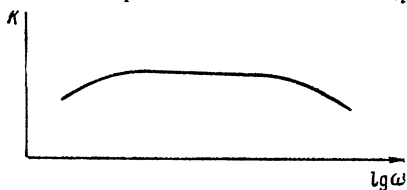


Рис. 3.

и сопротивлением анодной нагрузки R_a . На рис. 2 дана эквивалентная схема усилителя на сопротивлениях. Эта схема дает возможность проанализировать работу усилителя и выяснить зависимость коэффициента усиления K от частоты ω ; анализ приводит к зависимости, изображенной на рис. 3 в виде кривой $K = f(\omega)$.

Характерным в этой зависимости является уменьшение (завал или спад) коэффициента усиления в области низких и высоких частот и сравнительно постоянное его значение в области средних частот. Эта область средних частот определяется соотношением величин емкости C и сопротивления R и начинается с частот, для которых $\frac{1}{\omega C} \ll R$, т. е. частот, для которых конденсатор C представляет собой малое сопротивление по сравнению с R . В этой области частот коэффициент усиления такого усилителя определяется выражением

$$K = \frac{\mu}{1 + \frac{R_i}{R_a} + \frac{R_i}{R}}$$

Таким образом, максимальное усиление одной ступени усилителя будет меньше статического коэффициента усиления лампы. Спад K в области низких частот определяется влиянием сопротивления конденсатора C , которое с понижением частоты растет, а следовательно, растет падение напряжения на нем, т. е. уменьшается напряжение на R . На высоких частотах спад характеристики

определяется входной емкостью следующей усилительной лампы и взаимной емкостью соединительных проводов и в случае однокаскадного усилителя — входной емкостью прибора, включенного на выход усилителя.

В нашем случае на выход усилителя специально поставлен конденсатор C_1 (рис. 4), играющий роль такой шунтирующей емкости,

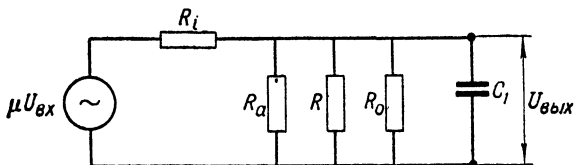


Рис. 4.

с тем чтобы, не выходя из диапазона частот генератора, можно было показать завал частотной характеристики усилителя на высоких частотах.

Из схемы рис. 4 видно, что с ростом частоты сопротивление конденсатора C_1 будет все больше и больше шунтировать сопротивления R_a и R и, так как R_i остается неизменным, $U_{\text{вых}}$ с ростом частоты будет уменьшаться. Поэтому при высоких частотах, когда можно считать $\frac{1}{\omega C_1} \ll \frac{R_a R}{R_a + R}$, эквивалентная схема принимает вид, изображенный на рис. 4.

В обычных усилителях, имеющих несколько ступеней усиления, сопротивление R является сопротивлением утечки сетки следующей лампы и параллельно ему будет включена входная емкость лампы,

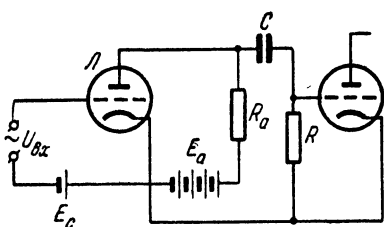


Рис. 5.

следовательно, она будет определять спад частотной характеристики при высоких частотах. На рис. 5 изображена схема соединения первого каскада усилителя с лампой второго каскада, а соответствующая эквивалентная схема будет такая же, как и изображенная на рис. 2, при этом емкость C_1 будет входной емкостью второй лампы ($C_{\text{вх}}$).

Из сказанного видно, что спады частотной характеристики усилителя на низких и высоких частотах не являются лишь частным следствием устройства предложенной в задаче схемы. Дело в том, что входные емкости ламп и переходная емкость каскадов всегда играют ту же роль. При всем том упомянем еще раз, что среди простейших усилителей усилитель на сопротивлениях является усилителем с частотной характеристикой, имеющей постоянную

величину коэффициента усиления в сравнительно широком диапазоне частот.

В усилителях с одной лампой другого типа коэффициент усиления может быть сделан больше статического коэффициента усиления лампы, например за счет коэффициента трансформации выходного трансформатора усилителя на трансформаторах.

Обращаем внимание, что все характерные черты работы всякого лампового усилителя могут быть выяснены на примере работы однокаскадного усилителя на сопротивлениях.

Из изучения работы данного усилителя на звуковой частоте никак не должно создаваться впечатление о возможности применения однокаскадного лампового усилителя на сопротивлениях только к усилению переменных токов. Наоборот, важнейшая в ряде областей физики задача усиления малых постоянных токов, например фототоков, решается в основном именно при помощи этих усилителей. Такое применение усилителя можно видеть в задаче 159, посвященной изучению фотоэффекта. Устройство усилительных схем постоянного тока и типы применяемых в них ламп, в частности электрометрические лампы, имеют, разумеется, свои характерные особенности, на которых мы здесь останавливаться не можем.

По поводу амплитудной характеристики усилителя можно сказать следующее. Усилители напряжения обычно работают на прямолинейном участке сеточной характеристики лампы (см. задачу 79), поэтому с ростом $U_{вх}$ должно пропорционально расти $U_{вых}$. Но как только лампа начинает работать на нелинейных участках характеристики, эта пропорциональность нарушается. Работа лампы на нелинейном участке характеристики приводит к искажению формы усиливаемых колебаний, что в некоторых случаях является недопустимым (измерительные и осциллографические усилители, усиление музыкальной передачи). Поэтому очень важно знать предельную величину сигнала, при которой усилитель работает еще в линейной части характеристик. Амплитудная характеристика усилителя $U_{вых} = f(U_{вх})$ дает возможность судить об этих искажениях. Область значения $U_{вх}$, в которой амплитудная характеристика линейна, является рабочей областью данного усилителя.

Описание приборов. 1. Усилитель собран в закрытом шасси. Шасси усилителя снизу закрыто крышкой из плексигласа, через которую виден весь монтаж схемы. Шасси крепится штырями на специальной подставке, и в таком положении должна проводиться работа с ним. Лампа усилителя 6С5 вставляется в панель лампы, находящуюся на верхней панели усилителя. На эту же панель шасси выведена колодка включения питания усилителя, которое подводится специальным кабелем с контактной колодкой. На панель выведена рукоятка регулировки сопротивления автоматического смещения лампы усилителя. Рабочее положение ее — в пределах

от 5-го до 6-го деления. С левого и правого торцов шасси выведены зажимы входа и выхода усилителя.

2. Стабилизированный выпрямитель предназначен для питания схемы усилителя. Выпрямитель обеспечивает постоянное анодное напряжение 250 в и переменное напряжение 6,3 в для питания накала лампы усилителя. Стабилизированный выпрямитель состоит из обычного двухполупериодного кенотронного выпрямителя с фильтром (см. задачу 101), на выходе которого имеется электронная стабилизирующая схема. Эта схема поддерживает анодное напряжение усилителя постоянным при изменении напряжения сети. На передней панели выпрямителя имеется вольтметр, показывающий напряжение на выходе стабилизированного выпрямителя, сетевой выключатель и сигнальная лампа включения выпрямителя. Кабель с колодкой служит для подвода напряжений к усилителю.

3. Генератор звуковых сигналов ЗГ-2А (смотрите заводское описание и инструкцию) является источником синусоидальных напряжений, которые подаются на вход исследуемого усилителя.

4. Электронный осциллограф ЭО-5 (см. его описание в задаче 109 и заводское описание) используется в данной задаче как для наблюдения формы сигнала на входе и выходе усилителя, так и для измерения амплитуды этих сигналов.

Упражнение 1

Изучение схемы усилителя и сборка установки

Снять усилитель с подставки и разобрать в схеме усилителя. Вычертить полную схему усилителя; проставить величину сопротивлений и емкостей, входящих в схему. Собрать схему установки согласно рис. 6. На этой схеме цифрами обозначены отдельные

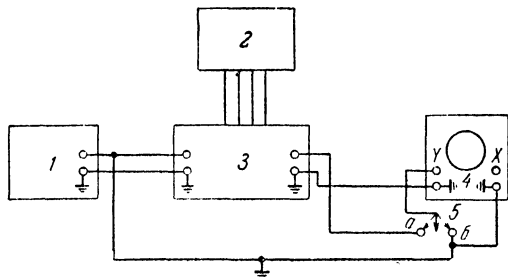


Рис. 6

приборы, входящие в установку: 1 — звуковой генератор, 2 — стабилизированный выпрямитель, 3 — усилитель, 4 — осциллограф, 5 — переключатель на два положения.

При сборке схемы необходимо следить за тем, чтобы корпуса всех приборов были электрически соединены друг с другом.

Как видно из схемы рис. 6, при включении переключателя 5 в положение *a* на вход вертикального усилителя осциллографа подается напряжение с выхода усилителя, в положение *б* — напряжение с выхода звукового генератора. Для измерения напряжения на выходе усилителя замечают величину амплитуды напряжения на осциллографе при включении переключателя 5 в положение *a*. Затем переключают его в положение *б* и регулировкой выходного напряжения генератора 1 добиваются на осциллографе той же амплитуды. Показания вольтметра звукового генератора в этом случае соответствуют напряжению выходного сигнала усилителя.

Упражнение 2

Снятие амплитудной характеристики усилителя и определение коэффициента усиления на средних частотах

Включить стабилизированный выпрямитель, звуковой генератор и осциллограф. Отрегулировать яркость и фокусировку осциллографа, получить сигналы на осциллографе с выходов усилителя и звукового генератора.

Указатель рукоятки на верхней панели усилителя ставят в положение против цифры 6¹⁾. Устанавливают на генераторе частоту 5000 *гц*. Подбирают амплитуду генератора и усиления осциллографа такими, чтобы синусоиды умещались на экране и чтобы синусоида с выхода исследуемого усилителя была правильной формы.

После этого, изменяя частоту генератора при постоянной амплитуде напряжения на входе усилителя, просматривают частотную характеристику усилителя. Находят частоту с максимальным усилением.

Затем, работая на этой частоте, снимают амплитудную характеристику усилителя. Для этого, меняя напряжение на входе усилителя, измеряют амплитуду напряжения на выходе исследуемого усилителя.

Пользуясь этими данными, строят амплитудную характеристику усилителя и определяют коэффициент усиления для средних частот.

Упражнение 3

Снятие частотной характеристики усилителя

Из амплитудной характеристики определяют напряжение $U_{вх}$ на входе усилителя, при котором начинается нелинейность в амплитудной характеристике. Затем устанавливают на входе

¹⁾ Это положение рукоятки соответствует смещению на сетке, при котором рабочая точка находится на середине линейного участка сеточной характеристики лампы.

усилителя напряжение $0,1U'_{\text{вх}}$ ¹⁾ и, поддерживая его все время постоянным, меняя частоту, измеряют напряжение на выходе усилителя так же, как в предыдущем упражнении. Полученные данные записываются в таблице.

Ч а с т о т н а я х а р а к т е р и с т и к а $U'_{\text{вх}}$. Частотную характеристику снимают, начиная с низших частот (50 гц) и до высоких частот, при которых совершенно ясно заметен спад частотной характеристики. Снятие частотной характеристики повторяют, понижая частоту.

Рекомендуется сделать измерения для 20—25 точек и затем начертить частотную характеристику, откладывая по оси ординат логарифм коэффициента усиления, а по оси абсцисс — логарифм частоты f .

Технические данные установки. Все необходимые данные установки приведены в тексте описания задачи.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ж е р е б ц о в, Радиотехника, Связьиздат, 1958.
2. Г. В. В о й ш в и л л о, Общий курс радиотехники, Воениздат, 1950.
3. Н. Н. М а л о в, Курс электротехники и радиотехники, Физматгиз, 1959.
4. А. М. Б о н ч - Б р у е в и ч, Радиоэлектроника в экспериментальной физике, «Наука», 1966.

З А Д А Ч А 111

ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Введение. Из курса математического анализа известно, что всякую периодическую функцию, удовлетворяющую определенным условиям (условия Дирихле), можно разложить в ряд по гармоническим функциям аргумента с частотами, кратными основной частоте (ряд Фурье).

В дальнейшем в данной работе будут встречаться только такие функции, для которых подобное разложение выполнимо.

Ряд Фурье имеет следующий вид:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots + a_n \cos n\omega t + \dots \\ \dots + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + \dots + b_n \sin n\omega t + \dots,$$

¹⁾ То есть напряжение заведомо меньше того, при котором усилитель начинает искажать форму сигнала.

где $\omega = 2\pi/T$ — угловая частота, а T — период изменения функции $f(t)$. Коэффициенты этого ряда вычисляются по формулам

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos k\omega t dt \quad \text{и} \quad b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin k\omega t dt$$

(формулы Эйлера).

Ряд Фурье может быть преобразован к следующему виду:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots \\ \dots + A_n \sin(n\omega t + \varphi_n) + \dots,$$

где

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad \text{и} \quad \text{tg } \varphi_k = \frac{a_k}{b_k}.$$

Члены разложения этого ряда принято называть гармоническими составляющими или гармониками функции $f(t)$. При этом величина $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ будет амплитудой k -й гармоники, а $\varphi_k = \arctg(a_k/b_k)$ — ее начальной фазой.

Определение амплитуд и фаз гармоник данной периодической функции называется ее гармоническим анализом. Совокупность же амплитуд и фаз гармоник принято называть спектром данной функции. Иными словами, гармонический анализ некоторой функции состоит в нахождении ее гармонического спектра.

При физических исследованиях часто представляет интерес случай, когда периодической функцией времени являются электрический ток или напряжение. В настоящей лабораторной работе будут исследоваться напряжения, периодически изменяющиеся со временем.

Исходя из изложенного выше, мы можем рассматривать всякий периодический ток как сумму синусоидальных переменных токов, а всякое периодическое напряжение как сумму синусоидальных напряжений с кратными частотами. Амплитуды и фазы гармоник этих токов и напряжений определяются по формулам нахождения амплитуд и фаз членов разложения соответствующих рядов Фурье.

Найдем ряды Фурье для двух периодических напряжений:

1) П и л о б р а з н о е н а п р я ж е н и е (рис. 1). Напряжение U линейно нарастает по закону $U = (U_0/T)t - U_0/2$ от значения $U = -U_0/2$ при $t = 0$ до значения $U = +U_0/2$ при $t = T$. В момент $t = T$ напряжение мгновенно меняется от $U = +U_0/2$ до $U = -U_0/2$. Далее процесс повторяется периодически.

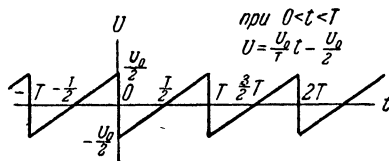


Рис. 1.

Вычислив коэффициенты a_k и b_k по формулам Эйлера и подставив их в ряд Фурье, получим

$$U(t) = -\frac{U_0}{\pi} \left(\frac{\sin \omega t}{1} + \frac{\sin 2\omega t}{2} + \dots + \frac{\sin n\omega t}{n} + \dots \right).$$

Здесь, как и прежде, $\omega = 2\pi/T$.

2) Прямоугольная волна (рис. 2). Напряжение U в первую половину периода равно $U = +U_0/2$, а вторую половину периода $U = -U_0/2$. Изменения напряжения происходят мгновенно. Процесс периодический повторяется. Находим, как и в предыдущем случае, ряд Фурье

$$U(t) = \frac{2U_0}{\pi} \left(\frac{\sin \omega t}{1} + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \frac{\sin 5\omega t}{5} + \dots + \frac{\sin (2n+1)\omega t}{2n+1} + \dots \right).$$

В обоих рассмотренных случаях начальные фазы всех гармоник равны нулю. В дальнейшем нами будут исследоваться напряжения, для которых зависимости от времени близки к приведенным выше.

Простейшим устройством, позволяющим выделить отдельные гармоники периодического напряжения, является последовательный колебательный контур (см. задачу 107). При воздействии на контур синусидальным

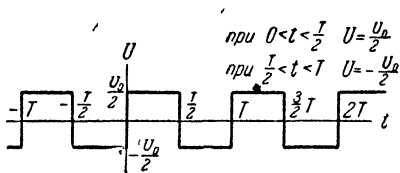


Рис. 2.

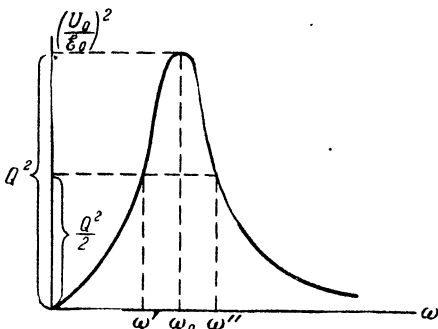


Рис. 3

напряжением с амплитудой \mathcal{E}_0 и частотой ω амплитуда напряжения на конденсаторе контура U_0 будет равна

$$U_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{\omega^2}{\omega_0^2} Q^2}},$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ — собственная частота контура, $Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ — добротность контура. Приведенное выражение является уравнением резонансной кривой контура (рис. 3).

Если затухание в контуре мало, то при резонансе

$$U_{0 \text{ рез}} \approx \mathcal{E}_0 \text{ рез} Q.$$

Добротность контура может быть определена по резонансной кривой. Она равна

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega' - \omega''}.$$

Здесь ω' и ω'' — частоты, соответствующие значениям величины $\left(\frac{U_0}{E_0}\right)^2$, равным половине максимального.

Как видно из формул для добротности и собственной частоты контура, при настройке контура путем изменения емкости его конденсатора одновременно с изменением собственной частоты так же пропорционально меняется и добротность.

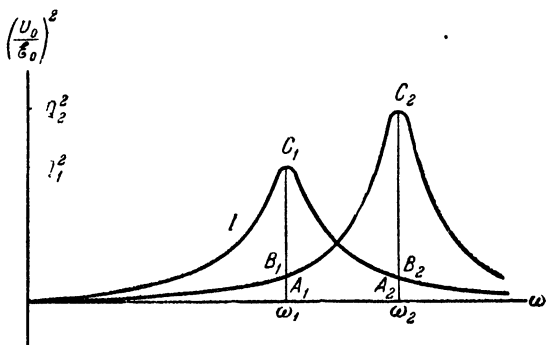


Рис. 4.

Пусть на колебательный контур действуют одновременно два синусоидальных напряжения с разными частотами ω' и ω'' . Меняя емкость контура, мы можем настроить его на любую из этих частот. Резонансные кривые, соответствующие этим двум настройкам, приведены на рис. 4.

При настройке контура на частоту ω_1 амплитуда первого напряжения будет определяться ординатой A_1C_1 , а амплитуда второго — ординатой A_2B_2 . Сравнивая эти ординаты, заключаем, что при прочих равных условиях на конденсаторе контура будет преобладать то напряжение, частоты которого ближе к резонансной. Это преобладание будет тем сильнее, чем выше добротность контура, чем больше разность частот $\omega_2 - \omega_1$ и чем ниже собственная частота контура.

Аналогичные рассуждения можно провести и для случая настройки контура на частоту ω_2 . Таким образом, для того чтобы при помощи колебательного контура выделить некоторую гармонику периодического напряжения, нужно настроить контур в резонанс с частотой выделяемой гармоники.

Описание приборов. Используемый в настоящей задаче анализатор амплитуд гармоник представляет колебательный контур с вспомогательными цепями (рис. 5).

Для расширения диапазона частот анализатора емкость контура выполнена в виде двух конденсаторов: постоянного C_2 и переменного C_3 . Первый из них может отключаться ключом K . Индуктивность контура состоит из двух включенных последовательно катушек L_1 и L_2 . В катушке L_2 под влиянием магнитного поля катушки L_3 наводится переменная электродвижущая сила, вынуждающая колебания в контуре.

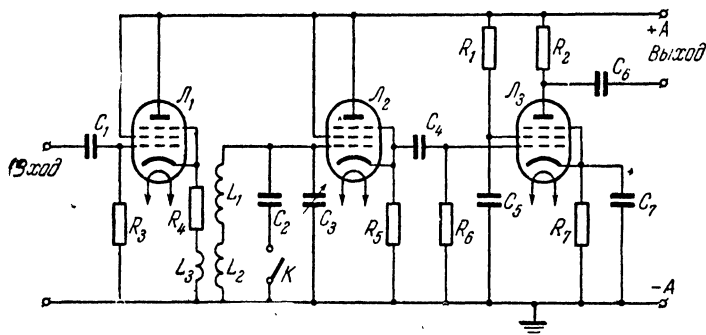


Рис. 5.

Исследуемое напряжение подается на сетку первой лампы анализатора L_1 . Эта лампа выполняет роль усилителя мощности, собранного по схеме с включением нагрузки в цепь катода (катодный повторитель; со свойствами катодного повторителя можно ознакомиться по приложению 1). Падение напряжения на нагрузке катодного повторителя пропорционально напряжению на его входе. Нагрузкой в нашем случае являются сопротивления R_4 и катушка связи L_3 . Так как L_3 и R_4 выбраны такими, что в пределах диапазона частот анализатора выполняется условие

$$\omega L_3 \ll R_4,$$

то ток в нагрузке лампы L_1 пропорционален напряжению

$$I = \frac{K_1}{R_4} U_{\text{вх}},$$

где K_1 — коэффициент усиления катодного повторителя. В силу этого напряжение, наводимое полем катушки связи L_3 в колебательный контур анализатора, будет пропорционально производной от входного напряжения по времени

$$\mathcal{E} = -M \frac{dI}{dt} = -\frac{MK_1}{R_4} \frac{dU_{\text{вх}}}{dt},$$

где M — коэффициент взаимной индукции катушек L_3 и L_2 . Напряжение U_C на конденсаторе колебательного контура при резонансе будет равно

$$U_C = Q\mathcal{E} = \frac{QMK_1}{R_4} \frac{dU_{вх}}{dt}.$$

Напряжение с конденсатора подается на сетку второго катодного повторителя (лампа L_2). Так как катодный повторитель обладает очень высоким входным сопротивлением (как активная, так и реактивная слагающие), то при таком включении выходные цепи анализатора практически не влияют на свойства (добротность и собственную частоту) его колебательного контура.

Со второго катодного повторителя напряжение поступает на оконечный усилительный каскад (лампа L_3) (см. задачу 110). Усиленное этим каскадом напряжение через переходную емкость C_3 подается на выходные клеммы анализатора. Таким образом, напряжение на выходе анализатора равно

$$U_{вых} = \frac{QMK_1K_2K_3}{R_4} \frac{dU_{вх}}{dt} = A \frac{dU_{вх}}{dt},$$

где K_2 — коэффициент усиления второго катодного повторителя, K_3 — коэффициент усиления выходного каскада. Если на вход анализатора воздействует синусоидальное напряжение (одна из гармоник исследуемого напряжения)

$$U_{вх} = U_{0\text{ вх}} \sin \omega t,$$

то на выходе анализатора мы получили

$$U_{вых} = U_{0\text{ вх}} A \omega \cos \omega t = U_{0\text{ вх}} \cos \omega t.$$

Отношение амплитуды выходного напряжения к амплитуде входного напряжения будет называться коэффициентом передачи анализатора

$$N = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = A \omega = \frac{\omega QMK_1K_2K_3}{R_4}.$$

При перестройке частоты анализатора коэффициент передачи его будет изменяться. Это видно из того, что в формулу для N частота, во-первых, входит явно, а, во-вторых, от частоты зависят как добротность контура, так и коэффициенты усиления всех каскадов анализатора.

Отношение коэффициента передачи N при некоторой частоте ω к коэффициенту передачи N_1 , при заранее выбранной частоте ω_1 , будем называть относительным коэффициентом передачи и обозначать символом B :

$$B = \frac{N}{N_1} = \frac{U_{0\text{ вх}}}{U_{0\text{ вх}} N_1}.$$

За опорную частоту ω_1 выберем $\omega_1 = 2\pi \cdot 25 \cdot 10^3$ гц ($\nu = 25$ кГц). Из определения величины B следует

$$U_{0 \text{ вх}} = \frac{U_{0 \text{ вых}}}{BN_1}.$$

Так как M_1 — величина постоянная, то, следовательно, отношение $U_{0 \text{ вых}}/B$ может служить мерой входного напряжения в некоторых условных единицах. Для используемого в задаче анализатора зависимость B от ν предварительно измерена и соответствующий график приложен к прибору.

В качестве прибора для измерения $U_{0 \text{ вых}}$ используется осциллограф ЭОБ-М (смотри заводское описание, имеющееся в практикуме). Исследуемые напряжения вырабатываются генераторами прямоугольной волны и пилообразного напряжения.

Описание схем и принципа действия этих генераторов даны в приложениях 2 и 3. Питание анализатора и генераторов исследуемого напряжения производится от стабилизированного выпрямителя (блок питания).

Измерения и обработка результатов. Перечисленные ниже упражнения следует выполнить для напряжения пилообразной формы и для напряжения, имеющего форму прямоугольной симметричной волны.

Упражнение 1

Наблюдение формы кривой зависимости исследуемого напряжения от времени

Выполнение этого упражнения производится в следующем порядке:

1. Собирают электрическую схему согласно блок-схеме, приведенной на рис. 6.

2. Включают осциллограф и блок питания генератора в сеть 220 в.

3. Включают периодическую развертку осциллографа и регулируют яркость и фокусировку луча.

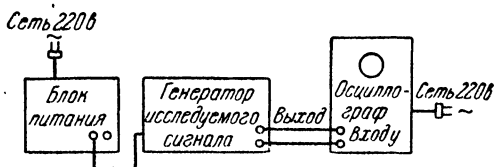


Рис. 6.

4. Для установления стабильной частоты дают генератору исследуемого напряжения прогреться в течение пяти минут.

5. Ставят ручку ослабления входного сигнала на 1 и устанавливают усиление таким, чтобы наблюдаемое изображение занимало на экране осциллографа 25—30 мм по вертикали.

6. Регулируя частоту развертки и синхронизацию, получают четкое неподвижное изображение.

7. Накладывают на экран осциллографа кусок полупрозрачной бумаги и переносят на него изображение с экрана,

Упражнение 2

Наблюдение гармоник и измерение их амплитуд

Выполнение этого упражнения производится следующим образом:

1. Составляют электрическую схему согласно приведенной на блок-схеме (рис. 7).
2. Включают блок питания и осциллограф.
3. Включают первый диапазон частот анализатора и, манипулируя лимбом переменного конденсатора, добиваются максимальной амплитуды 1-й гармоники.

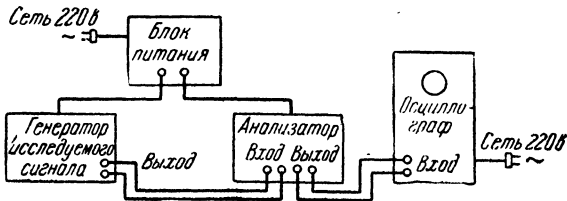


Рис. 7.

4. Устанавливают четкое неподвижное изображение 1-й гармоники.

5. Делают усиление y -канала осциллографа таким, чтобы амплитуда 1-й гармоники была равна 15 мм по сетке, и впредь, в течение всего измерения, усиления не меняют.

6. Настроив анализатор последовательно на более высокие гармоники, производят их визуальное наблюдение. Убеждаются, что частоты гармоник пропорциональны их номеру. (При этом частоту развертки осциллографа придется немного подстраивать, так как с повышением частоты сигнала меняются условия синхронизации.)

7. Выключают генератор развертки и производят измерения амплитуд гармоник по сетке с точностью до 0,2 мм. Одновременно по лимбу анализатора измеряют частоты гармоник. Результаты измерений заносят в таблицу. Пользуясь графиком частотной градуировки анализатора и графиком зависимости относительного коэффициента передачи от частоты, определяют значения частот гармоник в килогерцах и значения относительных коэффициентов передачи для этих частот. Затем из полученных данных определяют амплитуды гармоник в условных единицах по формуле

$$U_{0 \text{ вх}} = \frac{U_{0 \text{ вых}}}{B}.$$

Полученные значения также заносят в таблицу.

Обработка результатов измерений. Эта задача выполняется так: период первой гармоники разбивают на 12 равных интервалов времени. Определяют значения всех измеренных гармоник для

Таблица значений фазовых углов и их синусов для гармоник периодической функции
через $\frac{1}{12}$ периода

№ гармоник	Фазовые углы и их синусы	Моменты времени t												
		0	$1 \frac{T}{12}$	$2 \frac{T}{12}$	$3 \frac{T}{12}$	$4 \frac{T}{12}$	$5 \frac{T}{12}$	$6 \frac{T}{12}$	$7 \frac{T}{12}$	$8 \frac{T}{12}$	$9 \frac{T}{12}$	$10 \frac{T}{12}$	$11 \frac{T}{12}$	$12 \frac{T}{12}$
1	α° $\sin \alpha$	0 0	30 0,5	60 0,87	90 1	120 0,87	150 0,5	180 0	210 -0,5	240 -0,87	270 -1	300 -0,87	330 -0,5	0 0
2	α° $\sin \alpha$	0 0	60 0,87	120 0,87	180 0	240 -0,87	300 -0,87	0 0	60 0,87	120 0,87	180 0	240 -0,87	300 -0,87	0 0
3	α° $\sin \alpha$	0 0	90 1	180 0	270 -1	0 0	90 1	180 0	270 -1	0 0	90 1	180 0	270 -1	0 0
4	α° $\sin \alpha$	0 0	120 0,87	240 -0,87	0 0	120 0,87	240 -0,87	0 0	120 0,87	240 -0,87	0 0	120 0,87	240 -0,87	0 0
5	α° $\sin \alpha$	0 0	150 0,5	300 -0,87	90 1	240 -0,87	30 0,5	180 0	330 -0,5	120 0,87	270 -1	60 0,87	210 -0,5	0 0
6	α° $\sin \alpha$	0 0	180 0	0 0	180 0	0 0	180 0	0 0	180 0	0 0	180 0	0 0	180 0	0 0
7	α° $\sin \alpha$	0 0	210 -0,5	60 0,87	270 -1	120 0,87	330 -0,5	180 0	30 0,5	240 -0,87	90 1	300 -0,87	150 0,5	0 0

моментов времени, соответствующих границам этих интервалов. Сумма значений гармоник для заданного момента времени равна значению первоначального напряжения в этот момент.

Таблица определения амплитуд гармоник

№ гармоники	1	2	3	4	5	6	7
Отсчет по лимбу анализатора							
Частоты в кГц							
Вертикальное отклонение луча в мм сетки осцил.							
Относительный коэффициент передачи							
Амплитуда гармоники в условных единицах							

Значение гармоники в момент t находят по формуле

$$U_n = U_{n_0} \sin n \frac{2\pi}{T} t.$$

В этой формуле U_{n_0} — амплитуда гармоники, она была определена в предыдущем упражнении; $n \frac{2\pi}{T} t$ — фаза гармоники, определяемая номером гармоники и выбранным моментом времени¹⁾. Для определения значений фазовых углов гармоник и их \sin в указанные моменты времени удобно воспользоваться таблицей, приведенной на стр. 314. Вычисленные значения амплитуд гармоник для заданных моментов времени и их суммы заносят в таблицу:

Время t	0	$\frac{1}{12} T$	$\frac{2}{12} T$	$\frac{3}{12} T$	$\frac{4}{12} T$	$\frac{5}{12} T$	$\frac{6}{12} T$	$\frac{7}{12} T$	$\frac{8}{12} T$	$\frac{9}{12} T$	$\frac{10}{12} T$	$\frac{11}{12} T$	$\frac{12}{12} T$
1													
2													
3													
.....													
7													
Значения первоначального напряжения													

¹⁾ Как следует из введения, начальные фазы всех гармоник, выбранных для исследования напряжений, равны нулю.

На основании данных этой таблицы строится график зависимости синтезированного из гармоник напряжения от времени. Этот график сравнивают с картиной, наблюдавшейся на экране осциллографа в первом упражнении.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Смирнов, Курс высшей математики, т. II, Физматгиз, 1962.
2. С. Г. Калашников, Электричество, «Наука», 1964.
3. А. М. Бонч-Бруевич, Радиозлектроника в экспериментальной физике, «Наука», 1966.
4. Г. С. Горелик, Колебания и волны, Физматгиз, 1959.

Приложение 1

КАТОДНЫЙ ПОВТОРИТЕЛЬ

В радиотехнической аппаратуре широкое распространение имеет схема усилителя мощности с нагрузкой в цепи катода, называемая «катодный повторитель» (рис. 8).

Эта схема отличается от обычного усилителя на сопротивлениях способом включения входного напряжения.

Как видно из схемы, в катодном повторителе напряжение между сеткой и катодом лампы складывается из входного напряжения и падения напряжения на сопротивлении нагрузки, причем эти напряжения имеют противоположные фазы.

Выясним наиболее характерные свойства такой схемы. Определим коэффициент усиления напряжения катодного повторителя

$$K = \frac{U_{0 \text{ вых}}}{U_{0 \text{ вх}}},$$

где $U_{0 \text{ вх}}$ и $U_{0 \text{ вых}}$ — амплитуды входного и выходного напряжений.

В свою очередь

$$U_{0 \text{ вых}} = \mu U_{0 \text{ с}} \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{г}} + R_{\text{н}}},$$

где $U_{0 \text{ с}}$ — амплитуда напряжения между сеткой и катодом, $R_{\text{г}}$ — внутреннее сопротивление лампы, $R_{\text{н}}$ — сопротивление нагрузки, μ — статический коэффициент усиления лампы (см. задачу 110).

Это равенство справедливо, если сопротивление нагрузки значительно меньше сопротивления внешней цепи, что обычно выполняется, так как $R_{\text{н}}$ выбирается небольшим. Но, как говорилось выше,

$$U_{0 \text{ с}} = U_{0 \text{ вх}} - U_{0 \text{ вых}},$$

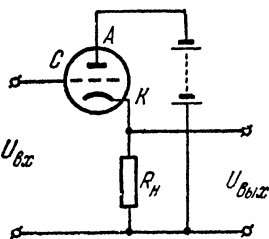


Рис. 8.

откуда

$$K = \frac{\mu R_H}{R_i + R_H(1 + \mu)},$$

но так как $R_i = \mu/S$ (см. задачу 69), где S — статическая крутизна сеточной характеристики лампы, а обычно $\mu \gg 1$, то $K \approx \frac{R_H}{\frac{1}{S} + R_H}$.

Из этой формулы следует, что K всегда меньше единицы и, если выполняется условие $1/S \ll R_H$, то $K \approx 1$, т. е. напряжение на катоде лампы по амплитуде и фазе мало отличается от напряжения на сетке. Отсюда и произошло название «катодный повторитель».

Определим теперь коэффициент усиления мощности катодного повторителя K_W .

Мощность, расходуемая во входной цепи, равна $W_{вх} = U_{0\text{вх}}^2/2R_{вх}$, а мощность, выделяющаяся в нагрузке, равна $W_{вых} = U_{0\text{вых}}^2/2R_H$. Тогда

$$K_W = \frac{U_{0\text{вых}}^2}{U_{0\text{вх}}^2} \frac{R_{вх}}{R_H} = K^2 \frac{R_{вх}}{R_H},$$

а так как $K \approx 1$, то $K_W = R_{вх}/R_H$.

Отсюда видно, что K_W при соответствующем выборе параметров входной цепи и сопротивления нагрузки может быть весьма большим.

Произведем теперь оценку входной емкости катодного повторителя. Емкостный ток в цепи сетки состоит из двух слагающих; емкостного тока между сеткой и катодом и емкостного тока между сеткой и анодом лампы. Переменная слагающая напряжения, действующего между сеткой и анодом, равна $U_{вх}$, а переменная слагающая напряжения, действующая между сеткой и катодом, равна $U_{вх} - U_{вых} = U_{вх}(1 - K)$. Амплитуда емкостного тока в цепи сетки $I_{0с}$ равна

$$I_{0с} = I_{0с,к} + I_{0с,а} = U_{0\text{вх}}(1 - K)\omega C_{с,к} + U_{0\text{вх}}\omega C_{с,а},$$

где $I_{0с,к}$ — амплитуда емкостного тока между сеткой и катодом, $I_{0с,а}$ — амплитуда емкостного тока между сеткой и анодом, ω — угловая частота, $C_{с,а}$ — емкость промежутка сетка — анод, $C_{с,к}$ — емкость промежутка сетка — катод. Так как $K \approx 1$, то первым слагаемым можно пренебречь. Тогда

$$I \approx U_{0\text{вх}}\omega C_{с,а},$$

у современных пентодов и тетродов величина $C_{с,а}$ весьма мала (доли пикофарды), следовательно, и входная емкость катодного повторителя также весьма мала.

Из других ценных свойств катодного повторителя следует отметить (не приводя расчетов) весьма низкое выходное сопротивление $R_{вых} \approx 1/S$ и широкую полосу пропускания частот.

Приложение 2

ГЕНЕРАТОР ПИЛООБРАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Принцип работы генератора пилообразного напряжения состоит в следующем: конденсатор C_2 (рис. 9) мгновенно заряжают до напряжения U_1 , а затем при помощи электронной схемы отключают от источника напряжения. После этого C_2 разряжается через пентод Λ_3 , причем ток разрядки поддерживается постоянным. Напряжение на обкладках конденсатора при этом меняется линейно.

После разрядки конденсатора до напряжения U_2 с помощью той же электронной схемы производится повторная зарядка. Затем процесс периодически повторяется. Пилообразное напряжение снимается с обкладок конденсатора.

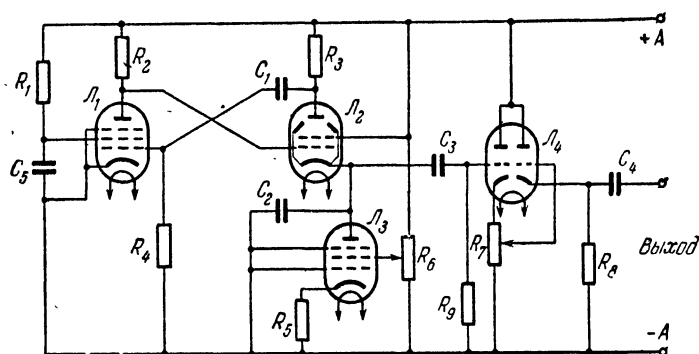


Рис. 9.

Работа линейризирующего пентода подробно рассмотрена в описании задачи 109, поэтому на этом вопросе мы останавливаться не будем. Рассмотрим более подробно процессы, происходящие в приведенной схеме.

Пусть в некоторый момент через лампу Λ_1 идет ток, а конденсатор C_2 заряжен до такого напряжения, что лампа Λ_2 заперта (потенциал катода выше потенциала ее сетки). Тогда C_2 будет разряжаться через пентод Λ_3 . Потенциал катода лампы Λ_2 будет падать. Так будет происходить до тех пор, пока лампа Λ_2 не начнет отпираться. При отпирании Λ_2 потенциал ее анода резко снизится (возникнет падение напряжения на R_3).

Отрицательный импульс напряжения с анода лампы Λ_2 через емкость C_1 передастся на сетку лампы Λ_1 и уменьшит ее анодный ток. Уменьшение же анодного тока Λ_1 вызовет повышение потенциала ее анода, а следовательно, и сетки лампы Λ_2 , чем еще сильнее отперет последнюю. Таким образом, начавшийся процесс «опрокидывания» схемы будет развиваться с нарастающей скоростью (ла-

винно). Этот процесс закончится тогда, когда лампа L_1 окажется запертой, а лампа L_2 отпертой. В этом состоянии схемы лампы L_2 и L_3 окажутся включенными последовательно, и так как падение напряжения на L_2 будет значительно меньше, чем на L_3 , то конденсатор C_2 снова зарядится до достаточно высокого потенциала. Но такое состояние долго существовать не может. Конденсатор C_1 будет разряжаться через сопротивления R_3 , R_4 и внутреннее сопротивление источника анодного питания. Потенциал сетки лампы L_1 будет расти до тех пор, пока она не отперется. Отпирание лампы L_1 вызовет падение потенциала ее анода и запирает лампы L_2 . Этот процесс обратного «опрокидывания» схемы будет протекать так же лавинно. Постоянная времени цепи разрядки конденсатора C_1 выбирается малой по сравнению с периодом пилообразного напряжения. По окончании процесса обратного опрокидывания схема вернется к исходному положению, и процессы в ней станут периодически повторяться.

Таким образом, напряжение на конденсаторе C_2 будет линейно убывать со временем до потенциала, соответствующего первому опрокидыванию схемы, а затем быстро нарастать до первоначального значения.

Напряжение с конденсатора C_2 через катодный повторитель и переходную емкость C_4 подается на выходные клеммы генератора. Катодный повторитель с лампой L_4 применен

в этой схеме для уничтожения влияния емкости внешней нагрузки на частоту генератора и для снижения его выходного сопротивления.

График зависимости напряжения генератора от времени будет иметь вид, представленный на рис. 10. Постоянная слагающая в этом напряжении будет отсутствовать.

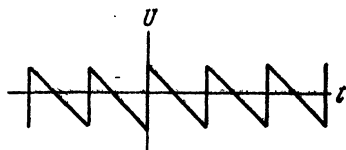


Рис. 10.

Приложение 3

ГЕНЕРАТОР ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ВОЛНЫ

Основной частью генератора прямоугольной волны (рис. 11) является задающий симметричный мультивибратор (лампы L_1 и L_2). Напряжение с мультивибратора через буферную лампу L_3 подается на управляющую сетку левой лампы L_4 выходного каскада.

Буферная лампа L_3 необходима для того, чтобы сеточные токи лампы L_4 не нагружали анодную цепь лампы L_2 и не влияли на скважность задающего мультивибратора. Кроме того, буферная лампа является одновременно усилителем напряжения. Напряжение питания ламп мультивибратора и буферной лампы равно 150 в; оно стабилизировано газовым стабилизатором L_6 .

Выходной каскад включает в себя лампы L_4 и L_5 . Задающий мультивибратор последовательно то отпирает, то запирает буферную лампу L_3 . Когда L_3 заперта, то на ее аноде, а следовательно, и на сетке лампы L_4 напряжение равно $+150$ в¹⁾.

При этом ток, текущий через лампу L_4 , создает на сопротивлении R_{10} падение напряжения около 120 в. Напряжение на сетке лампы

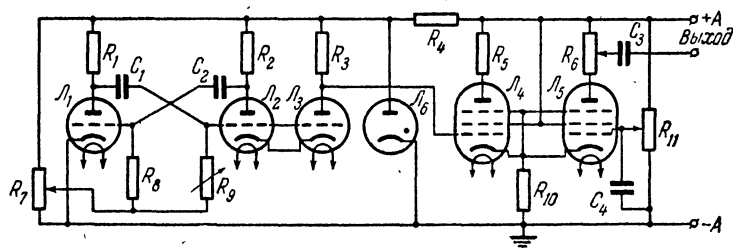


Рис. 11.

L_5 при помощи потенциометра R_{11} и конденсатора C_4 все время поддерживается постоянным, равным приблизительно $+90$ в. Таким образом, в рассматриваемом случае лампа L_4 отперта сеточным напряжением $+30$ в, а лампа L_5 заперта сеточным напряжением -30 в.

Когда же лампа L_3 отперта, то ток, текущий в ее анодной цепи, создает на сопротивлении R_3 падение напряжения около 120 в. Следовательно, напряжение на сетке L_4 понижается до $+30$ в. При этом лампа L_4 запирается и падение напряжения на R_{10} уменьшается. Но так как напряжение на сетке лампы L_5 постоянно ($+90$ в), то эта лампа отпирается, в ней устанавливается ток, который создает на сопротивлении R_{10} падение напряжения около 60 в. Теперь состояние ламп изменилось на обратное, лампа L_4 заперта, а лампа L_5 отперта. В последующие периоды описанный процесс повторяется.

Когда лампа L_5 заперта, то падение напряжения на ее анодной нагрузке равно нулю. Когда же она отперта, то на ее анодной нагрузке устанавливается постоянное падение напряжения, так как ее сеточное напряжение при этом постоянно. Быстрота перехода от одного состояния к другому определяется скоростью переброса задающего мультивибратора.

Напряжение на выходные клеммы генератора снимается с анодной нагрузки лампы L_5 через переходную емкость C_3 . Следовательно,

¹⁾ Здесь и в дальнейшем все напряжения в схеме будем указывать относительно минуса источника анодного питания.

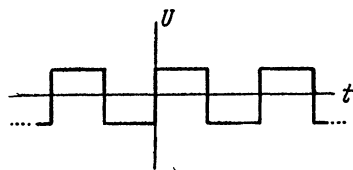


Рис. 12.

но, напряжение на выходе генератора будет изменяться со временем, как показано на приведенном графике (рис. 12).

Постоянная слагающая в этом напряжении будет отсутствовать,

Технические данные установки. Для работы может быть использован любой универсальный осциллограф с полосой пропускания частот по «У»-каналу не менее 250 кГц, например ЭОБ-М или СИ-1, укомплектованный координатной сеткой.

Принципиальные схемы приборов не заводского изготовления приведены в тексте. Спецификации деталей этих схем приведены ниже. Анализатор: L_1, L_2, L_3 — 6Ж4; $C_1 = 700$ пф, $C_2 = 1000$ пф, $C_3 = 2 \times 500$ пф (переменный), $C_4 = 0,1$ мкф, $C_5 = 0,25$ мкф, $C_6 = 0,1$ мкф, $C_7 = 0,1$ мкф; $R_1 = 68$ ком, $R_2 = 1$ ком, $R_3 = 330$ ком, $R_4 = 200$ ом, $R_5 = 620$ ом, $R_6 = 300$ ком, $R_7 = 300$ ом. Генератор пилообразного напряжения (рис. 9): L_1, L_3 — 6Ж8, L_2 — 6П3, L_4 — 6Н8; $C_1 = 0,02$ мкф, $C_2 = 3000$ пф, $C_3 = 0,07$ мкф, $C_4 = 0,1$ мкф; $R_1 = 100$ ком, $R_2 = 4$ ком, $R_3 = 2$ ком, $R_4 = 33$ ком, $R_5 = 39$ ком, $R_6 = 47$ ком ВК, $R_7 = 2$ ком ВК, $R_8 = 1,8$ ком, $R_9 = 2,7$ Мом. Генератор прямоугольной волны (рис. 11): L_1, L_2, L_3 — 6С2С; L_4, L_5 — 6П9; L_6 — СГ-4С; $C_1, C_2 = 240$ пф, $C_3 = 0,1$ мкф, $C_4 = 0,1$ мкф; $R_1, R_2 = 3$ ком, $R_3 = 20$ ком, $R_4 = 4,1$ ком (4 вт), $R_5 = 1,5$ ком, $R_6 = 2,2$ ком ВК, $R_7 = 0,1$ Мом ВК, $R_8 = 270$ ком, $R_9 = 500$ ком ВК, $R_{10} = 2,5$ ком (4 вт), $R_{11} = 47$ ком ВК.

ЗАДАЧА 112

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА К ЕГО МАССЕ МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Важнейшими характеристиками электрона являются его заряд и масса. При движении электрона в электрических и магнитных полях траектория электрона определяется конфигурацией этих полей и отношением заряда электрона к его массе.

Если структура электрического или магнитного поля задана и из опыта известна траектория электрона в этом поле, то значение $\frac{e}{m}$ может быть найдено. На этом соображении основаны теперь многочисленные методы определения отношения заряда к массе для электрона. Впервые этот прием был использован в так называемом методе парабол, когда изучалось отклонение от первоначального направления электронного пучка, пролетающего поперек однородного электрического поля плоского конденсатора. Аналогичные способы определения величины $\frac{e}{m}$ применяются и в случае ионов и других частиц.

Одним из важнейших вариантов этих методов является метод магнетрона, в котором используется отклонение движущегося электрона магнитным полем. Последнее, как известно, действует на движущийся заряд с силой

$$F = \frac{e}{c} [\mathbf{v}H],$$

всегда нормальной к направлению скорости движения электрона.

Сущность метода магнетрона заключается в том, что электронная лампа с коаксиальными цилиндрическими катодом и анодом помещается в аксиальное магнитное поле. Поле создается питаемым постоянным током соленоидом (схема питания соленооида изображена на рис. 1). Этот соленоид надевается на баллон электронной лампы, и направление напряженности магнитного поля совпадает с осью симметрии лампы, вдоль которой расположен подогревный катод.

При таком расположении катода и цилиндрического анода лампы электроны, вылетающие с поверхности катода K в отсутствие магнитного поля движутся на анод A прямо по радиусам. После включения постоянного тока в соленоид его магнитное поле начнет действовать на электроны и отклонять их перпендикулярно к направлению вектора скорости электронов в каждый данный момент времени.

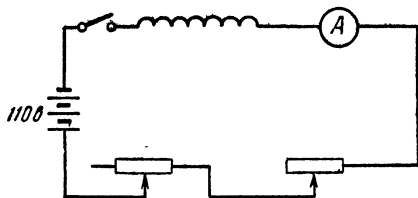


Рис. 1.

Под действием отклоняющей силы движение электронов приобретает более сложный характер, и их траектория станет криволинейной; кривая будет начинаться на катоде и кончаться на аноде лампы. При определенном соотношении между их скоростью v и значением вектора H электроны совсем перестанут достигать анода и анодный ток в лампе прекратится. Электроны образуют в лампе объемный отрицательный заряд, который будет двигаться в пространстве между катодом и анодом, но сила анодного тока будет равна нулю. В этом проявится эффект отклоняющего действия магнитного поля на радиально летевшие электроны.

Эксперимент по определению e/m этим методом заключается в том, что в лампе магнетрона устанавливается постоянное напряжение накала и постоянная разность потенциалов между катодом и анодом, т. е. создаются условия для постоянства анодного тока. Затем, изменяя от нуля значение силы тока в соленоиде и тем самым увеличивая напряженность аксиального магнитного поля, добиваются прекращения анодного тока в лампе. Зная геометрию магнетрона, т. е. радиусы его цилиндрических катода и анода, величину примененного анодного напряжения и напряженность критического магнитного поля, при котором прекратился анодный ток, можно найти и величину отношения e/m .

Если произвести расчет движения электрона в этих условиях, то окажется, что величину e/m можно представить так:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{b^2 H_{\text{кр}}^2} \frac{1}{\left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)^2},$$

где U — величина анодного напряжения в лампе, $H_{кр}$ — критическое напряжение магнитного поля, a и b — радиусы, соответственно, катода и анода. По этой формуле и найденным из опыта значениям U и $H_{кр}$ вычисляется величина e/m в настоящей задаче.

Характерной особенностью метода является то, что он исключает необходимость изучения траектории электрона в магнитном поле. Наоборот, изменением величины H (при заданном U) достигается наперед заданная траектория электронов, при которой они не могут попасть на анод лампы, вопреки действию электрического поля. Таким образом, опыт сводится к снятию так называемой сбросовой характеристики лампы, т. е. к снятию зависимости I_a (при $U = \text{const}$) от H . Резкий спад этой кривой (резкое уменьшение анодного тока лампы) соответствует искомым критическим условиям работы магнетрона.

Измерения и их обработка.

Измерения сводятся к установлению фиксированного напряжения на аноде лампы и определенного тока накала 1,75 а и к изменению силы тока в соленоиде впредь до падения анодного тока. Схема включения диода 2Ц2С изображена на рис. 2. Напряженность магнитного поля, если известно число витков на единицу длины n в обмотке соленоида, легко может быть вычислена по величине питающего соленоид постоянного тока

$$H = 0,4\pi nI.$$

Критическое значение напряженности магнитного поля находится для нескольких значений анодного напряжения лампы 160, 180, 200 и 220 в, в результате чего получается семейство сбросовых характеристик.

Надо иметь в виду, что сбросовые характеристики не будут давать вертикального сброса силы анодного тока при определенном значении $H_{кр}$, но фактически будет иметь место лишь довольно крутой спад этой кривой, что объясняется неодинаковым значением скоростей электронов, покидающих нить накала. Наиболее правильно брать значение $H_{кр}$ из участка крутого спада сбросовой характеристики.

Работа ведется с лампой 2Ц2С; радиус $a = 0,9$ мм и радиус $b = 9,6$ мм. При небольших значениях анодного напряжения в лампе течет ток (в отсутствие магнитного поля) около 1 ма. Этот ток измеряется миллиамперметром.

Соленоид питается током либо от высоковольтной аккумуляторной батареи, либо от проводки постоянного тока, если она обеспе-

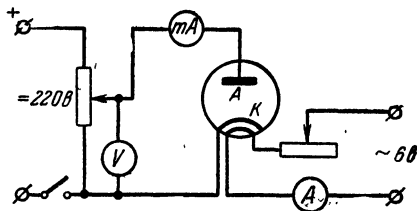


Рис. 2.

на рис. 2. Напряженность магнитного поля, если известно число витков на единицу длины n в обмотке соленоида, легко может быть вычислена по величине питающего соленоид постоянного тока

чивает достаточное постоянство напряжения. Сила необходимого тока в соленоиде при небольших значениях анодного напряжения на лампе составляет не более 1 а. Соленоид имеет 190 витков на 1 см своей длины.

Технические данные установки. Электрическое питание установки осуществляется от аккумуляторной сети постоянного тока; прочие данные указаны в ходе описания задачи.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964,
2. Специальный физический практикум, под редакцией Г. В! С п и в а к, т. 1, Изд. МГУ, 1960.
3. С. А. Б о г у с л а в с к и й, Пути электронов в электромагнитных полях, в кн. «Избранные труды по физике», Физматгиз, 1961.

З А Д А Ч А 113

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ МОТОРА И ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Целью настоящей задачи является изучение включения, пуска и регулирования числа оборотов мотора и генератора постоянного тока, получение их основных рабочих характеристик и определение к. п. д. установки, состоящей из мотора и генератора. С принципами работы мотора и генератора студенты, выполняющие работу, знакомятся по одному из руководств, указанных в списке литературы, приведенном в описании настоящей задачи.

Описание установки. Установка состоит из двух электромоторов малой мощности, валы которых соединены резиновой муфтой. Один из моторов приводится во вращение в результате включения его в сеть постоянного тока. Другой мотор работает как генератор в результате вращения в магнитном поле его якоря, приводимого в движение первым мотором.

Электрическая схема установки приведена на рис. 1. Измерительные приборы, включенные в эту схему, позволяют измерять силу общего тока, потребляемого установкой (амперметр A), и общее напряжение, подведенное к установке (вольтметр V). Вольтметры V_1 и V_2 позволяют измерять соответственно напряжение на якоре мотора и напряжение на выходе генератора. Последнее, при включении нагрузки в цепь генератора (две лампы накаливания, включаемые рубильником 5), равно падению напряжения на нагрузке. Амперметры A_1 и A_2 позволяют измерять силы токов в обмотках возбуждения (OB) мотора и генератора. Эти же приборы после соответствующего переключения рубильников схемы 6 и 7 могут измерять и силы токов в цепи якорей мотора и генератора.

Рубильник 1 включает в сеть постоянного тока всю установку; рубильник 2 включает цепь возбуждения мотора, в которую введен реостат R_1 ; рубильник 3 — цепь якоря мотора, в которую введены пусковые реостаты мотора R_2 и R_4 . Рубильник 4 включает цепь возбуждения генератора, сила тока в которой регулируется реостатом R_3 . Рубильник 5 включает нагрузку в цепи якоря генератора.

Отдельного упоминания заслуживает примененный метод измерения скорости вращения якоря мотора и генератора. На свободный

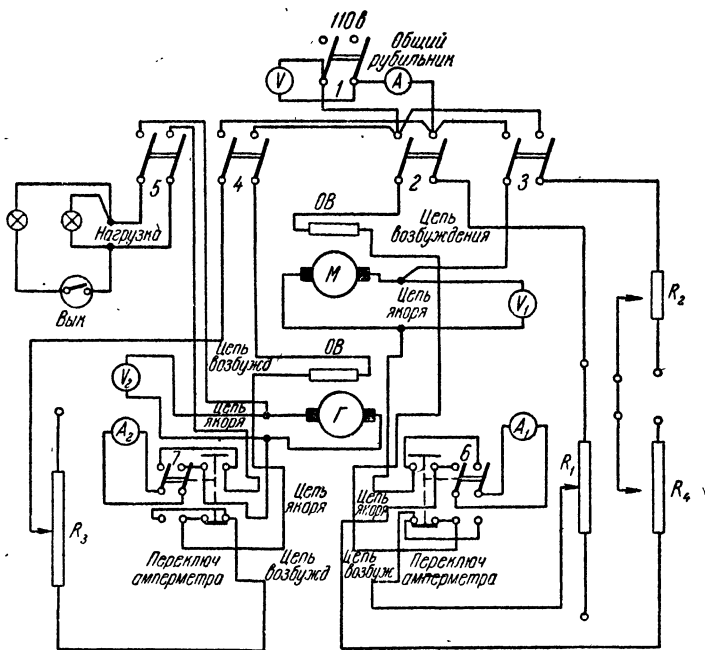


Рис. 1.

конец вала генератора насажен вспомогательный маленький генератор, э. д. с. которого, разумеется, зависит от числа оборотов его якоря. Измерение силы тока в цепи этого генератора позволяет измерять скорость вращения его якоря, если предварительно с помощью механического тахометра установлено соответствие между силой тока и числом оборотов якоря. Схема включения этого измерителя числа оборотов якоря и калибровочный график всей этой системы, носящей название таходинамы, прилагаются к установке задачи в практикуме.

Упражнение 1

Пуск в ход и остановка агрегата

1. При разомкнутых рубильниках всей схемы полностью вводят сопротивления всех реостатов.

2. Включают сетевой рубильник 1 и рубильник 2 в цепи возбуждения мотора. С помощью реостата R_1 устанавливают рекомендованную на установке силу тока возбуждения мотора.

3. Включают с помощью рубильника 3 цепь якоря мотора и, плавно уменьшая сопротивление пусковых реостатов R_2 и R_4 , доводят силу тока в якоре до рекомендованного значения.

4. Включают рубильник 4 и с помощью реостата R_3 устанавливают в цепи возбуждения генератора рекомендованное значение силы тока.

5. С помощью рубильника 5 включают нагрузку в цепь якоря генератора.

6. Упражнение завершается остановкой агрегата. Для этого все вышеуказанные операции по пуску установки выполняются в последовательности, обратной описанной выше. Это значит, что сначала выключается нагрузка в цепи генератора, затем уменьшается и выключается ток в якоре мотора и, наконец, уменьшается и выключается ток возбуждения мотора. После этого установка полностью отключается от сети рубильником 1.

Упражнение 2

Снятие характеристик работы мотора и генератора

1. Прежде всего снимаются пусковые характеристики холостого хода мотора. Таких характеристик снимается две. Первая характеристика должна дать зависимость числа оборотов мотора от силы тока возбуждения при неизменной силе тока в якоре и в условиях, когда все цепи генератора разомкнуты. Постоянное значение силы тока в якоре мотора и пределы изменения силы тока возбуждения указаны на установке. Вторая характеристика должна выразить зависимость числа оборотов холостого хода мотора от силы тока в его якоре (или от напряжения на якоре) при неизменной силе тока возбуждения. Необходимые для выполнения этого упражнения указания также приведены на установке.

2. Характеристики холостого хода генератора должны дать: 1) зависимость его электродвижущей силы от числа оборотов якоря при неизменной силе тока возбуждения, 2) зависимость электродвижущей силы генератора от силы тока возбуждения при неизменном числе оборотов якоря генератора в единицу времени. Рекомендуемые для снятия этих характеристик режимы работы генератора указаны на установке. Следует иметь в виду, что при определении зависимости электродвижущей силы генератора от тока возбуждения имеет

место гистерезис. Поэтому рекомендуется при снятии этой характеристики изменять силу тока возбуждения в одном направлении (скажем, в сторону ее увеличения).

3. Определение коэффициента полезного действия агрегата в целом производится следующим образом. Мотору задается определенное число оборотов в секунду. В цепи возбуждения генератора устанавливается определенное значение силы тока. В цепь генератора включается нагрузка в виде имеющихся на установке электрических ламп и измеряется сила тока в нагрузке и падение напряжения на ней. Рекомендуемые при этом режимы работы мотора и генератора указаны на установке. Отношение мощности, развиваемой в нагрузке, к общей мощности, потребляемой от сети всей установки, дает искомый коэффициент полезного действия агрегата.

Технические данные установки. В работе используются моторы типа УМТ-22; амперметры типа ЛМ-1 на 3 а, ЛМ-70 на 5 а; микроамперметр ЛМ на 500 ма; вольтметры типа АСТВ на 150—300 в, АМВ на 75—600 в, М-45 на 3—150 в; реостаты: $R_1 = 270 \text{ ом}$, 1 а, $R_2 = 309 \text{ ом}$, 0,9 а, $R_3 = 358 \text{ ом}$, 0,9 а, $R_4 = 367 \text{ ом}$, 1 а.

ЛИТЕРАТУРА

С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.

ЗАДАЧА 114

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ОПЕРАЦИОННОГО ЭЛЕМЕНТА НА УСИЛИТЕЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Введение. Метод исследования любого физического явления всегда состоит в построении его модели, отражающей в полной мере наиболее существенные стороны явления. Только после создания модели (логической схемы) становится возможным применение математических методов для разработки теории явления. Таким образом, модель воплощает в себе наиболее характерные признаки и не отражает признаков мало существенных, т. е. она должна, с одной стороны, достаточно полно отражать изучаемое явление, а с другой стороны, быть по возможности достаточно простой и наглядной. Эти требования в известной мере исключают друг друга. Выбор «наилучшей» из моделей, рассматриваемых предварительно в качестве гипотез, осуществляется на основе задаваемого критерия выбора путем изучения поведения каждой из них и сравнения с экспериментальными данными. Например, при изучении амортизации колебаний рессорной подвеской автомобиля в качестве модели может быть выбрана система, состоящая из шарика, подвешенного на пружинке. В самом деле, наиболее неприятно ощущаются при езде колебания корпуса, происходящие в вертикальной плоскости. Потребуем, чтобы модель достаточно полно описывала эту сторону

явления, которую мы считаем наиболее характерной. Этому критерию удовлетворяет выбранная нами система, находящаяся под воздействием вертикальной силы. Модель, очевидно, не отражает других типов колебаний, также возникающих в природе. Однако при своей простоте она качественно описывает основные эффекты, испытываемые при езде на автомобиле. Такая простейшая модель представляет собой физическую систему, поведение которой может быть описано с помощью линейного дифференциального уравнения второго порядка. Поведение более сложных моделей описывается обычно нелинейными уравнениями.

Правильный выбор критерия, умение абстрагироваться от несущественных сторон явления при решении поставленной задачи является главным искусством исследователя. Однако процесс решения получаемых уравнений часто оказывается трудоемким. В большинстве случаев решение дифференциальных уравнений (в особенности нелинейных) не удается найти в явном виде. Тогда единственным средством проверки адекватности моделей является применение вычислительной техники.

1. Назначение операционного элемента. В соответствии с различными принципами действия вычислительных машин различают устройства дискретного и непрерывного действия. Вычислительные машины дискретного действия позволяют получать численные решения в результате выполнения определенной последовательности арифметических операций по заранее установленной программе счета. Все преобразования в этих машинах сводятся к операции сложения.

Машины непрерывного действия работают по принципу математического моделирования. Математическое моделирование — это моделирование аналогиями, имеющими различную физическую природу, но описываемыми одинаковыми уравнениями. Оно часто применяется при решении задач по гидромеханике и аэродинамике. Например, модель самолета, обдуваемого воздухом. Происходящие в модели физические процессы являются решением математической задачи. В математическую модель вводится количественная информация в виде задаваемых физических величин. Такая модель выдает количественную информацию, представляющую собой численное решение уравнений, описывающих природу, т. е. является математической машиной. Обычно используют электрические модели, так как они удобны и позволяют изучать процессы при непрерывном изменении параметра системы. Электрическая модель какой-либо системы это специальная электрическая цепь, процессы в которой протекают аналогично процессам в рассматриваемой системе. Другими словами, дифференциальные уравнения, описывающие процессы, в обеих системах одинаковы. Преимуществами электрических моделей является простота набора схем и изменения их параметров, удобство и точность электрических изме-

рений, возможность осциллографической регистрации процессов во времени.

Наиболее распространенными электрическими моделями являются электронные моделирующие устройства, построенные из операционных элементов. Легкость перестройки электронных моделей позволяет в течение короткого времени проанализировать большое количество режимов работы исследуемой системы, выбрать оптимальные соотношения между параметрами, определить границы устойчивой работы и т. д.

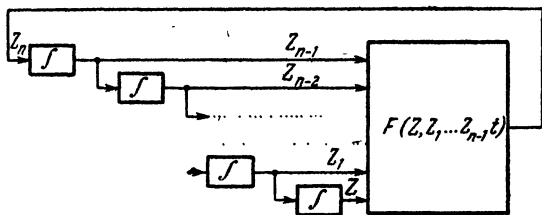


Рис. 1.

Неизвестная величина (z) представляется в модели в виде напряжения (Z) в определенном масштабе: $Z = Mz$, где M — постоянная величина. Теперь для моделирования в этом масштабе дифференциального уравнения n -го порядка

$$z^{(n)}(t) = F(z, z^1, \dots, z^{(n-1)}, t) \quad (1)$$

нужно, очевидно, моделировать следующее соотношение:

$$Z_n(t) = F(Z, Z_1, \dots, Z_{n-1}, t),$$

где

$$Z_{n-1}(t) = \int_0^t Z_n(t') dt', \quad Z_{n-2}(t) = \int_0^t Z_{n-1}(t') dt', \dots,$$

$$Z_1(t) = \int_0^t Z_2(t') dt', \quad Z(t) = \int_0^t Z_1(t') dt'.$$

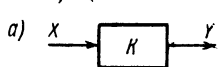
Электронная модель рассматриваемого общего случая представлена на рис. 1. В ней используется n интеграторов и осуществляется функциональное преобразование

$$Z_n(t) = F(Z, Z_1, \dots, Z_{n-1}, t). \quad (2)$$

Решение моделируемого уравнения в заданном масштабе получается как результат измерения напряжения $Z(t)$ ($z(t) = \frac{Z(t)}{M}$). Очевидно, что в общем случае требуются элементы, осуществляющие простейшие математические операции сложения, вычитания, умножения, деления, а также и другие функциональные преобразования.

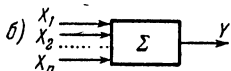
2. Устройство операционного элемента. Операционный элемент может выполнять следующие операции (рис. 2):

а) умножения $Y = -kX$, где X — напряжение на входе усилителя, Y — напряжение на выходе усилителя, k — положительное число, целое или дробное;



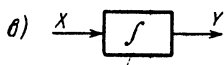
б) суммирования

$$Y = -(k_1 X_1 + k_2 X_2 + \dots + k_n X_n);$$



в) интегрирования

$$Y(t) = -\frac{1}{T_0} \int_0^t X(t') dt' + Y_0;$$



г) дифференцирования

$$Y(t) = -T_0 \frac{dX(t)}{dt}$$

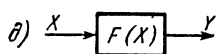
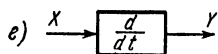


Рис. 2.

(Y_0 — постоянная интегрирования, T_0 — некоторая постоянная, смысл которой будет раскрыт ниже);

д) нелинейного преобразования $Y(t) = F(X)$, где $F(X)$ — нелинейная функция своего аргумента.

Знак «минус» указывает на то, что колебания на выходе операционного усилителя дополнительно сдвинуты на фазовый угол π по отношению к входному напряжению в соответствии с соотношением $e^{i\pi} = -1$.

Рассмотрим, каким образом осуществляется суммирование и усиление при помощи операционного усилителя. На рис. 3 представ-

лен усилитель, охваченный отрицательной обратной связью при помощи сопротивления R_0 . Напряжения, подлежащие суммированию и усилению X_1, X_2, \dots, X_n , подаются на вход усилителя через сопротивления R_1, R_2, \dots, R_n . Через сопротивление обратной связи R_0 течет ток, равный сумме токов, проходящих через сопротивление входов, т. е. можно написать:

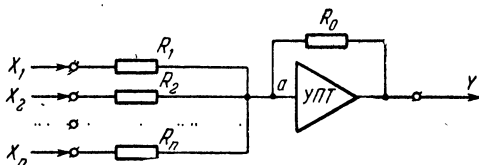


Рис. 3.

$$\frac{Y - U_a}{R_0} = \frac{U_a - X_1}{R_1} + \frac{U_a - X_2}{R_2} + \dots + \frac{U_a - X_n}{R_n},$$

где U_a — напряжение в точке a . Очевидно, что $U_a \approx Y/K$, где K — коэффициент усиления усилителя. Если коэффициент усиления сделать довольно большим (на практике $K \sim 10^6$), то величиной U_a

можно пренебречь, так как она мала по сравнению с входным и выходным напряжениями, которые суть величины одного порядка. Тогда

$$Y = -X_1 \frac{R_0}{R_1} - X_2 \frac{R_0}{R_2} - \dots - X_n \frac{R_0}{R_n} = - \sum_{j=1}^n X_j \frac{R_0}{R_j}.$$

Таким образом, с помощью схемы операционного усилителя, изображенного на рис. 3, можно производить операции сложения и умножения на постоянный множитель в соответствии с правилом

$$Y = - \sum_{j=1}^n k_j X_j, \quad (3)$$

где $k_j = R_0/R_j$ — коэффициент передачи по j -му входу. Следовательно, коэффициент передачи операционного элемента зависит только от соотношения сопротивлений и не зависит от коэффициента усиления усилителя K , если усиление велико. Поэтому усилитель должен иметь высокий коэффициент усиления во всем диапазоне частот входных напряжений, включая низкие и инфранизкие частоты (порядка единиц и долей герц), так как моделируемое напряжение является часто медленно меняющейся функцией времени, в том числе постоянной величиной. При этом условии коэффициент передачи операционного элемента не зависит от свойств самого усилителя. Операционный усилитель должен иметь определенный динамический диапазон выходных напряжений. Обычно напряжение на выходе операционного усилителя должно меняться в пределах ± 100 в; при этом усилитель в режиме умножения на коэффициент должен работать в линейном режиме. Этим требованиям удовлетворяет усилитель постоянного тока (УПТ) типа УУ-2, используемый в задаче.

Если вместо R_0 включить в цепь обратной связи конденсатор C , то получится интегратор (рис. 4, а). Действительно, имеет место приближенное равенство

$$-\frac{X}{R} = C \frac{dY}{dt}, \text{ т. е. } Y(t) = -\frac{1}{RC} \int X(t') dt' + Y_0. \quad (4)$$

$Y_0 \equiv Y(0)$ определяет начальное напряжение на выходе интегратора. Величина $T_0 = RC$ называется постоянной времени интегрирования и определяет по существу масштаб времени. Действительно,

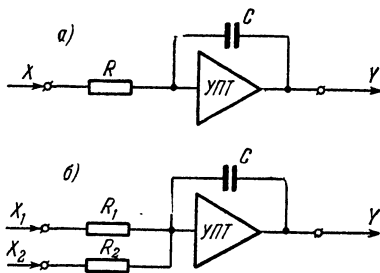


Рис. 4.

последнее соотношение можно переписать в виде

$$Y(t) = - \int_0^{t/RC} X(t'') dt'' + Y_0,$$

где

$$t'' = \frac{t'}{RC}.$$

Время моделируемого процесса течет как бы в $T_0 = RC$ раз медленнее реального времени. Поэтому величину T_0 называют масштабной единицей времени.

Если подать два напряжения X_1 и X_2 через входные сопротивления R_1 и R_2 , то получим суммирующий интегратор (рис. 4, б). Действительно в этом случае имеет место приближенное равенство

$$-\frac{X_1}{R_1} - \frac{X_2}{R_2} = C \frac{dY}{dt},$$

или

$$Y = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t X_1(t') dt' - \frac{1}{R_2 C} \int_0^t X_2(t') dt' + Y_0. \quad (5)$$

Интегрирование при помощи суммирующего интегратора может производиться, следовательно, с различными постоянными времени ($T_1 = R_1 C$ и $T_2 = R_2 C$).

В электронной моделирующей установке обычно предусматривают возможность задания определенного начального условия Y_0 при помощи задания соответствующего заряда на конденсаторе к моменту времени $t = 0$ (моменту начала интегрирования).

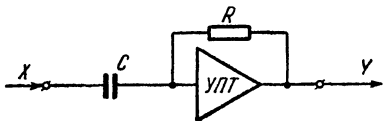


Рис. 5.

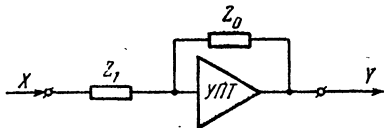


Рис. 6.

В случае гармонического сигнала на входе интегратора $X = X_m e^{j\omega t}$ (X_m — амплитуда сигнала), выходной сигнал может быть представлен в виде $Y = Y_m e^{j(\omega t + \varphi + \pi)}$ ($e^{j\pi} = -1$), где Y_m — амплитуда, а φ — фаза выходного сигнала. Как следует из (4), коэффициент передачи интегратора имеет вид

$$K(j\omega) \equiv \frac{Y}{X} = -\frac{1}{j\omega RC}. \quad (6)$$

Если в обратной связи усилителя включено омическое сопротивление R , а сигнал X подается через конденсатор C , то операционный элемент работает как дифференциатор (рис. 5), т. е.

$$-RC \frac{dX}{dt} = Y, \quad (7)$$

Коэффициент передачи дифференциатора равен

$$K(j\omega) \equiv \frac{Y}{X} = -j\omega RC. \quad (8)$$

В общем случае включения произвольных комплексных сопротивлений Z_0 и Z_1 (рис. 6) выходное напряжение Y может являться произвольной линейной функцией входного напряжения X , так как имеет место соотношение

$$Y = -\frac{Z_0}{Z_1} X. \quad (9)$$

Для получения нелинейной зависимости $Y = Y(X)$ требуется подобрать соответствующее функциональное сопротивление $Z_1 = Z_1(X)$ или $Z_0 = Z_0(X)$, величина которого зависит от входного

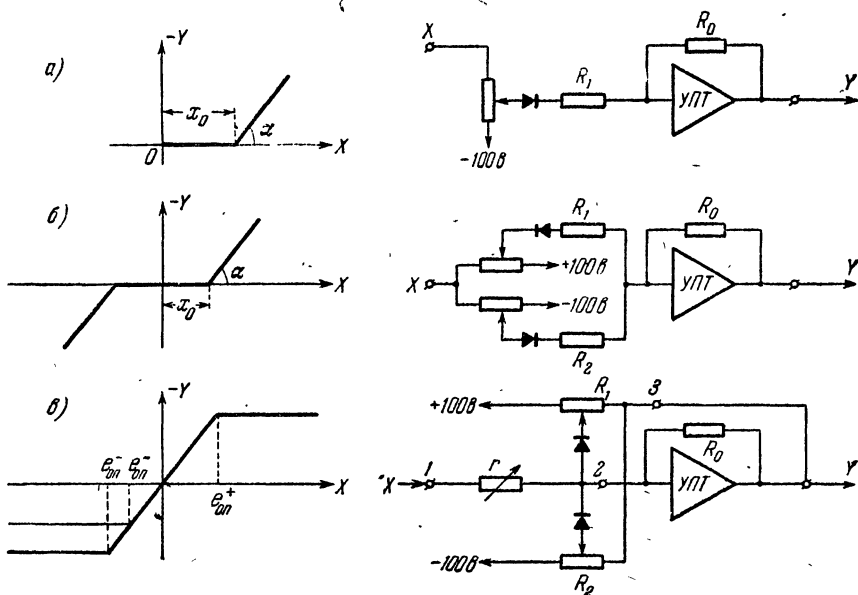


Рис. 7.

напряжения. В качестве этого нелинейного сопротивления применяют диодные схемы (диоды с последовательно включенными сопротивлениями).

При моделировании практических задач часто встречается необходимость в построении характерных нелинейностей таких, как зона нечувствительности, различные типы кусочно-непрерывных зависимостей, ограничение координат и т. п. Некоторые типовые нелинейности и способы их осуществления показаны на рис. 7.

Воспроизведение ломаной линии, представленной на рис. 7, а, производится путем сочетания диода с УПТ. Как известно, сопротивление диода зависит от поданных на него напряжений, т. е. диод обладает вентиляющим действием. Если потенциал анода превышает потенциал катода, то сопротивление диода резко падает и через него начинает проходить ток (диод отпирается). Сопротивление отпертого диода составляет десятки ом и им обычно можно пренебречь по сравнению с другими сопротивлениями цепи (в частности, R_1). Величина напряжения отпирающего диода (X_0) устанавливается при помощи потенциометра. Угол наклона прямой к оси абсцисс $\alpha = \text{arctg} \left(\delta \frac{R_0}{R_1} \right)$, где δ — коэффициент, учитывающий сопротивление потенциометра, включенного последовательно с диодом.

Для воспроизведения зоны нечувствительности (рис. 7, б) используются два диода, включенные последовательно с входными сопротивлениями R_1 и R_2 . Крутизну нарастания напряжения на выходе схемы можно изменять, меняя R_1 и R_2 .

При моделировании систем с ограничением выходной величины по модулю в цепь обратной связи включаются два диода (рис. 7, в). При малых значениях выходного напряжения $|Y| < e_{\text{он}}$ диоды заперты и коэффициент усиления определяется отношением сопротивлений R_0 и r . Сопротивление r меняется от 0,5 до 1 Мом, что соответствует изменению угла наклона линейной части α в широких пределах, если одновременно менять R_0 сопротивление обратной связи. При напряжении на выходе усилителя, равном наперед заданному $e_{\text{он}}$ ($|Y| \geq e_{\text{он}}$), откроется один из диодов и коэффициент усиления УПТ резко упадет. При этом напряжение на выходе системы будет оставаться постоянным при дальнейшем увеличении входного напряжения. Сдвоенное сопротивление R устанавливает величину $e_{\text{он}}$ ($e_{\text{он}}^+ = e_{\text{он}}^-$). На коммутационную плату выведены гнезда 1, 2 и 3, а также сопротивления r и R (« $e_{\text{он}}$ »).

Аналогично можно построить нелинейную зависимость произвольного вида, аппроксимируя ее кусочно-линейной кривой, получаемой путем различных сочетаний диодных элементов и потенциометрических схем с усилителями постоянного тока.

3. Модель линейной системы первого порядка. Построим теперь на базе операционного элемента систему, которая описывается при помощи дифференциального уравнения первого порядка (общего вида). Для этого можно использовать схему суммирующего интегратора (рис. 4, б), если в качестве X_2 подать напряжение с выхода УПТ (Y) ($X_1 \equiv X$ — входное напряжение). Тогда получаем

$$Y = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t X(t') dt' - \frac{1}{R_2 C} \int_0^t Y(t') dt'.$$

Дифференцируем по t обе части равенства и вводим обозначения

$$\alpha = \frac{1}{R_2 C}, \quad \beta = \frac{1}{R_1 C}.$$

Тогда уравнение, описывающее поведение полученной линейной системы, приобретает следующий вид:

$$\dot{Y} + \alpha Y = -\beta X(t). \quad (10)$$

Такая система называется линейной системой первого порядка. Ее можно моделировать, включая сопротивление R_3 параллельно конденсатору обратной связи C_0 , т. е. схему на рис. 4, б можно представить в соответствии с рис. 8, если в качестве R_2 взять R_3 , а в качестве C взять C_0 . Решение уравнения (10) имеет следующий вид:

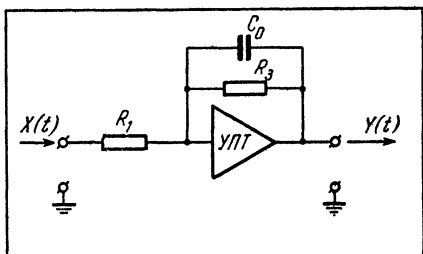


Рис. 8.

$$Y(t) = \left[-\int_0^t \beta X(t') e^{at'} dt' + Y_0 \right] e^{-at},$$

или

$$Y(t) = -\beta \int_0^t X(t') e^{-a(t-t')} dt' + Y_0 e^{-at}. \quad (11)$$

Физический смысл второго члена — это релаксация начального напряжения на конденсаторе (совпадающего с напряжением на выходе). Время релаксации $T_{\text{рел}} = \frac{1}{\alpha} = R_3 C_0$. Первый член дает отклик системы и на входное воздействие. При $\alpha = 0$ наша система представляет собой интегратор, и решение (11) переходит в (4).

Пусть на систему действует прямоугольный импульсный сигнал, принимающий значения $+a$ и $-a$, причем длительность τ как положительных, так и отрицательных импульсов много больше времени релаксации. Тогда решение может быть конкретизировано следующим образом. Допустим, что при $t = 0$ происходит переброс сигнала из $-a$ в $+a$ (рис. 9, а). Тогда для $t \geq 0$ имеем $X(t) = a$ и из (11) следует

$$Y^+(t) = -\frac{\beta}{\alpha} a [1 - e^{-at}] + Y_0^+ e^{-at}. \quad (12)$$

Очевидно, что при $t > T_{\text{рел}}$ можно считать, что решение не зависит от времени, т. е. $Y^+(t) \approx Y^+(\infty) = -\frac{\beta}{\alpha} a$ (стационарное решение).

Пусть при $t = 0$ происходит переброс сигнала $X(t)$ из $+a$ в $-a$. Тогда для $t > 0$ имеем $X(t) = -a$ и из (11) находим

$$Y^-(t) = \frac{\beta}{\alpha} a (1 - e^{-\alpha t}) + Y_0^- e^{-\alpha t}. \quad (13)$$

Аналогично $Y^-(t)$ при $t > T_{\text{перл}}$ практически не зависит от времени, т. е. $Y^-(t) \approx Y^-(\infty) = a\beta/\alpha$. Поэтому в качестве начальных условий Y_0^+ и Y_0^- при $\tau > T_{\text{перл}}$ необходимо брать стационарные решения:

$$Y_0^+ \approx Y^-(\infty) = \frac{\beta}{\alpha} a, \quad Y_0^- \approx Y^+(\infty) = -\frac{\beta}{\alpha} a.$$

Отсюда и из (12) и (13) имеем (рис. 9, а и б)

$$-Y^+(t) = \frac{\beta}{\alpha} a [1 - 2e^{-\alpha t}] \quad (14)$$

$$(t \geq 0, X = a),$$

$$-Y^-(t) = -\frac{\beta}{\alpha} a [1 - 2e^{-\alpha t}] \quad (15)$$

$$(t \geq 0, X = -a).$$

В случае гармонического сигнала $X = X_m e^{j\omega t}$ выходное колебание можно записать в виде $Y = Y_m e^{j(\omega t + \varphi + \pi)}$. Как следует из (10), коэффициент передачи линейной системы первого порядка равен

$$K(j\omega) \equiv \frac{Y}{X} = -\frac{1}{(j\omega C_0 + \frac{1}{R_3}) R_1} = -\frac{\beta}{\alpha + j\omega}.$$

(16)

Очевидно, что при $\alpha = 0$ мы получаем коэффициент передачи интегратора. Помимо изменения амплитуды в $k = Y_m/X_m$ раз, выходной сигнал в общем случае имеет сдвиг по фазе $\pi + \varphi$ по отношению к входному сигналу. Зависимость коэффициента усиления от частоты $k = k(\omega)$ носит название *амплитудно-частотной характеристики*. Зависимость $\varphi = \varphi(\omega)$ называется *фазово-частотной характеристикой*. Очевидно, что

$$K(j\omega) = -k(\omega) e^{j\varphi(\omega)}. \quad (17)$$

Тогда $k(\omega) = \sqrt{K(j\omega) K^*(j\omega)}$, а

$$\text{tg } \varphi(\omega) = \frac{\text{Im} [K(j\omega)]}{\text{Re} [K(j\omega)]}, \quad (18)$$

где значком * отмечена комплексно-сопряженная величина. Отсюда получаем для линейной системы первого порядка следующие значения для коэффициента усиления по амплитуде и фазового сдвига:

$$k = \frac{\beta}{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}}, \quad \text{tg } \varphi = -\frac{\omega}{\alpha}. \quad (19)$$

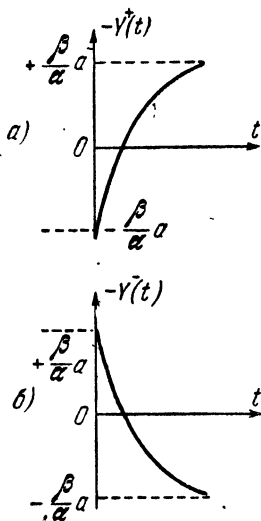


Рис. 9.

Таким образом, фазовый сдвиг между $Y(t)$ и $X(t)$ равен $\pi + \varphi$, где

$$\varphi = -\operatorname{arctg} \frac{\omega}{\alpha}.$$

Для интегратора ($\alpha \rightarrow 0$), очевидно, имеем $k = 1/\omega T_0$ и $\varphi = -\pi/2$. Сравнивая (17) и (18) с (8), для дифференциатора получаем $k = \omega T_0$ и $\varphi = \pi/2$.

4. Конструкция операционного элемента. Различные операционные элементы могут быть осуществлены при помощи прибора, содержащего УПТ, сопротивления обратной связи R_0 и R_3 , интегрирующую емкость C_0 , входные сопротивления R_1 и R_2 , входную емкость C_1 , а также диодную схему ограничения с регулируемой крутизной линейной части (r) и потенциалом ограничения выходных

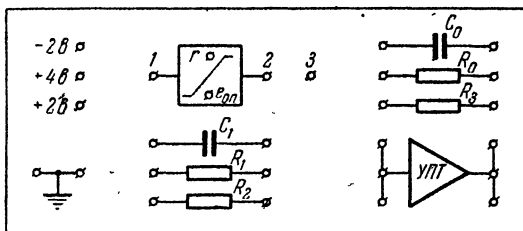


Рис. 10. Общий вид коммутационной платы.

$R_1 = 1,0 \text{ Мом}$, $R_2 = 100 \text{ ком}$, $R_0 = 1,0 \text{ Мом}$, $R_3 = 100 \text{ ком}$.

напряжений ($e_{\text{оп}}$). Съемная верхняя крышка, на которой расположены гнезда, соединенные с указанными сопротивлениями и емкостями в соответствии с рис. 10, представляет собой коммутационную плату. Коммутация (соединение) компонент схемы осуществляется при помощи соединительных проводников, прилагаемых к задаче.

Для подачи постоянных потенциалов и напряжения накала ламп на операционный усилитель используется специальный кабель питания, подключаемый одним концом к источнику стабилизированного напряжения, другим — к штепсельному разъему, находящемуся на боковой стенке операционного элемента.

Включение усилителя производится тумблерами «накал» и «высокое», расположенными на передней стенке усилителя. Сначала включается тумблер «накал» и после 30—40 сек — тумблер «высокое». Перед работой УПТ должен хорошо прогреться.

Подготовка к измерениям. Включить УПТ и дать ему прогреться в течение 10—15 мин. В качестве входного сопротивления включить $R_2 = 100 \text{ ком}$, а в качестве сопротивления обратной связи $R_0 = 1 \text{ Мом}$. Другой конец R_2 заземлить. Подключить к выходу операционного элемента нуль-индикатор, включив предварительно на нем самую грубую шкалу (рис. 11). Регулируя величину

сопротивления («установка нуля»), добиться, чтобы прибор на выходе УПТ показывал нуль напряжения. Отключить нуль-индикатор. Включить в сеть низкочастотный генератор (НГ), ламповый вольтметр (ВК7-4) и осциллограф (С1-4). Дать им прогреться в течение

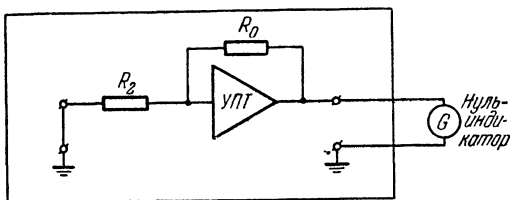


Рис. 11.

нескольких минут. Установить на осциллографе чувствительность 300 мв/мм. Диапазон развертки поставить на 0,3 гц. Соединить земли НГ, осциллографа и УПТ.

Упражнение 1

Изучение умножения на коэффициент и суммирования

а) Умножение на постоянный коэффициент. К выходу УПТ подсоединить осциллограф, ко входу — НГ в соответствии с рис. 12. Включить НГ в режим гармонических колебаний и установить частоту $f = 10$ гц и амплитуду $X_m = 1$ в. Включая R_0 , R_2 в качестве Z_0 , Z_1 , установить максимальный коэффициент

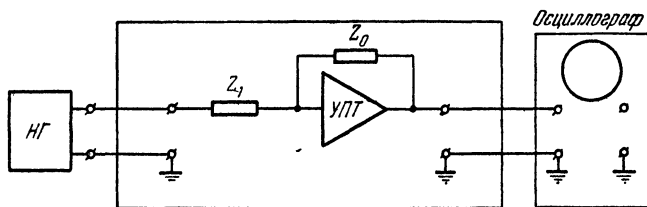


Рис. 12.

передачи элемента, равный 10. Регулируя ручки разверток «амплитуда» и «плавно», получить развертку на весь экран, чтобы во всей картине наблюдалось два-три периода колебаний. Регулировками «чувствительность плавно» и «коррекция нуля» добиться, чтобы выходной сигнал на экране осциллографа был расположен между двумя горизонтальными линиями (рисками), не вылезая за них. В дальнейшем эти регулировки не менять! Вместо R_0 подключить R_3 и увеличить чувствительность осциллографа до 30 мв/мм, не трогая плавной регулировки. Убедиться в том, что картина на экране

осталась прежней. Определить цену деления сетки на экране осциллографа. Уменьшить вновь чувствительность осциллографа до 300 мв/мм и восстановить картину, подавая амплитуду входного сигнала $X_m = 10$ в. Проверить при помощи изменения чувствительности осциллографа, что подключение R_1 вместо R_2 в качестве входного сопротивления ведет к уменьшению коэффициента передачи в десять раз (по сравнению с первоначальным усилением в 100 раз).

б) К а л и б р о в к а п е р е м е н н о г о к о э ф ф и ц и е н т а у с и л е н и я и у р о в н я о г р а н и ч е н и я п о м о д у л ю. Упражнение производится в соответствии с рис. 12, где в качестве Z_1 включается переменное сопротивление, а в качестве Z_0 — сопротивление обратной связи R_0 и шунтирующая его диодная схема. Для этого соединить гнездо 2 со входом, а гнездо 3 с выходом УПТ (рис. 7, в) и подать гармонический сигнал на гнездо 1. Вывести на максимум потенциометры $e_{оп}$ и r , вращая их по часовой стрелке. Установить частоту входного сигнала $f = 1$ гц, амплитуду $X_m = 5$ в. Меняя величину входного сопротивления r , определить при помощи осциллографа коэффициент усиления, соответствующий каждому делению потенциометра r , т. е. откалибровать r . Построить график зависимости коэффициента k от положения потенциометра.

Установить при помощи потенциометра r амплитуду выходного напряжения, равную $Y_m = 10$ в (сигнал между рисками). Вращая потенциометр $e_{оп}$, определить положение его ручки, при котором начинается ограничение выходного сигнала по модулю ($e_{оп} = 10$ в). Откалибровать потенциометр $e_{оп}$, т. е. построить зависимость $e_{оп}$ от деления шкалы потенциометра. Зарисовать картины, получающиеся на экране осциллографа при различных $e_{оп}$. Отключить гнездо 3 от выхода УПТ, а гнездо 2 от его входа.

в) С н я т и е а м п л и т у д н о - ч а с т о т н о й х а р а к т е р и с т и к и. Снять амплитудно-частотную характеристику УПТ. В качестве входного сопротивления включить $R_1 = 1$ Мом, а в качестве сопротивления обратной связи $R_0 = 1$ Мом. Менять частоту входного колебания с НГ от 1 до 10 гц. Установить амплитуду входного напряжения $X_m = 10$ в. Выходное напряжение измеряется при помощи осциллографа. Построить график $k = k(f)$ в логарифмическом масштабе, т. е.

$$\lg k = k'(\lg f).$$

г) О п р е д е л е н и е с д в и г а ф а з. Определить сдвиг по фазе между входными и выходными колебаниями для частоты $f = 1$ гц при помощи фигур Лиссажу (см. задачу 109). Для этого составить схему, изображенную на рис. 13, включив R_0 в качестве Z_0 , а R_1 — в качестве Z_1 . Необходимо учесть, что вход напряжения на пластины X осциллографа С1-4 находится сверху. Тумблер «пластины X », находящийся там же, должен быть включен.

Полученную на экране осциллографа картину зарисовать. Измерить сдвиг по фазе для различных частот в диапазоне от 1 до 10 гц. После измерений выключить тумблер «пластины X».

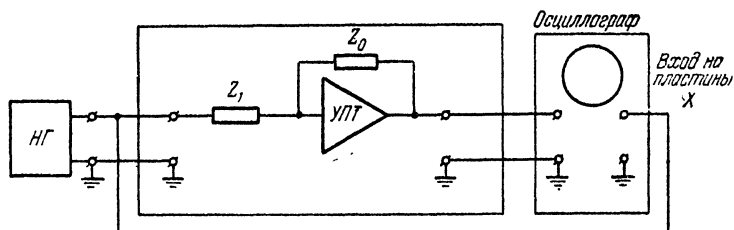


Рис. 13.

д) Суммирование. Суммирующее действие УПТ с замкнутой обратной связью можно проверить, подключая ко входам R_1 и R_2 постоянные напряжения $+4$, $+2$, а затем -2 , $+2$ в с выхода

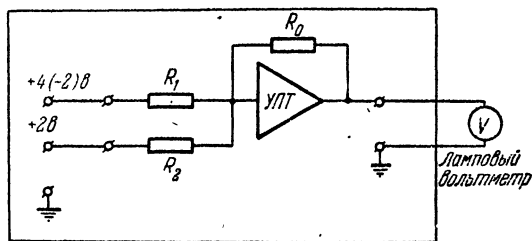


Рис. 14.

соответствующих гнезд. Включить R_0 и R_3 в качестве сопротивления обратной связи (рис. 14 и 10). Измерение выходного напряжения осуществляется при помощи лампового вольтметра.

Упражнение 2

Изучение электронного интегрирования

а) Определение постоянной времени интегрирования. Подключить к выходу УПТ осциллограф, а на вход операционного усилителя подать прямоугольные колебания с выхода НГ, амплитуду $a = 10$ в, частоту $f = 1$ гц (рис. 12). Включить в качестве Z_0 сопротивление R_0 , а в качестве Z_1 сопротивление R_1 и зарисовать прямоугольные колебания. Заменить R_0 на C_0 и наблюдать на осциллографе эффект интегрирования. Полученную картину также зарисовать. Ту же процедуру повторить для треугольных импульсов с выхода НГ.

Отключить осциллограф и подключить к выходу ламповый вольтметр, включив шкалу 150 в. Разрядить C_0 , включая на короткое

время специальный тумблер «Разряд C_0 », который закорачивает конденсатор на сопротивление разряда R_x (рис. 15). Одновременно с подключением $+2$ в от источника постоянного напряжения ко входу интегратора пустить секундомер и измерить время t , в течение которого напряжение на выходе схемы возрастает до 100 в. Перед тем как проделать следующее измерение, необходимо при помощи тумблера «разряд C_0 » установить нулевое начальное условие (разрядить емкость C_0). Аналогичную процедуру повторить, подключив R_2 в качестве входного сопротивления. Определить величину емкости C_0 в обоих случаях, исходя из соотношения

$$Y(t) = -\frac{1}{T_0} \int_0^t X(t') dt' = -\frac{a}{T_0} t \quad (Y(t) = 100 \text{ в}, a = +2 \text{ в}),$$

где $T_0 = RC_0$ — постоянная интегрирования.

б) Снятие амплитудно-частотной характеристики. В качестве входного сопротивления подключить $R_1 = 1$ Мом. На вход интегратора подать гармонический сигнал с генератора, устанавливая амплитуду X_m такой, чтобы на частоте $f = 1$ гц выходной сигнал располагался между рисками осциллографа. X_m в дальнейшем не менять. Частоту входного колебания менять от 1 до 10 гц. Подключить к выходу УПТ осциллограф, измерить выходное напряжение, следя за тем, чтобы форма выходного сигнала не искажалась. Построить график $k = k(f)$ в логарифмическом масштабе. Амплитудно-частотную характеристику снять также для $R_2 = 100$ ком, включенного во входную цепь вместо R_1 .

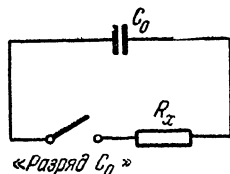


Рис. 15.

Определить угловой коэффициент полученных отрезков прямых, построенных на одном графике. Доказать, что интегрирование происходит в соответствии с формулой

$$Y(t) = -\frac{1}{T_0} \int_0^t X_m \cos \omega t' dt' = -\frac{1}{T_0} \frac{X_m}{\omega} \sin \omega t.$$

в) Определение сдвига фаз. Наблюдать сдвиг фаз, вносимый интегратором по фигурам Лиссажу. Установить частоту НГ, равную 1 гц. Измерить разность фаз между входными и выходными колебаниями на интеграторе при помощи осциллографа, аналогично процедуре, указанной в упражнении 1 (рис. 13). Зарисовать полученную на экране осциллографа картину и определить сдвиг фаз, вносимых интегратором. Меняя частоту входного гармонического сигнала от 1 до 10 гц, установить, как меняется сдвиг фаз входного и выходного напряжений.

Упражнение 3

Изучение электронного дифференцирования

а) Наблюдение работы дифференцирования. Подключить к выходу УПТ осциллограф, а на вход операционного усилителя подать треугольные колебания с НГ амплитуды $a = 99$ в, частоты $f = 10$ гц (рис. 12). Включить в качестве Z_0 сопротивление R_3 , а в качестве Z_1 сопротивление R_1 . Заменить R_1 на C_1 и наблюдать эффект дифференцирования. Полученные картинку зарисовать. Включить горизонтальные пластины осциллографа при помощи тумблера «пластины X» (вверху осциллографа) и наблюдать фигуру Лиссажу (рис. 13). Полученную картинку зарисовать и с ее помощью доказать, что прямоугольные колебания на выходе суть продифференцированные треугольные колебания на входе.

б) Снятие амплитудно-частотной характеристики дифференциатора. В обратную цепь усилителя включить сопротивление $R_3 (= 100 \text{ ком})$, во входную цепь — конденсатор C_1 . Подать на вход УПТ гармонический сигнал с генератора и менять частоту сигнала от 1 до 10 гц. Амплитуду входного сигнала X_m установить так, чтобы на частоте 10 гц выходной сигнал занимал все пространство между рисками. Амплитуда выходного сигнала измеряется при помощи осциллографа. Построить график $k = k(f)$ в логарифмическом масштабе и определить из него величину C_1 . Амплитудно-частотную характеристику снять также для $R_0 = 1 \text{ Мом}$, включенного вместо R_3 в обратную связь.

в) Измерение сдвига фаз между входным и выходным напряжениями дифференциатора. Делается так же, как для интегратора. Картина, полученная на экране осциллографа, зарисовывается в тетрадь.

Упражнение 4

Моделирование линейной системы первого порядка ¹⁾

а) Наблюдение выходного напряжения. Собрать модель линейной системы первого порядка в соответствии с рис. 8, не подключая сопротивления R_3 . Снять остаточный заряд с емкости C_0 при помощи тумблера «разряд C_0 » и зарядить ее, подсоединив к источнику +4 в. Подключить осциллограф к выходу УПТ и наблюдать начальное напряжение на входе («начальное условие»). Включить в обратную связь УПТ сопротивление R_0 и наблюдать на экране осциллографа релаксацию начального условия. Полученную картину зарисовать. Заменить R_0 на R_3 .

¹⁾ Упражнение дополнительное. Выполняется по указанию преподавателя.

Подключить НГ ко входу УПТ и переключить его в режим прямоугольного сигнала. Установить частоту следования импульсов $f = 1$ гц, амплитуду $a = 50$ в. Сравнить полученную на экране осциллографа картину с картиной, полученной при прямом присоединении НГ к осциллографу. Обе картины зарисовать.

б) Снятие амплитудно-частотной характеристики. Переключить НГ в режим гармонического сигнала, установив амплитуду входного напряжения X_m так, чтобы на частоте $f = 1$ гц сигнал на выходе занимал все пространство между рисками. Поддерживая X_m постоянным, менять частоту от 1 до 20 гц. Измерять одновременно амплитуду выходного напряжения при помощи осциллографа. Построить график $k = k(f)$ в логарифмическом масштабе. При помощи тумблера «разряд C_0 » вместо R_3 подключить к емкости C_0 неизвестное сопротивление R_x . Снять для него амплитудно-частотную характеристику и определить величину сопротивления.

в) Снятие фазово-частотной характеристики. Включить операционный усилитель по схеме, приведенной на рис. 13. Установить частоту входного сигнала, равную 1 гц. Измерить разность фаз между входными и выходными колебаниями при помощи фигур Лиссажу. Меняя частоту в пределах от 1 до 20 гц, измерить разность фаз и построить графики $\varphi = \varphi(\omega)$ для обоих сопротивлений R_3 и R_x .

Технические данные установки. В работе используются операционный элемент на базе УУ-2, стрелочный индикатор напряжения (нуль-индикатор), низкочастотный генератор НГПК-3М, осциллограф С1-4, ламповый вольтметр ВК7-4, секундомер.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. Калашников, Электричество, «Наука», 1964.
2. И. М. Тетельбаум, Электрическое моделирование, Физматгиз, 1959.
3. Б. Я. Коган, Электронные моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования, Физматгиз, 1963.
4. Г. Корн и Т. Корн, Электронные моделирующие устройства на постоянном токе, ИЛ, 1955.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

5. С. П. Стрелков, Введение в теорию колебаний, «Наука», 1964.
6. А. А. Харкевич, Теоретические основы радиосвязи, Гостехиздат, 1957.

ЗАДАЧА 115

ЭЛЕКТРОННАЯ МОДЕЛЬ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ОДНОЙ СТЕПЕНЬЮ СВОБОДЫ

Введение. Построение моделей является неотъемлемой частью научного мышления человека. Создавая модель изучаемого объекта или явления, исследователь отвлекается от многочисленных его

свойств, несущественных в данный момент. Модель должна быть достаточно проста по сравнению со своим оригиналом, чтобы сделать возможным его изучение. С другой стороны, она должна правильно воспроизводить основные свойства оригинала с точки зрения проводимого исследования.

Математическое моделирование основывается на одинаковом математическом описании процессов, происходящих в оригинале и в модели, т. е. поведение оригинала и модели, имеющих различную физическую природу, описывается одними и теми же дифференциальными уравнениями. С помощью математической модели производится решение этих уравнений, тем самым исследуются процессы, происходящие в оригинале.

Модели, в которых математические операции выполняются путем простого математического сложения, называются цифровыми

вычислительными машинами. Результат их решения выдается дискретно. В других моделях операции осуществляются на основе некоторых физических законов, которые дают необходимые математические зависимости между величинами. В этом случае результат решения представляется непрерывными функциями времени.

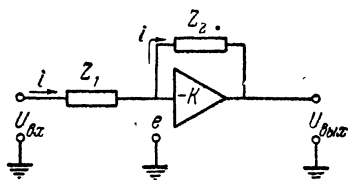


Рис. 1.

Такие модели называются непрерывными или аналоговыми вычислительными машинами. Вычислительные машины чаще всего состоят из электронных или магнитных элементов, поскольку измерение величин и регулировка параметров в цепях с такими элементами осуществляется наиболее просто и точно.

Целью настоящей работы является изучение простейшей электронной математической модели непрерывного действия.

Краткое описание устройства и принципа действия электронных моделей. Электронные моделирующие установки собираются из решающих элементов, с помощью которых могут выполняться различные математические операции. Решающий элемент состоит из усилителя постоянного тока, у которого в прямой цепи включено сопротивление Z_1 , а в обратной — Z_2 (рис. 1).

Чтобы установить связь между напряжениями на входе элемента $U_{вх}$ и на его выходе $U_{вых}$, используют уравнения Кирхгофа. При этом полагают, что токи в цепях прямой и обратной связи равны ¹⁾

$$\begin{cases} U_{вх} - e = iZ_1, \\ e - U_{вых} = iZ_2, \end{cases} \quad (1)$$

¹⁾ Такое предположение является вполне справедливым, поскольку ток входной сетки усилителя много меньше токов цепей прямой и обратной связи.

где e — напряжение на входной сетке усилителя. Кроме того,

$$U_{\text{вых}} = -Ke, \quad (2)$$

где K — коэффициент усиления разомкнутого усилителя. Если из полученной системы уравнений (1) и (2) исключить величины e и i , то получим

$$U_{\text{вых}} = -\frac{\frac{Z_2}{Z_1}}{1 + \frac{1}{K} \left(\frac{Z_2}{Z_1} + 1 \right)} U_{\text{вх}}. \quad (3)$$

Множитель, стоящий при $U_{\text{вх}}$, называется коэффициентом передачи элемента. Обычно коэффициент усиления K разомкнутого усилителя очень велик (10^4 — 10^7), и коэффициент передачи элемента с высокой степенью точности равен $-Z_2/Z_1$, т. е.

$$U_{\text{вых}} = -\frac{Z_2}{Z_1} U_{\text{вх}}. \quad (4)$$

Таким образом, коэффициент передачи элемента зависит только от сопротивлений цепей прямой и обратной связи.

Так как эти цепи собираются из омических сопротивлений, конденсаторов и катушек индуктивности, то Z_1 и Z_2 являются комплексными функциями частоты. Характер функций $Z_1(\omega)$ и $Z_2(\omega)$ определяет вид операции, выполняемой элементом.

Когда в прямой и обратной цепях элемента включены омические сопротивления, т. е. $Z_1(\omega) = R_1$, $Z_2(\omega) = R_2$, то коэффициент передачи не зависит от частоты, и элемент производит умножение входного напряжения на постоянный множитель

$$U_{\text{вых}} = -aU_{\text{вх}}, \quad \text{где } a = \frac{R_2}{R_1}. \quad (5)$$

Такой элемент называется *масштабным множителем* и обозначается, как показано на рис. 2, a .

Когда в прямой цепи включено омическое сопротивление R , а в обратной — конденсатор C , т. е. $Z_1(\omega) = R$, $Z_2(\omega) = 1/j\omega C$, то

$$U_{\text{вых}} = -\frac{1}{j\omega CR} U_{\text{вх}}. \quad (6)$$

Пусть $U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}^{(0)} e^{j\omega t}$. Тогда выражение (6) можно переписать в виде

$$U_{\text{вых}} = -\frac{U_{\text{вх}}^{(0)}}{RC} \int e^{j\omega t} dt,$$

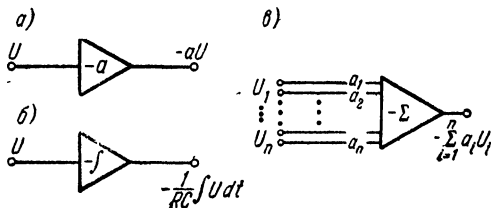


Рис. 2.

т. е. выходное напряжение элемента пропорционально интегралу от напряжения на его входе

$$U_{\text{вх}} = -\frac{1}{RC} \int U_{\text{вх}} dt. \quad (7)$$

Такой решающий элемент называется *интегратором* и обозначается, как показано на рис. 2, б.

Решающие элементы могут иметь по несколько входных цепей. Можно показать, что в этом случае одновременно с описанными операциями производится суммирование напряжений, поданных на входы элементов. Так, масштабный множитель становится *сумматором*, который выполняет операцию

$$U_{\text{вых}} = -\sum_{i=1}^n a_i U_{\text{вх } i}; \quad (8)$$

a_i называется коэффициентом передачи сумматора по i -му входу.

Принцип действия электронной модели рассмотрим на примере решения линейного дифференциального уравнения четвертого порядка:

$$U^{(IV)}(t) + a_3 U^{(III)}(t) + a_2 U^{(II)}(t) + a_1 U^{(I)}(t) + a_0 U(t) + bf(t) = 0, \quad (9)$$

где все коэффициенты a_i положительны. Учитывая, что $U^{(n-1)}(t) = \int_0^t U^{(n)}(\tau) d\tau$, разрешим уравнение относительно старшей производной

$$\begin{aligned} U^{(IV)}(t) = & -a_3 \int_0^t U^{(IV)}(\tau_1) d\tau_1 - a_2 \int_0^t d\tau_2 \int_0^{\tau_2} U^{(IV)}(\tau_1) d\tau_1 - \\ & - a_1 \int_0^t d\tau_3 \int_0^{\tau_3} d\tau_2 \int_0^{\tau_2} U^{(IV)}(\tau_1) d\tau_1 - a_0 \int_0^t d\tau_4 \int_0^{\tau_4} d\tau_3 \int_0^{\tau_3} d\tau_2 \int_0^{\tau_2} U^{(IV)}(\tau_1) d\tau_1 - \\ & - bf(t). \quad (10) \end{aligned}$$

Чтобы определить искомую функцию $U(t)$, необходимо четырежды проинтегрировать правую часть выражения (10). Для этого поступим следующим образом. Пусть в некоторой точке A имеется напряжение $U^{(IV)}(t)$, равное правой части выражения (10). Подав его на цепочку последовательно соединенных интеграторов, получим на выходе первого из них напряжение, равное $-U^{(III)}(t)$, на выходе второго $+U^{(II)}(t)$, на выходе третьего $-U^{(I)}(t)$, на выходе четвертого $+U(t)$.

С помощью решающих элементов, умножающих на « -1 », образуем из напряжений $-U^{(III)}(t)$ и $-U^{(I)}(t)$ соответственно $+U^{(III)}(t)$ и $+U^{(I)}(t)$. Затем на сумматоре « $-\Sigma$ » сложим напряжения $+U^{(0)}(t)$, $+U^{(I)}(t)$, $+U^{(II)}(t)$, $+U^{(III)}(t)$ с коэффи-

ентами a_0, a_1, a_2, a_3 . Кроме того, на вход с коэффициентом передачи b подадим напряжение $f(t)$. Как следует из уравнения (10), на выходе сумматора получим напряжение $U^{(IV)}(t)$, которое подадим в точку A .

В модели, собранной по такой структурной схеме, функции $U, U^{(I)}, U^{(II)}, U^{(III)}, U^{(IV)}$ представляют собой решение уравнения и его производные. Эти функции можно фиксировать, например, с помощью осциллографа или вольтметра. Для этого приборы подключаются к выходам соответствующих решающих элементов. Начальные условия при решении уравнения на модели задаются в момент запуска модели; с которого начинается отсчет времени, в виде напряжений в соответствующих точках системы.

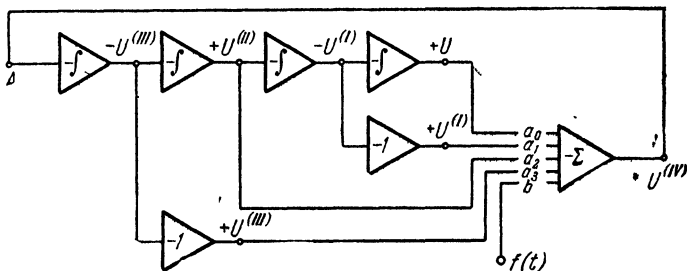


Рис. 3.

Если некоторые коэффициенты a_i отрицательны, i -е производные в схеме, изображенной на рис. 3, должны быть умножены на -1 с помощью дополнительных масштабных множителей.

Постановка задачи. В задаче изучается электронная модель для решения уравнения колебаний линейной системы с одной степенью свободы. Так, движение груза на пружинке в среде с трением описывается уравнением

$$m\ddot{y} = -ky - h\dot{y} + F_0 \cos pt \quad \text{или} \quad \ddot{y} = -\omega_0^2 y - 2\delta\dot{y} + F \cos pt, \quad (11)$$

где $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ — собственная круговая частота колебаний, $\delta = h/2m$ — коэффициент затухания, $F = F_0/m$ — амплитуда внешней силы, отнесенная к массе.

Структурная схема модели, составленная аналогично описанному выше приему, представлена на рис. 4. Коэффициенты усиления сумматора по входам 1, 2, 3 равны соответственно ω_0^2 , 2δ и 1. Видно, что напряжения на выходах элементов модели, собранной по такой схеме, связаны таким же уравнением, как смещение, скорость и ускорение груза, поэтому в модели можно наблюдать такие же закономерности, как и при колебании груза. Так, в модели возникают собственные колебания, если имеется начальное смещение $y(0)$ или начальная скорость $\dot{y}(0)$. Частота колебаний определяется коэффициентом передачи сумматора по входу ω_0^2 , быстрота

затухания — коэффициентом усиления по входу 2δ . Регулируя эти коэффициенты передачи, можно менять независимо ω_0 и δ , и тем самым получать электронную модель грузов, колеблющихся с различными собственными частотами и коэффициентами затухания. Когда коэффициент затухания равен нулю, что в модели эквивалентно размыканию цепи

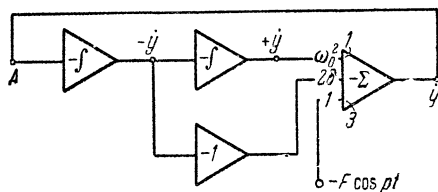


Рис. 4.

внешнего воздействия p , совпадающей с собственной частотой ω_0 , в модели наступает явление резонанса с характерным для него увеличением амплитуды колебаний.

Таким образом, электронная модель, собранная по схеме рис. 4, является математическим аналогом колебаний грузов на пружинке.

Часто коэффициенты усиления элементов модели выбирают несколько иначе. Так, для всех входов сумматора их удобно взять равными -1 , тогда как у каждого интегратора $-\omega_0$, а у масштабного множителя $-1/Q = -2\delta/\omega_0$. Измененная структурная схема изображена на рис. 5.

Здесь на выходе сумматора образуется напряжение, пропорциональное ускорению груза, на выходе первого интегратора — скорости, умноженной на частоту. Напряжение на втором интеграторе, пропорциональное $\omega_0^2 y$, можно рассматривать как аналог упругой силы, отнесенной к массе и взятой с обратным знаком. Наконец, напряжение на выходе масштабного множителя $-1/Q$ является аналогом силы трения.

Описание установки. Электронная модель 1 собрана на четырех стандартных усилителях постоянного тока типа УУ-2. Усилители имеют вид отдельных блоков, которые вставляются в пазы, расположенные на передней панели установки (рис. 6). Электрически усилители соединяются с установкой двадцатиштырьковыми разъемами. На передней панели каждого блока находится шлиц потенциометра для установки нуля усилителя и сигнальная лампочка, загорающаяся при его перегрузке.

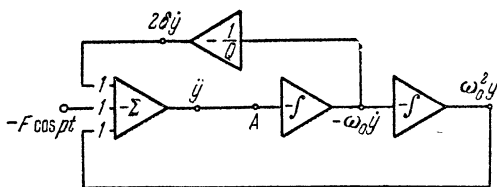


Рис. 5.

Соединение усилителей согласно структурной схеме производится на наборном поле (рис. 7). Для этого на наборное поле выведены входы и выходы усилителей и цепи прямой и обратной связи. Набор схемы осуществляется при помощи гибких шнуров со штекерами.

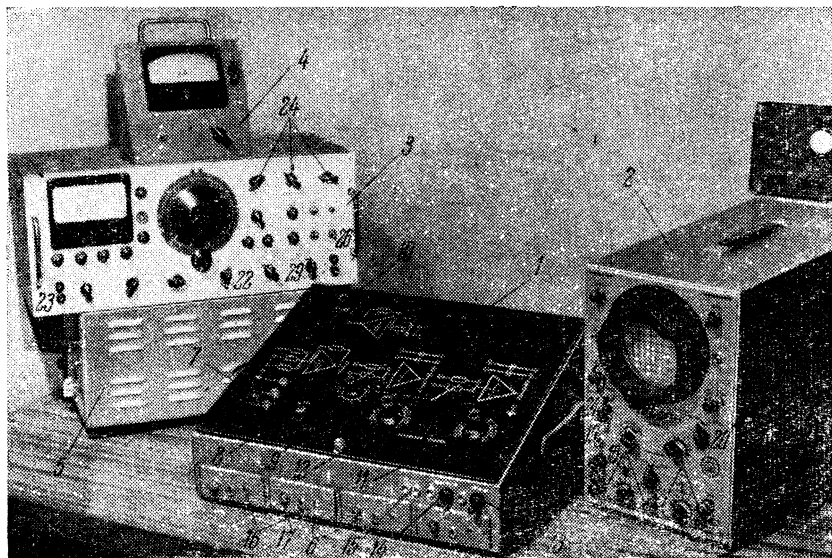


Рис. 6. Общий вид установки.

1 — электронная модель, 2 — осциллограф И-5М, 3 — генератор НГПК-3М, 4 — нуль-индикатор, 5 — блок питания электронной модели. Электронная модель: 6 — усилители постоянного тока УУ-2, 7 — переключатель режимов, 8 — тумблер T_1 , 9 — регулировка P_{ω} , 10 — регулировка P_1/Q , 11 — регулировка для установки «начального смещения» груза, 12 — регулировка для установки «начальной скорости» груза, 13 — тумблер T_2 , 14 — тумблер T_3 , 15 — сигнальные лампочки, 16 — шлиц для установки нуля усилителя, 17 — сигнальная лампочка для контроля работы усилителя. Осциллограф: 18 — вертикальный вход «1», 19 — коммутатор входа, 20 — переключатель работы горизонтального входа, 21 — переключатель режимов работы осциллографа. Генератор: 22 — включение питания генератора, 23 — выход «1» генератора, 24 — установка амплитуды напряжения на выходе «1», 25 — переключатель диапазонов частоты генератора, 26 — запуск генератора.

На наборном поле находится «переключатель режимов» решающих элементов. В положении «работа» входы усилителей соединены со своими входными цепями, и в модели с набранной структурной схемой осуществляется решение уравнения (11). В режиме «стоп» входные цепи интеграторов отключаются от усилителей. Процесс решения задачи останавливается, и на выходах интеграторов запоминаются мгновенные значения напряжений в момент остановки. В положении «начальные условия» во входные цепи интеграторов включаются делители, с помощью которых устанавливаются начальные значения напряжений на интеграторах.

Ручки для установки начальных условий выведены на наборное поле. Непосредственно у переключателя режимов находятся лампочки, сигнализирующие о включении модели в тот или иной режим. Тумблер T_1 предназначен для включения модели в режим «установки нуля».

Кроме того, на наборном поле находится регулировка P_{ω} , изменяющая одновременно выходные сопротивления обоих интеграторов, и $P_{1/Q}$, изменяющая коэффициент передачи масштабного множителя $-1/Q$.

Включение установки производится многополюсными тумблерами T_2 и T_3 , расположенными на передней панели. Сначала замыкается ключ T_2 , стоящий в цепях накала и питания реле. Высокое

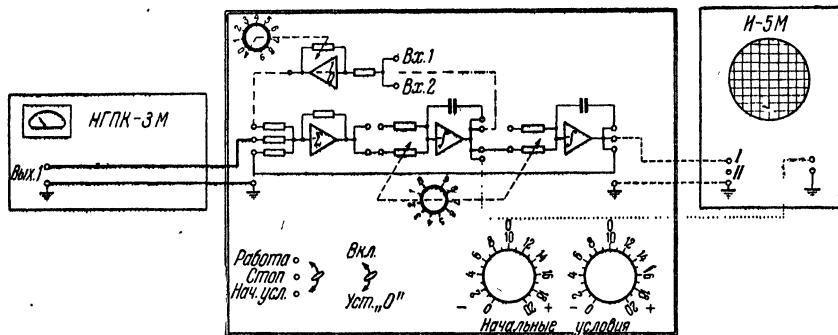


Рис. 7. Схема подключения приборов.

— — — — подключение осциллографа в п. 1 упражнений 1, 2, 3; дополнительное соединение осциллографа в п. 2 упражнений 1, 2, 3; ——— подключение генератора в упражнении 3; ——— цепи коммутации элементов в модели груза, колеблющегося без трения; - - - - - дополнительные цепи коммутации в модели груза, колеблющегося с трением.

напряжение включается тумблером T_3 после 2—3 мин. прогрева. Рядом с ключами находятся четыре сигнальные лампочки.

Для исследования модели применяется аппаратура низкочастотного диапазона: осциллограф И-5М и генератор НГПК-3М. При работе с осциллографом, во избежание порчи его экрана, необходимо выключать луч, когда прибор не используется для наблюдения, особенно если луч неподвижен.

Подготовка модели к измерениям. После предварительного знакомства с установкой включить питание модели тумблерами T_2 и T_3 . Через 5—10 мин. прогрева установить нули усилителей. Для этого «переключатель режимов» на наборном поле модели ставится в положение «начальные условия», а тумблер T_1 — в положение «установка нуля». При установке нуля усилителя к его выходу подключают нуль-индикатор¹⁾ и затем добиваются нулевого показа-

¹⁾ «Земля» нуль-индикатора должна быть соединена с «землей» установки.

ния прибора вращением шлица «установка нуля» на передней панели усилителя. При этом сначала устанавливают нулевое показание по грубой шкале прибора, а затем по более точной. Подключая нуль-индикатор последовательно к выходу каждого из усилителей, устанавливают их нули.

Упражнение 1

Изучение модели груза, совершающего собственные колебания на пружине без трения

Для системы без трения решение уравнения (11) в отсутствие внешней силы имеет вид

$$y(t) = Y_0 \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (12)$$

т. е. груз совершает гармонические колебания с постоянной амплитудой Y_0 . Величина амплитуды и фаза колебаний φ зависит от начальных условий.

Изучаемая модель набирается согласно схеме, изображенной на рис. 7. На этом же рисунке приведены цепи соединения приборов, используемых в упражнении.

1. Наблюдение колебаний в электронной модели. Измерение частоты. В этом случае осциллограф включается следующим образом: на вертикальный вход 1 подается «смещение» груза, снимаемое с выхода второго интегратора; «коммутатор входа» выключается; «переключатель работы горизонтального входа» ставится в положение «развертка»; «переключатель режимов» в положение 1.

Для запуска колебаний модель сначала включается в режим «начальные условия», при котором вращением ручки «начальные условия» у второго интегратора устанавливается начальное «смещение груза». «Начальная скорость» берется равной нулю, т. е. указатель «начальные условия» у первого интегратора ставится на значение 10. С переводом «переключателя режимов» модели последовательно в положения «стоп» и «работа» начинается процесс колебаний. Вращением ручек осциллографа «усиление» и «частота развертки» добиваются изображения, удобного для рассмотрения, при котором на экране укладывается 5—10 колебаний с амплитудой 20—40 мм. Повторяя запуск модели при различных положениях регулировки P_{ω} , качественно оценивают изменение частоты собственных колебаний. Точное значение частоты находится по периоду колебаний, который измеряется с помощью секундомера. Для повышения точности измеряется длительность 5—7 периодов колебаний. При этом запуск и остановка секундомера производятся в момент прохождения лучом нулевого положения. Измерение периода осуществляется не менее трех раз, а затем берется среднее значение. Измеряя частоты колебаний модели при различных

значениях входных сопротивлении интеграторов, градуируют регулировку P_{ω} . Результат градуировки представляется графически.

2. Наблюдение фазовых траекторий. В этом случае, в отличие от предыдущего, на осциллографе «переключатель работы горизонтального входа» ставится в положение «усилитель»; на горизонтальный вход подается «скорость груза», которая снимается с отрицательным знаком с выхода первого интегратора. При таком включении экран осциллографа является фазовой плоскостью, а луч — изображающей точкой. В режиме «начальные условия» положение луча определяется величиной заданных начальных условий. Сдвиг его по оси Y соответствует начальному «смещению груза»; сдвиг по оси X — «начальной скорости». Таким образом, можно измерить установленную начальную фазу колебаний.

Если запустить модель, на экране наблюдается фазовая траектория, которую описывает луч в процессе колебаний. Переведя модель в режим «стоп», можно остановить изображающую точку на траектории и продолжить движение ее снова путем возврата в режим «работа». По характерному виду траектории можно найти сдвиг фаз между колебаниями смещения и скорости. Наблюдаемые на экране фазовые траектории зарисовываются в тетрадь.

Изменяя входное сопротивление интеграторов регулировкой P_{ω} , определяют влияние собственной частоты на движение изображающей точки по траектории.

Упражнение 2

Изучение модели груза, совершающего собственные колебания на пружинке с трением $h \neq 0$

При наличии трения колебания груза со временем затухают:

$$y(t) = Y_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi), \quad (13)$$

где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ — частота колебаний.

Для моделирования силы трения в установке включается еще масштабный множитель $-1/Q$, как показано на рис. 7. Его входы 1 и 2 отличаются коэффициентами передачи. Для входа 1 он в 10 раз меньше, чем для входа 2.

Частота модели устанавливается порядка 0,3—0,5 гц. В дальнейшем в этом упражнении и в следующем частота модели остается неизменной.

1. Наблюдение колебаний. Определение декремента затухания. Подключив осциллограф к установке так же, как описано в п. 1 упражнения 1, производят запуск модели при различных положениях регулировки затухания $P_{1/Q}$. Наблюдаемые на экране осциллографа дуги затухающих синусоидальных колебаний зарисовывают в рабочую тетрадь.

Величина декремента затухания вычисляется по формуле

$$\gamma = \frac{1}{N} \ln \frac{Y_n}{Y_{n+N}}, \quad (14)$$

где Y_n , Y_{n+N} — амплитуды колебаний грузов, отстоящие друг от друга на N периодов.

Амплитуды измеряются по сетке на экране для N порядка 3—7. При измерениях необходимо, чтобы колебания луча происходили относительно оси, изображенной на сетке. Для этого вращают регулировку осциллографа «вертикальное смещение» при отключенном вертикальном входе, добиваясь совпадения луча с осью. Определение декремента затухания при некотором положении ручки $P_{1/Q}$ повторяется не менее трех раз, а затем берется среднее значение.

Находя декремент затухания для различных положений регулировки $P_{1/Q}$, производят градуировку для обоих входов масштабного множителя $—1/Q$. Результат градуировки представляется в виде графиков.

2. Наблюдение фазовых траекторий. Для получения фазовых траекторий приборы включаются так же, как в п. 2 упражнения 1. Фазовые траектории в этом случае имеют вид скручивающихся спиралей. Быстрота скручивания зависит от величины затухания колебаний в модели. Наблюдаемые картины зарисовываются в тетрадь.

Измеряя по фазовым траекториям амплитуды колебаний луча по оси Y , можно найти декремент затухания (при измерении необходимо, чтобы в отсутствие сигнала луч находился в начале координат, изображенных на сетке). Такой метод определения более удобен по сравнению с описанным в п. 1.

Упражнение 3

Изучение вынужденных колебаний

При действии гармонической силы в системе вместе с вынужденными колебаниями возникают собственные. Решение уравнения, описывающего этот процесс (уравнение (11)), имеет вид

$$y(t) = Y_0 \cos(pt + \varphi) + Ae^{-\delta t} \cos \omega t. \quad (15)$$

Первое слагаемое представляет собой вынужденные колебания, второе — собственные, возникающие в системе в момент появления внешней силы; $Y_0 = \frac{F}{\sqrt{(\omega_0^2 - p^2)^2 + 4p^2\delta^2}}$ — амплитуда вынужденных колебаний, $\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\delta p}{p^2 - \omega_0^2}$ — сдвиг фазы между вынужденными колебаниями в системе и внешней силой, A — амплитуда собственных колебаний. Со временем собственные колебания затухают, и в системе остается только вынужденное движение.

В этом упражнении рассматривается модель груза, колеблющегося с трением под действием «внешней силы». Собственная частота модели остается такой же, как в предыдущем упражнении. «Внешняя сила» подается с выхода 1 генератора на один из свободных входов сумматора. Модель находится все время в режиме «работа».

1. Снятие резонансных кривых. Резонансные кривые снимаются при трех декрементах затухания, которые выбираются порядка 0,20—0,60. Сначала устанавливается наименьшее значение, а затем остальные. Величина «внешней силы» берется порядка 1—3 в. По сетке на экране осциллографа измеряется размах колебаний «смещения груза». При этом осциллограф включается так же, как в п. 1 упражнения 1. «Вертикальное усиление» его подбирается таким, чтобы на частоте генератора, совпадающей с собственной частотой модели, отклонение луча при установившихся колебаниях не выходило за пределы экрана. В дальнейшем «вертикальное усиление» осциллографа остается неизменным. Затем, изменяя частоту генератора, измеряют для каждого ее значения установившуюся амплитуду колебаний груза. Для того чтобы установление колебаний происходило скорее, необходимо частоту «внешней силы» изменять как можно медленнее. На частотах «внешней силы», далеких от резонансной, особенно при больших декрементах затухания, для удобства измерения амплитуды колебаний необходимо амплитуду силы увеличить с помощью регулировок, имеющихся на генераторе.

По результатам измерений строится зависимость амплитуды колебаний, отнесенной к напряжению «силы», от частоты «внешней силы» $\frac{Y_0}{F} = f(p)$. По резонансным кривым определяется добротность колебательной системы Q ¹⁾, а затем декремент затухания по формуле

$$\gamma = \frac{\pi}{Q}. \quad (16)$$

Найденные значения декремента сравниваются с полученными при изучении собственных колебаний модели.

2. Наблюдение фазовых соотношений. Для наблюдения фазовых сдвигов между «внешней силой» и «смещением груза» напряжение с выхода 1 генератора, в отличие от предыдущего пункта, подается также на горизонтальный вход осциллографа. При этом его развертка выключается. На экране осциллографа наблюдается эллипс, поворот осей которого определяется сдвигом фаз между «силой» и «смещением». При изменении частоты «внеш-

¹⁾ Определение добротности по резонансным кривым приведено в описании к задачам 108 и 111.

ней силы» оси эллипса поворачиваются. Аналогично наблюдается сдвиг фаз между «скоростью груза» и «внешней силой».

3. Наблюдение процесса установления вынужденных колебаний. Если частота «внешней силы» p^1) близка к ω и декремент затухания в системе невелик, то наложение вынужденных колебаний и собственных образует биения, которые имеют вид периодически возрастающих и ослабевающих колебаний. Со временем в системе остаются чисто вынужденные колебания.

Для наблюдения описанных явлений приборы включают, как описано в п. 1 этого упражнения. Затем, отсоединив генератор от модели, ждут, когда в системе полностью прекратятся колебания. Чтобы колебания прекращались быстрее, в системе можно временно, пока отключена «внешняя сила», увеличить затухания, подав «скорость груза» на вход 2 масштабного множителя. После этого генератор снова подключается к модели, возбуждая таким образом в ней одновременно собственные и вынужденные колебания. Наблюдаемая на экране картина процесса установления зарисовывается в тетрадь.

На фазовой плоскости биения представляются периодически скручивающейся и раскручивающейся спиралью. Наблюдение фазовых траекторий производится так же, как описано в предыдущих упражнениях.

Технические данные установки. В работе используются: электронная модель колебательной системы, индикатор низкочастотных колебаний И-5м, генератор низкочастотных колебаний НПК-3, нуль-индикатор, блок питания модели УЭСВ-1, блок питания генератора ЭСВ-1м, секундомер.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. П. Стрелков, Механика, «Наука», 1965.
2. С. Г. Калашников, Электричество, «Наука», 1964.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

3. И. М. Тетельбаум, Электрическое моделирование, Физматгиз, 1959, гл. I, §§ 1, 2, гл. V, §§ 13, 15.
4. Б. Я. Коган, Электронные моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования, Физматгиз, 1963, Введение, гл. 1, §§ 1, 2, гл. 2, §§ 1, 4, гл. 10, § 1.
5. Г. Корн и Т. Корн, Электронные моделирующие устройства на постоянном токе, ИЛ, 1955, гл. I, §§ 1, 3, 4, гл. II, §§ 5, 6.
6. С. П. Стрелков, Введение в теорию колебаний, «Наука», 1964, гл. I, III.

¹⁾ Частота «внешней силы» смещается от резонансной на 10—20%.

ЗАДАЧА 116

**ИЗУЧЕНИЕ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ
ТРЕХСАНТИМЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН,
ИЗЛУЧАЕМОГО РУПОРОМ**

В задаче изучаются основные характеристики излучаемого рупором потока энергии. Определяется длина волны λ и характер поляризации излучения. Измеряется диаграмма направленности излучателя в горизонтальной плоскости и, наконец, определяется изменение амплитуды волны в зависимости от расстояния между излучателем и приемником.

Излучателем электромагнитных волн является линейный вибратор. Роль такого вибратора выполняет антенна, возбужденная переменным электрическим током.

В свободном пространстве, в так называемой волновой зоне, где расстояние от вибратора до приемника $r \gg \lambda$, распространяются поперечные электромагнитные волны. Амплитуды напряженностей электрического (E) и магнитного (H) полей убывают, как $1/r$. Если вибратор, возбужденный клистроном, расположен в волноводе, то излучение происходит через отверстие рупора (рис. 1). В этом случае излучение направлено преимущественно вдоль оси рупора, но амплитуды полей убывают, как $1/r$.

Описание установки. Все задачи по электромагнитным волнам проводятся в трехсантиметровом диапазоне длин волн, который удобен тем, что позволяет работать с направленным потоком излучения.

Установки всех задач этой группы однотипны и состоят из следующих основных блоков: 1) источника электромагнитных волн, 2) индикатора интенсивности электромагнитного поля, 3) гониометрического стола, 4) системы подвижных салазок для фиксирования координат точек наблюдения, 5) вспомогательных деталей, используемых при опытах. Описание первых четырех блоков, необходимых для всех задач, приводится ниже, а характеристика деталей дана в описании соответствующих задач.

Источник электромагнитных волн. Источник электромагнитных трехсантиметровых волн (рис. 1) собран из следующих основных узлов: клистронного генератора G типа К-19, волновода B , коротко замкнутого с одного конца и переходящего с другого в рупор C , выпрямителя стандартного типа УИП-1, питающего клистрон, и подвижной подставки, на которой укреплен рупор с волноводом и клистронсм. Клистрон К-19 (рис. 1, а) генерирует незатухающие электромагнитные колебания частоты примерно 10^{10} *гц*, длина волны 3 *см*. Подробное описание теории клистронных генераторов можно найти в учебниках по электрорадиотехнике (см. литературу в конце задачи).

Кратко поясним устройство и принцип действия клистрона. Последний представляет собой электронную лампу (схема изображена на рис. 1, б), в которую вставлен объемный резонатор P . Резонатор представляет собой полость в виде тора. Полость тора в средней части затянута двумя сетками C_1 и C_2 . Резонатор расположен между отражателем O и катодом так, чтобы плоскости сеток были перпендикулярны к направлению движения потока электронов от катода к отражателю.

На резонатор подается положительный потенциал относительно катода; на отражатель — отрицательный потенциал. При включении питания клистрона в резонаторе P появляются собственные колебания электромагнитного поля.

Отражательный клистрон является генератором, частота колебаний которого определяется собственной частотой его электромагнитного резонатора. Автоколебания поддерживаются в резонаторе проходящим через него электронным потоком переменной плотности. Такой поток электронов создается в отражательном клистроне следующим образом. Электроны, ускоренные

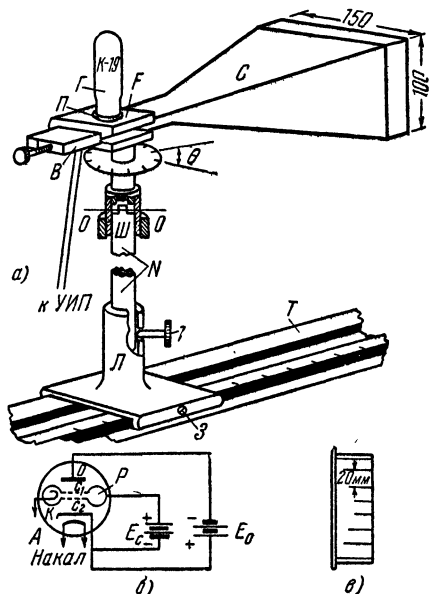


Рис. 1.

постоянным электрическим полем между катодом и первой сеткой, влетают в пространство между сетками резонатора. В этом пространстве, если в резонаторе уже происходят электромагнитные колебания, электроны попадают в высокочастотное переменное электрическое поле. Так как вектор напряженности электрического поля периодически меняет свое направление, то электроны ускоряются или замедляются в зависимости от момента их пролета через резонатор. Модулированные таким образом по скорости электроны влетают в область между сеткой C_2 резонатора и отражателем O . Здесь они сначала тормозятся постоянным полем между резонатором и отражателем, а затем, изменив направление движения на обратное, ускоряются и возвращаются снова к резонатору. На этом пути происходит пространственная группировка электронов: ускоренные высокочастотным полем резонатора электроны догоняют замедленные электроны. Образуется электронный поток переменной плотности. Если разность потенциалов между отражателем и резо-

натором подобрана так, что очередная группа электронов пересекает резонатор в момент, когда его высокочастотное поле вызывает их торможение, то за счет кинетической энергии электронов будут восполняться потери электромагнитной энергии колебаний резонатора.

Таким образом, непрерывно действующий механизм обратной связи, поддерживающий автоколебания в клистроне, состоит в том, что электроны, проходящие резонатор в одном направлении, модулируются по скоростям с частотой резонатора, а электроны, сгруппированные пространственно, проходят через резонатор в обратном направлении пульсирующим потоком, поддерживая в нем незатухающие колебания.

В полость резонатора вставлена петля связи с вибратором — антенной *A*; введенной в волновод *B* (рис. 1, б), которая и возбуждает в последнем электромагнитные волны. Эти волны распространяются по волноводу к рупору *C*, из которого излучаются в свободное пространство.

Панелька клистрона, к которой непосредственно подводятся провода от выпрямителя для питания клистрона, жестко с помощью обоймы *F* закрепляется на волноводе. Вся система укреплена на специальной подставке. Подставка (рис. 1) смонтирована из следующих деталей: штыря *N*, шарнира *Ш*, рейтера *Л* и скамьи *T*. Штырь вставляется одним концом в рейтер и закрепляется винтом *I*. Другой конец оканчивается резьбой, на которую навернут шарнир *Ш*. Подвижная головка шарнира имеет в свою очередь штырь с резьбой, который ввинчен в тело обоймы *F*. Обойма скрепляет клистрон с рупором. Высоту излучателя над столом можно изменять, погружая штырь в отверстие рейтера на различные глубины.

Шарнир *Ш* позволяет ступеньками изменять угол поворота излучателя в вертикальной плоскости вокруг горизонтальной оси, проходящей через шарнир. Эти ступеньки соответствуют углам поворота излучателя 0, 45, 90°. Положение излучателя на скамье *T* фиксируется зажимным винтом *З*.

На рупор может надеваться электрическая линза (рис. 1, в). Она состоит из параллельных волноводов, длины которых подобраны так, чтобы выходящий из линзы фронт волны был плоским. Вид и размеры линзы рассчитаны для $\lambda = 3,2 \div 3,4$ см и указаны на рис. 1, в.

Индикаторы интенсивности электромагнитного поля. В задаче используются два типа приемников. Первый из них — зонд — служит для измерения интенсивности излучения в точке наблюдения. Второй — рупор — измеряет интенсивность волн, распространяющихся в определенном направлении. В обоих случаях индикатором электрического поля служит детектор *D* (ДКВ-4), контакты которого являются ненастроенной антенной; концы

детектора присоединяются к измерителю постоянного тока. Эквивалентная схема измерительного зонда может быть представлена в виде, указанном на рис. 2, а, где \mathcal{E} — э. д. с., пропорциональная амплитуде напряженности электрического поля в точке наблюдения, R_i — внутреннее сопротивление детектора, R_H — внутреннее сопротивление прибора постоянного тока типа ЛМ. C_H — собственная емкость прибора. Из приведенной схемы нетрудно видеть, что она представляет собой электрическую цепь однополупериодного выпрямителя. Среднее значение выпрямленного тока в такой цепи будет определяться характеристикой детектора ДКВ-4, которая представлена на рис. 2, б. Для малых сигналов характеристика может быть представлена аналитической зависимостью между изменением напряжения и изменением тока в виде $I = aU^2$. Так как U пропорционально амплитуде поля E , то ток пропорционален E^2 и, следовательно, интенсивности электромагнитного поля.

Основное требование, предъявляемое к зонду, заключается в том, что при внесении его в поле он должен не влиять или мало влиять на распределение измеряемого поля. Это требование накладывает ограничения на конструкцию самого прибора — индикатор должен быть мал по сравнению с длиной волны λ . Материал, который несет на себе зонд-индикатор, должен иметь такую же диэлектрическую проницаемость ϵ , как и среда, в которой распространяется волна. С учетом этих требований был выбран высокочастотный детектор-антенна типа ДКВ-4. Размеры детектора примерно в 8 раз меньше λ . В качестве держателя детектора-антенны взята палочка, изготовленная из пенопласта, длиной примерно в 300 мм. Диэлектрическая проницаемость пенопласта $\epsilon = 1,03$ и мало отличается от ϵ воздуха. На конце палочки укреплен детектор-антенна D , второй конец палочки крепится к подставке Π (рис. 2, в).

Провода, соединяющие головки детектора-антенны с прибором постоянного тока, уложены в пазу, прорезанном в палочке. Провода, как правило, свивают и располагают так, чтобы они

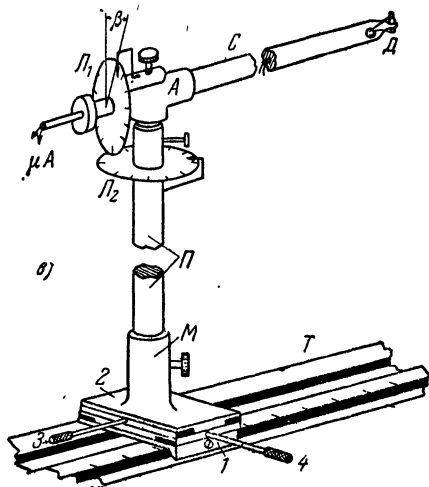
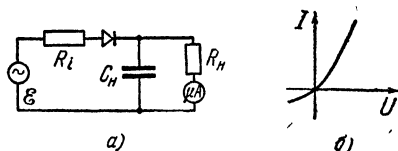


Рис. 2.

образовывали замкнутый контур наименьшей площади. Это делается для того, чтобы э. д. с., наведенная магнитным полем, была значительно меньше э. д. с., наведенной электрическим полем.

Детектор-антенна укреплен перпендикулярно к проводам: в этом случае поле E , если вектор E параллелен антенне, наведет в ней максимальную э. д. с., а в соединительном проводе наводимая э. д. с. практически будет равна нулю.

Зонд одним концом закреплен в стакане A . В стакане зонд может поворачиваться вместе с палочкой относительно ее оси. Угол поворота отсчитывается по лимбу L_1 . Зонд поворачивается в горизонтальной плоскости относительно оси подставки $П$. Угол поворота в горизонтальной плоскости отсчитывается по лимбу L_2 . Подставка $П$, несущая на себе зонд, вставлена в муфту M подвижной плоскости платформы 2.

Платформа 2 позволяет плавно перемещать зонд в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях вращением винтов 3 и 4. Кроме того, платформу можно перемещать вдоль скамьи T .

Приемный рупор устроен так же, как и излучающий, только детектор-антенна, вставленный в специальную головку-держатель, опускается в отверстие в волноводе и является прием-

ной антенной. Настройка головки детектора осуществляется изменением глубины ее погружения в волновод и контролируется током детектора.

Настройка головки контролируется величиной тока, протекающего по цепи детектора. Рупор удерживается на той же подставке, которая удерживает зонд. Так как рупор изготовлен из металла и его размеры достаточно велики, то он искажает измеряемое поле, поэтому им следует пользоваться только в случае, когда распределение напряженности поля в пространстве нас не интересует.

Гониометрический столик (рис. 3) состоит из круглого стола A , вращающегося на ножке H . Плоскость стола разрезана по диаметру на две части ($A - A$), которые могут раздвигаться плавно с помощью микрометрического винта B (шаг винта равен 1 мм). Угловое положение столика фиксируется стопорным винтом C . Внизу ножка H оканчивается лимбом L для отсчета углов поворота столика вокруг вертикальной оси и для отсчета углов поворота индикатора поля. Индикатор поля связан со столиком; для этого на ножку столика надето кольцо, которое свободно вращается

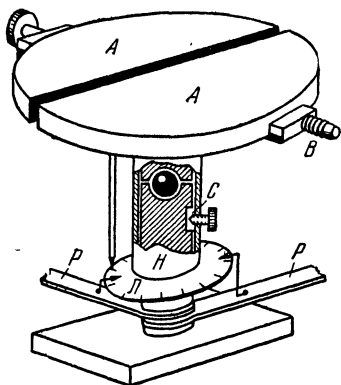


Рис. 3.

относительно нее. В одной из точек кольца прикреплена текстолитовая рейка P , другой конец которой соединяется с подставкой индикатора.

Координатный столик с салазками (рис. 4).

Две рейки (длиною 1200 мм) (рис. 4, а) с миллиметровыми делениями монтируются параллельно на плоскости лабораторного стола и служат направляющими для текстолитовой перемычки P длиной в 700 мм. Положение перемычки относительно реек фиксируется винтами 1, 2. Перемычка P имеет продольный паз, в который вставлен винт для крепления салазок. Салазки (рис. 4, б) имеют каретку K , передвижение которой осуществляется микрометрическим винтом M . На каретке салазок укрепляется стакан с зажимным устройством. В этот стакан может вставляться стержень, несущий на себе индикатор. Перемещение индикатора осуществляется грубо перемещением перемычки P и более плавно с помощью микрометрического винта M салазок.

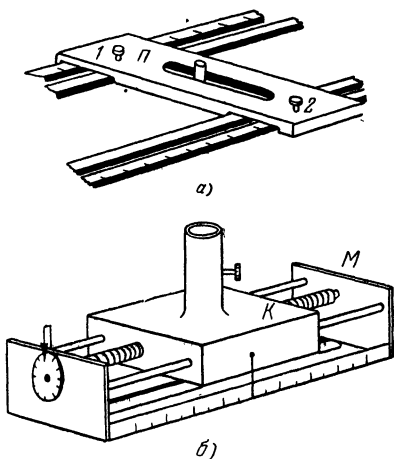


Рис. 4.

Упражнение 1

Определение длины волны излучения

Определение длины волны λ производится измерением расстояния между максимумами или минимумами в системе стоячих волн.

Получить стоячие волны можно, отразив плоскую электромагнитную волну от металлической плоскости, на которую волна падает нормально. Для получения стоячих волн следует поставить (рис. 5) на гониометрический столик гладкую медную пластину размером 300×400 мм. Пластины установить нормально к оси излучателя на расстоянии 400—450 мм от него.

Между пластиной и излучателем поместить зонд и повернуть антенну зонда вокруг горизонтальной оси так, чтобы токоизмерительный прибор показал максимальное значение тока детектора.

Перемещая зонд вдоль оси излучателя, от пластины к излучателю, измерить распределение интенсивности $I = f(x)$. Координата зонда x отсчитывается от пластины. Перемещать зонд следует так, чтобы x менялось в пределах от 3 до 100 мм. Ближе к излучателю

проводить измерения не рекомендуется. Измеряемая величина тока i прямо пропорциональна интенсивности (см. описание индикатора

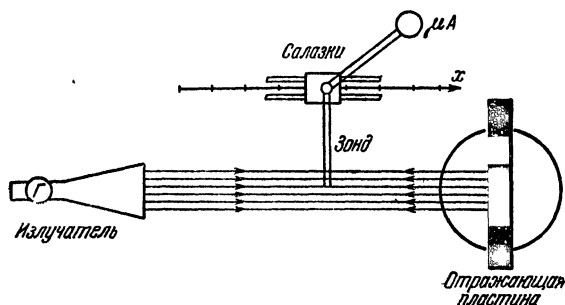


Рис. 5.

тора поля) и, следовательно, пропорциональна квадрату амплитуды волны.

Обработка результатов измерений. 1. Построить график изменения интенсивности $I = f(x)$.

2. Подсчитать длину волны из условия, что $\lambda = 2l$, где l — расстояние между двумя ближайшими минимумами (максимумами) кривой $f(x)$.

3. Показать из результатов опыта, что фаза электрического вектора при отражении от металлической пластинки изменилась на π .

Упражнение 2

Изучение поляризации электрического вектора волны рупорного излучателя

Измерения. 1. Расположить излучатель и зонд по одной прямой линии так, чтобы ось одного была продолжением оси другого

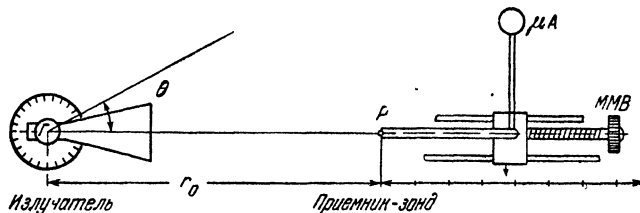


Рис. 6.

(рис. 6), и, поворачивая антенну зонда вокруг горизонтальной оси в плоскости, перпендикулярной к оси излучателя (рис. 2), измерить зависимость $I = f(\beta)$.

Расстояние между излучателем и антенной 450 мм.

2. Повернуть излучатель вокруг его горизонтальной оси на 90° и вновь произвести измерения $I = f(\beta)$ в той же точке.

Обработка результатов измерений. 1. Результаты измерений представить в виде графиков, $I_\beta/I_0 = f(\beta)$, где I_0 — максимальное значение интенсивности.

2. Рассчитать изменение интенсивности плоскополяризованной волны с изменением угла поворота приемной антенны согласно закону Малюса, т. е. $I = I_0 \cos^2 \beta$ (I_0 определяется по графикам измерений). Результаты расчета сравнить с опытом.

Упражнение 3

Измерение диаграммы направленности рупорного излучателя в горизонтальной плоскости

Диаграммой направленности называют график зависимости потока энергии электромагнитной волны от направления излучения относительно оси излучателя. Обычно диаграммы направленности излучателя строят в полярных координатах для определенных сечений пространственного распределения интенсивности излучения. Форма диаграммы направленности зависит от устройства излучателя.

В теории антенн излучатели разделяются на две группы: 1) *элементарные* излучатели, длина вибратора у которых мала по сравнению с длиной волны λ ; их характерной чертой является отсутствие резкой направленности излучения, и 2) *сложные* излучатели, имеющие немалые размеры по сравнению с длиной волны λ . Некоторые сложные излучатели дают остронаправленное излучение.

Рупорные излучатели, например, имеют диаграмму направленности с одним преимущественным направлением распространения волны.

Расчет диаграммы направленности рупорного излучателя можно произвести, представив плоскость xOy , ограничивающую рупор, набором вибраторов по осям x и y , т. е. двумерной решеткой.

Если число вибраторов будет возрастать, то в пределе колебания будут происходить так же, как и в случае поршневой мембраны (или прямоугольной щели в оптике). Вся плоскость, ограниченная выходным отверстием рупора, будет иметь в каждой точке одинаковые амплитуды и фазы. Амплитуда A электромагнитной волны в точке наблюдения P , отстоящей от рупора на расстоянии r , определяется следующим выражением:

$$A_P = \frac{B}{r} \frac{\sin \left[\frac{kD_x}{2} \cos \alpha \right]}{\cos \alpha} \cdot \frac{\sin \left[\frac{kD_y}{2} \cos \beta \right]}{\cos \beta}, \quad (1)$$

где D_x и D_y — размеры, ограничивающие отверстие рупора; α и β — направляющие углы соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскостях; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число. B — величина, пропорциональная амплитуде волны в плоскости рупора. Первый множитель в формуле (1) определяет изменение амплитуды волны с расстоянием r , второй — изменение амплитуды в зависимости от углов α и β , т. е. диаграмму направленности. В настоящей задаче производятся измерения диаграммы направленности только в одной горизонтальной плоскости, и следовательно, угол $\beta = \text{const}$. Тогда формулу (1) можно представить в виде

$$A_P = \frac{C}{r} \frac{\sin \left[\frac{kD_x}{2} \cos \alpha \right]}{\cos \alpha}, \quad (2)$$

где $C = B \cdot f(\beta)$ при $\beta = \text{const}$. Интенсивность I волны в точке P пропорциональна квадрату амплитуды и запишется в виде

$$I \approx A_P^2 = \frac{C^2}{r^2} \frac{\sin^2 \left[\frac{kD_x}{2} \cos \alpha \right]}{\cos^2 \alpha}. \quad (3)$$

Угол α удобнее заменить на угол $\theta = \pi/2 - \alpha$ ¹⁾ и переписать выражение (3) в виде

$$I \sim \frac{C^2 \left[\frac{kD_x}{2} \right]^2 \cdot \sin^2 \left[\frac{kD_x}{2} \sin \theta \right]}{r^2 \cdot \left(k \frac{D_x}{2} \sin \theta \right)^2}. \quad (4)$$

Формула (4) справедлива только в том случае, если параметр, равный $\sqrt{\lambda r/D_x} > 1$; D_x и λ задаются устройством излучателя, расстояние r должно быть подобрано из указанного условия.

Характеристикой остроты направленности диаграммы, служит угол, определяемый соотношением

$$\sin \frac{\theta_1}{2} = \frac{\lambda}{D_x}. \quad (5)$$

Легко понять из формулы (4), что угол θ_1 есть угол между направлениями, при которых интенсивность излучения падает до нуля, т. е. есть полный угол раствора излучения рупора. Часто при определении угловой ширины диаграммы вводится еще угол γ между двумя направлениями, которым соответствует поток энергии, равный половине потока по оси диаграммы.

Измерения. Поставить излучатель и зонд по одной прямой линии (рис. 6) так, чтобы антенна находилась на оси рупора излучателя. Расстояние между излучателем и антенной выбирается равным ~ 450 мм.

¹⁾ Угол θ это угол между осью излучателя и направлением измерений.

Поворачивая рупор в горизонтальной плоскости и отсчитывая угол поворота по лимбу, закрепленному на держателе рупора, измерить изменение интенсивности с изменением угла θ поворота рупора. Угол θ меняется в пределах от 0 до 90° . Так как в начале малым изменениям угла θ соответствуют большие изменения напряженности поля, то при малых θ необходимо изменять его каждый раз не более чем на 2° .

Обработка результатов измерений. 1. Результаты измерений $I = f(\theta)$ представить графиком в полярных координатах.

2. Определить по диаграмме направленности угловую ширину θ_1 лепестка и угол γ и сравнить их с вычисленными по формуле (4).

3. Дополнительное задание: измерить диаграмму направленности без линзы и сравнить с диаграммой направленности рупора с линзой. Пояснить, почему угловые ширины лепестков этих двух диаграмм различны.

Упражнение 4

Измерение интенсивности волны в зависимости от расстояния между излучателем и приемником

Согласно (2) амплитуда волны меняется с расстоянием по закону:

$$A = \frac{F}{r}, \quad (6)$$

где F не зависит от r . Из (6) очевидно, что в заданном направлении для интенсивности излучения должно соблюдаться соотношение

$$I \cdot r^2 = \text{const}. \quad (7)$$

Для проверки этой зависимости интенсивности от расстояния воспользуемся той же схемой рис. 6. Измерим интенсивность $I(r)$ в ряде точек по направлению максимального излучения; для этого надо поставить индикатор-зонд на скамью так, чтобы оси излучателя и индикатора были расположены по одной линии, и, перемещая индикатор вдоль направления r , измерить $I(r)$.

Обработка результатов измерений. 1. Измерения $I(r)$ произвести как для рупора с линзой, так и для рупора без линзы и результаты измерений представить в виде графика $I(r) \cdot r^2$ в зависимости от r и сравнить с формулой (7).

2. Построить график $I(r) \cdot r^2 = \psi(r)$ и убедиться в правильности соотношения (7).

ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Лебедев, Техника и приборы сверхвысоких частот, т. 2, «Энергия», 1964.
2. С. Г. Калашников, Электричество, «Наука», 1964.
3. Г. С. Горелик, Колебания и волны, Физматгиз, 1959.
4. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.

ЗАДАЧА 117

**ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ R
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ
ОТ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

В задаче наблюдается явление отражения плоской линейно поляризованной электромагнитной волны ($\lambda = 3$ см) от металлических плоских поверхностей с одинаковой проводимостью σ , но различной шероховатостью. Степень шероховатости характеризуется параметром N , определяемым как $N = \Delta X / \lambda$, где ΔX — средняя глубина ямки или выступа отражающей поверхности, λ — длина волны излучателя.

Изучение условий отражения электромагнитных волн от несовершенных поверхностей представляет известный практический интерес и существенно для выяснения требований, которые надо предъявлять к качеству отражающих поверхностей.

Если поверхность металла плоская, идеально гладкая и размеры этой поверхности велики по сравнению с λ , то для отраженного излучения сохранится та же диаграмма направленности, которая была у излучателя. Этому требованию должны, в частности, удовлетворять все виды плоских зеркал и грани поворотных призм, широко применяемых в инструментальной оптике.

Если же поверхность металла имеет шероховатости, равные λ или большие, то отраженная волна уже не сохранит своей диаграммы направленности и будет наблюдаться явление рассеяния волн, аналогично тому, как шероховатая поверхность рассеивает, а не просто отражает видимый свет. Количественно о степени рассеяния волн можно судить по коэффициенту отражения R , который определяется как отношение амплитуд:

$$R = \frac{A_{\text{отр}}}{A_{\text{пад}}}, \quad (1)$$

где $A_{\text{пад}}$ — амплитуда падающей волны, $A_{\text{отр}}$ — амплитуда отраженной волны.

Найдя это отношение для пластин с разной степенью шероховатости, установим зависимость коэффициента отражения $R = f(N)$ и выясним примерно, какое значение параметра шероховатости поверхности вызовет заметное рассеяние.

В случае нормального падения волны на отражающую пластинку ($\varphi = 0$) перед последней в области между излучателем и пластинкой возникает стоячая волна. Отношение амплитуды максимальной напряженности электрического поля стоячей волны E_{max} к амплитуде в области минимума E_{min} стоячей волны обозначают обычно КСВ (коэффициент стоячей волны). Легко показать, что

1) О диаграмме направленности см. задачу 116.

КСВ связан с коэффициентом отражения R соотношением

$$R = \frac{КСВ - 1}{КСВ + 1}. \quad (2)$$

Действительно, в максимуме стоячей волны падающая и отраженная волны совпадают по фазе, а в минимуме — находятся в противофазе. Отсюда $A_{\max} = A_{\text{пад}} + A_{\text{отр}}$, а $A_{\min} = A_{\text{пад}} - A_{\text{отр}}$. По определению $КСВ = \frac{A_{\text{пад}} + A_{\text{отр}}}{A_{\text{пад}} - A_{\text{отр}}}$, откуда простой подстановкой

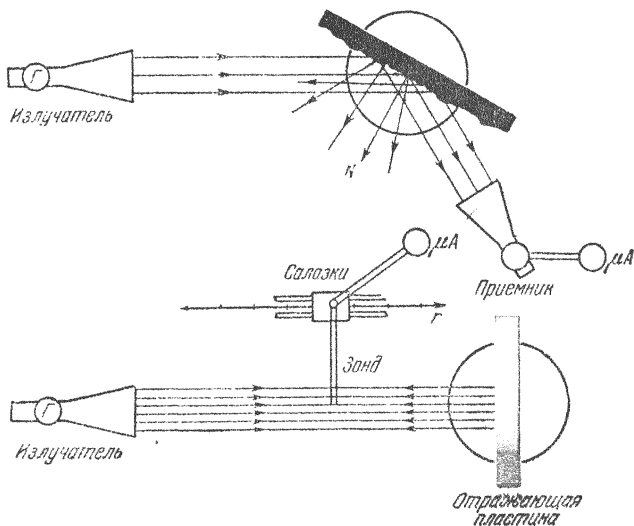


Рис. 1.

легко убедиться в справедливости соотношения (2). Таким образом, в случае нормального падения $\varphi = 0$ надо найти $КСВ = \sqrt{\frac{I_{\max}}{I_{\min}}}$ и по формуле (2) вычислить R .

Определить коэффициент отражения в случае, если $\varphi \neq 0$, можно, непосредственно измерив интенсивность падающей и отраженных волн. Именно, $R = \frac{A_{\text{отр}}}{A_{\text{пад}}} = \frac{\sqrt{I_{\text{отр}}}}{\sqrt{I_{\text{пад}}}}$ для каждого угла наблюдения φ' , где φ' — угол между нормалью к пластине и горизонтальной осью рупора-приемника. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Установка состоит из излучателя, двух индикаторов: рупора и зонда, гониометрического столика, на котором помещается отражающая пластина салазок с микрометрическим винтом, и четырех проводящих пластинок с различной степенью шероховатости N . Описание первых четырех блоков дано

в задаче 116. Три отражающие пластины сделаны из латунных листов толщиной 5, 10 и 20 мм. Размеры пластин 300×400 мм. Шероховатость пластин создавалась сверлением (сверлами различных диаметров на различную глубину). Четвертая пластина (с наибольшей шероховатостью) изготовлена из асбеста, размоченного в крахмальном клее, высушена и покрыта толстым слоем алюминиевой краски. Для того чтобы отражающие поверхности имели одинаковую проводимость, все металлические пластины покрыты также алюминиевой краской. Степени шероховатости пластин следующие:

$$N_1 = 3,2 \cdot 10^{-3}, \quad N_2 = 6,2 \cdot 10^{-2}, \quad N_3 = 0,3, \quad N_4 = 1.$$

Измерения. 1. Измерения, нужные для расчета коэффициента отражения R в зависимости от параметра N при $\varphi = 0$. Поставить на плоскость гониометрического столика пластину и ориентировать ее так, чтобы волна, излучаемая рупором, падала на нее по нормали (рис. 1, внизу). Установить зонд на салазки, чтобы палочка зонда была перпендикулярна к оси излучателя, а детектор-антенна ориентирован параллельно вектору E падающего излучения¹⁾. Перемещая зонд вдоль оси излучателя от пластины к излучателю вращением микрометрического винта салазок, измерить зависимость $I = f(r)$ (r отсчитывается от границы раздела к излучателю). Пластина ставится примерно на расстоянии 400—450 мм от излучателя. Зонд перемещается вблизи отражающей пластины. Измерения проделать для четырех пластин.

2. Измерения, нужные для расчета коэффициента отражения R от поверхностей с различной шероховатостью N при $\varphi \neq 0$ в зависимости от угла наблюдения φ' . Схема измерений представлена на рис. 2, вверху; в качестве приемника в этом случае используют рупор. Сначала следует измерить интенсивность падающей волны в некоторой точке P , лежащей на оси рупора излучателя. После этого на стол гониометра поставить отражающую пластину. Задать поворотом стола угол падения волны $\varphi = 30^\circ$ (можно выбрать и другой угол падения). Измерить, поворачивая рупор вокруг ножки стола гониометра, распределение интенсивности I в зависимости от угла φ' поворота рупора, сохраняя угол φ постоянным. Отсчет угла φ' производится по лимбу гониометра. Аналогичные измерения произвести для всех четырех пластин. Расстояние между излучателем и рупором для всех углов наблюдения должно оставаться постоянным и равным расстоянию от излучателя до точки P .

Обработка результатов измерений. 1. Из кривых $I = f(r)$ рассчитать КСВ и R для всех пластин.

¹⁾ Рупор излучает плоскополяризованную волну. Направление вектора E можно найти, вращая детектор-антенну в плоскости, перпендикулярной к оси рупора излучателя (см. описание установки в задаче 116).

2. Построить график $R = f(N)$.
3. Определить коэффициент отражения $R = \varphi(\varphi')$ и построить его график в полярных координатах. Кривые для всех четырех пластин чертятся на одном графике.
4. Определить угловую ширину лепестков диаграмм направленности в отраженной волне (см. задачу 116) для всех четырех диаграмм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. С. Г. Калашников, Электричество, «Наука», 1964.
3. Литература к задаче 116.

ЗАДАЧА 118

**ПРЕЛОМЛЕНИЕ ВОЛН ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИЗМОЙ
И УЧЕТ ПОТЕРЬ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ ГРАНЕЙ ПРИЗМЫ
И НА ПОГЛОЩЕНИЕ В ПРИЗМЕ**

Введение. В задаче измеряются угол наименьшего отклонения призмы и энергия излучения, прошедшая через призму. Энергия волны, прошедшая через призму, меньше энергии, падающей на нее, из-за потерь на отражение на гранях призмы и поглощения в призме. Изменение энергии, прошедшей через призму, только за счет отражения можно определить, если воспользоваться формулами Френеля и применить их последовательно к двум границам раздела (на входе и при выходе из призмы). Однако сразу можно отметить следующее. Если на входную грань призмы плоскополяризованная волна (такая, что вектор E лежит в плоскости падения) падает под углом Брюстера, то интенсивность отраженной волны будет равна нулю, и следовательно, никаких потерь энергии при переходе через границу в прошедшей волне не будет. Условия, определяющие угол φ Брюстера, и закон преломления дают

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \psi} = n, \quad \psi + \varphi = \frac{\pi}{2}, \quad (1)$$

где угол φ — угол падения, а ψ — угол преломления.

Если подобрать условия прохождения луча в призме так, чтобы и на вторую границу раздела (на выходе из призмы) луч падал под углом Брюстера, мы, очевидно, получим систему, в которой потерь на отражение от граней призмы не будет. Условия (1) для второй грани запишутся в виде

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \psi_1} = \frac{1}{n}, \quad \psi_1 + \varphi_1 = \frac{\pi}{2}, \quad (2)$$

где φ_1 — угол падения на вторую грань призмы, а ψ_1 — угол, который вышедший из призмы луч образует с нормалью к выходной

грани. Из условий (1) и (2) сразу видно, что $\varphi = \psi_1$ и $\psi = \varphi_1$, т. е. в этом случае волна распространяется в призме по направлению, перпендикулярному к биссектрисе преломляющего угла α призмы. Такое направление распространения луча в призме, как известно, приводит к наименьшему значению угла отклонения γ луча, вышедшего из призмы от направления луча падающего.

Однако чтобы соблюсти условие отсутствия потерь на отражение, необходимо также, чтобы угол падения был равен углу Брюстера, т. е. преломляющий угол α призмы должен быть определенной величины, задаваемой следующим выражением:

$$\alpha = \pi - 2\varphi_{\text{бр}}, \quad (3)$$

$$\text{tg } \varphi_{\text{бр}} = n = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}$$

где

(ϵ_2 — диэлектрическая проницаемость материала призмы, а ϵ_1 — воздуха). Таким образом, используя призму с соответствующим

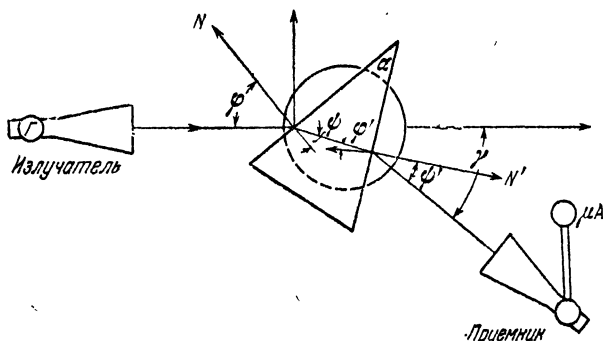


Рис. 1.

преломляющим углом, можно изменить направление распространения волны, поляризованной в плоскости падения, без потерь на отражение от ее граней.

Все сказанное не имеет отношения к волне, у которой вектор E перпендикулярен к плоскости падения, так как для этой волны коэффициент отражения ни при каком угле падения в нуль не обращается.

Если падающее излучение не поляризовано или поляризовано, но вектор E образует угол β с плоскостью падения, то при вышеуказанных условиях потери на отражения при $\varphi = \varphi_{\text{бр}}$ будут наименьшими, но не равными нулю.

Описание установки. Схема установки изображена на рис. 1. Она состоит из излучателя, поворотного столика-гонометра, индикатора поля с рупором и двух преломляющих призм (первые три блока описаны во введении к задаче 116). Рупор с индикатором

прикреплен к рейке на ножке гониометрического столика и может вращаться вокруг его оси.

Призмы изготовлены из оргстекла. Одна призма имеет размеры граней 300×250 мм с преломляющим углом $\alpha = 50^\circ$; вторая призма выбрана из условий оптимального прохождения энергии (с наименьшими потерями на отражение), размеры граней 430×380 мм, преломляющий угол $\alpha = 64^\circ$. Длина грани a призмы выбрана порядка 10λ , так что $a \gg \lambda$. При таких размерах граней призмы явлением дифракции на краях можно пренебречь. Размеры призм при данной мощности излучателя увеличивать не целесообразно, так как оргстекло обладает значительным поглощением электромагнитных волн в трехсантиметровом диапазоне. Потери на поглощение могут быть измерены и учтены при окончательной обработке результатов измерений.

Измерения. Рупор излучателя дает плоскополяризованную волну, вектор E которой перпендикулярен к широкой стороне волновода. Рупор излучателя следует расположить так, чтобы в дальнейшем вектор E лежал в плоскости падения, т. е. в горизонтальной плоскости. Сначала производится измерение интенсивности прямого пучка I_0 в отсутствие призмы. Для этого рупор индикатора располагают вдоль оси рупора излучателя. Расстояние между ними должно быть примерно равно 1000 мм и в дальнейшем остается неизменным. Оба рупора должны быть ориентированы одинаково, при этом показание прибора в индикаторе будет максимальным.

После того как измерена интенсивность падающей волны I_0 , поставим на гониометрический столик призму с преломляющим углом $\alpha = 50^\circ$ (рис. 1). Повернем призму, вращая гониометрический столик так, чтобы грань призмы, на которую падает волна, была примерно перпендикулярна к направлению распространения волны излучателя — это положение соответствует значению угла падения $\varphi = 0$.

Поворачивая столик гониометра с призмой, увеличиваем угол φ каждый раз на $\Delta\varphi = 5^\circ$, измерим зависимость $I = f(\varphi)$ и углы отклонения $\gamma = f(\varphi)$.

Угол отклонения γ (угол между осью излучателя и направлением распространения преломленной волны) измеряется по отсчетному лимбу гониометра. Направление преломленной волны устанавливается индикатором по максимуму интенсивности. Рупор приемника устанавливается так, чтобы горизонтальная ось его совпадала по направлению с рейкой, соединяющей держатель индикатора и поворотную ножку гониометрического стола.

Ошибка при измерении угла γ на данном гониометре может быть большой из-за того, что расстояние от излучателя до индикатора недостаточно велико по сравнению с длиной волны λ , и максимум в диаграмме направленности рупоров выражен недостаточно

резко, поэтому измерения угла γ необходимо проводить несколько раз и наиболее тщательно.

Аналогичные измерения $I_1 = f(\varphi)$ и $\gamma = f(\varphi)$ проводятся и со второй призмой, преломляющий угол которой равен 64° .

Результаты измерений $I_1 = f(\varphi)$ включают не только потери на отражение от граней, но потери и на поглощение в оргстекле, из которого сделана призма. Потери на поглощение можно определить следующими способами.

При прохождении пучка через призму с преломляющим углом, удовлетворяющим условию (3), под углом наименьшего отклонения поляризованного луча (вектор E лежит в плоскости падения) все ослабление первичного пучка определяется только поглощением. Отсюда, измерив интенсивность прошедшего без призмы луча I_0 и интенсивность преломленного луча $I_{\text{пр}}$, можно определить коэффициент поглощения μ из следующей формулы:

$$I_{\text{пр}} = I_0 e^{-\mu x}, \quad (4)$$

где за x можно приближенно принять среднюю длину пути в призме.

Второй способ измерения коэффициента поглощения заключается в поочередном измерении интенсивностей излучения $I_{\text{пр}1}$ и $I_{\text{пр}2}$, прошедшего через плоскопараллельные пластинки, сделанные из одного материала, но разной толщины d_1 и d_2 . При этом способе потери излучения на отражение от входных граней обеих пластинок будут совершенно одинаковыми, а разностью потерь на отражение от выходных граней этих пластинок можно пренебречь. В этом случае, как следует из (4), коэффициент поглощения рассчитывается по формуле

$$\mu = \frac{1}{d_2 - d_1} \ln \frac{I_{\text{пр}1}}{I_{\text{пр}2}}. \quad (5)$$

Заметим, что описанный прием измерения поглощения путем поочередного использования поглощающих слоев разной толщины широко применяется в акустике, оптике, при исследованиях космических лучей, различных ядерных измерениях и т. д.

Величины $I_{\text{пр}1}$ и $I_{\text{пр}2}$ измеряются на той же установке, но без призмы. Рупоры излучателя и приемника ориентируют вдоль одной прямой на расстоянии 450 мм друг от друга. Нормально к этой прямой поочередно устанавливают пластинки из оргстекла разной толщины и измеряют $I_{\text{пр}1}$ и $I_{\text{пр}2}$.

Обработка результатов измерения. 1. Построить график $I_{\text{пр}}/I_0 = f(\varphi)$ для всех призм. Из положения максимума для интенсивности прошедшего пучка определить угол Брюстера и сравнить его со значением угла, вычисленного по формуле (3).

2. Построить график $\gamma = f(\varphi)$ и определить угол наименьшего отклонения γ_{min} . Рассчитать диэлектрическую проницаемость ϵ_2

по формуле

$$\sqrt{\epsilon_2} = \frac{\sin \frac{\alpha + \gamma_{\min}}{2}}{\sin \alpha/2}. \quad (6)$$

3. Оценить коэффициент поглощения μ двумя указанными выше способами и сравнить полученные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л а н д с б е р г, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. Литература к задаче 116.

З А Д А Ч А 119

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ ВОЛНЫ ПРИ ТОНКОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Введение. В предлагаемой задаче изучается явление полного внутреннего отражения, причем измеряется интенсивность электромагнитной волны за отражающей границей. В работе показывается, что если толщина граничного слоя изменяется в пределах от 0 до λ , то, несмотря на то, что угол падения волны соответствует условию полного внутреннего отражения, не вся энергия отражается от границы, а часть ее (большая или меньшая, в зависимости от толщины слоя) проходит через слой и распространяется во второй среде.

Если на границу раздела двух сред с диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 падает плоская электромагнитная волна, она не проходит во вторую среду в том случае, если угол падения φ больше определенного значения φ_1 :

$$\sin \varphi_1 = n_{21} = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}, \text{ где } \epsilon_1 > \epsilon_2. \quad (1)$$

При $\varphi = \varphi_1$, для которого $\sin \varphi_1 = n$, волна во второй среде будет скользить по границе раздела, т. е. угол преломления ψ будет равен $\pi/2$. Угол φ_1 называется *предельным углом* и определяется, как указано, отношением диэлектрических проницаемостей сред.

Если угол падения волны больше предельного $\varphi > \varphi_1$, то падающая волна полностью отражается. Однако, как показал Эйхенвальд, это справедливо, если граничная среда заполняет собой полупространство. Если же вторая среда представляет собой слой толщиной x , то количество отраженной энергии будет зависеть от толщины слоя. Если толщина слоя $x < \lambda$, то полного внутреннего отражения практически не наблюдается. Часть энергии отражается, а часть проходит за границу раздела.

Расчеты Эйхенвальда показали, что при угле падения $\varphi > \varphi_1$ интенсивность I прошедшей во вторую среду волны зависит от x по закону:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{4\pi x}{\lambda_1} \sqrt{\sin^2 \varphi - n_{21}^2}\right), \quad (2)$$

где I_0 — интенсивность на границе раздела, φ — угол падения волны, $n_{21} = \sqrt{\epsilon_2/\epsilon_1}$ и λ_1 — длина волны в первой среде, из которой луч падает на границу раздела, а x — расстояние от границы раздела во второй среде.

Согласно теории Эйхенвальда при полном внутреннем отражении энергия заходит во вторую среду, так как поле на границе раздела

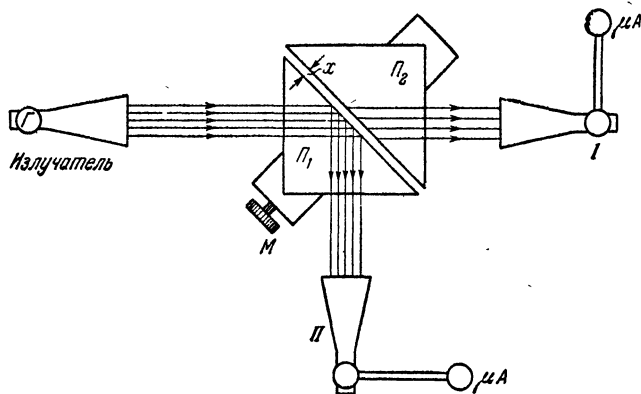


Рис. 1.

не прерывается. Поэтому изменение направления распространения электромагнитной волны происходит в некотором слое. В свое время наличие такого слоя было установлено в оптическом случае Мандельштамом и Зелени.

Измерить изменение амплитуды или изменение интенсивности волны за границей раздела при полном внутреннем отражении на волнах оптического диапазона практически невозможно, но на волнах сантиметрового диапазона эти измерения проводятся сравнительно легко.

Бозе предложил способ обнаружить проникновение волны во вторую среду следующим образом: поставить на пути волны диэлектрическую призму Π_1 (рис. 1) и за призмой Π_1 поставить такую же по размерам и материалу призму Π_2 так, что толщина воздушной прослойки будет x . Подвигая вторую призму к первой, можно толщину воздушного слоя x сделать сколь угодно тонкой. Если действительно есть захождение волны за отражающую грань, то при очень тонком слое воздуха практически отраженной волны от диа-

гональной грани призмы P_1 не должно быть. Призмы P_1 и P_2 изготовлены из оргстекла, диэлектрическая проницаемость которого $\epsilon_1 = 2,56$. Размеры граней призмы 250×250 мм выбирались из следующих соображений: толщина призмы должна быть такой, чтобы интенсивность прошедшей сквозь нее волны была достаточной для измерения ее индикатором (оргстекло значительно поглощает энергию трехсантиметровых волн). Это заставляет уменьшать размер призм. С другой стороны, размер граней призмы должен быть достаточным, чтобы перехватить весь направленный пучок излучателя, иначе на границе могут возникнуть дифракционные явления, которые затруднят анализ результатов. Определенные на опыте и указанные выше размеры призм удовлетворяют этим условиям.

Описание установки. Схема установки изображена на рис. 1. Отдельные ее части описаны в задаче 116; индикаторы излучения I и II крепятся на специальных рейках на ножке гониометрического столика.

Призмы устанавливаются на гониометрическом столике. Толщина слоя воздуха регулируется вращением микрометрического винта M , раздвигающего полуплоскости столика, на которых стоят призмы. Угол падения волны $\varphi = 45^\circ$ и выбран так, что $\varphi = \varphi_1$. Призмы P_1 и P_2 представляют собой первую среду с $\epsilon = 2,56$. Слой воздуха, прилегающий к призме P_1 , является второй средой с $\epsilon = 1,0$.

Измерения. Задачей работы является измерение интенсивности волны отраженной и волны, проходящей сквозь обе призмы при изменении толщины x воздушной прослойки. Для этого следует установить индикаторы-рупоры на одной высоте с рупором-излучателем. Индикатор I размещается на продолжении оси излучателя за гониометром, индикатор II — по направлению волны, отраженной от диагональной грани призмы P_1 . Расстояния между рупорами-индикаторами и рупором-излучателем должны быть примерно по 450 мм.

Сомкнув плотно призмы так, чтобы они представляли собой куб ($x = 0$), измерить интенсивность I_{01} волны, прошедшей через куб. После этого снять со столика вторую призму (теперь слой воздуха не ограничен) и измерить интенсивность I_{02} отраженной волны. Интенсивности отраженной и прошедшей волн должны быть примерно равными $I_{01} \approx I_{02}$. Вновь поставить вторую призму на столик, плотно прикнув ее к первой, и, вращая микрометрический винт, раздвигающий плоскости столика, на которых установлены призмы, измерить $I_1 = f(x)$ и $I_2 = f(x)$.

Толщину слоя x изменять от 0 до 45 мм.

Обработка результатов измерений. 1. Начертить полученные измерением кривые

$$\frac{I_1}{I_{01}} = f\left(\frac{x}{\lambda}\right) \quad \text{и} \quad \frac{I_2}{I_{02}} = f\left(\frac{x}{\lambda}\right).$$

2. Рассчитать по формуле (2) интенсивность волны за отражающей границей в зависимости от расстояния x и нанести результаты расчета на тот же график, который получен из эксперимента. Длина волны λ указана в приложении к установке.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. С. Э. Фриш и М. В. Тиморева, Курс общей физики, т. III, Физматгиз, 1962.
3. Литература и описание к задаче 116.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

4. А. А. Эйхенвальд, Теоретическая физика, ч. 6, ГОНТИ, 1938.
5. Дж. Чандра Бозе, Избранные труды по экспериментальной физике, ИЛ, 1959.

ЗАДАЧА 120

ИЗМЕРЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЗАДАННОЙ ТОЧКЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ПОЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗНОСТИ ХОДА ИНТЕРФЕРИРУЮЩИХ ВОЛН

В настоящей задаче измеряется интенсивность колебаний, получаемая в результате суперпозиции двух когерентных волн, в зависимости от их разности хода δ . Разность хода δ изменяется в пределах от 0 до 4λ .

Установка представляет собой интерферометр (рис. 1), состоящий из следующих частей: излучателя A , системы расщепления B одной волны на две когерентные, подвижного зеркала B , изменяющего направление распространения одной из расщепленных волн, индикатора-зонда, регистрирующего интенсивность электромагнитного поля и поглощающих пластин. Излучатель, индикатор и зеркало расположены на оптических скамьях. Описание излучателя и индикатора-зонда дано в задаче 116.

Система расщепления одной волны на две когерентные состоит из двух прямоугольных призм, изготовленных из оргстекла с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,56$, размеры граней призм 300×300 мм. Призмы поставлены на гониометрический столик с двумя подвижными полуплоскостями, так что они составляют куб; раздвигая их вращением винта, образуют между диагональными гранями воздушную прослойку толщиной x . Известно, что в таком составном кубе тонкую воздушную прослойку можно рассматривать как «полупрозрачный» слой, прозрачность которого может изменяться с изменением толщины прослойки воздуха x (см. задачу 119).

Если на этот слой из призмы падает волна под углом больше предельного $\varphi > \varphi_1$, то интенсивность волн, отраженных и прошедших через этот слой, будет зависеть от толщины воздушной прослойки x . Это свойство и позволяет разделить одну волну на две когерентные и в наблюдаемой точке P уравнять амплитуды этих волн.

Для того чтобы совместить когерентные волны I_1 и I_2 в точке наблюдения P , поставлено отражающее металлическое зеркало B .

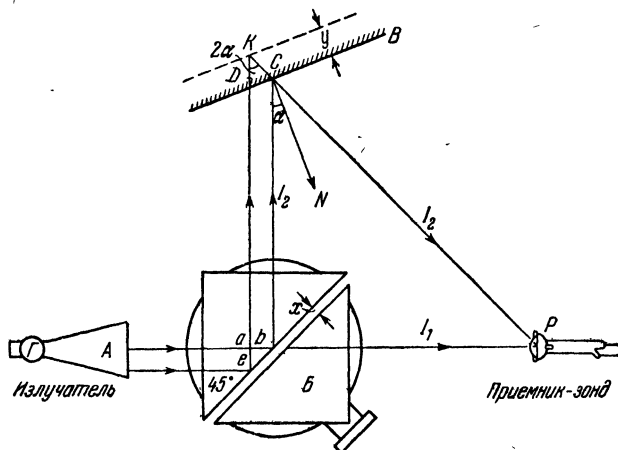


Рис. 1.

Зеркало B может вращаться относительно вертикальной оси, лежащей в плоскости зеркала; таким образом, можно изменять угол φ падения волн на зеркало. Совмещенные когерентные волны I_1 и I_2 при соблюдении определенных условий могут интерферировать.

Наилучшая интерференционная картина, как известно, наблюдается в том случае, если амплитуды интерферирующих одинаково поляризованных волн равны.

Первое условие можно выполнить подбором соответствующей толщины x воздушной прослойки. Второе условие — совпадение плоскостей поляризации в данном приборе также выполнено: поляризация прошедшей волны I_1 при измерении вблизи максимума излучения не изменяется, так как призмы изготовлены из изотропного материала. Поляризация волны I_2 , вообще говоря, может изменяться, так как волна I_2 испытывает двукратное отражение: первое — от границы раздела оргстекло — воздух и второе — от металлического зеркала. Однако поляризация волны не изменится, так как вектор E этой волны перпендикулярен к плоскости падения на отражающие поверхности.

Обе волны приходят в точку наблюдения P , как нетрудно видеть из рис. 1, с некоторой разностью хода Δ . Эту разность хода можно изменить на величину δ , перемещая зеркало B в направлении, перпендикулярном к плоскости зеркала, с помощью микрометрического винта. Это перемещение измеряется по шкале, укрепленной около зеркала. Разность хода волн δ , возникшая за счет перемещения зеркала на расстояние y , как видно из рис. 1, определяется следующим соотношением:

$$\delta = 2y \cos \alpha.$$

Измерения. Сначала следует уровнять интенсивности обоих волновых потоков, что можно сделать соответствующим подбором толщины воздушной прослойки x между призмами. Для этого помещают индикатор в область пересечения потоков и поочередно измеряют интенсивность каждого из потоков в отдельности, ставя на пути второго потока графитовый поглотитель. После этого приступают к основным измерениям, а именно определяют интенсивность I в одной точке в зоне интерференции в зависимости от величины дополнительной разности хода δ . Для этого проводят измерения $I(\delta)$ при различных положениях зеркала на шкале (различные значения y).

Установка дает возможность также измерить диэлектрическую проницаемость ϵ пластины из оргстекла, если вставить ее в одно из плеч интерферометра и скомпенсировать возникшую дополнительную разность хода, переместив зеркало на соответствующую величину y (можно измерять перемещение минимума). Тогда, очевидно, разность хода Δ , возникшая из-за появления пластины, будет равна $\Delta = (n_{o.c} - n_v) L = \delta = 2y \cos \alpha$, откуда

$$n_{o.c} = \sqrt{\epsilon_{o.c}} = n_v + \frac{2y \cos \alpha}{L},$$

где $\bar{n}_{o.c}$ — показатель преломления оргстекла, n_v — показатель преломления воздуха, а L — толщина пластины.

Использованный здесь метод измерения ϵ применим только для тонких пластин, толщина которых подбирается из условий $L \leq \frac{\lambda}{n_{\max} - 1}$, т. е. предполагается, что верхний предел n_{\max} значения коэффициента преломления пластин диэлектрика известен.

Обработка результатов измерений. 1. Результаты измерений интенсивности в заданной точке поля при разных положениях зеркала представить в виде графика $I = f(\delta)$.

2. Определить из полученного графика длину волны λ .

3. Измерить диэлектрическую проницаемость ϵ пластины из оргстекла указанным методом, повторив измерения несколько раз. Вычислить ошибку измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. Описание задачи 116. Литература, указанная к задаче 116.

ЗАДАЧА 121

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ

В задаче измеряется распределение амплитуд напряжения и тока вдоль двухпроводной линии при различных режимах ее работы на ультравысоких частотах.

Система, состоящая из источника электромагнитных колебаний, двухпроводной линии и приемника электромагнитных волн (рис. 1), часто называется лехеровой системой по имени ученого Лехера, впервые ее осуществившего. Электромагнитная энергия передается полностью от источника в нагрузку через двухпроводную линию только тогда, когда в линии нет потерь и отражений энергии, т. е. имеет место бегущая волна. В бегущей волне амплитуды напряжения и тока не зависят от координаты x . Чисто бегущая волна могла

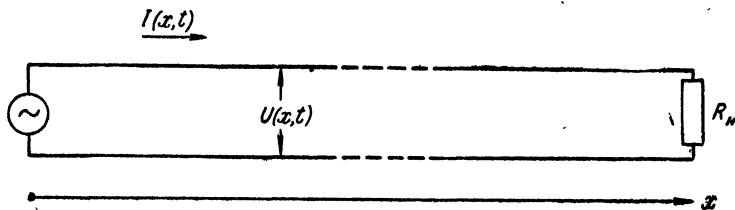


Рис. 1.

бы существовать в бесконечно длинной однородной линии без потерь. В ограниченной по длине линии тоже может иметь место бегущая волна, если на конце линии между проводами включить определенное сопротивление, равное входному сопротивлению аналогичной бесконечной линии и способное поглотить всю энергию, поступающую от источника. Это сопротивление, которое равно отношению амплитуды напряжения к амплитуде тока в бегущей волне, называют волновым сопротивлением линии. Волновое сопротивление линии зависит от ее геометрических и электрических свойств.

Если считать, что тепловые потери тока в линии малы, а утечка между проводами незначительна, то приближенно волновое сопротивление будет равно

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (1)$$

где L — индуктивность единицы длины линии и C — емкость единицы длины между проводниками.

Для того чтобы электромагнитную энергию полностью передать от источника через двухпроводную линию в приемник, необходимо сделать входное сопротивление приемника равным волновому сопротивлению линии Z_0 . Индуктивность L и емкость C на единицу длины линии зависят от геометрических размеров проводов и их взаимного расположения. Волновое сопротивление приближенно можно выразить через геометрические размеры линии:

$$Z_0 = 276 \lg \frac{a}{d}, \quad (2)$$

где a — расстояние между проводниками, d — диаметр провода.

Если мы нагрузим линию на конце сопротивлением, большим или меньшим волнового, то появится отраженная волна и наряду с бегущей волной в линии установится также и стоячая волна. Если линия закорочена ($R_n = 0$) или разомкнута ($R_n = \infty$), на конце линии происходит полное отражение энергии и в линии установится стоячая волна.

В том случае, когда частота колебаний источника близка к одной из собственных частот линии, имеет место резкое увеличение амплитуды колебаний тока и напряжения в линии (явление резонанса). Частоты собственных колебаний линии определяются из условия, что по длине линии укладывается целое число четвертей длины волны в соответствии с условиями на ее концах.

Если линия закорочена (или разомкнута) на обоих концах, то при каждом собственном колебании на линии должно уложиться четное число четвертей волны. Если линия с одного конца закорочена, а с другого конца разомкнута, то на линии при каждом собственном колебании уложится нечетное число четвертей волны.

На графике (рис. 2) указано распределение амплитуд колебаний напряжения и тока для первых трех собственных колебаний короткой линии при различных условиях на ее концах.

Необходимо иметь в виду, что в реальных двухпроводных линиях не могут быть практически осуществлены режимы чисто бегущих или чисто стоячих волн. Причины этого состоят в наличии во всякой реальной линии отражений и потерь на Джоулево тепло и на излучение электромагнитной энергии в окружающее пространство.

Таким образом, в реальной двухпроводной линии всегда имеет место смешанный режим бегущих и стоячих волн. В настоящей задаче, меняя сопротивление R_n на конце линии, можно добиться условий, при которых будут преобладать или бегущие волны ($R_n \approx Z_0$) или стоячие волны ($R_n \rightarrow 0$ или $R_n \rightarrow \infty$).

Описание установки. Установка состоит из: клистронного генератора типа КГ54-А, генерирующего незатухающие электромагнит-

ные колебания частотой $0,55 \cdot 10^{10} - 0,42 \cdot 10^{10}$ гц (длина волны в воздухе 5,5—7 см); двухпроводной линии, натянутой на две стойки, укрепленные на лабораторном столе, длина линии 2 м, расстояние между проводами $a = 20$ мм, диаметр медного провода $d = 1,7$ мм;

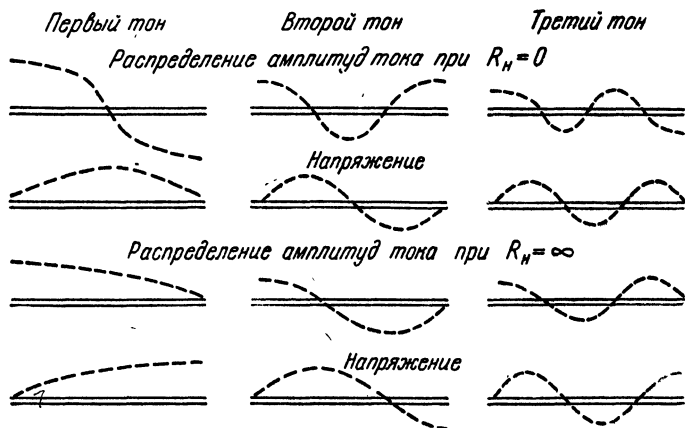


Рис. 2.

двух измерителей поля — один измеряет величину, пропорциональную квадрату амплитуды тока, протекающему по линии, другой — величину, пропорциональную квадрату амплитуды напряжения; салазок, с отсчетным устройством, по которым перемещается индикатор вдоль линии. Устройство индикаторов тока и напряжения,

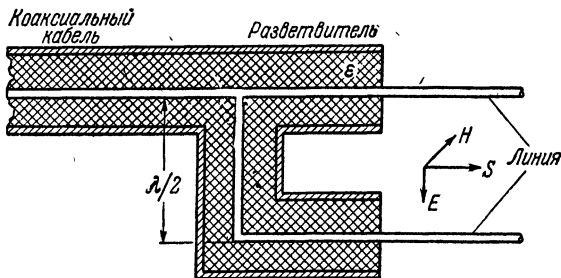


Рис. 3.

а также салазок подробно описано в задаче 116. Описание генератора КГ54-А прилагается к установке.

Переход волны, распространяющейся внутри кабеля, присоединенного к генератору, на двухпроводную линию происходит через разветвитель (рис. 3).

Электрическое поле E в плоскости, перпендикулярной к проводам, для определенного момента времени аналогично полю двух тонких разноименно заряженных длинных нитей. Картина силовых линий магнитного поля H будет примерно такой же, как картина поля двух тонких проводов, по которым протекает ток во взаимно противоположных направлениях (рис. 4).

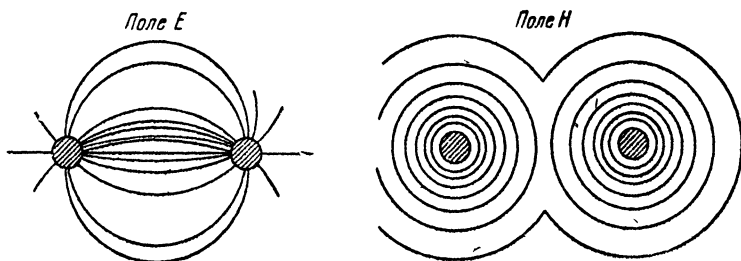


Рис. 4.

Измерения распределения амплитуд тока и напряжения вдоль линии производятся индикаторами, схемы которых изображены на рис. 5 и 6.

Виток связи прибора рис. 5, который мы будем называть прибором тока, ориентируется перпендикулярно к направлению магнитного поля H . Э. д. с. индукции, наводимая в нем высокочастотным магнитным полем H , будет пропорциональна амплитуде тока в том сечении линии, около которого расположен виток связи. Но токо-

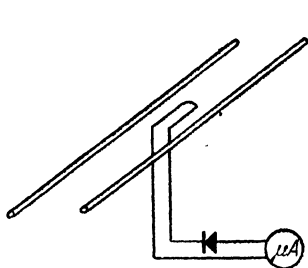


Рис. 5.

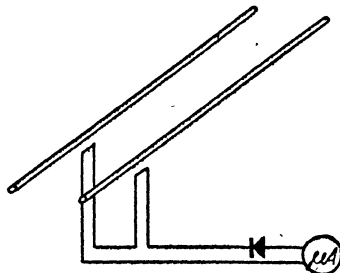


Рис. 6.

измерительный прибор в цепи измерительного витка включен через кристаллический детектор, вольтамперная характеристика которого нелинейна. Используемый участок характеристики соответствует квадратичной зависимости силы тока от э. д. с., поэтому показания токоизмерительного прибора будут в свою очередь пропорциональны квадрату амплитуды напряженности магнитного поля, пронизывающего виток, и соответственно квадрату амплитуды силы тока в двухпроводной линии.

Приемная антенна индикатора напряжения располагается параллельно проводам линии вблизи них (рис. 6). Высокочастотное электрическое поле E будет индуцировать в цепи прибора ток, пропорциональный амплитуде напряжения между проводами, в том сечении линии, около которого расположены витки связи. Однако по причинам, подробно изложенным выше, и в этом случае показания токоизмерительного прибора будут пропорциональны квадрату амплитуды переменного электрического поля, а не ее первой степени.

Необходимо учесть, что напряженность электрического и магнитного полей вблизи провода очень сильно убывает с расстоянием от провода: так, например, изменение расстояния на один-два миллиметра может привести к значительной ошибке, поэтому необходимо при измерении индикатор держать на одном и том же расстоянии от линии на всей ее длине. Рекомендуется во время измерений держаться по возможности дальше от линии, так как, находясь вблизи линии, экспериментатор будет влиять на распределение поля.

Система Лехера при наличии измерительного прибора (для измерения тока или напряжения) может служить волномером, прибором, измеряющим длину волны.

Измерения. 1. Измерение длины волны λ . Для измерения длины волны с помощью двухпроводной линии удобно использовать условия, когда в линии установилось одно из ее собственных колебаний, т. е. имеет место резонанс линии с генератором. Для того чтобы настроить линию в резонанс, линию замыкают хорошо проводящим диском и при помощи индикаторов отыскивают положение диска, соответствующее этому режиму линии. Индикаторы напряжения и тока дают тем большие показания соответственно в пучностях напряжения или тока, чем точнее линия настроена в резонанс. Надо иметь в виду, однако, что при перемещениях диска смещаются и положения пучностей, в которые надо помещать индикаторы.

Расстояние l между двумя максимумами напряжения или тока, найденное перемещающимися индикаторами, будет равно $\lambda/2$. Следовательно, $\lambda = 2l$. Таким образом можно определить и частоту генератора $\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2l}$, где c — скорость распространения электромагнитной волны принимается равной $3 \cdot 10^8$ м/сек (скорости света).

2. Измерения распределения амплитуд тока и напряжения вдоль линии. Эти измерения следует провести для двух нагрузок на конце линии: $R_n = 0$ — линия замкнута диском и $R_n = Z_0$ — на линии установлен поглотитель. В настоящей установке нет сосредоточенных сопротивлений, которые обычно употребляются в радиосхемах, а на конце линии стоит поглотитель высокочастотной энергии.

Поглотитель изготовлен в виде конуса из войлока. Войлок пропитан раствором графита. Если в конце линии поставить такой поглотитель, то можно на линии получить тот же самый эффект, который получается при нагрузке линии волновым сопротивлением. Однако необходимо учесть, что даже при очень длинных линиях и хороших поглотителях невозможно получить только бегущую волну, поэтому здесь будут возникать одновременно бегущая и отраженные волны. Ближе к генератору производить измерения не следует.

При выполнении упражнения необходимо:

1. Получить график распределения амплитуд токов и напряжений для случая стоячей волны при $R_n = 0$. Измерить длину волны генератора и найти его частоту колебаний. Полученные зависимости $i = f(x)$ и $U = f(x)$ изобразить на одном графике.

2. Показать, что в случае применения поглотителя в линии преобладает бегущая волна.

Технические данные установки приведены в самом тексте описания задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. К а л а ш н и к о в, Электричество, «Наука», 1964.
2. И. В. Л е б е д е в, Техника и приборы сверхвысоких частот, т. 2, «Энергия», 1964.

З А Д А Ч А 122

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ В ОДНОПРОВОДНОЙ ЛИНИИ

Введение. В высокочастотной технике используются различные виды линий для передачи электромагнитной энергии от генератора к нагрузке (антенне, приемнику и т. п.). Это однопроводные, двухпроводные коаксиальные и волноводные линии. Каждая из них имеет свои существенные особенности и область применения. В то же время основные черты процесса распространения электромагнитных волн вдоль этих линий могут рассматриваться с единой точки зрения аналогично двухпроводной линии (см. задачу 121).

Распространение волн вдоль одиночного провода имеет следующие особенности. Энергия, переносимая волной, локализуется вблизи поверхности провода и практически течет по трубке некоторого радиуса r_0 (r_0 отсчитывается от оси провода). Так, например, радиус трубки, по которой течет 75% энергии при длине волны $\lambda = 3$ см, равен $r_0 = 15$ мм (линия медного провода без диэлектрического покрытия, диаметр провода 1,7 мм). Скорость распространения такой бегущей поверхностной волны зависит от диэлектрической проницаемости среды; окружающей провод.

С увеличением диэлектрической проницаемости ϵ скорость распространения волны уменьшается.

В задаче изучается явление распространения электромагнитной волны вдоль одиночного проводника. Выясняются условия получения бегущих и стоячих волн в проводе конечной длины. Измеряется распределение интенсивности волны вдоль линии, а также зависимость интенсивности от расстояния до оси провода (по радиусу). По графику распределения интенсивности в стоячей волне определяется длина волны λ и вычисляется частота колебаний генератора.

Для получения бегущих волн на конце линии устанавливается поглотитель такой формы, чтобы электромагнитная энергия поглощалась им и превращалась в тепло. Однако полностью устранить отражение волн практически невозможно, и поэтому в линии всегда наряду с бегущей волной присутствует и слабая стоячая волна. Для характеристики степени отклонения от режима чисто бегущей волны вводится коэффициент стоячей волны (КСВ):

$$\text{КСВ} = \frac{E_{\max}}{E_{\min}},$$

где E_{\max} и E_{\min} — напряженности электрического поля в точках сечений с максимальной и минимальной интенсивностью. Для измерения коэффициента КСВ параллельно проводу перемещается кристаллический детектор, ток которого при слабых сигналах пропорционален квадрату напряженности электрического поля, т. е. пропорционален интенсивности волны. Поэтому, обозначая через α_{\max} и α_{\min} показания токового прибора в точках максимума и минимума интенсивности, получим для коэффициента стоячей волны

$$\text{КСВ} = \sqrt{\frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\min}}}.$$

В линиях, используемых в технике, обычно считается удовлетворительным значение $\text{КСВ} = 1,1 - 1,2$.

Для получения в линии режима стоячих волн необходимо создать условия возможно более полного отражения энергии от ее концов. В этом случае в линии может быть получена значительно большая интенсивность электромагнитного поля по сравнению с режимом бегущей волны при одинаковой мощности генератора. Практически это может быть осуществлено разными методами. Простейшим примером такой линии может служить штыревая антенна, один конец которой связан с генератором, а другой свободен. Наибольшая интенсивность стоячей волны в ней будет, если длина антенны равна нечетному числу четвертей длины волны.

В задаче используется металлический экран, который устанавливается на конце линии и обеспечивает хорошее отражение

электромагнитных волн. В этом случае резонанс достигается при расстоянии экрана от генератора, кратном целому числу полуволн. Таким образом, однопроводная линия может быть использована не только для передачи энергии, но как резонатор или антенна.

Установка. Установка (рис. 1) состоит из однопроводной линии, натянутой медным проводом $d = 1,7$ мм длиной 2 м; клистронного генератора К-19, питаемого стандартным выпрямителем типа УИП-1, передающего конуса ПК, индикатора поля ИП с измерителем и поглотителем П.

Полуволновая антенна от клистронного генератора К-19 выведена в волновод В. Волновод настраивается в резонанс поршнем А.

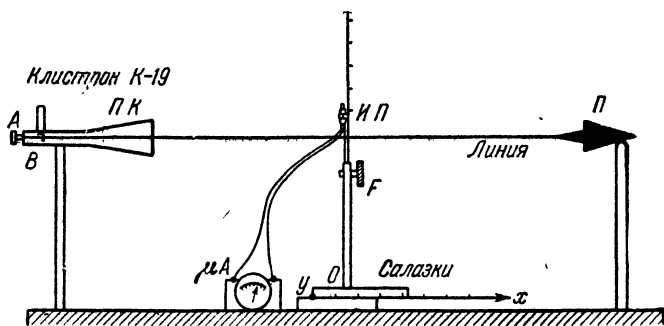


Рис. 1.

Антенна возбуждает колебания в волноводе. Через волновод проходит провод, в котором поле волновода возбуждает колебания. Волна, возбужденная на конце провода, будет распространяться вдоль провода. Убедиться в том, что энергия будет передаваться вдоль провода, можно при помощи индикатора поля. Индикатором являются металлические держатели детектора типа ДКВ-4, которые представляют собой ненастроенную антенну. Постоянная составляющая тока детектора пропорциональна E^2 (мы можем считать эту зависимость между током и напряжением справедливой для малых амплитуд напряжения). Ток измеряется прибором типа ЛМ.

Индикатор помещен на подвижные салазки С, позволяющие его передвигать во взаимно перпендикулярных направлениях (подробное описание клистрона К-19 индикатора и салазок дано в задаче 116).

Упражнение 1

Бегущие волны в линии

Измерения. Включить выпрямитель УИП-1 в электрическую сеть. Одновременно с включением выпрямителя включается и клистронный генератор К-19. После включения выпрямителя подождать

5—6 мин., пока прогреется клистрон и стабилизируется режим генерации. О стабилизации режима генерации можно судить по току, питающему клистрон. Прибор, вмонтированный в переднюю панель выпрямителя УИП-1, регистрирует анодный ток клистрона.

Следует измерить интенсивность волны в зависимости от расстояния (по радиусу) от оси провода, т. е. $I = f(r)$ при постоянном расстоянии от генератора $x = \text{const}$. Для этого установить индикатор на расстоянии 500 мм от возбуждающего конуса и, перемещая его в плоскости, перпендикулярной к оси провода, вращением винта F произвести измерения. Построить график $I = f(r)$.

2. Измерить распределение интенсивности вдоль линии $I = f(x)$ при $r = \text{const}$. Перемещающие индикатор салазки имеют ограниченный ход 60 мм, поэтому следует произвести измерения $I = f(x)$ на участках линии, отстоящих друг от друга примерно на 1 м. Начертить графики зависимости $I = f(x)$; и из этих графиков определить коэффициент стоячей волны линии КСВ.

Обработка результатов измерений. Построить кривую $I = f(r)$ в полулогарифмическом масштабе $\ln I = \varphi(r)$. Зависимость $I = f(r)$ можно аппроксимировать экспоненциальной функцией $I_0 e^{-\alpha r}$. По графику $\ln I = \varphi(r)$ следует найти α .

Упражнение 2

Стоячие волны в линии

На конце линии установить отражающий медный диск. Диск плавно при помощи салазок перемещается вдоль линии. Перемещая диск, настроить линию, т. е. подобрать ее длину так, чтобы на ней укладывалось целое число полуволн; при этом амплитуда стоячей волны будет максимальна. После настройки измерить распределение интенсивности $I = f(x)$ при $r = \text{const}$. Из полученного графика определить λ . Вычислить частоту колебаний генератора из соотношения $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ($c = 3 \cdot 10^{10}$ см/сек).

Упражнение 3

Измерение диэлектрической проницаемости ϵ пластинки из оргстекла

На провод надевается диск из оргстекла толщиной d и прижимается к медному диску, после чего повторяют измерения $I = f(x)$. Распределение максимумов и минимумов переместится на величину δ относительно распределения $I = f(x)$, измеренного во втором упражнении.

Смещение минимума на величину $\delta = (\sqrt{\epsilon_{0,c}} - 1) d$ произойдет за счет изменения скорости распространения волны в пластинке из оргстекла. Если δ не превышает величины $\lambda/2$, то можно при

известных d и δ определить $\epsilon_{0,c}$ для оргстекла. Воспользоваться этим методом измерения можно, только если ϵ вещества лежит в заранее известном интервале значений, так как смещения максимума на целое число длин волн обнаружить нельзя и, например, два смещения $\delta_1 = n\lambda + \delta$ и δ неразличимы. Это накладывает на толщину пластины условие $d < \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{\max} - 1}}$, где ϵ_{\max} — максимальное ожидаемое значение $\epsilon_{0,c}$.

Обработка измерений. Кривые $I = f(x)$ второго и третьего упражнений следует начертить на одном графике. Из графика определить δ по смещению минимума или максимума и, зная толщину диска d , подсчитать $\epsilon_{0,c}$ по формуле

$$\epsilon_{0,c} = \left(1 + \frac{\delta}{d}\right)^2.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Горелки, Колебания и волны, Физматгиз, 1959.
2. С. Г. Калашников, Электричество, «Наука», 1964.

ЗАДАЧА 123

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ
СОБИРАТЕЛЬНОЙ И РАССЕИВАЮЩЕЙ ЛИНЗ**

Элементарная теория тонких линз приводит к простым соотношениям между фокусным расстоянием тонкой линзы, с одной стороны, и расстояниями от линзы до предмета и до его изображения — с другой. Простой оказывается также связь между размерами объекта, его изображения, даваемого линзой, и их расстояниями до линзы.

Определяя на опыте названные величины, нетрудно по упомянутым соотношениям вычислить фокусное расстояние тонкой линзы с точностью, вполне достаточной для большинства случаев.

*Упражнение 1***Определение фокусного расстояния собирающей линзы**

Описание прибора. На расположенной горизонтально оптической скамье могут перемещаться на ползушках следующие приборы: линза, экран со шкалой, зрительная труба и специальный осветитель. В передней стенке осветителя имеется вырез, освещаемый находящейся внутри него электрической лампочкой. Освещенный прямоугольник этого выреза играет роль объекта (предмета), изображение которого получается с помощью изучаемых линз. Для повышения точности фокусировки изображения в вырезе натянута сетка, перед которой для ослабления хроматической аберрации помещен светофильтр (обычно окрашенная в красный цвет пленка). Ячейки центральной части сетки можно сфокусировать точнее, чем края выреза.

Все эти приборы устанавливаются так, чтобы центры их лежали на одной высоте, плоскости экранов были перпендикулярны к длине оптической скамьи, а ось линзы — ей параллельна. Расстояния между приборами отсчитываются по шкале линейки (масштабу), расположенной вдоль скамьи, при помощи указателей, укрепленных на ползушках.

Определение фокусного расстояния собирающей линзы производится следующими способами.

Способ 1. Определение фокусного расстояния по расстоянию предмета и его изображения от линзы. Если обозначить буквами a и b расстояния предмета и его изображения от линзы, то фокусное расстояние последней выразится формулой

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad (1)$$

или

$$f = \frac{ab}{a+b} \quad (2)$$

(эта формула справедлива только в том случае, когда толщина линзы мала по сравнению с a и b).

Измерения. Поместив экран со шкалой на достаточно большом расстоянии от осветителя, ставят линзу между ними и передвигают ее до тех пор, пока не получат на экране отчетливого изображения выреза в осветителе и натянутой в нем сетки. Отсчитав по линейке, расположенной вдоль скамьи, положение линзы, экрана и сетки, передвигают ползушки с осветителем и экраном в другое положение и вновь отсчитывают соответствующее положение линзы и всех приборов на линейке.

Ввиду неточности визуальной оценки резкости изображения, измерения рекомендуется повторять не менее десяти раз. Кроме того, в данном способе полезно проделать часть измерений при увеличенном, а часть при уменьшенном изображении сетки.

Из каждого отдельного измерения по формуле (2) вычисляют фокусное расстояние линзы и из полученных результатов находят его среднее арифметическое значение.

Для того чтобы убедиться, что форма изображения не зависит от величины и формы отверстия линзы, рекомендуется перед линзой или за ней помещать поочередно различные диафрагмы из прилагаемого набора (щель, кольцо, полукруг и т. п.) и проследить их влияние на изображение. Проследить также за влиянием диафрагмирования линзы на резкость даваемого ею изображения.

Способ 2. Определение фокусного расстояния по величине предмета и его изображения и по расстоянию последнего от линзы. Обозначим величину предмета l , величину его изображения L и расстояния их от линзы соответственно через a и b . Эти величины связаны между собой известным соотношением

$$\frac{l}{L} = \frac{a}{b}.$$

Определяя отсюда a (расстояние от предмета до линзы) и подставляя его в формулу (1), легко получить выражение f через эти три величины

$$f = b \frac{l}{L+l}. \quad (3)$$

Измерения. Ставят линзу между экраном и предметом так, чтобы на экране со шкалой получилось сильно увеличенное отчетливое изображение выреза в осветителе и сетки, и отсчитывают положения линзы и экрана. Измеряют при помощи линейки величину предмета и величину его изображения на шкале экрана. Изменив расстояние от изображения до линзы, находят фокусное расстояние линзы по формуле (3).

Изменяя расстояние от плоскости сетки до экрана, повторяют опыт несколько раз.

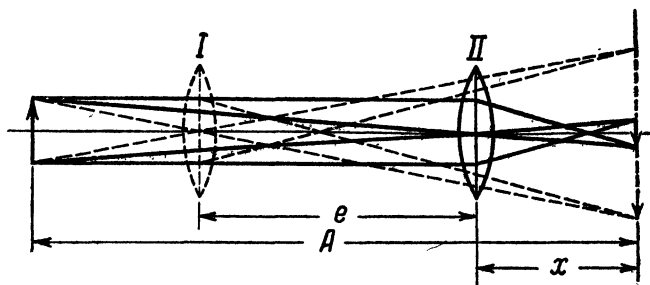


Рис. 1.

Способ 3 (Бесселя). Определение фокусного расстояния по величине перемещения линзы. Если расстояние от предмета до изображения, которое обозначим через A , более $4f$, то всегда найдутся два таких положения линзы, при которых на экране получается отчетливое изображение предмета: в одном случае уменьшенное, в другом — увеличенное (рис. 1).

Нетрудно видеть, что при этом оба положения линзы будут симметричны относительно середины расстояния между предметом и изображением. Действительно, воспользовавшись уравнением (2), можно написать для первого и второго положений линзы (рис. 1)

$$f = \frac{(A - e - x)(x + e)}{A} \quad \text{и} \quad f = \frac{(A - x)e}{A}.$$

Приравняв правые части этих уравнений, найдем $x = (A - e)/2$. Подставив это значение x в выражение $A - e - x$, легко найдем, что

$$A - e - x = \frac{A - e}{2},$$

т. е. что действительно оба положения линзы находятся на равных расстояниях от предмета и изображения и, следовательно, симметричны относительно середины расстояния между предметом и изображением.

Чтобы получить выражение для фокусного расстояния, рассмотрим одно из положений линзы, например. первое; для него расстояние от предмета до линзы

$$a = \frac{A - e}{2},$$

а расстояние от линзы до изображения

$$b = \frac{A + e}{2}.$$

Подставляя эти величины в формулу (2), найдем

$$f = \frac{A^2 - e^2}{4A}. \quad (4)$$

Этот способ является принципиально наиболее общим и пригодным как для толстых, так и для тонких линз. Действительно, когда в предыдущих случаях пользовались для расчетов величинами a и b , то подразумевали отрезки, измеренные до центра линзы; на самом же деле следовало эти величины измерять от соответствующих главных плоскостей линзы, определение положения которых довольно затруднительно¹⁾. В описываемом же способе эта ошибка исключается благодаря тому, что в нем измеряется не расстояние от линзы, а лишь величина ее перемещения.

Измерения. Установив осветитель и экран на расстоянии $A > 4f$ (ориентировочно значение f берут из предыдущих опытов), помещают линзу между ними и, передвигая ее, добиваются получения на экране вполне отчетливого изображения предмета, например увеличенного. Отсчитав по шкале соответствующее положение линзы, сдвигают ее в сторону и вновь устанавливают. Эти измерения производят несколько раз.

Передвигая линзу, добиваются получения второго отчетливого изображения предмета — уменьшенного и вновь отсчитывают положение линзы по шкале. Повторяют опыт и измерения несколько раз.

Измерив расстояние A между экраном и сеткой осветителя, а также среднее значение перемещения e , вычисляют фокусное расстояние линзы по формуле (4).

Способ 4. Определение фокусного расстояния посредством зрительной трубы. Как известно, лучи, выходящие из фокуса линзы, пройдя ее, идут параллельно оптической оси линзы. На этом свойстве линз и основан четвертый способ.

Измерения. Устанавливают зрительную трубу на бесконечность, наводя ее на достаточно удаленный предмет²⁾. Ставят трубу на

¹⁾ О главных плоскостях сложной оптической системы см. задачу 126.

²⁾ На окулярной части зрительных труб, используемых в практикуме, имеется кольцевая риска, указывающая, при каком положении окулярного тубуса труба наведена на бесконечность.

оптическую скамью и помещают перед ее объективом исследуемую линзу, а за ней— осветитель.

Передвигая линзу, устанавливают ее так, чтобы в трубе получилось совершенно отчетливое изображение сетки, и измеряют расстояние от сетки до линзы, которое и будет равно искомому фокусному расстоянию.

Упражнение 2

Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы

Описание прибора. Укрепленные на ползушках рассеивающая и собирающая линзы, полупрозрачный экран и осветитель размещают вдоль оптической скамьи и устанавливают согласно тем же правилам, как и в упражнении 1.

Измерение фокусного расстояния рассеивающей линзы производится следующими способами.

Способ 1. Определение фокусного расстояния по расстоянию предмета и его изображения от линзы. Если на пути лучей, выходящих из

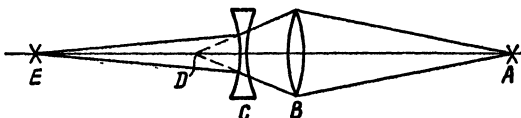


Рис. 2.

точки A и сходящихся в точке D после преломления в собирающей линзе B (рис. 2), поставить рассеивающую линзу C так, чтобы расстояние CD было меньше ее фокусного расстояния, то изображение точки A удалится от линзы B . Пусть, например, оно переместится в точку E . В силу оптического принципа взаимности мы можем теперь мысленно рассмотреть лучи света, распространяющиеся из точки E в обратную сторону. Тогда точка D будет мнимым изображением точки E после прохождения лучей через рассеивающую линзу C .

Обозначая расстояние EC буквой a , DC — через b и замечая, что f и b имеют отрицательные знаки, получим согласно формуле (1)

$$-\frac{1}{f} = \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \quad (5)$$

и, следовательно,

$$f = \frac{ab}{a-b}. \quad (6)$$

Измерения. На оптической скамье размещают осветитель, собирающую линзу и полупрозрачный экран. Передвигая экран, получают на нем отчетливое изображение сетки осветителя. Сделав

отсчет этого положения экрана на шкале оптической скамьи, сдвигают экран в сторону и вновь находят изображение сетки. Таких установок и отсчетов делают до десяти и берут из них среднее арифметическое. Это дает положение точки D (рис. 2).

Отодвинув экран влево, ставят на скамью между найденным выше положением экрана и собирающей линзой исследуемую линзу и вновь находят отчетливое изображение сетки. Отсчитывают по шкале оптической скамьи положение линзы (или экрана) и, сдвигая ее (или экран), повторяют установку и отсчеты до десяти раз; из полученных результатов берут среднее ¹⁾. Отыскав несколько раз второе положение экрана (точку E), находят расстояния EC и DC и вычисляют фокусное расстояние по формуле (6).

Прежде чем приступить к тщательному нахождению первого положения экрана (точка D), рекомендуется убедиться, получается ли при данном расположении приборов отчетливое действительное изображение объекта при одновременной работе обеих линз.

Способ 2. Определение фокусного расстояния при помощи зрительной трубы. Если точка D (рис. 2) совпадает с фокусом рассеивающей линзы, то согласно формуле (5) точка E должна переместиться в бесконечность, т. е. лучи после рассеивающей линзы пойдут параллельным пучком. На этом соображении основан второй способ определения фокусного расстояния рассеивающей линзы.

Измерения. Найдя, как и прежде, положение изображения, даваемого собирающей линзой (точку D), удаляют экран; помещают исследуемую линзу между найденным положением экрана и собирающей линзой, а за рассеивающей линзой ставят оптическую трубу, установленную предварительно на бесконечность ²⁾. Перемещающая рассеивающую линзу, добиваются того, чтобы в трубе получилась отчетливое изображение сетки.

Отсчитывают найденное положение линзы; затем сдвигают ее и снова устанавливают. Сделав не менее десяти отсчетов, берут из них среднее. Расстояние между найденным положением экрана и этим положением линзы дает фокусное расстояние последней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, отд. III, гл. VI, Гостехиздат, 1957.
2. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева, Курс общей физики, т. III, Физматгиз, 1962.
3. Р. Вуд, Физическая оптика, гл. VI, ОНТИ, 1936.
4. Г. Г. Слюсарев, Геометрическая оптика, Изд. АН СССР, 1946.

¹⁾ Разумеется, можно перемещать либо экран, либо линзу, но ни в коем случае оба эти прибора одновременно, в ходе одной и той же серии совместно обрабатываемых измерений.

²⁾ См. примечание на стр. 392

ЗАДАЧА 124

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ТРУБЫ И МИКРОСКОПА

Задача имеет целью ознакомить студентов с различными методами определения увеличения микроскопа и зрительной трубы.

Введение. Оптическая труба и микроскоп представляют собой оптические системы, состоящие в основном из двух линз, первая из которых, обращенная к наблюдаемому объекту (объектив), создает действительное обратное изображение $A'B'$ предмета AB (рис. 1).

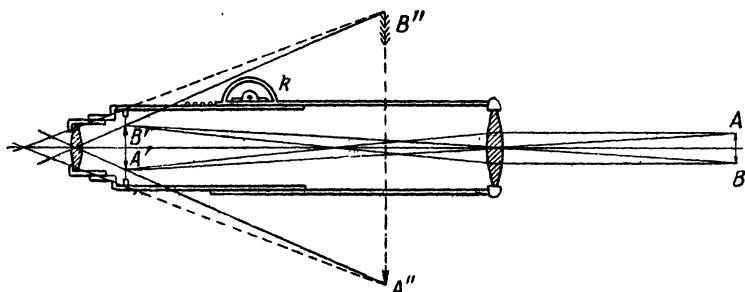


Рис. 1.

Это изображение в свою очередь является предметом по отношению ко второй линзе (окуляру), которая, действуя как лупа, дает мнимое, увеличенное по отношению к $A'B'$ изображение $A''B''$ на расстоянии ясного зрения от глаза наблюдателя.

Объектив микроскопа, рассчитанного на расстояние мелких близлежащих предметов, имеет короткое фокусное расстояние. Предмет помещается перед объективом немного дальше его фокуса, в результате чего изображение $A'B'$ оказывается значительно увеличенным. Объектив трубы, употребляющейся для наблюдения предметов, находящихся на сравнительно больших расстояниях (превышающих двойное фокусное расстояние объектива), берется длиннофокусный, даваемое им изображение $A'B'$ получается уменьшенным.

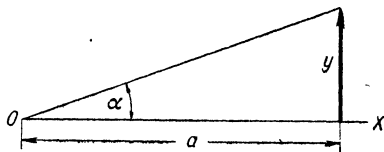


Рис. 2.

Для характеристики увеличения, даваемого оптической системой, используется величина, называемая *углом зрения*. Углом зрения α называется угол, под которым глаз, находящийся в точке O (рис. 2), видит предмет или изображение предмета y , перпендикулярные оси Ox . Величина α может быть найдена из соотношения $\text{tg } \alpha = y/a$, где a — расстояние между предметом и глазом.

Отношение тангенса угла зрения, под которым видно изображение, даваемое оптической системой, к тангенсу угла зрения, под которым виден предмет невооруженным глазом, называется *угловым увеличением системы*. Ниже будет рассмотрен вопрос о значении углового увеличения труб и микроскопов.

Фокусировка прибора, т. е. установка его на ясное видение изображения, производится либо изменением расстояния между объективом и окуляром (труба), либо перемещением прибора в целом относительно объекта (микроскоп). И то и другое производится обычно при помощи кремальеры k (рис. 1). Последняя состоит из укрепленного на неподвижной части прибора зубчатого колеса, которое при вращении передвигает подвижную часть при помощи установленной на ней зубчатой рейки.

Применение оптических инструментов для измерений возможно осуществить различными способами. Один из них, наиболее простой, заключается в том, что измеряемый объект рассматривается вместе со шкалой, помещенной непосредственно рядом с ним, через трубу или микроскоп. Благодаря совместному и одинаковому увеличению объекта и шкалы отсчет положения объекта на шкале становится при этом гораздо более точным. Примером таких измерений может служить отсчет показаний термометра при помощи зрительной трубы.

В несколько ином виде труба и микроскоп сами применяются в качестве частей измерительных приборов. В этом случае их окуляры снабжаются отсчетным крестом. Последний состоит из двух очень тонких взаимно-перпендикулярных штрихов, нанесенных на стеклянной пластинке, помещенной вблизи фокальной плоскости глазной линзы окуляра. Перемещением оптического прибора (трубы, микроскопа) изображение любой точки объекта может быть приведено в совпадение с точкой пересечения штрихов креста. Это перемещение может отсчитываться по соответствующей шкале, что и дает возможность определить расстояние между любыми точками объекта.

Нередко труба и микроскоп в сочетании с так называемым окулярным микрометром применяются для измерения небольших расстояний. Окулярный микрометр представляет собой плоскую стеклянную пластинку с нанесенными на ней миллиметровыми делениями. Каждое миллиметровое деление снабжено цифрой и разбито на 10 частей. Обычно окулярные микрометры помещаются в плоскости диафрагмы, совпадающей с фокальной плоскостью окуляра. На них проектируется изображение объекта, даваемое объективом.

Для измерения величины объекта надо знать цену деления микрометра, т. е. расстояние между двумя ближайшими штрихами микрометра, и увеличение, даваемое объективом прибора. Но если зрительная труба или микроскоп применяются в условиях, когда даваемое ими увеличение неизменно, то целесообразно найти некоторую эффективную цену деления микрометра уже с учетом

увеличения, даваемого объективом. Величина эта определяется следующим образом: прибор наводят на шкалу с известными делениями l , установленную строго перпендикулярно к его оси и на том же расстоянии, на котором в дальнейшем помещается наблюдаемый объект. Находят два таких деления микрометра, которые точно совпадают с изображениями каких-либо делений шкалы. Пусть между этими делениями заключено n делений микрометра и m делений шкалы. Тогда можно утверждать, что $nl' = ml$ и, следовательно, цена деления микрометра при данном увеличении будет

$$l' = \frac{m}{n} l.$$

При использовании прибора в других условиях надо либо заново определить цену деления микрометра, либо учесть изменение увеличения, даваемого объективом прибора.

При пользовании приборами, имеющими окулярный микрометр, прежде чем сфокусировать объект, следует соответствующим передвижением глазной линзы окуляра сфокусировать сам микрометр, который обыкновенно бывает укреплен неподвижно внутри прибора.

В винтовом окулярном микрометре вблизи фокальной плоскости глазной линзы окуляра находится небольшая рамка с косым крестом двух штрихов, нанесенных на стеклянной пластинке, перемещающаяся в поле зрения при помощи барабана с микрометрическим винтом. Один оборот барабана обычно соответствует перемещению центра креста на 1 мм. Барабан разделен на 100 частей; следовательно, смещение креста можно отсчитывать с точностью до 0,01 мм. Разумеется, при измерениях, производимых и этим микрометром, надо учитывать, с каким увеличением изображение объекта проектируется объективом на плоскость креста микрометра. (О том, как применять винтовой микрометр в сочетании с микроскопом, см. в описании последнего упражнения настоящей задачи.)

Упражнение 1

Определение увеличения оптической трубы

В этой задаче определение увеличения оптической трубы производится двумя методами.

Первый метод. Пусть l_0 — предмет, находящийся на расстоянии d_0 от глаза O наблюдателя, l — изображение предмета, видимое в трубу и находящееся на расстоянии d от O , α_0 и α — соответствующие углы зрения (рис. 3).

Согласно определению увеличения

$$D = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha_0} = \frac{l}{d} : \frac{l_0}{d_0} = \frac{ld_0}{l_0 d}.$$

Спроектируем изображение l на плоскость предмета при помощи центральной проекции с центром в точке O , т. е. так, чтобы все

точки изображения переместились вдоль лучей, соединяющих их с глазом наблюдателя. Спроектированное таким образом изображение займет положение L . Очевидно, что угол зрения, под которым видна эта проекция, есть α , а расстояние ее от глаза есть d_0 . В этом случае увеличение

$$D' = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha_0} = D = \frac{L}{l_0}.$$

Если предмет представляет собой шкалу, длина одного деления которой есть l_0 , то, спроектировав ее изображение на ту же шкалу, получим изображение, длина деления которого будет L , причем $L > l_0$. Если теперь выбрать такой отрезок шкалы, чтобы на нем разместились n делений предмета и N делений изображения, где n и N — числа целые и $n > N$, то можно написать $nl_0 = NL$; следовательно,

$$D = \frac{L}{l_0} = \frac{n}{N}. \quad (1)$$

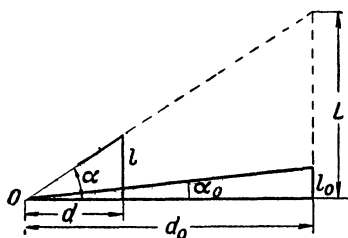


Рис. 3.

Если предмет расположен не так, как указано на рис. 3, а пересекает ось прибора, то выражение (1) не изменится; в этом можно легко убедиться, сделав соответствующее построение.

Измерения. Установив трубу на ясное видение удаленной на несколько метров линейки с делениями, смотрят одним глазом на изображение этой линейки через трубу, а другим — непосредственно на линейку. Устанавливают глаза так, чтобы изображение в трубе налагалось на видимую невооруженным глазом линейку и определяют количество n целых делений шкалы линейки, совпадающих с N целыми делениями её изображения. Увеличение D вычисляется по формуле (1).

Второй метод. Известно, что между угловым увеличением оптической трубы и фокусными расстояниями составляющих ее линз существует следующее соотношение:

$$D = \frac{f_1}{f_2},$$

где f_1 — главное фокусное расстояние объектива, а f_2 — окуляра. Кроме того, в случае установленной на бесконечность трубы длину ее d , т. е. расстояние между объективом и окуляром, можно считать равной $f_1 + f_2$.

Если, вывинтив объектив предварительно установленной на бесконечность трубы, поместить на его место предмет определенной величины L (диафрагму с вырезом), то по другую сторону окуляра на некотором расстоянии b от него получится действительное изображение предмета величины l , даваемое окуляром.

На основании формулы увеличения линзы имеем

$$L : l = (f_1 + f_2) : b, \quad (2)$$

кроме того,

$$\frac{1}{f_1 + f_2} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f_2}, \quad (3)$$

исключая b из (2) и (3), получим

$$\frac{L}{l} = \frac{f_1}{f_2} = D. \quad (4)$$

Измерения. Устанавливают трубу на бесконечность, т. е. так, чтобы какой-нибудь удаленный предмет был ясно виден ¹⁾).

Вывинчивают объектив трубы и ставят на его место диафрагму с вырезом (в форме ромба). Направляют трубу на какой-нибудь освещенный светлый предмет, например на ту же самую шкалу, которой пользовались при определении увеличения трубы первым методом.

Укрепленную на штативе лупу фокусируют так, чтобы шкала микрометра была ясно видна, и, приближая лупу к окуляру трубы, добиваются получения на шкале микрометра отчетливого изображения ромба. Определяют число делений, занимаемых на шкале микрометра диагоналями ромба. Измеряют линейкой или штанген-циркулем длину диагоналей ромба непосредственно на диафрагме.

Если длина диагоналей ромба равна L_1 и L_2 , а длина их изображения на шкале микрометра равна l_1 и l_2 , то увеличение трубы

$$D = \frac{\frac{L_1}{l_1} + \frac{L_2}{l_2}}{2}.$$

Упражнение 2

Определение поля зрения оптической трубы

Для определения поля зрения трубы ее фокусируют на стенную линейку с делениями и замечают, сколько делений этой линейки видны в трубу. Затем измеряют рулеткой расстояние от объектива трубы до линейки.

Если число делений линейки, видимых в трубу, равно n , а расстояние от трубы до линейки равно L , то поле зрения оптической трубы, выраженное в градусах, определяется формулой

$$a = 57,3 \frac{n}{L}.$$

¹⁾ См. примечание на стр. 392.

Упражнение 3

Определение увеличения микроскопа и измерение скорости роста кристаллов

Описание прибора. В устройстве микроскопа простейшего типа можно выделить две основные части: механическую и оптическую (рис. 4).

Механическая часть микроскопа состоит из штатива (подразделяющегося в свою очередь на основание *A*, колонку *B* и предметный столик *C*), тубуса *D* и приспособлений *E* для крепления зеркала *S*, необходимого для освещения объекта. Эти приспособления находятся под предметным столиком (см. ниже).

Штатив микроскопа имеет массивное основание, придающее ему необходимую устойчивость. Колонка, в простых моделях неподвижно укрепленная в вертикальном положении, может в более сложных и дорогих моделях наклоняться для более удобного наблюдения.

Предметный столик квадратной или круглой формы служит для поддержания препарата и имеет на верхней плоскости два отверстия, в которые вставляются штифты с пружинами, прижимающими препарат к столику для предохранения его от передвижения во время наблюдения.

Непосредственно под столиком или на конденсоре укреплена переменная диафрагма, служащая для регулировки освещенности рассмат-

риваемого изображения объекта. Диафрагмы бывают двух родов: револьверные и ирисовые. Более простые — револьверные — состоят из диска, в котором просверлен ряд отверстий различного диаметра; эти отверстия могут устанавливаться против отверстия в столике микроскопа поворотом диска. Ирисовые диафрагмы состоят из стальных пластинок особой формы, образующих круглое отверстие, диаметр которого можно плавно изменять, поворачивая пластинки при помощи рычажка,

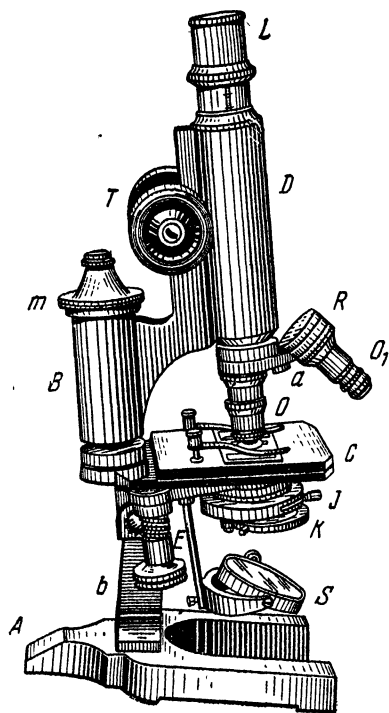


Рис. 4.

Тубус представляет собой раздвижную цилиндрическую трубу, длина которой может измеряться по шкале, нанесенной на боковой поверхности верхней половины.

Тубус в целом связан с колонкой при помощи салазок и может передвигаться при вращении кремальберного винта T . Более медленное передвижение тубуса, необходимое для точной фокусировки объекта, достигается вторым микрометрическим винтом m . Нижнее отверстие тубуса имеет нарезку для привертывания объектива или «револьвера» R — особого держателя, несущего на себе от двух до четырех объективов и позволяющего быстро менять их. Для того чтобы ось объектива всегда совпадала с осью микроскопа, револьвер снабжен защелкивающей пружинкой, которая, попадая в специальную прорезь, удерживает объектив в нужном положении.

Оптическая часть состоит из осветительного аппарата, состоящего в свою очередь из зеркала S и конденсора K , сменных объективов O, O_1 и окуляра L .

Приспособление для установки осветительного аппарата состоит из вилкообразного держателя для зеркала, вращающегося вокруг двух перпендикулярных осей, и кремальеры или винта, передвигающих конденсор вдоль оси микроскопа. Последнее имеется лишь у более совершенных приборов.

Зеркало служит для направления лучей от источника света вдоль оси прибора сквозь рассматриваемый объект. Делается оно обыкновенно из стекла и имеет две поверхности — плоскую и вогнутую. Последняя служит для усиленной концентрации света на рассматриваемом объекте в тех случаях, когда нельзя пользоваться конденсором, вносящим некоторое искажение в изображение объекта.

Конденсор состоит обыкновенно из двух или трех линз, при помощи которых отражающийся от зеркала свет концентрируется сильно сходящимся пучком на объекте (рис. 5). Для наиболее отчетливого изображения необходимо, чтобы объект находился в фокусе этого пучка, для чего конденсор передвигают вверх или вниз при помощи описанного выше приспособления.

Объектив (рис. 6) — важнейшая часть микроскопа — представляет собой систему линз, собранную в единой оправе. Передняя так называемая *фронтальная линза* является главной и единственной производящей увеличение, остальные же служат лишь для исправления недостатков изображения, создаваемого фронтальной линзой, и поэтому называются *корректирующими*. Объективы нумеруются в порядке возрастания увеличения.

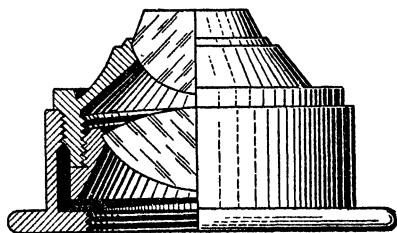


Рис. 5.

Окуляр (рис. 7) представляет собой сложную лупу, состоящую обыкновенно из двух линз: верхней *глазной* и нижней *собирающей*, отстоящих друг от друга на расстоянии, равном полусумме их фокусных расстояний. Обе линзы заключены в короткую цилиндрическую трубку, которая вставляется в верхнее отверстие

тубуса. Так же, как и объективы, они нумеруются в порядке возрастания увеличения.

Теория прибора. Ход лучей (рис. 8). Свет от осветительной лампы падает на зеркало *S* и, отражаясь от него, направляется через отверстие диафрагмы *I* в конденсор *K*. Выйдя из последнего, лучи сильно сходящимся пучком попадают на объект, помещенный на плоскопараллельной стеклянной

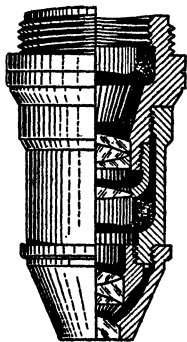


Рис. 6.

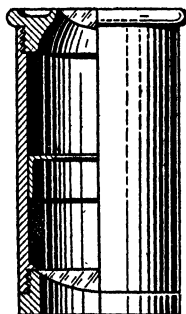


Рис. 7.

пластинке несколько дальше фокуса объектива и находящийся одновременно вблизи фокуса конденсора. Пройдя объектив, лучи слабо сходящимся пучком идут до окуляра и должны были бы дать в плоскости L_1 , сопряженной с плоскостью объекта, увеличенное обратное действительное изображение N_1M_1 . Но на пути их находится собирающая линза окуляра, преломляясь в которой, лучи сходятся несколько ближе к объективу в плоскости L_2 и дают изображение N_2M_2 .

В этой плоскости, положение которой определяется для данного микроскопа длиной тубуса, помещается диафрагма, обрезающая крайние лучи и ограничивающая, таким образом, поле зрения, т. е. являющаяся *диафрагмой поля зрения*. Положение ее в большинстве микроскопов соответствует длине тубуса, равной 160 мм.

Так как плоскость L_2 лежит ближе к центру глазной линзы окуляра, чем ее фокус, то действие этой линзы сводится к действию простой лупы. Следовательно, вместо изображения N_2M_2 мы получаем мнимое, обратное (по отношению к объекту) и еще более увеличенное изображение N_3M_3 , лежащее в плоскости L_3 . Обыкновенно эта плоскость устанавливается наблюдателем на расстоянии ясного зрения его глаза.

Увеличение микроскопа равно произведению увеличений объектива и окуляра. Если рассматривать объектив как проекционный прибор, то величина изображения N_1M_1 представляется формулой

$$N_1M_1 = \frac{NM \cdot \delta}{f_1}, \quad (5)$$

где f_1 — фокусное расстояние объектива, а δ — расстояние изображения от центра объектива.

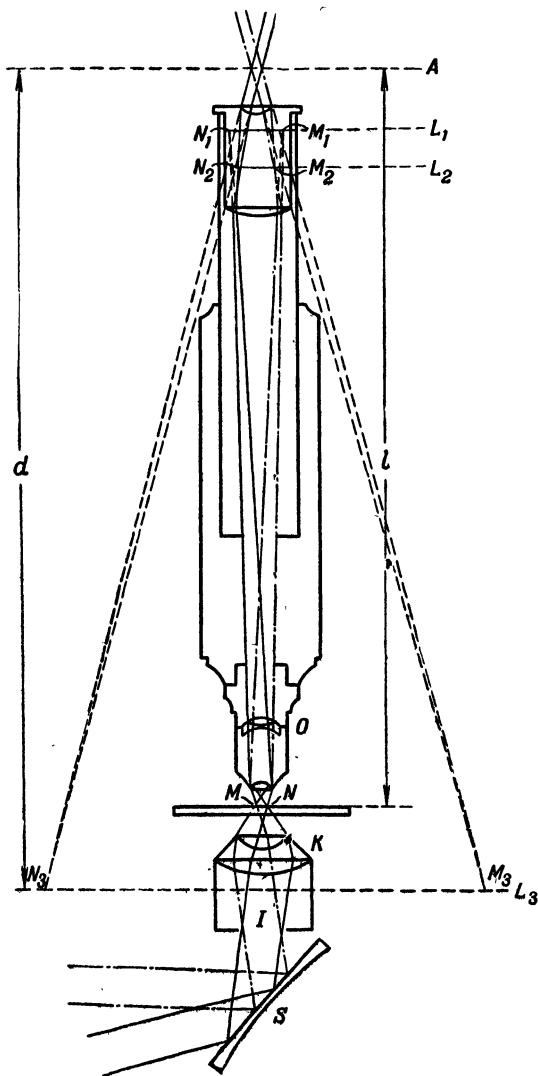


Рис. 8.

Действие обеих линз окуляра можно заменить действием эквивалентной им линзы с фокусным расстоянием f_2 , используемой в качестве лупы. Согласно формуле, выражающей увеличение лупы,

имеем

$$N_3 M_3 = N_1 M_1 \frac{d}{f_2}, \quad (6)$$

где d — расстояние ясного зрения глаза наблюдателя. Согласно формуле (5)

$$N_3 M_3 = NM \frac{\delta d}{f_1 f_2}.$$

Линейное увеличение микроскопа будет

$$\omega = \frac{N_3 M_3}{NM} = \frac{\delta d}{f_1 f_2}. \quad (7)$$

Так как изображение $N_1 M_1$ должно лежать весьма близко к фокусу окуляра, а фокусное расстояние объектива весьма мало, то с достаточной степенью точности можно считать δ равным расстоянию между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра; это расстояние называется *оптической длиной микроскопа*.

Угловое увеличение микроскопа определяется формулой

$$D = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha_0}, \quad (8)$$

где α и α_0 — углы зрения изображения $N_3 M_3$ и предмета NM . Из рис. 300 ясно, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{N_3 M_3}{2d}; \quad \operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{NM}{2l},$$

где l — расстояние от объекта до плоскости A , в которой помещается глаз наблюдателя; следовательно,

$$D = \frac{N_3 M_3 l}{NM d} = \omega \frac{l}{d}. \quad (9)$$

Измерения. Для определения увеличения микроскопа D нет необходимости сравнивать непосредственно величины самого объекта и его изображения, которые находятся, как мы видели, на различных расстояниях от глаза. Вместо этого достаточно сравнить величину изображения с каким-либо другим предметом, отношение величины которого к величине объекта нам точно известно. При этом предмет должен быть помещен на том же расстоянии от глаза, как и сравниваемое изображение объекта. Измерение производится следующим образом.

Установив длину тубуса равной 160 мм, кладут на столик микроскопа объектный микрометр — стеклянную пластинку с нанесенной на ней шкалой с делениями через 0,01 мм и фокусируют микроскоп на ясное видение последних.

Сбоку от микроскопа на расстоянии ясного зрения от его оси, равном 25 см (для нормального глаза), ставят вертикальную шкалу

с делениями в 1 мм. На окуляр микроскопа ставят наклоненное под углом 45° к оси прибора полупрозрачное (или имеющее продольный вырез) зеркальце и устанавливают глаз и это зеркальце так, чтобы одновременно видеть как изображение микрометра в микроскопе, так и вертикальную шкалу. При этом для выравнивания освещенности изображений обеих шкал рекомендуется пользоваться диафрагмой конденсора или изменением наклона зеркала предметного столика.

Отсчитывают количество целых делений шкалы N_1 , совпадающих с целым числом делений изображения микрометра N_2 . Так как отношение длины делений шкалы и микрометра равно 100, то

$$D = \frac{N_1}{N_2} \cdot 100; \quad (10)$$

зная D , по формуле (9) легко найти линейное увеличение.

Измерение скорости роста кристаллов. На тубус микроскопа надевают винтовой окулярный микрометр. Наводя крест окуляра на деления шкалы объект-микрометра, положенного на предметный столик микроскопа, и перемещая крест вдоль этой шкалы, находят, какому линейному отрезку в миллиметрах в плоскости предмета соответствует одно деление на барабане окулярного винтового микрометра. Это будет цена деления микрометра в условиях его использования с данным объективом.

На предметном стекле размазывают тонким слоем каплю водного раствора CuSO_4 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ или другой соли; при испарении раствора из него выпадают кристаллы. Препарат помещают на столик микроскопа и фокусируют последний на ясное зрение.

Устанавливают крест нитей микрометра на одну из граней кристалла, одновременно пускают в ход секундомер и отсчитывают показания барабана микрометра. Перемещая крест микрометра вслед за растущей гранью, засекают секундомером ее положение через некоторое время и отсчитывают новые показания барабана микрометра. Зная величину перемещения грани и время, за которое оно произошло, вычисляют скорость роста кристалла в этом направлении.

Такие же измерения производят и для других граней кристалла. Скорость роста кристалла можно определить также с помощью рисовального аппарата, принцип действия которого ясен из рис. 9. Над окуляром микроскопа помещен стеклянный кубик $adbc$,

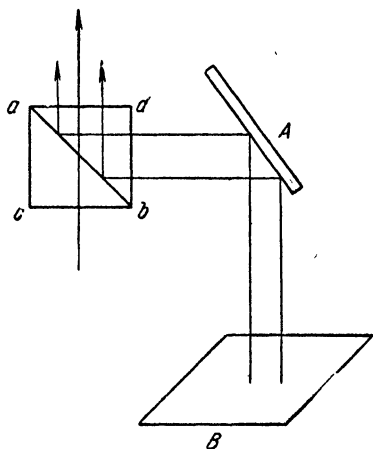


Рис. 9.

диагональное сечение ab которого посеребрено со стороны, обращенной к глазу. В центре сечения оставлен непосеребранный кружок, так что через него лучи из микроскопа попадают в глаз одновременно с изображением листа бумаги B . Грань растущего кристалла зарисовывается в двух положениях, и секундомером измеряется время ее перемещения. Ее перемещения на рисунке измеряются циркулем и линейкой. Зная время, за которое произошло смещение грани, и увеличение микроскопа, определяют скорость ее роста.

Технические данные установки. Для постановки задачи необходимо иметь: оптическую трубу, например типа ОТ-1, лупу (с микрометром 0,1 мм) на штативе. Микроскоп «Прогресс» ОМЗ с двумя сменными объективами и двумя окулярами, винтовой окулярный микрометр АМ-9, объектный микрометр, рисовальный аппарат, наклонное зеркальце на цилиндрической подставке, шкалу с миллиметровыми делениями, установленную на вертикальном штативе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. Курс физики под редакцией Н. Д. Папалекси, т. II, Гостехиздат, 1948.
3. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева, Курс общей физики, т. III, Физматгиз, 1962.
4. Г. Г. Слюсарев, Геометрическая оптика, Изд. АН СССР, 1945.
5. Р. Дитчберн, Физическая оптика, «Наука», 1965.

ЗАДАЧА 125

ИЗУЧЕНИЕ ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ

Введение. Задача посвящена определению увеличения зрительной трубы, измерению ее поля зрения и предела разрешения.

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с устройством зрительной трубы (см. [1] и описание задачи 124).

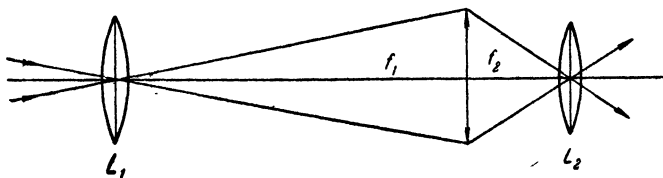


Рис. 1.

Напомним только, что зрительные трубы являются сложными оптическими системами, состоящими из объектива и окуляра. Действительное (уменьшенное и обратное) изображение отдаленного предмета, даваемое объективом, рассматривается в окуляр как

в лупу (рис. 1). Зрительные трубы представляют собой обычно телескопические системы, т. е. такие системы, у которых задний фокус объектива совмещается с передним фокусом окуляра. Увеличение зрительной трубы определяется отношением фокусного расстояния объектива f_1 к фокусному расстоянию окуляра f_2 , т. е.

$$N = \frac{f_1}{f_2}. \quad (1)$$

Окуляром в зрительной трубе Кеплера является положительная линза (рис. 1), причем расстояние между объективом и окуляром равно сумме их фокусных расстояний. Такая система дает перевернутое изображение объекта.

В зрительной трубе Галилея (рис. 2) окуляр представляет собой рассеивающую линзу, и расстояние между объективом и окуляром равно разности их фокусных расстояний. Труба Галилея дает прямое изображение объекта.

При рассмотрении вопроса о возможности различения с помощью зрительной трубы мелких деталей предмета необходимо учитывать дифракционные явления, которые определяют разрешающую силу зрительной трубы, т. е. возможность получения раздельных изображений двух близких точек предмета. Свет, попадающий в зрительную трубу, дифрагирует на круглой оправе объектива, играющей роль входного зрачка системы, в результате чего в фокальной плоскости объектива получается не простое стигматическое изображение точки, а сложная дифракционная картина с центральным максимумом освещенности, окруженным темными и светлыми кольцами.

По Релею, для определенности, принимают за предел разрешения такое положение, при котором максимум освещенности дифракционной картины от одной точки предмета совпадает с первым минимумом освещенности дифракционной картины от его второй точки (рис. 3), тогда наименьшее расстояние между разрешаемыми изображениями точек будет равно величине радиуса первого темного кольца,

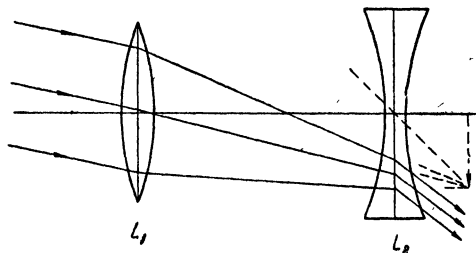


Рис. 2.

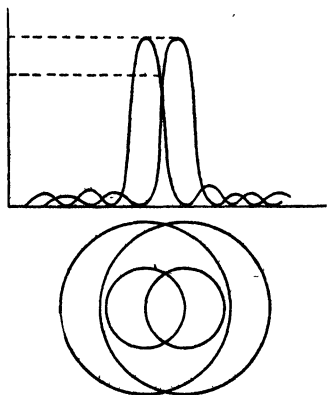


Рис. 3.

Для первого темного кольца радиус определится формулой

$$r_1 = 1,22\lambda \frac{f_1}{D}, \quad (2)$$

где D — диаметр входного зрачка — оправы или диафрагмы объектива (см. [1]), λ — длина волны падающего света.

Предельное угловое расстояние φ между еще разрешаемыми объективом точками объекта определится в таком случае из соотношения

$$\varphi = \frac{r_1}{f_1} = 1,22 \frac{\lambda}{D} \text{ радиан} = 1,22 \cdot 2 \cdot 10^5 \frac{\lambda}{D} \text{ угловых секунд}. \quad (3)$$

Величина, обратная предельному углу, носит название разрешающей силы объектива

$$A = \frac{1}{\varphi} = \frac{1}{2,44 \cdot 10^5} \cdot \frac{D}{\lambda}. \quad (3a)$$

Таким образом, разрешающая способность объектива зависит от диаметра объектива и длины волны падающего света.

Окуляр трубы, как известно, ни в какой мере на разрешающую силу трубы не влияет. Для определения разрешающей силы объективов зрительных труб пользуются специальными штрихованными таблицами — мирами (рис. 4). Мира представляет собой негативное изображение таблицы, изготовленное фотографическим способом на мелкозернистой коллоидной пластинке.

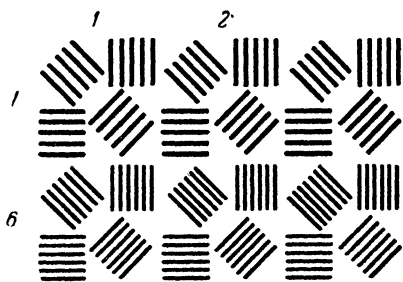


Рис. 4.

На негативе расположено несколько рядов заштрихованных квадратов с постепенно уменьшающейся толщиной штрихов. В каждом квадрате штрихи расположены по четырем различным направлениям: в вертикальном, горизонтальном и под углом в 45° с наклоном вправо и влево. Расстояние между штрихами равно их толщине, следовательно, зная число штрихов в каждом квадрате и ширину квадрата (которая равна 0,4 мм), можно вычислить и ширину штрихов в любом квадрате. Число штрихов можно подсчитать, пользуясь увеличенным изображением миры (на рис. 4 приведены квадраты с наиболее крупными штрихами миры), или определить по номеру квадрата, указанного на мире, по таблице, прилагаемой к задаче.

Миру помещают в фокусе линзы коллиматорной трубы. Испытуемую трубу устанавливают объективом как можно ближе к объективу коллиматора и рассматривают изображение штрихов миры,

предельно разрешаемых объективом трубы по всем четырем направлениям.

Затем по номеру наблюдаемого квадрата, в котором штрихи еще представляются разрешенными, находят ширину a штрихов в этом квадрате. Наконец, воспользовавшись очевидным соотношением для предела углового расстояния φ между еще разрешаемыми точками объекта наблюдения

$$\varphi = 2 \cdot 10^5 \frac{a}{F} = \frac{1}{A}, \quad (4)$$

где $F=38$ см — фокусное расстояние объектива коллиматора, находим значения φ и A . Результаты, найденные таким образом опытным путем, сравнивают с их теоретическими значениями, рассчитанными по формулам (3) и (3а).

В настоящей задаче, кроме зрительной трубы, исследования проводятся на моделях зрительных труб Кеплера и Галилея. Для этого в комплекте задачи имеется набор из трех тонких линз (двух положительных и одной отрицательной).

Упражнение 1

Определение увеличения моделей зрительных труб Кеплера и Галилея

Увеличение модели зрительной трубы можно найти по формуле (1), для этого необходимо знать фокусное расстояние объектива и окуляра. Определение фокусного расстояния объектива может быть выполнено любым способом, изложенным в задаче 123, однако наличие коллиматорной трубы, в фокусе которой находится предмет

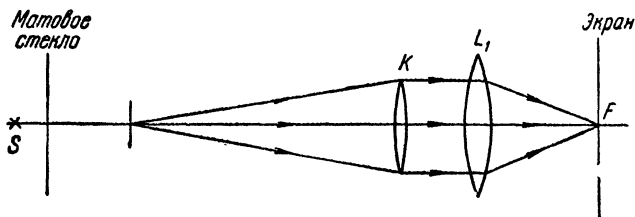


Рис. 5.

(в данном случае мира), значительно упрощает определение фокусных расстояний линз, что очевидно из рассмотрения рис. 5.

Располагают на оптической скамье осветитель с матовым стеклом, коллиматор K с мирой, линзу L_1 и экран согласно рис. 5. Коллиматорную трубу в данном случае рекомендуется ставить почти вплотную к осветителю, а линзу L_1 вблизи объектива коллиматорной трубы таким образом, чтобы их оптические центры находились на одной прямой. Перемещая экран вдоль оптической скамьи,

добиваются получения на нем изображения миры; расстояние от оптического центра тонкой линзы до экрана и является в данном случае фокусным расстоянием объектива.

Повторяют измерения этого расстояния 3—5 раз, каждый раз заново находя положение экрана, и из полученных значений f объектива берут среднее.

Для определения фокусного расстояния окуляра можно воспользоваться тем, что параллельный пучок света при прохождении через телескопическую систему остается параллельным (рис. 2), в чем можно убедиться при помощи трубы, наведенной на бесконечность.

На оптической скамье располагают осветитель, коллиматорную и зрительную трубы. Зрительную трубу наводят на бесконечность, для чего помещают ее вплотную к коллиматорной трубе и добиваются (при помощи винта, перемещающего окуляр) получения четкого изображения мира при полностью открытой диафрагме. Затем, отодвинув трубу, между нею и коллиматором помещают объектив модели (линзу L_1) и окуляр трубы Кеплера (линзу L_2). Наблюдая в зрительную трубу, наведенную на бесконечность, перемещают окуляр (линзу L_2) до получения четкого изображения миры. Необходимо постоянно следить за тем, чтобы оптическая система всех линз была центрированной. Фокусное расстояние окуляра определяется по формуле

$$f_{\text{ок}} = L - f_{\text{об}},$$

где L — расстояние между оптическими центрами объектива и окуляра. Зная f объектива и f окуляра, вычисляют увеличение модели зрительной трубы Кеплера.

Для получения модели зрительной трубы Галилея заменяют собирательный окуляр (линза L_2) рассеивающим (линза L_3). Определяют фокусное расстояние рассеивающего окуляра способом, аналогичным описанному выше.

Вычисляют $f_{\text{ок}}$ по формуле $f_{\text{ок}} = f_{\text{об}} - L$. Из (1) вычисляют увеличение модели трубы Галилея. Ход лучей в моделях обеих труб изображается на чертеже и прилагается к измерениям.

Упражнение 2

Определение предела разрешения модели зрительной трубы

В этой задаче определяется предел разрешения объективов в зависимости от диаметра действующего отверстия D для белого света, в котором глаз максимально чувствителен к зеленой части спектра $\lambda = 5550 \text{ \AA}$.

На оптической скамье располагаются: осветитель, коллиматорная труба, объектив и окуляр модели трубы Кеплера. Перемещением окуляра добиваются четкого видения миры. Меняя различные диафрагмы, определяют для каждой из них номер разрешаемого

квадрата мира, ширину его штрихов a , предел разрешения и разрешающую силу по формуле (4). Полученные значения φ и A сравнивают с их значениями, вычисленными по формулам (3) и (3а).

Изображение мира в окуляре рассматривают при помощи лабораторной зрительной трубы, установленной предварительно на бесконечность с полностью открытой диафрагмой; такое вспомогательное использование лабораторной трубы на разрешающую способность модели не влияет.

Упражнение 3

Определение предела разрешения лабораторной зрительной трубы

Зрительная труба располагается вплотную за коллиматорной трубой и наводится на бесконечность при открытой диафрагме. Предел разрешения определяется указанным выше способом для белого света при 10—15 различных положениях указателя диафрагмы. Перед каждым измерением, перемещая осветитель вдоль оптической скамьи (т. е. приближая или удаляя его от коллиматорной трубы), добиваются того, чтобы освещенность изображения мира оставалась неизменной.

Определяют, как указывалось выше, предел разрешения. Полученные данные для предела разрешения сравнивают с результатами вычисления по формуле (3). Диаметр диафрагмы определяется по положению указателя на ее оправе при помощи таблицы, прилагаемой к задаче. Для всех измерений вычисляют также разрешающую силу трубы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. Курс физики под редакцией Н. Д. Папалекси, т. II, отд. III, Гостехиздат, 1948.
3. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева, Курс общей физики, т. III, Физматгиз, 1962.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

4. А. И. Тудоровский, Теория оптических приборов, Изд. АН СССР, 1937.

ЗАДАЧА 126

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Цель настоящей задачи — отыскание положения кардинальных элементов идеальных оптических систем.

Теория. Идеальная оптическая система изображает точку в виде точки, т. е. все лучи, исходящие из любой точки предмета, собираются после выхода из системы в одной точке изображения.

Достаточно хорошим приближением к идеальной системе является центрированная оптическая система, если ограничиться лучами, образующими лишь небольшие углы с нормальными к поверхностям преломления. Идеальная оптическая система обладает рядом кардинальных элементов. Их свойства будут описаны ниже. Знание четырех кардинальных точек вполне определяет работу оптической системы, т. е. мы можем построить изображение любой точки, пользуясь только кардинальными элементами, совершенно не рассматривая действительного хода лучей в данной оптической системе.

В качестве кардинальных элементов оптической системы отметим следующие:

1. Передний и задний фокусы системы F_1 и F_2 (рис. 1). Если на систему падает пучок лучей, параллельных

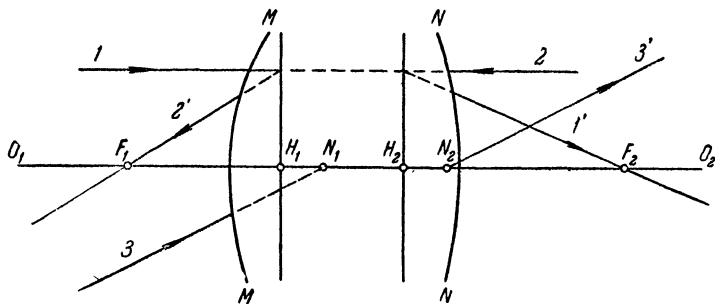


Рис. 1.

оптической оси системы (лучи 1), то они соберутся в заднем фокусе системы F_2 , если параллельный пучок идет в обратном направлении (лучи 2), то лучи соберутся в переднем фокусе системы F_1 . Плоскости, проходящие через фокусы перпендикулярно оптической оси системы, называются фокальными плоскостями.

2. Главные точки системы H_1 и H_2 и главные плоскости (т. е. плоскости, проходящие через главные точки перпендикулярно оптической оси). Главные плоскости изображают друг друга с линейным увеличением, равным $+1$. Найти главные плоскости можно следующим образом. Рассмотрим луч 1, падающий на оптическую систему $MMNN$ параллельно оптической оси O_1O_2 . После преломления его направление распространения будет I' . Точка пересечения лучей 1 и I' лежит во второй главной плоскости. Рассмотрев луч 2, идущий в обратном направлении, можно получить положение первой главной плоскости. Расстояния $F_1H_1 = f_1$ и $F_2H_2 = f_2$ от главных точек до фокусов называются фокусными расстояниями системы. Если данная оптическая система находится в среде с постоянным показателем преломления, то $|f_2| = |f_1|$.

3. Узловые точки системы N_1 и N_2 . Если какой-либо луч (или его продолжение) (рис. 1) проходит через первый узел N_1 (луч $З$), то после преломления в оптической системе этот луч (или его продолжение) будет выходить из второго узла N_2 в направлении, параллельном направлению падающего луча (луч $З'$). Положение узлов относительно фокусов определяется соотношениями $F_1N_1 = f_2$; $F_2N_2 = f_1$.

Если система расположена в среде с постоянным показателем преломления, то узловые точки совпадают с главными.

Доказательство существования этих кардинальных точек, а также их свойства приведены в литературе, указанной в конце описания. В тонких линзах положение обеих главных точек и обеих узловых точек совпадает с центром линзы.

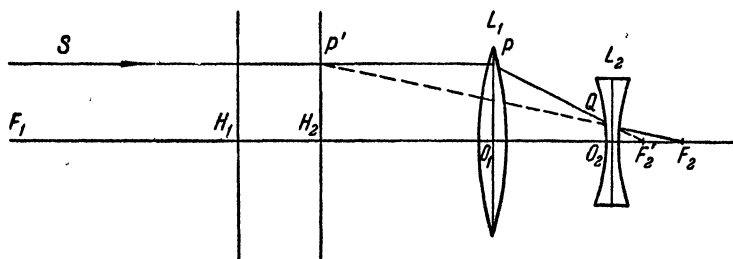


Рис. 2.

В настоящей работе исследуется сложная оптическая система, состоящая из двух тонких линз: положительной (собирающей) и отрицательной (рассеивающей). Расстояние между линзами меньше фокусного расстояния первой положительной линзы. Расположение главных и фокальных точек такой системы представлено на рис. 2.

Луч SP , параллельный оптической оси системы O_1O_2 , после преломления в собирающей линзе L_1 идет по направлению к точке заднего фокуса этой линзы F_2' ; отрицательная линза L_2 отклоняет этот луч так, что он пересекает оптическую ось в точке заднего фокуса системы F_2 (фокусное расстояние отрицательной линзы берется так, чтобы вся система в целом была положительной). Продолжение луча F_2Q пересечет направление падающего луча в точке P' .

Второй главной плоскостью является $P'H_2$. Нетрудно видеть, что первая главная плоскость расположена левее второй главной плоскости. Такая оптическая система решает вопрос получения длиннофокусного объектива, дающего картины в большом масштабе, при условии возможно более короткой камеры, т. е. с небольшим расстоянием между последней поверхностью объектива и плоскостью изображения. Действительно, фокусное расстояние системы есть расстояние $H_2F_2 = f$. Оно заметно больше расстояния O_2F_2

от последней поверхности объектива до фокуса. По такому принципу устроены все телеобъективы. Конструкции телеобъективов сложны, но принцип их действия полностью представляется указанной оптической системой.

Нахождение кардинальных точек оптической системы может быть проведено разными способами. В данной задаче рассматриваются два способа.

Первый способ основан на использовании свойств узловых точек системы. Пусть на оптическую систему падает пучок лучей, параллельных оптической оси системы. Тогда изображение источника света будет в точке заднего фокуса системы F_2 (см. рис. 1). Если теперь поворачивать оптическую систему вокруг оси, перпендикулярной оптической оси системы O_1O_2 , на некоторый угол, оставляя направление падающего пучка без изменения, то изображение источника света на неподвижном экране не будет смещаться лишь в том случае, когда ось вращения будет проходить через второй узел. При любом другом положении оси вращения изображение источника при вращении оптической системы будет смещаться.

Так как направление падающего пучка лучей в пространстве мы оставляем неизменным, то луч, который пройдет через первый узел системы N_1 , после поворота оптической системы сохранит свое направление в пространстве, хотя при повороте оптической системы этот луч будет составлять с оптической осью системы некоторый угол, отличный от нуля. Сопряженный ему луч, выходящий из второго узла N_2 , будет параллелен падающему, т. е. останется все время параллелен одному и тому же направлению в пространстве независимо от вращения системы.

Для построения изображения источника света мы должны в общем случае рассмотреть два луча, прошедших оптическую систему. Точка их пересечения определит положение изображения источника. В нашем случае, поскольку на систему падает параллельный пучок лучей, изображение источника света лежит в фокальной плоскости и для определения его положения достаточно рассмотреть один луч, точка пересечения которого с фокальной плоскостью и даст положение изображения источника. В качестве такого луча мы рассмотрим луч, выходящий из второго узла, т. е. из точки N_2 . Этот луч независимо от вращения оптической системы все время будет оставаться параллелен направлению распространения лучей, падающих на систему. Следовательно, если при вращении оптической системы точка N_2 не будет смещаться, то и изображение источника света на неподвижном экране также не будет смещаться; если же точка N_2 смещается, то смещается и изображение источника, причем в ту же сторону, что и смещение N_2 .

Точка N_2 остается неподвижной при вращении оптической системы только в том случае, если ось вращения проходит через нее, следовательно, только в этом случае изображение источника

света на неподвижном экране не будет смещаться при небольших поворотах оптической системы. Это свойство узловых точек позволяет экспериментально определить их положение.

Второй способ основан на использовании соотношения между фокусными расстояниями системы f_1 и f_2 и расстояниями от предмета и его изображения до соответствующих фокусов. Обозначим расстояние от переднего фокуса до предмета через x_1 , а расстояние от заднего фокуса до изображения через x_2 .

Тогда

$$x_1 \cdot x_2 = f_1 \cdot f_2. \quad (1)$$

Это уравнение оптической системы записано в форме, приданной ему Ньютоном. Вывод этого соотношения имеется в указанной литературе и здесь не приводится. Это уравнение идеальной оптической системы также может быть использовано при экспериментальном определении положения кардинальных точек оптической системы. Подробнее об этом будет сказано дальше.

Описание оптической установки. Вся необходимая для исследования оптических систем установка монтируется на длинной оптической скамье. На одном из концов скамьи располагается осветитель с небольшой лампой накаливания, питаемой от понижающего трансформатора, включенного через регулирующий накал лампы автотрансформатор. Лампочка непосредственно, или через конденсор освещает входную щель коллиматора. Поперек щели натянута проволочка или нить. Освещенная щель коллиматора играет роль объекта, изображение которого формируется с помощью исследуемой оптической системы. Осветитель и щель установлены на оптической скамье неподвижно и не смещаются в ходе выполнения задачи.

Следом за щелью на оптической скамье располагается коллиматор открытого или закрытого типа, в состав которого входит щель. В физическом практикуме имеются коллиматоры обоих типов. Коллиматоры формируют пучки параллельных лучей.

Коллиматор открытого типа состоит из щели и линзы, установленной на отдельном рейтере. Щель находится в фокусе линзы, формирующей пучок параллельных лучей. Но такой пучок лучей необходим только для выполнения первого и третьего упражнений задачи. Поэтому оправа линзы установлена на поворотном кронштейне, смонтированном на неподвижном рейтере. Поворачивая кронштейн с линзой, можно либо совмещать ее центр с осью светового пучка, идущего через щель, либо выводить линзу из этого светового пучка; это осуществляется во втором упражнении.

Коллиматор закрытого типа представляет собой трубу, заканчивающуюся с одного конца щелью, помещающейся около осветителя. Против другого конца трубы может помещаться линза коллиматора. Эта линза смонтирована на рейтере, который перемещается

поперек оптической скамьи по небольшому отрезку легкой оптической скамьи, скрещенной с главной оптической скамьей. При перемещении рейтера по поперечной оптической скамье линза может вводиться в световой пучок, идущий через освещенную щель, или выводиться из него. Так как расстояние между щелью и линзой (когда она поставлена на выходе трубы) равно ее фокусному расстоянию, эта линза может формировать параллельный пучок лучей, нужный в первом и третьем упражнениях.

У коллиматора закрытого типа щель помещается на небольшом патрубке, выдвигающемся из корпуса основной трубы коллиматора. Поэтому перед выполнением задачи необходимо проверить, выдвинут ли этот патрубок со щелью на такое расстояние, что щель находится на фокусном расстоянии от линзы. Отсчет на стенке патрубка, соответствующий нужному его положению, указан непосредственно на установке.

За коллиматорным объективом в установках обоих типов помещается неподвижный рейтер, предназначенный для установки на нем исследуемой оптической системы. Этот рейтер имеет горизонтальную пленку с гнездами, в которые вставляются штырьки оправ исследуемых линз. Горизонтальная планка снабжена кремальберной подачей, позволяющей плавно перемещать исследуемую оптическую систему вдоль ее оптической оси.

Кроме того, планка, несущая оптическую систему, может поворачиваться на рейтере вокруг вертикальной оси; это требуется при выполнении первого упражнения.

Наконец, на оптической скамье за неподвижным рейтером имеется еще один свободно скользящий рейтер. На штыре этого рейтера находится белый экран, на который проектируется изображение входной щели системы, формируемое испытываемыми оптическими системами.

Исследуемая оптическая система состоит из собирающей, большой линзы и рассеивающей (отрицательной) малой линзы. На оправе линз нанесены номера, соответствующие номерам тех установок, на которых данная система линз изучается.

Упражнение 1

Определение положения кардинальных точек оптической системы методом ее вращения в пучке параллельных лучей

В этом упражнении коллиматорные линзы, установленные на отрезке поперечной скамьи (или на вращающемся кронштейне), введены в световой пучок, распространяющийся из щели коллиматора. Большая собирательная линза вставлена своим штырем в гнездо, ближайшее к коллиматорной линзе. Во второе гнездо вставлена малая рассеивающая линза. Оптическая система этих

двух линз дает изображение щели коллиматора, которое можно получить на экране, установленном в рейтере, свободно перемещающемся по оптической скамье. Ход дальнейших опытов описан ниже. Однако для более подробного пояснения наиболее выгодного хода измерений при каждой установке имеется еще небольшая инструкция.

Определение положения кардинальных точек исследуемой системы начинают с определения положения ее заднего фокуса. Включают источник света, освещающий щель коллиматора. Осторожно снимают крышку с коллиматорного объектива. *Трогать руками коллиматорный объектив категорически воспрещается.*

Перемещая экран вдоль скамьи, добиваются получения на нем изображения коллиматорной щели. Изображение получается в заднем фокусе исследуемой оптической системы. Измеряют металлической линейкой расстояние между рассеивающей линзой и изображением щели коллиматора. Измерение проделывают несколько раз, причем каждый раз экран сдвигают и вновь добиваются резкого изображения входной щели. Определив положение заднего фокуса, поворачивают оптическую систему вокруг вертикальной оси на небольшой угол ($\pm 2^\circ$), наблюдая за изображением входной щели на неподвижном экране. Если это изображение смещается, то изменяют положение оси вращения по отношению к оптической системе, что достигается перемещением с помощью кремальеры всей оптической системы. После каждого перемещения оптической системы следует заново установить экран, получив на нем резкое изображение входной щели. Снова поворачивают оптическую систему в ту и другую стороны и наблюдают за поведением изображения щели на неподвижном экране. Находят такое положение оси вращения, при котором изображение щели не смещается. В этом случае ось вращения проходит через второй узел. Так как среда по обе стороны нашей оптической системы одна и та же, то узловая точка совпадает с главной точкой. Измеряют расстояние от собирающей линзы до второй узловой точки (или до второй главной точки).

Определение положения второй узловой точки также следует сделать несколько раз, взяв в качестве окончательного результата среднее значение. Измерив расстояние между двумя линзами, получают все данные для определения фокусного расстояния системы, равного расстоянию от главной точки до фокуса.

Затем система оборачивается, т. е. собирающая и рассеивающая линзы вынимаются из стоек и меняются местами. Находят передний фокус системы аналогично тому, как находился задний фокус системы. Измеряют расстояние от переднего фокуса до собирающей линзы. После всех проделанных измерений положение первой главной плоскости определяется легко, так как она расположена на расстоянии, равном фокусному расстоянию от переднего фокуса.

Определив положение всех кардинальных точек системы, изображают схематически изучаемую оптическую систему аналогично рис. 2, указывая на схеме расстояния от всех кардинальных точек до собирающей линзы.

Упражнение 2

Определение положения кардинальных точек системы с помощью измерения положения объекта и его изображения

При выполнении этого упражнения коллиматорная линза выведена из светового пучка, идущего из коллиматорной щели. Это делается путем сдвига линзы на поперечном отрезке оптической скамьи (или путем поворота кронштейна, несущего линзу).

Экран устанавливают на противоположном конце оптической скамьи на расстоянии около 2,5 м от источника света. Перемещая оптическую систему вдоль оптической скамьи, добиваются получения изображения источника света на экране. Измеряют расстояние от источника до первой линзы и от изображения до второй линзы оптической системы. Далее используют полученные ранее значения для расстояний переднего и заднего фокусов до первой и второй линз и вычисляют x_1 и x_2 . По формуле (1) определяют f . Зная положение фокусов F_1 и F_2 и величину фокусного расстояния f , определяют все кардинальные точки оптической системы. Результаты изображаются схематически аналогично результатам упражнения 1.

Упражнение 3

Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы с помощью формулы сложения оптических сил двух линз

Если f' — фокусное расстояние первой тонкой линзы, f'' — фокусное расстояние второй тонкой линзы, L — расстояние между линзами, то фокусное расстояние системы определяется выражением

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f'} + \frac{1}{f''} - \frac{L}{f' \cdot f''}. \quad (2)$$

Вывод этого соотношения дается в литературе, указанной ниже. Исследуемая система имеет фокусное расстояние f , определенное в первых двух упражнениях. Фокусное расстояние собирающей линзы f' определяется следующим образом. Вновь устанавливают линзу перед щелью коллиматора и получают параллельный пучок света. Убирают рассеивающую линзу. Перемещая экран, находят изображение щели на нем. Фокусное расстояние тонкой линзы f' равно расстоянию от изображения щели до линзы. Зная f , f' и L , определяют фокусное расстояние рассеивающей линзы f'' , используя соотношение (2).

Технические данные об установке. Задача поставлена на оптической скамье ОСК-3. Источником света служит лампа накаливания. Собирающая и рассеивающая линзы изготовлены в оптических мастерских МГУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева, Курс физики, т. III, Физматгиз, 1962.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

3. О. Д. Хвольсон, Курс физики, т. II, Государственное издательство, Берлин, 1923.
4. Г. Г. Слюсарев, Геометрическая оптика, Изд. АН СССР, 1946.
5. П. Друде, Оптика, ГОНТИ, 1935.
6. М. Борн, Оптика, ОНТИ НКТП, Харьков, 1937.
7. Р. Дитчберн, Физическая оптика, «Наука», 1965.

ЗАДАЧА 127

ИЗУЧЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЛИНЗ

В задаче исследуются два недостатка линз, искажающих изображение источника света, — астигматизм и хроматическая аберрация.

Упражнение 1

Изучение астигматизма косых пучков света при их преломлении в линзе

Если элементарный, т. е. достаточно тонкий, пучок лучей, выходящий из одной точки, падает на линзу под значительным углом к оси линзы, то он в результате прохождения линзы перестанет быть гомоцентрическим. Эта потеря гомоцентричности называется астигматизмом. Изображение точки в этом случае получается не стигматическим (т. е. не точечным), а в виде двух, пространственно разделенных, фокальных линий.

Чтобы пояснить это, рассмотрим волновую поверхность элементарного пучка, т. е. поверхность, нормальную к лучам. Волновая поверхность гомоцентрического пучка в однородной и изотропной среде является сферической поверхностью. Если в результате преломления пучок перестает быть гомоцентрическим, то волновая поверхность такого пучка уже не будет сферической.

Пусть элемент поверхности Σ (рис. 1) является волновой поверхностью элементарного негомоцентрического пучка. На каждой поверхности существует два семейства кривых, пересекающихся под прямым углом, так называемые линии кривизны. Линии кривизны определяются как линии, нормальные сечения вдоль которых имеют наибольшую или наименьшую, для данной точки

поверхности, кривизну. Для бесконечно малого элемента поверхности нормали, восстановленные вдоль линии кривизны, пересекаются в соответствующем центре кривизны поверхности. Величина отрезка нормали между поверхностью и центром кривизны равна одному из двух главных радиусов кривизны.

Пусть элемент поверхности Σ ограничен линиями кривизны. Тогда нормали, восстановленные вдоль линии кривизны $A_1'A_2'$ (например, лучи $A_1'B_1'$ и $A_2'B_2'$), пересекаются в точке F' ; нормали, восстановленные вдоль другой линии кривизны $A_2'A_2$ (например, лучи $A_2'B_2'$ и A_2B_2), пересекаются в другой точке S_2 . Точки F' и

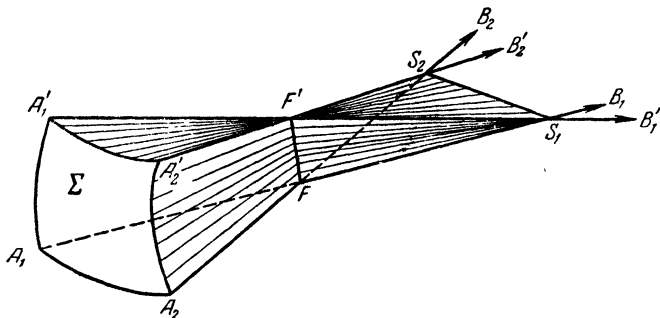


Рис 1.

S_2 являются двумя центрами кривизны, а отрезки $F'A_2'$ и S_2A_2' — двумя главными радиусами кривизны поверхности Σ , определенными для точки A_2' .

Лучи, не проходящие через одну линию кривизны, не пересекаются (например, лучи $A_2'B_2'$ и A_1B_1).

Совокупность всех центров кривизны для элемента волновой поверхности Σ образует две фокальные линии $F'F$ и S_2S_1 .

Если для бесконечно малого элемента волновой поверхности оба главных радиуса кривизны равны, то этот бесконечно малый элемент является сферическим. В этом случае две фокальные линии сливаются в один фокус (гомоцентрический пучок).

Если через некоторый средний луч из падающего элементарного пучка и ось линзы можно провести плоскость, то эта плоскость называется меридиональной плоскостью. Лучи, идущие в меридиональной плоскости, не выходят из нее в результате преломления в линзе. После прохождения линзы эти лучи соберутся в одну точку меридиональной фокальной линии. Вследствие симметрии меридиональная фокальная линия перпендикулярна меридиональной плоскости. Другая фокальная линия лежит в меридиональной плоскости и называется сагиттальной. Она образуется лучами, идущими в сагиттальных плоскостях, т. е. в плоскостях, перпендикулярных меридиональной.

Описание установки. Лучи от источника света падают на точечную диафрагму K (рис. 2), помещенную в фокальной плоскости линзы L_1 коллиматора. Параллельный пучок лучей, выходящий из коллиматора, преломляется в исследуемой линзе L_2 , укрепленной на столике. Линза L_2 может вращаться вокруг вертикальной оси. Действительное изображение точечной диафрагмы рассматривается в окулярный микрометр Ok (см. задачу 124). Окулярный микрометр можно перемещать вдоль оптической скамьи, отмечая его положение на масштабной линейке, расположенной вдоль скамьи. Коллиматор снабжен щелевой диафрагмой, с помощью которой можно выделять лучи, идущие в одной плоскости.

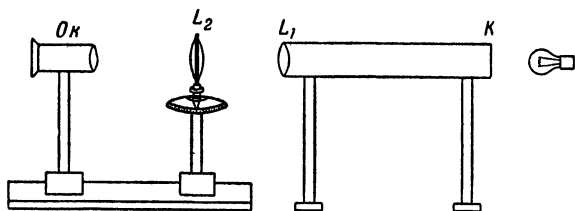


Рис. 2.

Измерения. Снимают щелевую диафрагму и устанавливают линзу L_2 перпендикулярно оси коллиматора. Перемещая окулярный микрометр вдоль оптической скамьи, получают в фокальной плоскости окуляра изображение точечной диафрагмы в виде резкой светящейся точки. Добиваются, чтобы это изображение было в центре поля зрения окуляра. Повернув линзу на некоторый угол ($\sim 30^\circ$) и перемещая окулярный микрометр вдоль оптической скамьи, находят меридиональную (вертикальную) и сагиттальную (горизонтальную) фокусные линии. Надевают на коллиматор щелевую диафрагму и наблюдают изображения точечного источника, получаемые с помощью лучей, идущих в меридиональной плоскости (горизонтальное положение щели), и лучей, идущих в сагиттальной плоскости (вертикальное положение щели). Эти изображения являются точками соответствующих фокальных линий. Повернув щель диафрагмы под углом 45° к вертикали, убеждаются, что лучи, падающие на линзу в данной плоскости, после прохождения через линзу не идут в одной плоскости, и поэтому нигде не сходятся в точку.

Сняв щелевую диафрагму, приступают к измерению меридиональных и сагиттальных фокусных расстояний (расстояний от центра линзы до плоскостей наблюдения фокальных линий) в зависимости от угла поворота линзы. Результаты оформляют в виде графика, построенного в полярной системе координат. В качестве координатного угла берут угол между осью линзы и осью коллиматора, а по радиусу откладывают меридиональные и сагиттальные фокусные расстояния для данного угла.

Упражнение 2

Исследование хроматической аберрации линзы

Фокусное расстояние тонкой линзы f связано с показателем преломления n вещества линзы формулой

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (1)$$

где r_1 и r_2 — радиусы ограничивающих линзу сферических поверхностей. В свою очередь n является функцией длины волны λ преломляемого линзой света. Для прозрачных сред зависимость n от λ определяется эмпирической формулой

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots, \quad (2)$$

где A , B и C — константы, характерные для данного вещества. Графическое изображение зависимости (2) носит название *дисперсионной кривой* для данного вещества.

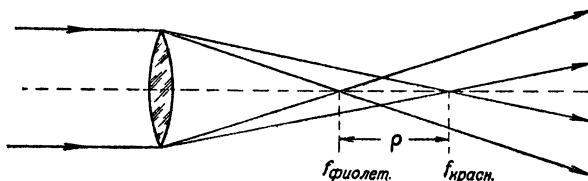


Рис. 3.

Отсюда следует, что f также является функцией λ . Поэтому тонкая линза дает изображение бесконечно удаленного некохроматического точечного источника света не в виде точки, а в виде ряда пространственно разделенных точек, каждая из которых представляет собою изображение источника в данном монохроматическом свете (рис. 3). Изображение плоского или пространственного предмета на плоском экране для случая некохроматического источника света по той же причине представляет собой совокупность ряда по-разному размытых изображений и потому окрашено по краям. Изложенное выше можно обобщить для случая толстых линз и систем.

Разобранный недостаток линз носит название *хроматической аберрации*. Мерой хроматической аберрации может служить разность фокусных расстояний линзы ($\rho = f_{\lambda_2} - f_{\lambda_1}$), соответствующая определенным длинам волн падающего на нее света λ_1 и λ_2 (см. рис. 3).

Для систем линз хроматическая аберрация может быть практически устранена путем соответствующего подбора сортов стекла,

их дисперсионных кривых и фокусных расстояний линз, входящих в систему.

Описание и установка прибора. Для измерения хроматической aberrации системы служит прибор, схема которого изображена на рис. 4 (см. также описание спектрометра в задаче 128). Коллиматорная труба K имеет на одном конце щель S , а на другом — ахроматический объектив L_1 ; щель и объектив укреплены в разных патрубках, подвижных друг относительно друга. Зрительная труба M также имеет два патрубка; один из них несет исследуемую линзу L_2 , другой — окуляр O .

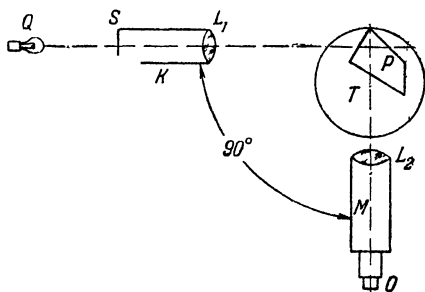


Рис. 4.

На вращающемся столике T устанавливается особая диспергирующая призма P , называемая *призмой с постоянным углом отклонения*. Эту призму можно рассматривать как совокупность двух диспергирующих 30-градусных призм и 45-градусной призмы полного внутреннего отражения (рис. 5). Если изменять угол падения i параллельного монохроматического пучка света на преломляющую грань a , вращая призму относительно оси, перпендикулярной к плоскости чертежа, то для каждой длины волны можно найти угол падения, при котором выходящий из грани b световой пучок будет перпендикулярен к падающему пучку света. При этом, очевидно, для таких пучков угол падения i на входную грань a и угол выхода i' через грань b должны быть равны друг другу. Найдем, при каком угле падения будет удовлетворяться это условие.

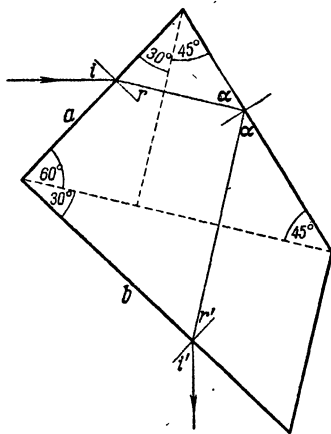


Рис. 5.

Обозначим угол преломления на входной грани через r . Тогда угол α , который луч образует с отражающей гранью призмы, будет

$$\alpha = 180^\circ - 75^\circ - (90^\circ - r) = 15^\circ + r,$$

а угол падения r' на выходную грань

$$r' = 180^\circ - 15^\circ - \alpha - 90^\circ = 75^\circ - \alpha, \quad \text{т. е.} \quad r' = 60^\circ - r.$$

Отсюда если мы хотим, чтобы r' было равно r , то должны подобрать угол падения i так, чтобы r было равно 30° ; это дает

$$\sin i = n \sin 30^\circ = \frac{1}{2} n,$$

где n — показатель преломления призмы.

Очевидно, для к а ж д о й д л и н ы в о л н ы можно подобрать угол падения так, чтобы он удовлетворял этому условию. При этом преломленный луч данной длины волны будет как раз перпендикулярен к падающему лучу. Кроме того, при соблюдении этого условия луч внутри тридцатиградусных призм распространяется параллельно их основаниям, т. е. идет под углом наименьшего отклонения.

Пользуясь такой призмой, можно фиксировать в укрепленной неподвижно зрительной трубе преломленный пучок любой длины волны. Это достигается вращением призмы вместе со столиком спектрометра вокруг оси, перпендикулярной к плоскости падающего и преломленного лучей. Применение обычной трехгранной призмы потребовало бы изменения положения также и зрительной трубы.

Свет неоновой лампы Q (рис. 4) падает на щель S , помещенную в фокальной плоскости линзы L_1 коллиматора. Полученные с помощью коллиматора K и призмы P , установленной на столике T , монохроматические параллельные пучки света неоновой лампы падают на исследуемую линзу L_2 .

После преломления пучков в линзе L_2 в ее фокальной плоскости получаются изображения щели в том или ином монохроматическом свете в зависимости от угла поворота призмы по отношению к коллиматору. Как уже сказано выше, положение фокуса будет меняться в зависимости от длины волны падающего света. Зная положение фокуса для ряда длин волн, можно снять кривую хроматической aberrации линзы.

Коллиматор спектрометра установлен на бесконечность и не регулируется. Призма будет установлена правильно, если проекции ее входной и выходной граней на коллиматорный объектив и исследуемую систему линз симметричны по отношению к последним¹⁾. При такой установке призмы получается спектральная картина наибольшей яркости.

В заключение необходимо отметить, что описанный выше прибор аналогичен спектроскопу и отличается от него лишь устройством призмы. Примененная в приборе призма позволяет при закрепленных коллиматоре и трубе рассматривать, поворачивая столик, весь спектр неоновой лампы.

Измерения. Вращая столик с призмой и приводя на крест окуляра зрительной трубы последовательно все яркие линии спектра

¹⁾ При проектировании параллельным пучком вдоль осей коллиматора и трубы.

неоновой лампы (см. таблицу 13), резко фокусируют каждую из них и записывают соответствующее ей положение фокуса. Отсчет фокусных расстояний производится по нониусу, укрепленному на тубусе выдвижного окуляра зрительной трубы.

Результаты измерений представляют в виде графика, в котором по оси абсцисс отложены длины волн, а по оси ординат — соответственно величины хроматической аберрации.

Технические данные установки. Для изучения астигматизма косых пучков применяется сферическая двояковыпуклая линза с радиусом кривизны поверхностей порядка 6 см.

Во втором упражнении используется расклеенный объектив оптической трубы, у которого оставлена только собирающая линза из стекла флинт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. Курс физики, под редакцией Н. Д. Папалекси, т. II, изд. III, гл. XII, Гостехиздат, 1948.
3. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева, Курс общей физики, т. III, Физматгиз, 1962.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

4. А. И. Тудоровский, Теория оптических приборов, Изд. АН СССР, 1937.
5. Г. Г. Слюсарев, Геометрическая оптика, Изд. АН СССР, 1946.

ЗАДАЧА 128

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ, ДИСПЕРСИИ И РАЗРЕШАЮЩЕЙ СИЛЫ СТЕКЛЯННОЙ ПРИЗМЫ СПЕКТРОМЕТРОМ

В задаче излагается метод определения показателя преломления изотропного твердого прозрачного вещества по измеренному преломляющему углу призмы из данного вещества и по углу наименьшего отклонения параллельного пучка монохроматического света, прошедшего призму. Дается понятие об определении дисперсии стеклянной призмы и определении разрешающей способности призмы, если известна ширина светового пучка, падающего на призму.

Описание прибора. Гониометр-спектрометр ГС-30 (рис. 1) служит для измерения двугранных углов оптическим методом с точностью до 30". Он состоит из следующих основных частей: основания 1, коллиматора 2, корпуса 3 с оптической трубой и отсчетным микроскопом 8, столика 4 и скрытого под корпусом лимба. На основании укреплены колонка коллиматора и вертикальная ось прибора, вокруг которой могут вращаться лимб, корпус и столик. На конце коллиматора имеется щель, ширину которой можно регулировать с помощью микрометрического винта. Коллиматор служит для

создания параллельного пучка света. Для этого щель должна быть установлена в фокальной плоскости системы линз коллиматора с помощью бокового винта. Наклон коллиматора в вертикальной плоскости можно изменять, вращая винт, находящийся под трубой коллиматора, около его фронтальной линзы.

Корпус 3 может вращаться вместе с оптической трубой относительно основания. Плавное перемещение корпуса осуществляется от руки или микрометрическим винтом 5, расположенным в нижней

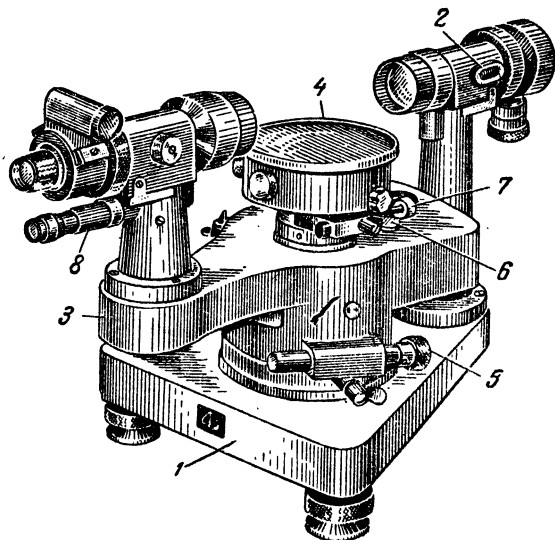


Рис. 1.

части корпуса. Под микрометрическим винтом расположен перпендикулярно к нему зажимной винт корпуса. Фокусировка оптической трубы производится с помощью винта сбоку трубы. Положение оптической трубы в вертикальной плоскости можно изменять, вращая винт, находящийся внизу около объектива трубы.

Стекланный лимб с делениями установлен на вертикальной оси прибора в ее нижней части. Отсчет по лимбу ведется через перископическую систему (рис. 2) с помощью отсчетного микроскопа 8, расположенного на корпусе под оптической трубой (рис. 1). Лимб подсвечивается электрической лампочкой, закрепленной на основании прибора. В поле зрения микроскопа (рис. 3) видны деления лимба (крупные цифры 0, 1, 2), цена которых равна одному градусу, и мелкие деления шкалы, расположенной в перископической системе прибора. Вся меньшая шкала, видимая в поле зрения микроскопа, равна одному делению лимба. Она имеет два ряда расположенных друг над другом делений, цена которых равна 1'.

Нижний ряд делений сдвинут по горизонтали по отношению к верхнему ряду на 0,5 деления, что дает возможность производить отсчет с точностью до 30''.

Лимб может быть закреплен относительно основания и перемещаться с помощью микрометрического винта 5 (рис. 1). Столик 4 можно вращать вокруг общей оси прибора, кроме того, его можно также поднимать или опускать и закреплять в желаемом положении

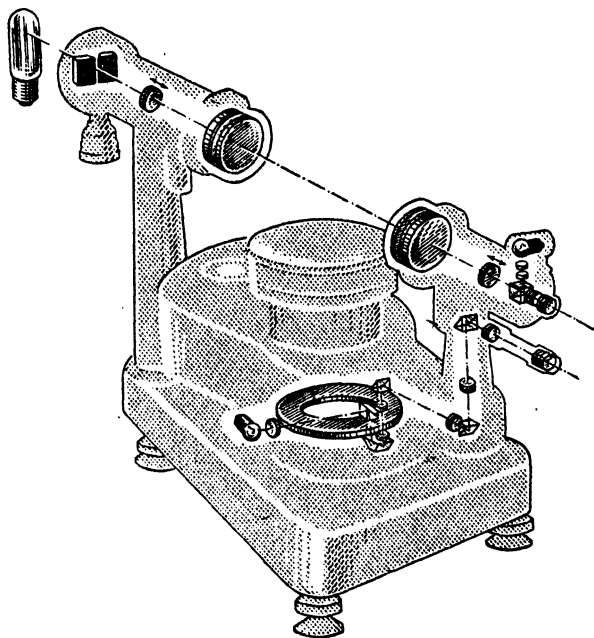


Рис. 2.

на оси зажимным винтом 6 (рис. 1). Плавное перемещение столика производится винтом 7. Установка столика горизонтально производится двумя винтами сбоку столика. Оптическая труба снабжена автоколлимационным окуляром Гаусса (рис. 4). Свет лампочки 1, пройдя матовую пластинку 2, отражается от плоскопараллельной пластинки 4, проходит через пластинку 3 с нанесенным на ней крестом, находящуюся вблизи фокальной плоскости окуляра 5 и, пройдя объектив зрительной трубы, попадает на плоскую зеркальную поверхность объекта, установленного на столике гониометра.

Труба установлена на бесконечность, если в поле зрения окуляра одновременно видны крест и его отражение. Действительно, в этом случае плоскости креста и его изображения совпадают, а это может

быть только тогда, когда обе эти плоскости совпадают с фокальной плоскостью объектива трубы. При этом отражающая поверхность объекта должна быть строго перпендикулярна к оптической оси трубы.

Установка прибора. Гониометр требует очень тщательной установки, которая состоит в отдельности из установки оптической трубы на бесконечность, установки оси трубы перпендикулярно

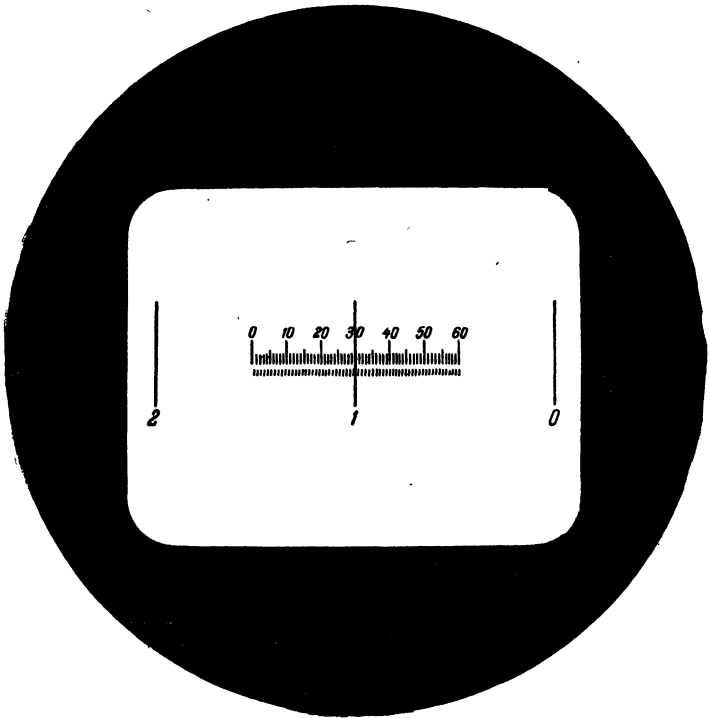


Рис. 3.

к оси вращения прибора и установки коллиматора. Вращая установочные винты под основанием прибора, устанавливают его горизонтально по уровню на корпусе.

1) **Установка трубы на бесконечность.** Устанавливают на глаз столик и трубу горизонтально. Приблизительную установку оптической трубы на бесконечность производят с помощью фокусирующего винта трубы, совмещая в окошке сбоку на тубусе трубы метку «0» на неподвижной шкале с меткой «∞» на подвижной шкале. Включают подсветку окуляра и наводят его на резкую видимость креста.

Ставят на столик плоскопараллельную стеклянную пластинку перпендикулярно к линии, соединяющей два установочных винта столика. Вращая столик и изменяя наклон трубы или столика, ловят отражение от передней грани плоскопараллельной пластинки светового пучка, освещающего крест. Если это отражение расплывчато, то фокусирующим винтом трубы устанавливают его на ясную видимость. В этом случае труба установлена на бесконечность.

2) Установка оси трубы перпендикулярно к оси вращения прибора. Вращая столик с пластинкой и наклоняя его или трубу, совмещают крест с его отражением. Затем поворачивают столик на 180° и ловят отражение от второй грани пластинки. Указанного выше совпадения крестов, вообще говоря, не будет. Его восстанавливают, действуя одним из винтов столика и винтом трубы. Первым винтом наклоняют столик настолько, чтобы расстояние между горизонтальной чертой и ее отражением сократилось наполовину, а затем совмещают горизонтальную черту с ее отражением, наклоняя трубу. После этого снова поворачивают столик на 180° и, если кресты немного расходятся, совмещают их точно таким же методом. Труба установлена перпендикулярно к оси вращения столика, если отражение креста от обеих граней плоскопараллельной пластинки совпадает с крестом в окуляре. После этого пластинку снимают со столика.

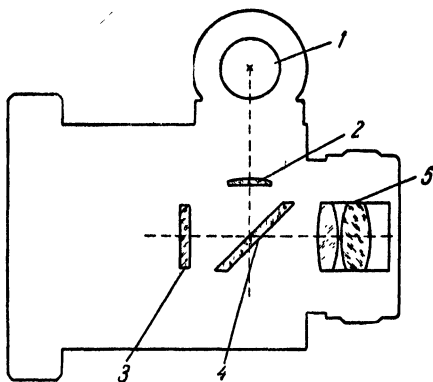


Рис. 4.

3) Установка коллиматора. Щель должна находиться в фокальной плоскости объектива коллиматора. Для этого совмещают в окошке сбоку на тубусе коллиматора «0» и « ∞ » двух шкал. Затем освещают щель, ловят ее изображение в трубу и, не трогая фокусирующего винта трубы, с помощью фокусирующего винта коллиматора добиваются резкого изображения щели.

Для установления оси коллиматора перпендикулярно к оси вращения столика предварительно уменьшают вертикальный размер щели, вдвигая пластинку с треугольным вырезом («ласточкин хвост»), а затем, изменяя наклон коллиматора, добиваются того, чтобы горизонтальная нить креста в окуляре разделяла щель пополам.

4) Установка призмы. Призма помещается на столике и должна быть установлена так, чтобы ее преломляющее ребро было

расположено параллельно оси вращения столика-или, что то же, перпендикулярно к оптической оси трубы. Для этого, предварительно установив спектрометр, как указано выше, ставят призму на столик так, чтобы ось вращения одного из установочных винтов столика была перпендикулярна к плоскости одной из преломляющих граней призмы. Тогда вращение этого винта не будет наклонять грань призмы относительно оси вращения прибора. Вращая столик, поворачивают призму этой гранью к трубе, и, действуя вторым установочным винтом столика, совмещают отражение креста с самим крестом (не трогая винтов трубы). Затем поворачивают столик второй гранью призмы к трубе и, совмещая отражение от второй грани с крестом, вращают только первый установочный винт столика. Наконец снова повертывают столик с призмой первой гранью к трубе, устраняют возникшее небольшое расхождение и затем проверяют вторую грань.

Источником света с линейчатым спектром служит ртутнокварцевая лампа, в которой используется дуговой разряд в парах ртути.

Описание ртутной лампы. В лампе, наполненной аргоном до давления нескольких мм ртутного столбца, имеется некоторое количество ртути, которая во время работы полностью испаряется и дает нужное для данной лампы давление

паров ртути. Аргон введен в лампу для начального зажигания разряда. Потенциал зажигания у аргона в присутствии небольшого количества ртутного пара снижается, и лампа в нормальных условиях легко зажигается при включении ее в цепь переменного тока (лампы типа ПРК-2, ПРК-4, ДРС-50).

В момент зажигания дугового разряда через ртутную лампу идет ток силой в несколько ампер, электроды накаляются и становятся источниками электронов, питающих разряд. Температура ртутной лампы повышается, давление паров ртути увеличивается, напряжение на лампе начинает расти, ток падает и свечение, заполняющее сначала все пространство лампы, стягивается в яркий шнур шириной от 2 до 4 мм, идущий по оси трубки. Режим лампы становится устойчивым, когда вся ртуть испарится. Схема включения лампы изображена на рис. 5.

Имеющиеся в схеме конденсаторы облегчают зажигание лампы. Если лампа не загорелась сразу после включения напряжения на клеммы схемы, то нажимают несколько раз ключ *К*. Удобнее пользоваться трансформатором Тесла или индукционной катушкой.

Повторное включение горевшей лампы возможно только после того, как она охладится и давление паров ртути понизится на-

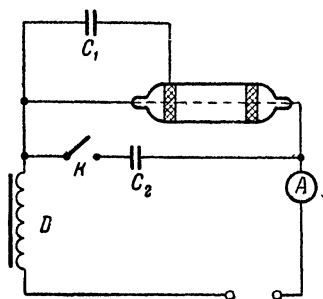


Рис. 5.

столько, что напряжение зажигания разряда станет ниже напряжения цепи, питающей лампу. Для этого обычно требуется не более 10 минут.

В целях предохранения окружающих от ожогов и от действия на глаза ультрафиолетового излучения лампу помещают в специальный кожух, если окошко кожуха не снабжено защитным стеклом, то работающему необходимо надевать защитные очки.

Упражнение 1

Определение преломляющего угла призмы

Преломляющий угол призмы можно определить двумя способами. **Способ 1.** Освещают крест окуляра и закрепляют трубу неподвижно. Поворачивают столик с призмой до тех пор, пока изображение креста, отраженное от одной из граней призмы, не совпадает в поле зрения окуляра с самим крестом. В этом положении столик закрепляют и производят отсчет по лимбу.

Пусть отсчет будет a° . Вращая столик, поворачивают призму другой гранью к трубе и производят такую же установку; пусть отсчет этого положения призмы будет b° .

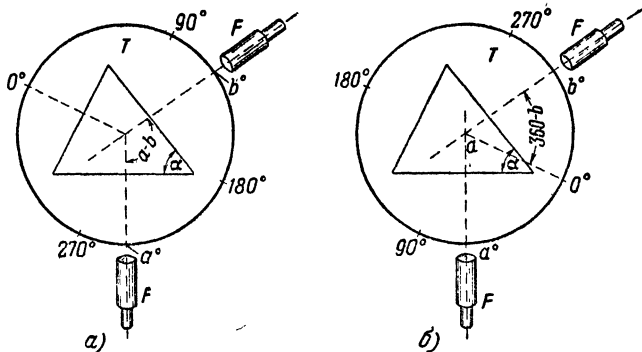


Рис. 6.

Если деления на лимбе идут, убывая от a к b , то измеряемый угол призмы будет равен

$$\alpha = 180^\circ - (a^\circ - b^\circ). \quad (1)$$

Это видно из рис. 6, а, на котором для простоты представления движение обращено, т. е. считается, что столик T с призмой неподвижен, а труба F вращается вокруг него.

Если же, переходя от a к b , мы перешли через нуль делений лимба (рис. 6, б), тогда

$$\alpha = 180^\circ - [a^\circ + (360^\circ - b^\circ)] = b^\circ - (180^\circ + a^\circ). \quad (1')$$

Вычисляют преломляющий угол призмы и, повторяя измерения два или три раза, берут среднее значение преломляющего угла α .

С п о с о б 2. Освещают щель коллиматора и поворачивают столик с призмой таким образом, чтобы падающий из коллиматора на одну из ее граней пучок света образовал с этой гранью угол приблизительно в 45° . Закрепив столик, вращают оптическую трубу, чтобы получить в ней изображение щели коллиматора, отраженное от грани призмы; совмещают это изображение с крестом и, закрепив трубу, производят отсчет. Поворачивают столик с призмой второй гранью в то положение, в котором находилась перед тем первая грань, устанавливают крест на изображение щели и снова отсчитывают. Вычисление преломляющего угла производится также по формулам (1) и (1').

Измерив тем и другим способами преломляющий угол призмы несколько раз, берут из всех полученных результатов среднее арифметическое.

Когда преломляющий угол призмы измерен, приступают к определению показателя преломления.

Упражнение 2

Определение показателя преломления, дисперсии и разрешающей способности стеклянной призмы

Это упражнение целесообразно выполнять с призмой из тяжелого стекла (флинта).

1. Помещают ртутную лампу перед щелью коллиматора, зажигают ее и поворачивают столик так, чтобы биссектриса преломляющего угла призмы образовала с осью коллиматора острый угол, близкий к прямому. Пусть при этом основание призмы лежит вправо от наблюдателя.

2. Закрепив столик, вращают трубу вправо (к основанию призмы) до тех пор, пока зеленая линия ртути ($\lambda = 5460 \text{ \AA}$) не появится в поле зрения трубы. Установив на нее крест, закрепляют трубу и, освободив столик, поворачивают его вместе с призмой в ту или другую сторону и наблюдают, куда движется линия, т. е. увеличивается или уменьшается отклонение. Столик с призмой следует вращать так, чтобы спектральная линия приближалась к направлению неотклоненного светового пучка; при этом может случиться, что линия выйдет из поля зрения трубы; в этом случае, продолжая вращать столик с призмой в том же направлении, открепляют зажимной винт трубы и ведут ее вслед за линией. Пройдя некоторое пространство, линия остановится и затем начнет возвращаться назад; в этом положении призма установлена на угол наименьшего отклонения для зеленой линии ртути. Столик с призмой закрепляют и, вращая трубу, совмещают крест с наблюдаемой линией; после этого, закрепив трубу, пробуют вращать столик

с призмой, чтобы убедиться, соответствует ли установка углу наименьшего отклонения. Если окажется, что линия при вращении немного сошла с креста в сторону уменьшения отклонения, то исправляют установку на наименьшее отклонение и, закрепив столик с призмой, вновь наводят линию на крест трубы.

3. Закрепив окончательно столик и трубу, производят отсчет и затем снимают призму со столика и поворачивают трубу так, чтобы непосредственно видеть щель коллиматора, наводят на него крест окуляра трубы и снова производят отсчет. Разность этих двух отсчетов и будет определять угол наименьшего отклонения δ_1 для данной спектральной линии. Если высота призмы позволяет делать отсчеты неотклоненного светового пучка, не снимая призмы, то призму со столика можно не удалять.

4. Вновь устанавливают призму на столике, поворачивают столик с призмой в симметричное положение — основанием призмы влево и, закрепив его, повторяют предыдущие измерения.

Таким образом, получаются два значения угла наименьшего отклонения: вправо δ_1 и влево δ_2 ; из них берут среднее.

Вычисления. Показатель преломления n для данной длины волны при преломляющем угле α призмы и угле δ минимального отклонения пучка света этой длины волны определяется по формуле

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2} (\alpha + \delta)}{\sin \frac{1}{2} \alpha}.$$

Затем определяют углы наименьшего отклонения для фиолетовой, красной и желтой линий ртутного спектра и вычисляют соответствующее значение показателей преломления n . Строят график, откладывая по оси абсцисс длину волны, а по оси ординат $(n - 1)$ для всех вычисленных значений показателя преломления. Из графика определяют дисперсию материала, из которого сделана призма, $dn/d\lambda$. Зная $dn/d\lambda$, оценивают разрешающую способность призмы $R = b(dn/d\lambda)$, где b — основание призмы, вдоль которого идет свет. Если световой пучок не заполняет всей призмы (рис. 7), то ее разрешающая способность вычисляется по формуле $R = (b_2 - b_1) dn/d\lambda$. При этом ширину пучка можно определить, поставив на его пути лист белой бумаги.

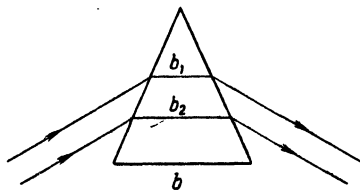


Рис. 7.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, гл. XII, Гостехиздат, 1957.
2. Т. Н. Богданова и Е. П. Субботина, Руководство к практическим занятиям по физике, ч. II, «Советская наука», 1950.

3. Д. Гаррисон, Р. Лоча, Д. Луфбуров, Практическая спектроскопия, ИЛ, 1950.

4. Н. А. Капцов, Электрические явления в газах и вакууме, Гостехиздат, 1950.

ЗАДАЧА 129

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ РЕФРАКТОМЕТРОМ ПУЛЬФРИХА

Показатель преломления жидких и твердых тел определяется по предельному углу преломления скользящего пучка света, падающего на границу раздела двух сред (исследуемое вещество и эталонная стеклянная призма).

Приведенный метод очень часто применяется в физико-химических лабораториях для серийных анализов растворов солей и смесей масел благодаря чрезвычайной простоте и скорости, с которой может быть произведено определение показателей преломления.

Область возможных измерений показателя преломления лежит между

$$n_D = 1,3 \text{ и } n_D = 1,9.$$

Измерение показателя преломления можно производить с точностью до $1 \cdot 10^{-4}$.

Рефрактометр Пульфриха, применяемый в данной задаче, служит для определения показателя преломления жидких и твердых прозрачных тел. Метод

основан на измерении углов φ световых пучков (рис. 1), прошедших через прямоугольную призму при условии, что на верхнюю грань призмы падает скользящий пучок монохроматического света.

Если показатель преломления исследуемого вещества n' меньше показателя преломления n призмы, то по закону преломления для случая скользящего пучка света в точке A можно написать

$$n' = n \sin \psi, \quad (1)$$

где ψ — предельный угол преломления; в точке B для того же пучка $n \sin (90^\circ - \psi) = \sin \varphi$ или

$$n \cos \psi = \sin \varphi, \quad (2)$$

где φ — угол между вышедшим из призмы пучком света и нормалью к вертикальной грани призмы. На основании (1) и (2) получаем

$$n' = \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi}. \quad (3)$$

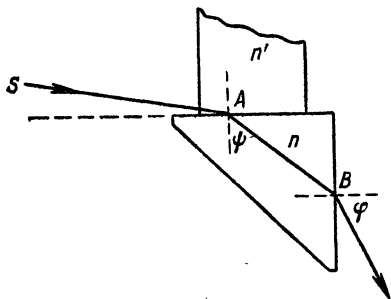


Рис. 1.

Таким образом, зная показатель преломления n призмы и угол φ , можно, пользуясь соотношением (3), определить показатель преломления исследуемого вещества n' .

Описание прибора. Основной частью прибора является прямоугольная эталонная призма из тяжелого флинта, показатель преломления которого n известен с большой точностью. Призма $б$ вмонтирована в специальную оправу и укреплена на столике 1 прибора (рис. 2). При измерениях на горизонтальную грань призмы помещают исследуемую жидкость или образец исследуемого твердого вещества.

Преломленные световые пучки наблюдают с помощью зрительной трубы 2 , которая закреплена на краю вертикального лимба 3 , имеющего горизонтальную ось вращения. Лимб снабжен одномоментным нониусом, а приспособление из микрометрического винта и барабана с делениями дает возможность измерять малые углы с точностью до $0,1'$. Зрительная труба снабжена автоколлимационным окуляром с косым крестом (см. задачу 128); устройство трубы показано на рис. 3. В фокальной плоскости объектива трубы помещена стеклянная пластинка $К$ с двумя штрихами, образующими крест,

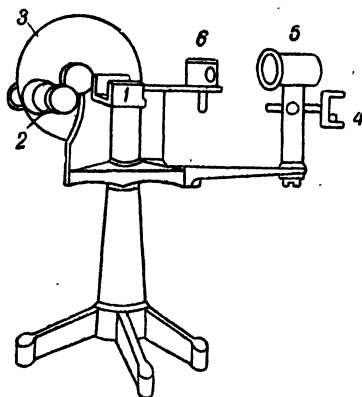


Рис. 2.

с делениями дает возможность измерять малые углы с точностью до $0,1'$. Зрительная труба снабжена автоколлимационным окуляром с косым крестом (см. задачу 128); устройство трубы показано на рис. 3. В фокальной плоскости объектива трубы помещена стеклянная пластинка $К$ с двумя штрихами, образующими крест,

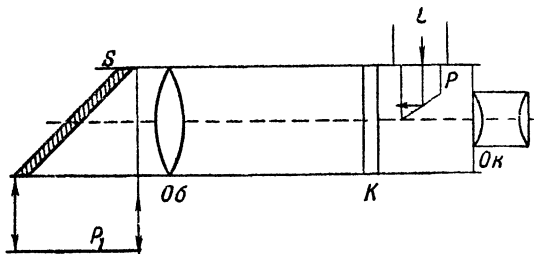


Рис. 3.

центр которого совпадает с оптической осью трубы. Между окуляром $Ок$ и крестом помещена призма полного внутреннего отражения $Р$, закрывающая правую часть креста. Пучок света от источника L , отразившись в призме $Р$, освещает правую часть креста и, пройдя объектив $Об$, отбрасывает ее изображение на зеркало S , расположенное под углом 45° к оптической оси трубы. Отражаясь от зеркала, световой пучок попадает на отражающую грань эталон-

ной призмы P_1 . Пучок света, идущий от призмы P_1 обратно, дает изображение правой половины креста в левой части поля зрения. При этом, если нормаль к отражающей грани перпендикулярна к оптической оси трубы, изображение косоугольного креста должно быть совмещено с самим крестом. Источником света при работе с рефрактометром может служить водородная трубка, укрепленная в зажиме 4 (рис. 2), или натриевая лампа, т. е. электрическая дуга в парах натрия. В практикуме используется натриевая лампа. Источник света помещается на высоте границы раздела исследуемое вещество — эталонная призма и, следовательно, в исследуемое вещество попадает скользкий пучок света, претерпевающий преломление на границе двух сред.

При этом необходимо, чтобы коэффициент преломления исследуемого вещества был меньше коэффициента преломления эталонной призмы, так как в противном случае будет наблюдаться полное внутреннее отражение и свет не пройдет через эталонную призму.

При исследовании жидких веществ к призме прикрепляются цилиндрические стеклянные сосуды, в которые и наливается жидкость. При определении показателя преломления твердых тел из исследуемого вещества изготавливаются образцы с одной хорошо отполированной гранью. Сторона образца, обращенная к источнику света, должна быть матовой. Для соблюдения оптического контакта между гранью призмы и полированной гранью исследуемого тела помещают каплю жидкости с показателем преломления большим, чем показатель преломления исследуемого вещества, но меньшим, чем показатель преломления призмы.

Слой жидкости действует как плоскопараллельная пластинка, и поэтому окончательная формула для определения показателя преломления исследуемого вещества остается той же.

Для упрощения вычислений показателя преломления к прибору прилагаются таблицы, в которых для каждой эталонной призмы по найденному углу φ можно непосредственно определить искомый показатель преломления n' . Точность определения показателя преломления n' зависит от точности определения показателя преломления эталонной призмы n и точности измерения угла φ . Применяемый в задаче рефрактометр позволяет определить показатель преломления с точностью до $1 \cdot 10^{-4}$.

Упражнение 1

Определение показателя преломления жидкости

К горизонтальной грани эталонной призмы приклеена канадским бальзамом стеклянная трубка с вертикальными стенками, в которую наливается исследуемая жидкость; в жидкости не должно быть пузырьков, и поверхность призмы должна хорошо смачиваться. Если жидкость плохо смачивает грань призмы, то последнюю сле-

дует промыть ацетоном и протереть замшей или чистым льняным полотном.

Измерения. 1. Определяют положение нормали к отражающей вертикальной грани призмы. Для этого устанавливают эталонную призму на столике прибора и затем совмещают крест окуляра зрительной трубы с его изображением, отраженным от рассматриваемой грани призмы.

При этом сначала совмещение производят грубо поворотом трубы от руки, затем закрепляют трубу и дальнейшее вращение трубы производят микрометрическим винтом. Когда изображение креста и крест совмещены, отсчитывают показания на лимбе и барабане.

Примечание. Если совместить изображение и крест не удастся, то добиваются симметричного расположения изображения относительно креста (рис. 4).

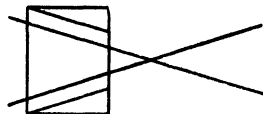


Рис. 4.

2. Устанавливают источник света таким образом, чтобы в жидкость попал скользящий пучок света. Вращают трубу вокруг горизонтальной оси и добиваются, чтобы в нее попал преломленный световой пучок. При этом в поле зрения трубы видна светлая полоса. Наводят центр косоугольного креста на верхнюю границу полосы (это соответствует скользящему падению пучка света на горизонтальную грань эталонной призмы). Фиксируют положение трубы и отсчитывают показания на лимбе и барабане.

Разность отсчетов в первом и втором положениях трубы и дает угол φ . Зная φ , по таблицам определяют показатель преломления n' .

Упражнение 2

Определение показателя преломления стекла

При выполнении этого упражнения используются стеклянные пластинки толщиной не менее 1,5 мм с хорошо отполированной одной поверхностью. Желательно, чтобы обращенная к источнику света грань пластинки была матовой. Стеклянной палочкой на рабочую грань пластинки наносят каплю альфа-монобромнафталина ($C_{10}H_7Br$) и устанавливают ее на горизонтальной поверхности эталонной призмы, при этом пластинка и эталонная призма должны быть хорошо притерты друг к другу.

Порядок измерения тот же, что и в упражнении 1.

Упражнение 3

Измерение дисперсии стеклянной призмы

Исследуемую призму устанавливают на горизонтальной поверхности эталонной призмы так же, как в упражнении 2, нанеся на рабочую грань каплю альфа-монобромнафталина.

Для измерения дисперсии устанавливают перед конденсором 5 (рис. 2) водородную трубку или другой источник света с линейчатым спектром. Справа от прибора (примерно в 30—40 см) устанавливают натриевую лампу и с помощью призмы б проектируют пучок света от лампы на основание испытуемой призмы. Вращая лимб, находят в поле зрения трубы линию натрия и укрепляют лимб зажимным винтом. Затем при помощи микрометрического винта наводят крест на верхний край линии натрия и производят отсчет на шкале вертикального круга.

Отсчет производится несколько раз и берется среднее значение угла. Затем призму б отводят в сторону, включают водородную трубку и направляют пучок света от нее на основание призмы. Производят те же измерения для линий спектра водорода (C — красная линия водорода, $\lambda = 6563 \text{ \AA}$; F — синяя линия, $\lambda = 4861 \text{ \AA}$).

Из нескольких отсчетов для каждого из углов φ берут среднее значение и вносят поправку на положение нуля.

По полученным значениям углов φ из специальной таблицы для данной эталонной призмы, прилагаемой к прибору, выписывают соответствующее углу φ значение показателей преломления n_D (для линии натрия), n_C и n_F (для линий водорода). Зная эти данные, можно вычислить дисперсию $dn/d\lambda$ испытуемых призм (см. задачу 128).

При наличии специальных таблиц можно производить вычисление дисперсии по показаниям микрометрического винта: в этом случае точность достигает порядка $\pm 2 \cdot 10^{-5}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. См. литературу к задаче 128.
2. А. Г. Бартенев, Оптические контрольно-измерительные приборы, гл. 7, ОНТИ, 1937.

ЗАДАЧА 130

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ И СРЕДНЕЙ ДИСПЕРСИИ ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ РЕФРАКТОМЕТРА АББЕ

В задаче измеряются: 1) показатели преломления эталонных смесей глицерина в воде, строится график зависимости показателя преломления от концентрации раствора, измеряется показатель преломления смеси с неизвестным содержанием глицерина и по графику определяется концентрация глицерина, 2) измеряется показатель преломления стекла, 3) измеряется средняя дисперсия испытуемого стекла или жидкости.

Рефрактометр ИРС-22 применяется в основном для быстрого определения показателей преломления жидкостей, взятых в неболь-

ших количествах (2—3 капли), показатели преломления которых лежат в пределах 1,3—1,7. Принцип действия прибора основан на явлениях, происходящих при прохождении света через границу раздела двух сред с разными показателями преломления.

Световой пучок, отраженный от зеркала, падает на двойную призму, представляющую собой две прямоугольные призмы, показанные на рис. 1.

Призмы изготовлены из тяжелого стекла (флинт), показатель преломления которого больше 1,700. Грань AB верхней осветительной призмы матовая и служит для освещения рассеянным светом жидкости, нанесенной тонким слоем в узкий зазор между призмами. Свет, рассеянный матовой гранью верхней призмы, проходит плоскопараллельный слой исследуемой жидкости и падает на диагональную грань нижней призмы под различными углами в пределах от 0 до 90° . Пучок света, угол падения которого равен 90° , называется скользющим пучком, а так как показатель преломления призмы больше, чем показатель преломления жидкости, то скользящий световой пучок RS , преломляясь на границе жидкость — стекло, пойдет в нижней призме под предельным углом преломления MST . Преломление светового пучка RS в точке S подчинено закону

$$n = N \sin r, \quad (1)$$

где N — показатель преломления стекла, из которого сделаны призмы, n — показатель преломления исследуемой жидкости, r — угол преломления MST в нижней призме. В точке T по выходе светового пучка из призмы имеем

$$N \sin r' = \sin i, \quad (2)$$

где r' — угол падения пучка ST на грань призмы AC , а i — предельный угол выхода пучка света из призмы. Пучок света TE представляет собой границу распространения света, прошедшего призму со стороны наименьших углов i . Преломляющий угол призмы (см. задачу 128)

$$\alpha = r + r'. \quad (3)$$

Из соотношений (1)—(3) легко получается формула, связывающая искомый показатель преломления n с предельным углом выхода i

$$n = \sin \alpha \sqrt{N^2 - \sin^2 i} - \cos \alpha \sin i. \quad (4)$$

Шкала показателей преломления, видимая в поле зрения одновременно с границей раздела, градуируется для натриевого света при $t = 20^\circ \text{C}$.

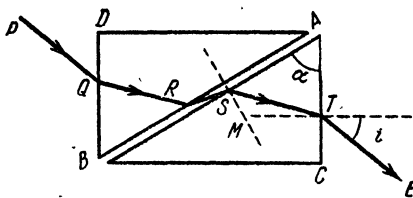


Рис. 1.

В отличие от рефрактометра, описанного в задаче 129, измерения показателей преломления на рефрактометре ИРФ-22 проводятся с любыми и некогерентными источниками света.

В этом случае граница раздела, видимая в поле зрения, окрашена вследствие дисперсии. Для устранения окраски в оптическую часть прибора между измерительной призмой и объективом оптической трубы для компенсации дисперсии введен компенсатор, состоящий из двух призм прямого зрения, могущих вращаться во взаимно противоположных направлениях. Винтом, расположенным на корпусе прибора справа от наблюдателя, вращают призмы компенсатора до полного устранения окраски границы раздела. Призмы

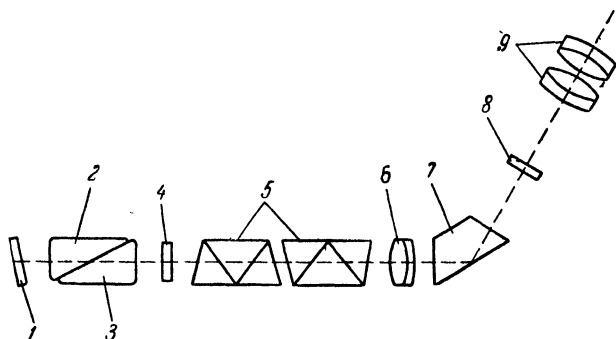


Рис. 2.

таким образом образуют оптическую систему с переменной дисперсией. Вместе с компенсатором вращается барабан со шкалой, по которой можно при наличии соответствующих таблиц определить дисперсию исследуемого вещества, т. е. разность показателей преломления ($n_F - n_C$) для линий $\lambda_C = 6563 \text{ \AA}$ и $\lambda_F = 4861 \text{ \AA}$ водорода.

Описание прибора. Оптическая схема прибора изображена на рис. 2. Свет, отраженный от зеркала 1, направляется в осветительную призму 2, проходит тонкий слой исследуемой жидкости и измерительную призму 3, затем через защитное стекло 4 и компенсатор 5 попадает в объектив 6, проходит через призму полного внутреннего отражения 7, пластинку с крестом 8 и через окуляр 9 попадает в глаз наблюдателя.

Шкала освещается с помощью зеркала, расположенного с левой стороны прибора, и проектируется системой призм в фокальную плоскость окуляра, так что в поле зрения одновременно видны граница светотени, перекрестье в окуляре и шкала с визиром. По шкале отсчитывается непосредственно значение показателя преломления в пределах от 1,3 до 1,7 с точностью до $1 \cdot 10^{-4}$. Десятитысячные доли отсчитываются на глаз. Таким образом, точность определе-

ния показателя преломления равна $2 \cdot 10^4$. Измерительная и осветительная призмы закреплены в оправе двух литых полушаров с окошками (измерительная головка), смонтированных на корпусе прибора. Для нахождения границы раздела и совмещения ее с крестом измерительную головку можно вращать вокруг горизонтальной оси с помощью винта, находящегося с левой стороны корпуса прибора.

Для поддержания постоянной температуры при точных измерениях показателя преломления в оправе призм сделаны камеры, сквозь которые циркулирует вода, подводимая от термостата. Подача и отвод воды осуществляются резиновыми шлангами, надеваемыми на четыре штуцера камер. Для определения температуры воды в один из штуцеров ввинчивается специальный термометр. В учебных лабораториях, где особой точности не требуется, измерения проводятся при комнатной температуре ¹⁾).

Упражнение 1

Определение показателя преломления жидкости

Включить лампу и установить ее так, чтобы свет падал на зеркало подсветки шкалы и на грань осветительной призмы. При правильной установке лампы в окуляр должен быть виден ярко освещенный квадрат со шкалой в левой части поля зрения.

Вращая окуляр, фокусируют шкалу и визир. Держась за штифты измерительной головки, отводят вверх и вправо верхнюю часть с осветительной призмой. На полированную грань призмы 3 наносят стеклянной палочкой 2—3 капли исследуемой жидкости, после чего ставят осветительную призму на место. Исследуемая жидкость должна при этом заполнять весь зазор между гранями осветительной и измерительной призм. Это имеет место, если матовая грань — гипотенуза осветительной призмы — кажется равномерно серой, при рассматривании ее через катетную грань призмы.

Вращая ручку поворота измерительной головки, расположенную с левой стороны прибора, ниже зеркала освещения шкалы, добиваются появления в поле зрения границы светлого и темного полей. Окраска границы раздела устраняется вращением ручки компенсатора.

Совмещают границу раздела с перекрестием штрихов в окуляре и записывают соответствующий этой наводке отсчет на шкале показателей преломления с точностью до четвертого знака, определяемого на глаз.

Повторяют наводку 3—4 раза. Измеряют показатели преломления эталонных смесей растворов глицерина в воде и строят график

¹⁾ В отчете о задаче следует указать температуру помещения до и после измерений.

зависимости показателей преломления смесей от концентрации раствора. Определяют показатель преломления раствора неизвестной концентрации глицерина в воде и по графику определяют содержание в нем глицерина.

После каждого определения показателя преломления отводят осветительную призму в сторону, наносят на полированную грань измерительной призмы несколько капель дистиллированной воды и осторожно протирают призмы мягкой льняной тканью. На рефрактометре Аббе можно измерить в отраженном свете показатели преломления окрашенных или мутных сред, но в данной задаче это упражнение не выполняется.

Упражнение 2

Измерение показателя преломления твердых тел

Исследуемый образец должен быть оптически однородным. Грань, соприкасающаяся с поверхностью измерительной призмы, должна быть хорошо отполирована, а сторона, обращенная к источнику света, должна быть матовой.

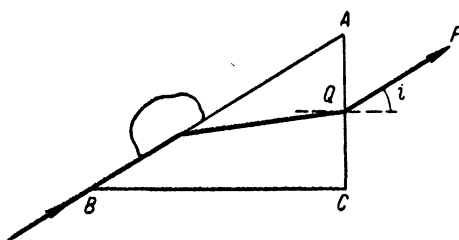


Рис. 3.

Перед началом измерения верхняя осветительная призма отводится в сторону, полированные поверхности образца и измерительной призмы промываются бензином или спиртом и осторожно вытираются мягкой тканью.

Исследуемый образец помещается на измерительную призму (рис. 3) с прослойкой между полированными гранями из α -монобромнафталина, показатель преломления которого (1,658) меньше N , но больше показателя преломления исследуемого тела n . Значение показателя преломления n отсчитывается непосредственно по шкале.

Упражнение 3

Измерение средней дисперсии

Для измерения средней дисперсии жидких и твердых тел исследуемый образец или жидкость устанавливают точно так же, как и при измерении показателя преломления. Мерой дисперсии служит поворот одной призмы компенсатора относительно другой, осуществляемый вращением винта компенсатора до полного устранения окрашенности границы раздела. Отсчет производится по барабану, разделенному на 120 частей.

При повороте барабана на 180° (60 делений) дисперсия компенсатора пройдет все значения от нуля до двойного значения дисперсии одной призмы, т. е. граница раздела дважды получится бесцветной.

При измерениях следует производить не менее 5 отсчетов с двух сторон барабана и найти среднее арифметическое Z . Величину средней дисперсии ($n_F - n_C$) определяют по прилагаемым к прибору таблицам в зависимости от полученного Z и показателя преломления n_D исследуемого вещества.

Значение средней дисперсии находят по формуле $V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. Т. Н. Богданова и Е. П. Субботина, Руководство к практическим занятиям по физике, ч. I, Изд. «Советская наука», 1949.
3. А. Г. Баргенов, Оптические контрольно-измерительные приборы, ОНТИ, 1937.

ЗАДАЧА 131

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПОМОЩИ БИЛИНЗЫ И БИПРИЗМЫ

В задаче излагаются два метода получения когерентных источников света и определение длины световой волны в опытах с билинзой Бийе и с бипризмой Френеля.

Теория. Для экспериментального обнаружения явления интерференции при сложении двух колебаний необходимо, чтобы они первоначально происходили от одного и того же источника. Два центра излучения, происходящих от одного и того же первоначального источника, испускающих поэтому колебания с постоянной разностью фаз, являются *когерентными*.

Энергия колебаний в интерференционном поле двух близких точечных когерентных источников одинаковой амплитуды пропорциональна

$$4a^2 \cos^2 \left(\pi \frac{d_2 - d_1}{\lambda} + \frac{\varphi}{2} \right),$$

где d_1 и d_2 — соответственные расстояния точек поля от источников, λ — длина волны, a — амплитуда колебаний и φ — начальная разность фаз. Если начальная разность фаз $\varphi = 0$, то условие максимума или минимума интенсивности в данной точке поля удовлетворяется при

$$2 \frac{d_2 - d_1}{\lambda} = 2k \text{ (максимум),}$$

$$2 \frac{d_2 - d_1}{\lambda} = 2k + 1 \text{ (минимум),}$$

где k — любое целое число. Пользуясь этим соотношением и зная расстояние между источниками l , легко получить зависимость между длиной волны λ и расстоянием между интерференционными полосами на экране, помещенном параллельно линии, соединяющей источники.

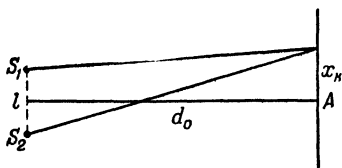


Рис. 1.

Действительно, пусть S_1 и S_2 (рис. 1) — два когерентных источника света, расстояние l между которыми мало по сравнению с расстоянием d_0 до экрана. Если на таком расстоянии поставить экран, то на нем будут наблюдаться интерференционные полосы; в точке A будет находиться центральная светлая полоса (разность фаз равна нулю). Расстояние k -й светлой полосы от центральной, равно x_k , определится из условия

$$x_k = \frac{d_0}{l} k \lambda,$$

если x_k и l малы по сравнению с d_0 . Положение темных полос определяется условием

$$x'_k = \frac{d_0}{l} (2k + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

Легко видеть, что расстояние между двумя соседними светлыми или темными полосами есть

$$\Delta x = x_{k+1} - x_k = \frac{d_0}{l} \lambda (k + 1) - \frac{d_0}{l} \lambda k = \frac{d_0}{l} \lambda,$$

откуда

$$\lambda = \frac{l}{d_0} \Delta x. \quad (1)$$

Упражнение 1

Определение длины световой волны при помощи билинзы

Б и л и н з а представляет собой собирающую линзу, разрезанную пополам; центры половин линзы обозначены O_1 и O_2 (рис. 2); обе половины линзы слегка раздвинуты одна относительно другой и дают два действительных или мнимых изображения щели S , которые и являются двумя когерентными источниками света. На оправе билинзы имеются два винта для смещения полулинз в плоскости, перпендикулярной к оси симметрии системы.

Рассмотрим более подробно ход лучей через билинзу, когда из нее вырезана средняя часть, как это обычно бывает на практике вследствие конечной ширины полосы распила линзы.

а) Получение интерференционной картины при помощи действительных изображений щели S . При помещении щели на расстоянии, большем фокусного от билинзы, в зависимости от расположения оптических центров полулинз относительно оси симметрии системы наблюдаются два положения интерференционной области. Если половина билинзы и ее оптический центр расположены по одну сторону оси симметрии, то изображение щели, даваемое рассматриваемой полулинзой, будет находиться по эту же сторону оси, а

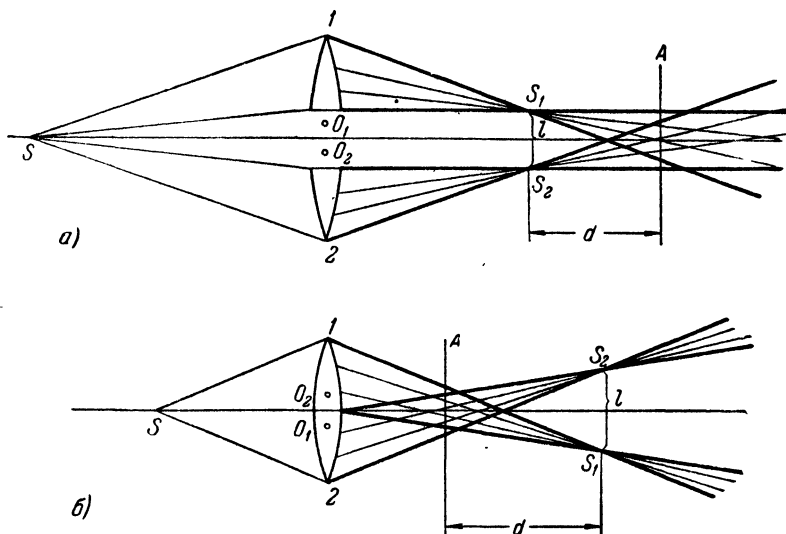


Рис. 2.

интерференционная картина, даваемая обеими полулинзами, будет находиться за изображениями щели, как это видно на рис. 2, а. Очевидно, это осуществляется в том случае, когда расстояние между полулинзами больше ширины вырезанной части линзы. Если же полулинза и ее оптический центр расположены по разные стороны оси симметрии, то изображение щели, даваемое этой полулинзой, будет с той стороны оси, где находится ее оптический центр, а интерференционная картина будет перед изображениями щели (рис. 2, б). Это будет в случае, когда расстояние между полулинзами меньше величины распила линзы.

б) Получение интерференционной картины при помощи перекрещивания параллельных пучков. При помещении щели S в фокальной плоскости билинзы также наблюдаются два случая в зависимости от положения оптических центров билинзы относительно оси

симметрии. Если полулинзы и соответствующие им оптические центры расположены по одну сторону оси симметрии, т. е. обе половины раздвинуты на расстояние, большее ширины вырезанной части линзы, то два параллельных пучка лучей, выходящих из каждой половины билинзы, не пересекаются и, следовательно, не будут интерферировать (рис. 3, а). Если же половины билинзы и соответствующие им оптические центры расположены по обе стороны оси симметрии (расстояние между полулинзами меньше распила линзы),

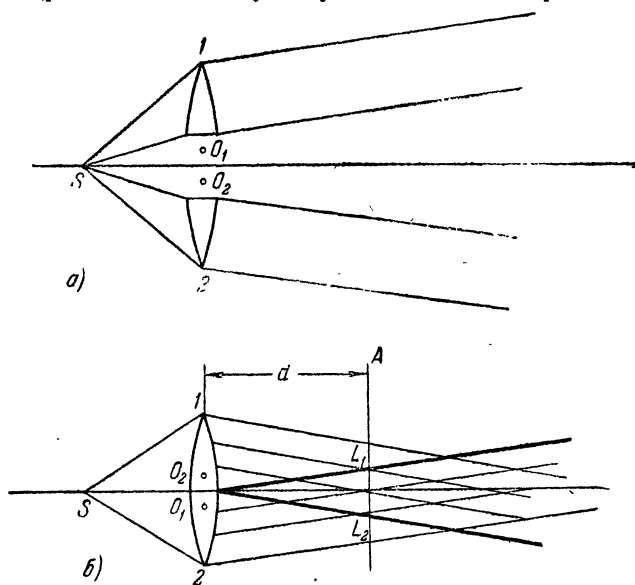


Рис. 3.

то два параллельных пучка, выходящих из половин билинзы, пересекутся и образуют интерференционную область (рис. 3, б).

Легко показать, что ширина интерференционных полос Δx в этой области не зависит от положения плоскости наблюдения и определяется из выражения $\Delta x = \lambda/2 \operatorname{tg} \varphi$ (φ — угол, образуемый преломленными лучами с осью симметрии системы).

в) Получение интерференционной картины при помощи мнимых изображений щели. При помещении щели S на расстоянии, меньшем фокусного от билинзы, так же как в предыдущем случае, интерференционная картина не наблюдается, если расстояние между полулинзами больше величины распила линзы (рис. 4, а). Если же расстояние между полулинзами меньше величины распила, т. е. полулинзы и соответствующие им оптические центры расположены по обе стороны оси симметрии, то интерференция наблюдается (рис. 4; б).

Несмотря на то, что полосы интерференции здесь весьма широки и отчетливы, точность при определении длины световой волны невелика вследствие того, что расстояние между двумя мнимыми источниками S_1 и S_2 , а также их расстояние до плоскости наблюдения A определяются косвенно, через величину фокусного расстояния билинзы и расстояние между оптическими центрами двух половин билинзы.

При выполнении задачи рекомендуется использовать для наблюдения интерференции все описанные варианты, а для вычисления длины световой волны только первые два.

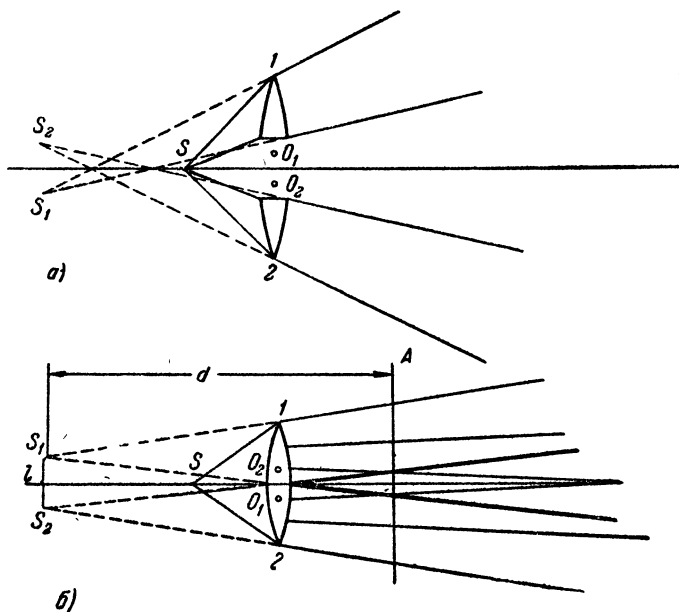


Рис. 4.

Измерения. На оптической скамье в следующей последовательности устанавливаются на одной высоте: осветитель, вертикальную щель, билинзу и окулярный микрометр. В качестве источника света с линейчатым спектром в осветителе используется ртутная лампа низкого давления. К окошку осветителя прикреплены планки, в которые вставляются светофильтры, позволяющие выделить те или иные линии спектра ртути. Щель снабжена двумя винтами, позволяющими регулировать ширину щели и ее наклон в вертикальной плоскости. Щель, оправа с билинзой, а также микрометр укрепляются на штырях, зажатых в гнездах ползушек¹⁾.

¹⁾ Билинза и микрометр имеют еще на своих штырях винтовые салазки, обеспечивающие перемещение приборов перпендикулярно к оптической скамье, что существенно при юстировке всей системы.

Ползушки могут свободно передвигаться вдоль оптической скамьи, снабженной сантиметровыми делениями. Указатели, прикрепленные к ползушкам, позволяют измерить расстояния между щелью, билинзой и окулярным микрометром. Следует отметить, что положение указателя на ползушке микрометра совпадает с плоскостью рассматриваемого предмета при сфокусированной шкале.

При центрировке системы по высоте широко раскрывают щель и наблюдают положение световых пучков при помощи листа белой бумаги. После юстировки системы светофильтры вставляют в окошко осветителя.

При наблюдении интерференционной картины, изображенной на рис. 2, а, билинзу устанавливают от щели на расстоянии, которое рекомендовано непосредственно на установке. (Это расстояние больше двойного фокусного расстояния билинзы.) Раздвигают половины билинзы на 3—4 мм и ищут при помощи листа белой бумаги действительные изображения щели. Затем устанавливают на это место окулярный микрометр и, наблюдая в окуляр, сужают щель (ширина изображения щели должна быть сравнима или немного больше толщины штрихов микрометра), сдвигают половины билинзы так, чтобы расстояние между изображениями щелей было бы не более 0,5—0,6 мм. Свидетельством того, что положение полулинз установлено в соответствии с рис. 2, а, служит совпадение направления движения изображений щели с движением полулинз. Затем отодвигают микрометр на 5—8 см от места, где наблюдались изображения щели, в сторону, противоположную билинзе, и снова, осторожно сдвигая в горизонтальном и вертикальном направлениях полулинзы и меняя ориентировку щели, добиваются резкой интерференционной картины. При помощи окулярного микрометра определяют величину Δx — расстояние между двумя соседними светлыми или темными интерференционными полосками. Для этого необходимо измерить расстояние между достаточно удаленными друг от друга темными (светлыми) полосами и разделить это расстояние на число светлых (темных) полос. Измерение производят несколько раз и записывают результаты. Отсчитывают положение окулярного микрометра на оптической скамье, передвигают его к изображениям щели, пока они не станут четко видимыми в окуляр. Измеряют расстояние d между первым и вторым положением микрометра на оптической скамье. При помощи окулярного микрометра измеряют расстояние между двумя изображениями щели l и по формуле (1) рассчитывают длину световой волны.

Для наблюдения интерференционной картины, соответствующей рис. 2, б, билинзу устанавливают за щелью на расстоянии, превышающем ее фокусное расстояние. Отыскивают новое положение изображения щели. При помощи микрометра устанавливают расстояние между изображениями в 0,8—1,0 мм. Свидетельством того, что положение полулинз установлено в соответствии с рис. 2, б,

служит противоположное направление движения изображений щели по отношению к движению полулинз. Затем отодвигают окулярный микрометр на 8—10 см от изображений в сторону билинзы, находят интерференционную картину и поворотами винтов на оправе билинзы и щели добиваются резкости изображения. Измерение ширины интерференционных полос, расстояния между наблюдаемой картиной и положением изображений щели и расстояния между изображениями щели производят так же, как указано выше. Определение длины световой волны производят также по формуле (1).

Для наблюдения интерференционной картины в параллельных пучках (рис. 3, б) необходимо поместить щель S в фокальной плоскости билинзы и практически вплотную сдвинуть обе половины билинзы. Положение щели находят при помощи зрительной трубы, установленной предварительно на бесконечность (см. описание задачи 124).

Для наблюдения интерференционных полос при помощи мнимых изображений (рис. 4) щель S устанавливают перед билинзой (нужное расстояние указано на установке), обе половины которой также почти вплотную сдвинуты друг с другом. Наблюдение интерференционной картины производят при помощи окулярного микрометра, который устанавливают на расстоянии 30—40 см от билинзы.

Упражнение 2

Определение длины световой волны при помощи бипризмы

Б и п р и з м а представляет собой две призмы с малыми преломляющими углами (порядка $30'$), сложенные основаниями (рис. 5). Падающий от щели S пучок света после преломления в бипризме разделится на два перекрывающихся пучка, как бы исходящих из двух мнимых изображений щели S_1 и S_2 . Так как источники S_1 и S_2 когерентны, то в пространстве за бипризмой будет наблюдаться интерференционная картина, локализованная во всей области пересечения пучков.

Измерения. Бипризма¹⁾ помещается на расстоянии 20—30 см от щели так, чтобы ребро тупого угла бипризмы было расположено вертикально (рис. 6). На расстоянии 30—50 см от бипризмы помещают окулярный микрометр. Окно осветителя, середина щели, бипризма и окулярный микрометр должны быть установлены на одной высоте.

Сделав щель достаточно узкой, слегка поворачивают ее или бипризму около горизонтальной оси, добиваясь такого положения, чтобы щель была строго параллельна ребру бипризмы. При этой установке интерференционная картина будет наиболее отчетливой. Изменяя ширину щели и передвигая микрометр вдоль оптической

¹⁾ Установка с бипризмой показана на рис. 6 в горизонтальной проекции

скамьи, добиваются того, чтобы интерференционные полосы были ярки при достаточно большом расстоянии между ними (0,08—0,15 мм).

Определение расстояния между полосами проводится так же, как и в упражнении 1, но вначале следует убедиться в возможности

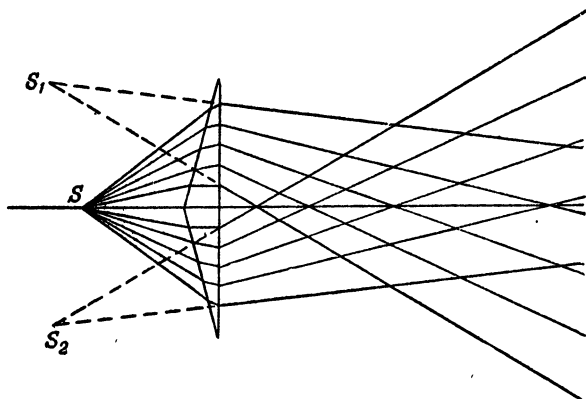


Рис. 5.

определения расстояния $S_1S_2 = l$. Для этой цели применяется метод, основанный на получении увеличенного и уменьшенного действительных изображений расстояния между мнимыми источниками S_1 и S_2 с помощью вспомогательной собирающей линзы, фокусное расстояние которой меньше четверти расстояния между

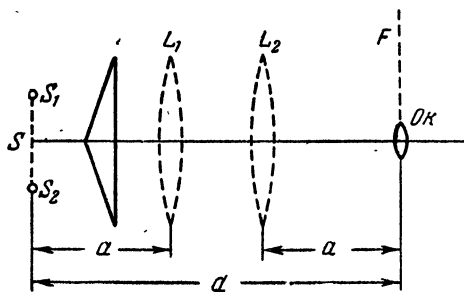


Рис. 6.

щелью S и фокальной плоскостью окулярного микрометра (см. задачу 123, упражнение 1, способ Бесселя). На оптическую скамью между бипризмой и окулярным микрометром помещают линзу, которая может передвигаться вдоль оптической скамьи. Щель, бипризма и окулярный микрометр должны быть закреплены неподвижно.

Передвигая линзу (рис. 6), добиваются того, чтобы при ее положении L_1 в фокальной плоскости окулярного микрометра было видно увеличенное (l_1) изображение отрезка S_1S_2 , а при положении L_2 — уменьшенное (l_2); в этом случае оба изображения лежат в той же плоскости, в которой наблюдалась интерференционная картина. С помощью окулярного микрометра измеряют расстояние между изображениями щели l_1 и l_2 .

Затем измеряют расстояние d ¹⁾ от щели S до окулярного микрометра $Ок$, расстояние a от щели S до линзы L_1 , равное L_2F (рис. 6). Тогда истинное расстояние между мнимыми источниками l легко определяется из простых соотношений

$$\frac{l_1}{l} = \frac{d-a}{a} \quad \text{и} \quad \frac{l_2}{l} = \frac{a}{d-a},$$

откуда

$$l = \sqrt{l_1 l_2}.$$

Подставляя значение l в формулу (1), вычисляют длину волны

$$\lambda = \frac{\sqrt{l_1 l_2}}{d} \Delta x.$$

Если известен преломляющий угол бипризмы α , то расстояние $l = 2r(n-1)\alpha$, где r — расстояние от щели до бипризмы, а n — показатель преломления стекла бипризмы, откуда нетрудно, пользуясь формулой (1), вычислить длину волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева, Курс физики, т. III, Физматгиз, 1962.
3. Р. Вуд, Физическая оптика, ОНТИ, 1936.
4. А. Н. Захарьевский, Интерферометры, Оборонгиз, 1952, гл. 1, §§ 3, 4.
5. Р. Дитчберн, Физическая оптика, «Наука», 1965, гл. 5.

ЗАДАЧА 132

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ И ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

Задача посвящена ознакомлению с явлением интерференции в тонких прозрачных изотропных пластинках, в частности, когда интерференционная картина локализована на поверхности тонкого клина (полосы равной толщины). Наблюдение интерференции с помощью колец Ньютона представляет собой наиболее простой метод изучения этого явления и определения длины световой волны.

¹⁾ На рис. 5 мнимые источники S_1 и S_2 и действительный источник S не лежат строго в одной плоскости, перпендикулярной к оптической оси, но это смещение при малых преломляющих углах бипризмы весьма мало по сравнению с расстоянием между источником S и микрометром $Ок$, а поэтому можно при определении величины l измерять прямо d и, следовательно, пренебрегать смещением S_1 и S_2 относительно S .

Этот метод может быть применен также для измерения углов тонких стеклянных клиньев и для определения профилей несферических поверхностей.

Кольца Ньютона наблюдаются в том случае, когда выпуклая поверхность линзы малой кривизны соприкасается с плоской поверхностью хорошо отполированной пластинки; при этом остающаяся между ними воздушная прослойка постепенно утолщается от центра к краям. Если на линзу падает пучок монохроматического света, то световые волны, отраженные от верхней и нижней границ этой воздушной прослойки, будут интерферировать между собой. При этом получается следующая картина: в центре — черное пятно, окруженное рядом concentрических светлых и черных колец убывающей ширины. При наблюдении в проходящем свете будет обратная картина: пятно в центре будет светлым, все светлые кольца заменятся темными и наоборот.

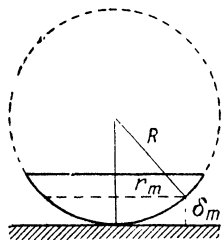


Рис. 1.

Произведем расчет размеров колец Ньютона в отраженном свете. Так как интерференция происходит между волнами, отраженными от верхней и нижней поверхностей воздушной прослойки, то для вычисления разности фаз надо иметь в виду не только разность хода внутри воздушной прослойки, но также и изменение

фазы электрического и магнитного векторов при отражении на границах стекло — воздух — воздух — стекло. Это изменение приводит как для того, так и для другого вектора к дополнительной разности фаз, равной π . При этом для электрического вектора первое отражение происходит без изменения фазы, а второе с изменением фазы на π , для магнитного же вектора — наоборот. В результате как для того, так и для другого вектора приобретает дополнительную разность $\lambda/2$; следовательно, полная оптическая разность хода

$$\Delta = 2\delta_m + \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

где δ_m — толщина воздушной прослойки (показатель преломления воздуха $n_1 = 1$) — легко вычисляется из геометрических соображений (рис. 1)

$$\delta_m = \frac{r_m^2}{2R}, \quad (2)$$

где r_m — радиус m -го кольца и R — радиус кривизны линзы.

Условие образования m -го темного кольца имеет вид

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (3)$$

Из формул (1), (2) и (3) получаем

$$r_m = \sqrt{mR\lambda}. \quad (4)$$

Чем больше m , тем меньше различие между радиусами соседних колец, т. е. тем теснее кольца.

Для радиуса светлого кольца будем иметь

$$r'_m = \sqrt{(2m-1)R\frac{\lambda}{2}}. \quad (5)$$

Из формул (4) или (5) можно определить R (или λ), но так как вследствие упругой деформации стекла невозможно добиться соприкосновения сферической линзы и плоской пластинки строго в одной точке, то более правильный результат получится, если вычислять R (или λ) по разности радиусов двух колец r_m и r_n ; тогда окончательная формула будет иметь следующий вид:

$$R = \frac{r_m^2 - r_n^2}{(m-n)\lambda}. \quad (6)$$

Для расчетов это выражение удобнее переписать так:

$$R = \frac{(r_m - r_n)(r_m + r_n)}{(m-n)\lambda}. \quad (7)$$

Описание прибора. В задаче применяется микроскоп МБИ-4 (рис. 2), с которого снят тубус и установлен винтовой окулярный микрометр АМ-9. Кроме того, объектив заменен более длиннофокусным ($f = 25$ мм) и расстояние между окуляром и объективом подобрано так, что вблизи фокальной плоскости окуляра одновременно со шкалой окуляра проектируется увеличенное в три раза изображение колец Ньютона. Таким образом, измеренные расстояния следует уменьшить в три раза или, что то же самое, считать, что перемещение креста нитей на одно деление барабана соответствует не 0,01 мм, а 0,0033 мм.

К револьверной головке микроскопа привинчен вертикальный осветитель (иллюминатор ОИ-1), представляющий собой небольшую трубку с боковым окном. Внутри трубки, перед окном, находится стеклянная пластинка P (рис. 2), которую с помощью винтов, не показанных на рисунке, устанавливают под углом 45° к оси микроскопа.

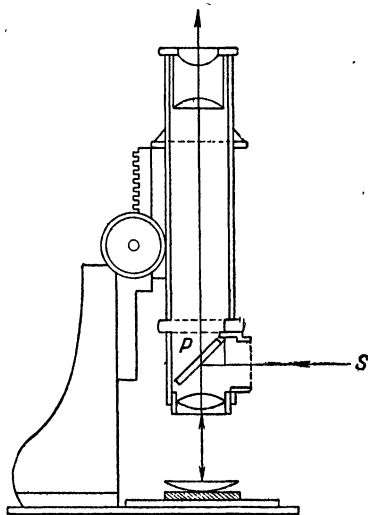


Рис. 2.

На столике измерительного микроскопа помещается полированная пластинка из черного стекла, на которой при помощи особых зажимов укреплена исследуемая линза. Свет от источника S попадает на линзу после отражения от пластинки P .

Источником света служит ртутная лампа, устанавливаемая на некотором расстоянии от прибора на одной высоте с окном осветителя. (Описание ртутной лампы см. в задаче 128.)

Свет, испускаемый ртутной лампой, состоит из немногих отдельных ярких линий (см. табл. 12), из которых наиболее удобными для наблюдений являются две зеленые, желтая и фиолетовая. Их можно выделить из спектра лампы, помещая на пути лучей соответствующим образом подобранные светофильтры (желтая линия, впрочем, состоит из двух весьма близких друг к другу линий).

Упражнение 1

Определение радиуса кривизны линзы

Измерения. 1. Зажигают ртутную лампу, поместив у окна защитного кожуха светофильтр, выделяющий зеленую линию ртути ($\lambda = 5460 \text{ \AA}$).

2. Сняв линзу, фокусируют микроскоп на верхнюю поверхность черного стекла, положив на него кусок миллиметровой бумаги. Поставив затем линзу в прежнее положение, устанавливают черную пластинку так, чтобы точка соприкосновения линзы и пластинки попала точно в центр поля зрения микроскопа. При этом образующиеся на границе воздушного слоя и линзы ньютоновы кольца должны быть отчетливо видны. Если этого не будет, то, не снимая линзы, исправляют фокусировку микроскопа. Если в точке соприкосновения вместо темного пятна получится светлое, то это значит, что между поверхностями линзы и стекла имеются пылинки; последнее следует удалить при помощи замши.

3. Вращая барабан окулярного микрометра, устанавливают его крест на середину ширины линии какого-нибудь достаточно удаленного от центра темного кольца, например 20-го влево, и производят отсчет по шкале и барабану окулярного микрометра. Смещая положение креста микрометра, повторяют измерение положения одного и того же кольца несколько раз и находят его среднее значение. После этого, вращая барабан окулярного микрометра, наводят крест последовательно на 19-е, 18-е, 17-е и т. д. кольца и производят такие же отсчеты. Пройдя центральное пятно, продолжают отсчеты в том же направлении, т. е. вправо от центрального пятна, доходя до того же 20-го кольца. Прodelывают такие же измерения со светлыми кольцами.

Так как ближайšie к центральному пятну несколько колец обычно бывают сильно размыты, что затрудняет установку на них креста, то измерения их можно не производить.

Вычисления. Из полученных отсчетов определяют диаметры, а затем и радиусы колец. Комбинируя попарно радиусы колец, по формуле (7) определяют радиус кривизны линзы.

При этом в целях повышения точности результата рекомендуется комбинировать радиус кольца номер k с радиусом кольца номер $k/2$, кольца $k - 1$ с $k/2 - 1$ и т. д.

Из полученных значений R берут среднее арифметическое.

Упражнение 2

Определение длин волн линий ртути

В окно защитного колпака лампы вставляют светофильтр, выделяющий желтую или фиолетовую линию ртути; повторяют все измерения, указанные в упражнении 1.

Подставляя в формулу (7) значение радиуса кривизны линзы R , найденное в первом упражнении, определяют длину волны выделенной ртутной линии.

Можно определить длину волны линий ртути графическим методом.

Составив таблицу

№ кольца	Отсчет микрометра (левый)	Отсчет микрометра (правый)	Диаметр D	D^2
20				
19				
.				
.				
.				

строят график, откладывая по оси ординат квадраты диаметров, а по оси абсцисс номера колец. График должен быть прямой линией.

Длина волны λ определяется по тангенсу угла наклона прямой к оси абсцисс:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{D_n^2 - D_m^2}{n - m} = 4R\lambda,$$

где R — радиус кривизны линзы.

Если известна длина волны, то таким же образом находится радиус кривизны линзы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева, Курс общей физики, т. III, Физматгиз, 1962.

3. Р. Вуд, Физическая оптика, ОНТИ, 1936.
4. М. Ф. Романова, Интерференция света и ее применение, ОНТИ, 1937.
5. А. Н. Захарьевский, Интерферометры, Оборонгиз, 1962.
6. Р. Дитчберн, Физическая оптика, «Наука», 1965, гл. 5.

ЗАДАЧА 133

ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ГАЗОВ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА РЕЛЕЯ

Как известно, показатели преломления непоглощающих видимый свет газов весьма мало отличаются от единицы (показатель преломления воздуха, для желтой линии Na, $\lambda = 5893 \text{ \AA}$ при нормальных условиях равен 1,000294; показатель преломления гелия 1,000035). Показатели преломления газов, содержащих небольшое количество примесей, имеют значения, отличающиеся от показателя преломления основной компоненты, лишь в пятом — седьмом десятичных знаках.

Между тем измерения показателей преломления газов являются важным и надежным средством установления состава газовых смесей, практически малодоступных другим методам анализа. Отметим, что аналогичные задачи возникают и при необходимости проводить анализы различных жидких растворов малой концентрации.

Оптические измерения требуемой точности приводят к необходимости использовать в этих случаях интерферометрические методы, позволяющие регистрировать разности показателей преломления до седьмой и даже до восьмой цифры после запятой.

Устройство интерферометра. Метод измерения с помощью интерферометра Релея является развитием классического опыта по получению интерференционной картины от двух когерентных световых пучков, прошедших через две параллельные щели (см., например, [1], § 39 и 9, или [2], § 11).

Принцип метода в конкретных условиях интерферометра можно пояснить с помощью рис. 1, *a* и *б*, где представлены горизонтальные и вертикальные разрезы интерферометра. Свет от источника со сплошным спектром, например от лампочки накаливания, собирается с помощью конденсора на входной щели прибора *S* шириной 3—5 мк. Эта щель находится в фокальной плоскости объектива F_1 с фокусным расстоянием около 300 мм, составляющего вместе со щелью *S* коллиматор прибора.

Непосредственно за объективом F_1 расположена плоская диафрагма *D*, прикрывающая объектив, но имеющая две длинные (25 мм) параллельные щели A_1 и A_2 , расположенные вдоль по двум вертикальным хордам диафрагмы *D*. Ширина этих щелей 5 мм, расположены они на расстоянии 25 мм друг от друга.

На расстоянии порядка одного метра от объектива F_1 расположен второй, обычно одинаковый с первым, объектив F_2 , и вблизи его фокальной плоскости сильный окуляр O — цилиндрическая линза

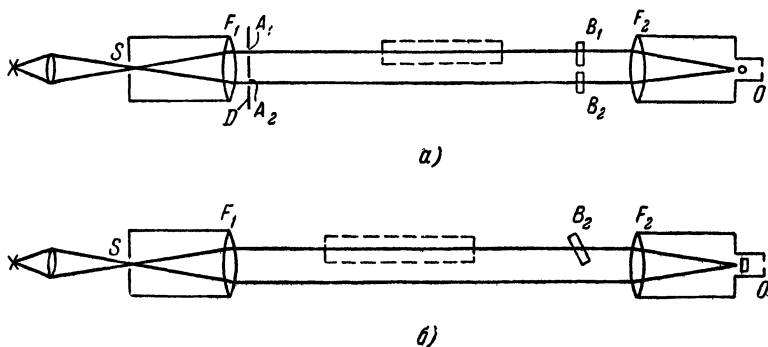


Рис. 1.

диаметром 2—3 мм, дающая примерно стократное увеличение. Ось цилиндра этой линзы параллельна щелям A_1 и A_2 и так же, как и они, перпендикулярна к плоскости чертежа. Мы пока не поясняем назначение стеклянных пластинок B_1 и B_2 , изображенных в разных проекциях на рис. 1, а и б. Об этих пластинках речь будет идти дальше.

Нетрудно видеть, что вся показанная на рисунке оптическая система представляет собой не что иное, как установку для наблюдения дифракции света в параллельных лучах, падающих из коллиматора на щели A_1 и A_2 . Объектив F_2 и окуляр O образуют наведенную на бесконечность зрительную трубу, в которую рассматривается дифракционная картина от двух щелей — система параллельных интерференционных полос (рис. 2)¹⁾.

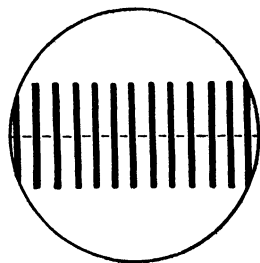


Рис. 2.

Наличие двух световых пучков, выделенных высокими щелями A_1 и A_2 и расположенных на расстоянии 25 мм друг от друга, создает возможности для использования всей оптической системы для измерительных целей. В самом деле, введение каких-либо прозрачных объектов (например, кювет с газом или жидкостью) в один из

¹⁾ Во избежание недоразумений отметим, что мы в ходе описания задачи будем называть наблюдаемую оптическую картину иногда интерференционной, а иногда дифракционной, подчеркивая в некоторых случаях ту или иную сторону явления. По существу дела оба термина в данном случае эквивалентны, так как в используемой оптической схеме можно говорить как о дифракции света на каждой щели и последующей интерференции дифрагировавших световых пучков, так и о дифракции света на двух щелях. К подробному обсуждению интерференционной картины, изображенной на рис. 2, мы вернемся ниже.

пучков (подобная кювета показана пунктиром на рис. 1, а и б) приведет к сдвигу наблюдаемой интерференционной картины в направлении, перпендикулярном оптической оси объектива F (рис. 3)¹⁾.

Указанный сдвиг картины является следствием увеличения оптического пути на величину

$$\Delta = L(n_{\text{вещ}} - n_{\text{возд}}), \quad (1)$$

приобретенного тем световым пучком, в который введено прозрачное тело длины L с показателем преломления $n_{\text{вещ}}$. Этот сдвиг интерференционной картины и используется для измерений показателя преломления $n_{\text{вещ}}$, введенного в световой пучок тела. Для большей ясности изложения мы здесь и ниже говорим об одном прозрачном теле, введенном в один из световых пучков. Так и показано на рис. 1. Фактически дело обстоит несколько иначе. Если мы работаем с газом или жидкостью, то они должны содержаться в кювете с плоскими стеклами на торцах, через которые проходит световой пучок. Введение уже одних только стекол в один световой пучок

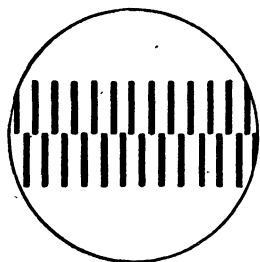


Рис. 3.

создаст огромную разность хода между двумя световыми пучками, используемыми в интерферометре. Поэтому фактически кюветы вводятся всегда в оба световых пучка, но заполняется исследуемым газом лишь одна из них, а другая бывает заполнена воздухом или другим эталонным газом. Тогда наличие торцовых стекол кювет в обоих световых пучках взаимно компенсируется, и сдвиг интерференционной картины будет следствием лишь различия показателей преломления газов, заполняющих кюветы.

Для того чтобы полностью выяснить измерительный прием, основанный на сдвиге интерференционной картины, обратимся к более детальному рассмотрению явлений, происходящих при падении параллельных когерентных лучей на щели A_1 и A_2 .

Дифракция на каждой из широких щелей A_1 и A_2 в отдельности дает для распределения интенсивности дифрагировавшего света I по направлениям φ характерную дифракционную картину вида, изображенного на рис. 4. В интерферометре Релея наблюдения

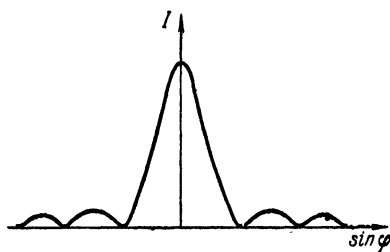


Рис. 4.

¹⁾ Подробнее рис. 3 будет пояснен ниже. Сейчас укажем только, что на рис. 3 по указанной причине сдвинута верхняя интерференционная картина относительно неподвижной нижней картины.

дифракции, необходимые для измерений, фактически ограничиваются углами, лежащими в пределах угловой ширины центрального максимума нулевого порядка. При этом используется угловой интервал $\Delta\varphi > 1'$. Наличие в приборе одновременно двух щелей приводит к интерференции световых пучков, дифрагировавших на каждой щели.

Решение задачи об интерференции двух однородных по своей пространственной структуре световых пучков хорошо известно (см., например, [1], § 41; [2], § 11; [6], Введение, § 3 и гл. 2, § 4). Именно в этом случае распределение интенсивности света

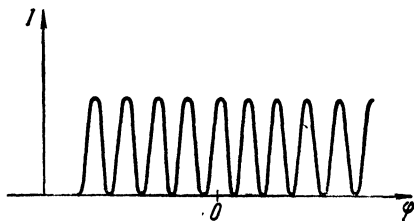


Рис. 5.

в интерференционной картине описывается графиком, изображенным на рис. 5. Эта функция осциллирует гораздо чаще, чем функция, изображенная на рис. 4.

Но нам надо учесть, что в нашем случае будут интерферировать между собой уже предварительно дифрагировавшие на каждой щели в отдельности световые пучки. Легко понять, что в этом случае на распределение интенсивности света в результирующей интерференционной картине будет наложено условие, которому подчинено распределение интенсивности в каждом интерферирующем пучке в отдельности. Таким образом, окончательное распределение интенсивности света по направлениям в интерференционной картине от двух щелей будет иметь вид, изображенный на рис. 6¹⁾.

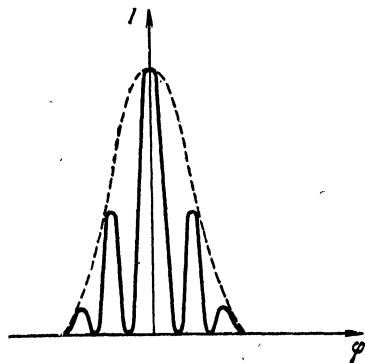


Рис. 6.

На этом рисунке пунктиром показана огибающая дифракционных максимумов; она воспроизводит (в произвольном масштабе) то распределение интенсивности света, дифрагировавшего на отдельной щели, о котором говорилось выше. Рисунок сделан в предположении, что расстояние между щелями в три раза больше ширины каждой щели.

Напомним, что распределение интенсивности света по направлениям после прохождения его через дифракционную решетку будет описываться аналогичной функцией, только главные интерференционные максимумы станут более резкими и между ними

¹⁾ Качественно случай дифракции света на двух щелях рассмотрен в [1], § 39.

расположится некоторое число дополнительных максимумов незначительной интенсивности.

В поле зрения наблюдателя интерференционная картина, видимая в окуляр с большим увеличением, будет выглядеть так, как это показано на рис. 2, т. е. будет представлять собой систему параллельных интерференционных полос. Использование монохроматического света от лампочки накаливания приведет к тому, что упомянутые интерференционные полосы будут окрашенными, кроме полосы, соответствующей нулевой разности хода. При соблюдении точной симметрии хода лучей и всех свойств нашей оптической системы ахроматической будет, очевидно, средняя интерференционная полоса. Наличие такой белой полосы весьма удобно. По перемещениям в поле зрения окуляра этой единственной неокрашенной светлой интерференционной полосы можно однозначно судить о сдвигах всей интерференционной картины в случае введения изучаемого объекта в один из пучков интерферометра.

Для того чтобы сделать полностью наглядной роль интерференции двух световых пучков в формировании наблюдаемой в окуляр картины, устройство имеющихся в практикуме приборов дополнено следующим приспособлением. В передней части прибора помещена подвижная вращающаяся шторка — флажок, при помощи которой можно прикрывать одну из щелей прибора. Эта шторка поворачивается ручкой, выведенной на крышку прибора. Вблизи ручки имеется надпись, поясняющая, при каком положении шторки открыты обе щели и при каком положении открыта только одна щель. Наблюдая в окуляр интерференционную картину при двух положениях шторки, можно убедиться в том, что видимая интерференционная картина действительно создается в результате интерференции двух световых пучков¹⁾.

Целесообразность использования цилиндрической линзы в окуляре прибора теперь легко разъясняется. Именно для удобства наблюдений нам нужно сильное увеличение интерференционной картины в направлении, перпендикулярном к узким и частым интерференционным полосам, получаемым в фокальной плоскости объектива F_2 от широко расставленных щелей A_1 и A_2 . Нужное увеличение дает цилиндрическая линза.

Для окончательного выяснения работы данной установки как измерительного прибора нам остается разобрать еще два вопроса: как регистрируется сдвиг интерференционной картины при введении в один из световых пучков исследуемого тела и как от наблюдаемого сдвига картины перейти к значениям показателя преломле-

¹⁾ При работе одного светового пучка можно видеть дифракцию света на отдельной щели. При этом отчетливо видны широкий максимум нулевого порядка и с каждой стороны от него по два дифракционных максимума ± 1 -го и ± 2 -го порядков.

ния исследуемого тела. Сдвиг картины мог бы быть в принципе зафиксирован путем одновременного наблюдения с помощью окуляра любого неподвижного указателя, помещенного в плоскости локализации интерференционной картины (креста нитей, какой-нибудь стрелки и т. д.). Однако практически выгоднее воспользоваться индикатором совсем другого типа. Именно, пользуясь тем, что щели A_1 и A_2 высоки, мы имеем в окуляре прибора достаточно высокую интерференционную картину. Поэтому можно по-разному использовать для работы верхнюю и нижнюю части картины. Газовые кюветы фактически вводятся только в верхнюю часть световых пучков. На рис. 1, б показано вертикальное сечение прибора. Таким образом нижние части обоих световых пучков остаются всегда свободными и их разность хода неизменной. Следовательно, остается неподвижной и нижняя часть наблюдаемой картины. Она и служит тем неподвижным индикатором, который нужен в приборе. Наоборот, верхняя часть интерференционной картины испытывает те сдвиги, о которых уже говорилось выше. Полная наблюдаемая в окуляр система двух рядов полос показана на рис. 3. Этот рисунок соответствует случаю сдвинутой верхней измерительной системы полос.

Примененный прием создания индикатора в виде системы интерференционных полос целесообразнее использования всякого рода крестов и стрелок в поле зрения окуляра. Дело в том, что используемый вид индикатора нечувствителен к изгибам и перекосам оптической системы прибора в целом, так как оба ряда интерференционных полос (верхний — рабочий и нижний — индикаторный) сдвигаются при этом одинаково, не изменяя взаимного расположения.

Кроме того, как показывает практика, взаимные сдвиги двух систем интерференционных полос или их совмещение можно констатировать глазом точнее, чем сдвиг интерференционной картины относительно совершенно чужеродного ей механического индикатора иной формы и окраски. Практика показывает, что в описываемом случае можно заметить сдвиг интерференционных полос до величины $\frac{1}{10}$ ширины отдельной полосы.

Самый метод измерений показателя преломления принадлежит к распространенному в физике классу компенсационных измерений. Как видно на рис. 1, а и б, в интерферометре есть еще добавочное приспособление, состоящее из двух плоскопараллельных стеклянных пластинок B_1 и B_2 , о назначении которых не говорилось раньше. Эта пара наклонных пластинок образует так называемый компенсатор прибора. Устроен он следующим образом. Наклонно расположенные стеклянные пластинки пересекают верхние, проходящие через газовые кюветы световые пучки. Одна из пластинок неподвижна, а другая может вращаться вокруг горизонтальной оси, изменяя свой наклон по отношению к проходящему сквозь нее световому пучку. Следовательно, при этом изменяется и эффективная толщина пластинки, пересекаемой световым пучком. Изменяя угол

наклона пластинки к световому пучку, можно тем самым изменять оптическую разность хода лучей, прошедших через газовые кюветы и, в частности, сводить ее к нулю, если она предварительно уже создана неполной идентичностью изготовления кювет.

Подвижная пластинка компенсатора поворачивается с помощью рычага, приводимого в движение микрометрическим винтом, установленным на интерферометре вблизи его окуляра (см. 1 на рис. 7). Головка винта снабжена делениями; она перемещается относительно линейной шкалы с делениями. По изменению отсчетов на головке и шкале, наблюдаемой через лупу 2, можно отмечать изменение наклона подвижной пластины компенсатора ¹⁾.

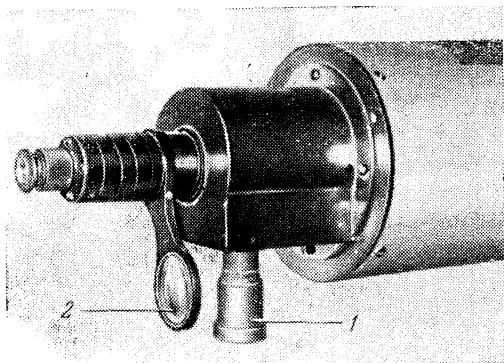


Рис. 7.

Использование компенсатора для измерения показателя преломления заключается в следующем. Пусть обе газовые кюветы наполнены одинаковым газом, а видимые в окуляр интерференционные картины не точно совпадают друг с другом (за счет неидентичности кювет). Тогда с помощью компенсатора можно привести верхнюю интерференционную картину к полному совпадению с нижней (индикаторной) картиной. Такому совпадению будет соответствовать некоторый отсчет на головке и шкале индикатора. Этот отсчет будет в дальнейшем являться рабочим нулевым отсчетом прибора. Далее, необходимо установить соответствие между отсчетами на компенсаторе и той разностью хода Δ , которую при каждом своем положении вносит между световыми пучками подвижная пластина компенсатора. Операция установления этого соответствия носит

¹⁾ Обращаем здесь внимание на то, что применение компенсаторов в виде стеклянных пластинок, вводимых в световые пучки интерферометров, довольно распространенный и практичный измерительный прием. Так, с устройством компенсаторов несколько иного типа можно познакомиться в описании интерферометра Жамена (см. описание задачи 134).

название калибровки компенсатора, а ее результаты изображаются калибровочным графиком. На этом графике наносятся по оси абсцисс отсчеты на головке и шкале компенсатора, а на оси ординат соответствующие им значения Δ . Построенный по нанесенным таким образом точкам калибровочный график находится в практикуме при приборе. Ввиду того, что построение калибровочного графика не входит в настоящую задачу, метод получения этого графика приведен в конце описания задачи.

При наличии калибровочного графика измерения на интерферометре сводятся к следующему. Оставляя неизменным состав эталонного газа, наполняющего одну из кювет интерферометра, наполняют другую кювету исследуемым газом. Компенсируя для каждого газа полученный сдвиг интерференционной картины и сопоставляя отсчеты на компенсаторе с калибровочным графиком, находят величину оптической разности хода световых пучков в обеих кюветах. Зная Δ , можно по формуле (1) найти

$$n_{\text{вещ}} = n_{\text{возд}} + \frac{\Delta}{L}. \quad (2)$$

К этому и сводится весь принцип измерений показателя преломления с помощью интерферометра Релея.

Ознакомление с техническими деталями устройства интерферометра, весьма близкими к описанной принципиальной схеме, производится непосредственно в практикуме. Кроме того, в физическом практикуме Московского университета находится наряду с двумя работающими приборами третий, полностью раскрытый интерферометр. Детальный осмотр этого прибора, идентичного по конструкции с работающими, необходим перед началом измерений. Полностью подготовленные к работе экземпляры приборов вскрытию не подлежат.

Подача газов в кювету интерферометра. Измерения показателей преломления выполняются для трех газов: углекислоты, азота и смеси азота с углекислотой.

Подготовленные для работы газы хранятся в небольших расположенных на столе газгольдерах (рис. 8). Давление газов в газгольдерах отличается от атмосферного только за счет веса подъемных колпаков газгольдеров. На рис. 8 представлена схема газгольдера: 1 — подъемный колпак газгольдера, наполненный используемым газом, 2 — трубка для наполнения газгольдера газами и для отвода газа из газгольдера, обслуживающего данную установку, 3 — неподвижный цилиндр газгольдера с масляным затвором (карманом).

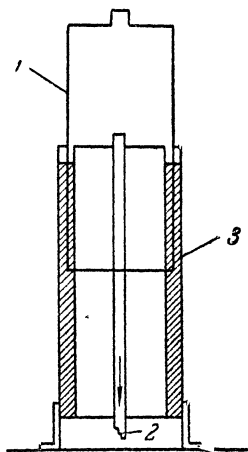


Рис. 8.

Газы из газгольдеров через резиновые трубки и наполненные хлористым кальцием осушители поступают в измерительную кювету интерферометра. Вторая кювета интерферометра всегда соединена с атмосферой. Управление подачей газа в кювету осуществляется поворотами соответствующих кранов и зажимов, надетых на резиновые трубки газовых коммуникаций. Схема газовых коммуникаций настолько проста, что мы не приводим ее здесь, предоставляя возможность студентам ознакомиться с ней на месте, под руководством дежурного лаборанта.

Для заполнения кюветы исследуемым газом данный газ продувается через нее из соответствующего газгольдера в течение 2—3 минут, после чего кран газгольдера закрывается. Важным моментом использования газовой системы интерферометра является одновременное заполнение обеих кювет атмосферным воздухом, что совершенно необходимо для получения нулевого рабочего отсчета на компенсаторе. Необходимая операция осуществляется следующим образом. Через рабочую кювету при закрытых кранах газгольдеров с помощью присоединенной к установке резиновой груши продувается атмосферный воздух, вытесняющий из кюветы могущие в ней сохраниться остатки различных газов от предшествующих измерений.

Измерения и их обработка. 1. Включают осветительную лампочку интерферометра, питаемую от специального понижающего трансформатора. Лампочка эта закрыта защитным кожухом и расположена перед коллиматорной частью прибора. Никакой регулировке ни ее положение, ни ее накал в ходе работы не подлежат. Проверяют, открыта ли шторка ¹⁾.

2. Фокусируют окуляром интерференционную картину. Если видна только нижняя индикаторная картина, то приводят головку компенсатора к отсчету, близкому к нулевому положению на шкале. В нормально работающем приборе рабочее нулевое положение компенсатора всегда близко к нулевому отсчету на шкале компенсатора. Если верхняя интерференционная картина тем не менее не видна, т. е. сильно сдвинута относительно нижней, то продувают рабочую кювету атмосферным воздухом с помощью резиновой груши, как это описано выше. Открывая и закрывая шторку в передней части прибора, убеждаются в том, что видимая интерференционная картина действительно обязана своим происхождением интерференции двух световых пучков.

3. При заполненных атмосферным воздухом обеих кюветах вращением головки компенсатора 5—7 раз приводят к совпадению верхнюю и нижнюю интерференционные картины, записывая каждый раз отсчеты на шкале и головке компенсатора. Среднее значе-

¹⁾ Напомним, что, как указано раньше, эта шторка служит для обеспечения возможности выключать из работы один из световых пучков.

ние из найденных отсчетов даст рабочий нулевой отсчет для компенсатора, необходимый в ходе дальнейших измерений.

4. Заполняют рабочую кювету интерферометра поочередно исследуемыми газами из газгольдеров. При наличии в кювете поочередно каждого исследуемого газа приводят несколько раз (с помощью компенсатора) к совпадению верхнюю и нижнюю интерференционные картины, записывая каждый раз соответствующий отсчет на головке и шкале компенсатора. Среднее значение из найденных отсчетов, исправленное на значение рабочего нулевого отсчета на компенсаторе, используется в дальнейшем.

5. Отыскивают с помощью калибровочного графика по найденным в п. 4 данным значения величин Δ для каждого газа.

6. Ввиду того, что значение коэффициента преломления воздуха $n_{\text{возд}}$, как и всякого другого газа, входящее в формулу (2), зависит от давления, а в таблицах физических величин приводится значение $(n_{\text{возд}})_{760,0}$ для температуры $t = 0^\circ \text{C}$ и давления $p = 760 \text{ мм рт. ст.}$, находят $n_{\text{возд}}$ для условий опыта, пользуясь следующей формулой:

$$(n_{\text{возд}})_{p,t} = 1 + \frac{(n_{\text{возд}})_{760,0} - 1}{(1 + t/273)} \cdot \frac{pt}{760}, \quad (3)$$

где p и t — значения температуры по шкале Цельсия и давления воздуха во время опыта.

7. Воспользовавшись формулой (2) и значением $(n_{\text{возд}})_{p,t}$, найденным по формуле (3), находят показатели преломления исследуемых газов. Для величины L , входящей в формулу (2), подставляют значение $L = 25 \text{ см}$, так как в ходе описанных упражнений используется кювета этой длины.

8. Учтя, что найденные указанным путем показатели преломления газов относятся к условиям опыта, приводят их значения к нормальным условиям ($t = 0^\circ \text{C}$ и $p = 760 \text{ мм рт. ст.}$) по формуле (3), применяя ее к исследуемому газу.

9. Оценивают точность применяемого метода измерений и реальную полученную точность измерений показателя преломления каждого газа.

О построении калибровочного графика компенсатора интерферометра. Предварительное построение калибровочного графика выполняется в ходе следующего опыта. Перед первичной входной щелью интерферометра вместо обычной рабочей осветительной системы помещается источник света с линейчатым спектром и светофильтром, выделяющим из этого спектра одну линию с известной длиной волны λ . Если теперь вращением головки компенсатора изменять наклон компенсационной пластинки, то в окуляр прибора будут видны, как обычно, сдвиги верхней интерференционной картины относительно нижней. Сдвигу верхней интерференционной пластины на k полос относительно нижней будет, очевидно, соответствовать возникновение разности хода

между работающими световыми пучками на величину $k\lambda$, где k и λ будут известны. Поэтому для построения калибровочного графика будет достаточно только провести сопоставление отсчетов на протяжении всей шкалы компенсатора со сдвигами интерференционной картины на определенное число полос.

О приведении значения показателя преломления газа к нормальным условиям. Как показывает опыт, показатели преломления газов мало зависят от температуры (при температурах, недостаточных для оптического возбуждения атомов газа термическим путем), но зависят от плотности газа или, что то же самое, от давления, под которым находится газ. К таким же результатам приводит и элементарная теория этого вопроса, как показывает подтвержденная опытом формула Лорентц—Лоренца (см., например, [1]). Зависимость показателя преломления n газа от давления p при неизменной температуре может быть записана так:

$$\frac{n-1}{p} = \text{const.}$$

Применим это соотношение к газу, находящемуся под давлением p , и к тому же газу, находящемуся под давлением 760 мм рт. ст. Оба раза газ находится при температуре 0°C . Тогда

$$n_{p,0} = 1 + \frac{n_{760,0} - 1}{760,0} \cdot p_0. \quad (4)$$

Если же газ находится под давлением p_t и при температуре t , то давление газа может быть приведено к его значению p_0 при 0°C с помощью соотношения

$$\frac{p_t}{1 + t/273} = p_0. \quad (5)$$

Подставив (5) в (4), имеем

$$n_{p,t} = 1 + \frac{n_{760,0} - 1}{(1 + t/273)} \cdot \frac{p_t}{760},$$

т. е. приходим к использованному нами выше соотношению (3).

Технические данные установки. В ходе настоящей работы используются стандартные экземпляры интерферометров марки ИТР-1, выпускаемые нашей промышленностью. Несущественные переделки в этих приборах осуществлены лишь в отношении дополнительной механической защиты их ювет и добавлены шторки, могущие прикрывать одну из щелей прибора. Подробные данные о приборе и описание ряда других (в особенности нужных для химических целей) возможностей его применения можно найти в заводском описании прибора и в ниже указанной специальной литературе. В работе используются газгольдеры емкостью 50 л, изготовленные в мастерских физического факультета МГУ.

ЛИТЕРАТУРА

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. А. Н. Захарьевский, Интерферометры, Оборонгиз, 1952.
3. А. Вайсбергер, Физические методы органической химии, т. I, ИЛ, 1950.
4. А. И. Бродский, Зав. лаб., 8, 1282, 1932.
5. Н. А. Фигуровский и К. А. Постеплов, Зав. лаб., 5, 983, 1936.
6. М. Ф. Романова, Интерференция света и ее применение, ОНТИ, ГТТИ, 1937.

ЗАДАЧА 134

ИЗУЧЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ГАЗА ОТ ДАВЛЕНИЯ

Зависимость показателя преломления газов от давления. Опыт и элементарная теория показывают, что показатель преломления n вещества зависит от его плотности ρ при прочих неизменных условиях. Зависимость эта может быть представлена соотношением следующего вида (см., например, [1], § 149):

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{1}{\rho} = \text{const.} \quad (1)$$

Для газов, находящихся при невысоких давлениях, написанное соотношение может быть упрощено. Именно, поскольку в рассматриваемом случае $n \approx 1$, можно написать

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{1}{\rho} \approx \frac{2(n - 1)}{3\rho} = \text{const} \text{ или, просто, } \frac{n - 1}{\rho} = \text{const.} \quad (2)$$

С другой стороны, ввиду того, что при постоянной температуре плотность газа ρ пропорциональна давлению P , можно написать

$$\frac{n - 1}{\rho} = \text{const} \text{ или } n - 1 = kP, \quad (3)$$

где k — некоторый коэффициент пропорциональности. Соответственно приведенным соображениям, выполняемый в настоящей задаче эксперимент имеет целью отыскание зависимости n от P . В случае справедливости приведенных выше расчетов искомая зависимость согласно (3) должна быть линейной.

Устройство прибора. Применяемый в настоящей задаче интерферометр Жамена представляет собой классический пример двухлучевой интерференционной схемы, характерные черты которой можно проследить и в устройстве ряда других интерферометров (см. описание задачи 133). Центральной частью прибора Жамена являются две толстые строго одинаковые плоскопараллельные пластины A и B , посеребренные с одной стороны (заштрихованной на рис. 1). Пластины эти расположены в приборе под малым углом

друг к другу. О том, как именно ориентирован в пространстве двугранный угол между пластинами, речь будет идти дальше.

Свет от источника света S (данные об этом источнике света также будут сообщены ниже) падает расходящимся пучком на пластину A . Ось пучка образует угол в 45° с нормалью к пластине. Мы предполагаем, что в соответствии с обычным устройством прибора Жамена пластины A и B расположены приблизительно вертикально, а лучи света от источника распространяются в горизонтальной плоскости, которая совпадает с плоскостью чертежа.

В результате отражений света от внешней и внутренней сторон пластины A по направлению к пластине B распространяются два

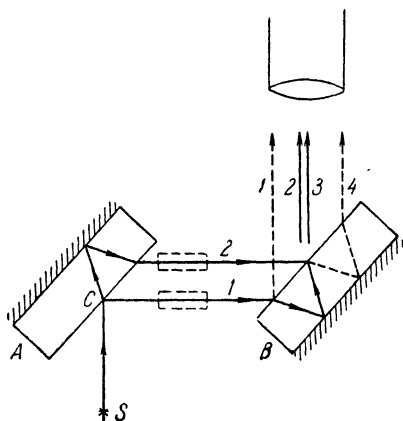


Рис. 1.

параллельных, пространственно раздвинутых когерентных пучка лучей 1 и 2. Наличие двух таких световых пучков определяет возможность использования их для интерферометрических измерений. На пути пучков лучей 1 и 2 пунктиром обозначены контуры исследуемых объектов, которые могут быть введены в эти световые пучки.

Лучи 1 и 2 падают на вторую пластинку интерферометра B , от которой распространяются уже четыре когерентных параллельных луча 1, 2, 3, 4. Для нас будут существенны только лучи 2 и 3.

Из простых геометрических соображений легко видеть, что разность хода между лучами 2 и 3 существенно меньше, чем разность хода между любыми другими парами лучей. Более того, при строгой параллельности одинаковых пластин A и B между лучами 2 и 3 вообще не будет никакой разности хода. Разность хода x между лучами 2 и 3 определяется углом между пластинами A и B . Она может быть сделана сколь угодно малой и поддается регулировке путем изменения угла между пластинами. Разность же хода между другими парами лучей будет определяться толщиной h пластин A и B , их показателем преломления n и углом преломления света в них r . Эта разность хода будет порядка величины $2hn \cos r$ (см., например, [1], § 25). При $h = 2$ см она будет $10^5 \lambda$, где λ — длина световой волны. Это исключает возможность интерференции (кроме как для пары лучей 2, 3) при не строго монохроматическом свете. Поэтому главным для работы интерферометра является вопрос об условиях получения и наблюдения интерференции лучей 2 и 3. Прежде всего сразу ясно, что поскольку речь идет об интерференции параллельных лучей, то они могут дать интерференционную кар-

тину, локализованную либо в бесконечности, либо в фокальной плоскости объектива, поставленного на их пути ¹⁾).

Далее легко понять, что в общем случае, при наличии некоторого угла между пластинами A и B , разность хода x между лучами 2 и 3 будет иметь значение

$$x = 2hn \cos r_1 - 2hn \cos r_2, \quad (4)$$

где r_1 и r_2 — углы преломления лучей в пластинах A и B . При малой разности значений r_1 и r_2 можно написать

$$x = 2hn \sin r \cdot \Delta r. \quad (5)$$

Перейдем от угла преломления r к углу падения i , который связан с r соотношением

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n. \quad (6)$$

Тогда

$$\Delta r = \frac{\cos i \cdot \Delta i}{n \cdot \cos r}. \quad (7)$$

Теперь можно записать

$$x = 2hn \sin r \cdot \Delta r = \frac{h \sin 2i \cdot \Delta i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}. \quad (8)$$

Обычно $i \approx 45^\circ$ и $n \approx 1,5$, тогда $x = 0,77 h \cdot \Delta i$.

Заметим, что для лучей, распространяющихся в плоскости, перпендикулярной к ребру двугранного угла α между пластинами, угол Δi будет, очевидно, точно равен углу α . В этом случае

$$x = \frac{h\alpha \sin 2i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}. \quad (8')$$

Найденное выражение показывает, как и следовало ожидать, что разность хода между параллельными лучами, из состава световых пучков 2 и 3, будет зависеть от направления распространения этих лучей. Следовательно, определенным направлениям распространения, в которых величина Δx будет равна целому или полуцелому числу длин волн, будут соответствовать локализованные в бесконечности интерференционные максимумы и минимумы. Практически обсуждаемая интерференционная картина может наблюдаться в виде полос равного наклона в наведенную на бесконечность зрительную трубу, что и осуществляется в интерферометре Жамена. Далее, в этом случае, как и во всякой интерференционной задаче, важным

¹⁾ Напомним еще раз, что фактически мы имеем на выходе из прибора не два луча 2 и 3, но два пучка лучей. Все, что мы говорим здесь о лучах 2 и 3, в действительности относится к любой паре параллельных лучей из состава этих световых пучков.

является вопрос о том, с какими порядками интерференции мы имеем дело и в какой мере в интерферометре может быть использован источник белого света. Последний, как известно, может применяться только в тех случаях, когда получается интерференция порядка, очень близкого к нулевому. Между тем применение белого света от источника со сплошным спектром как раз весьма существенно в измерительных целях, так как белый свет позволяет иметь в интерференционной картине совершенно отличную от других и единственную ахроматическую (белую) интерференционную полосу нулевого порядка. По этой ахроматической полосе можно однозначно и легко следить за перемещениями и изменениями интерференционной картины в ходе опытов¹⁾.

Ввиду того, что в выражениях (8) и (8') величины h и i заведомо не равны нулю, возможность получения интерференции нулевого и ближайшего к нему порядков определяется значением Δi . Разность хода лучей 2, 3 может обращаться в нуль только при $\Delta i = 0$. При этом нас не должен интересовать случай, когда $\Delta i = 0$ за счет равенства нулю угла α между пластинами, т. е. за счет полной параллельности пластин A и B . В самом деле, в этом случае разность хода интерферирующих пучков будет равна нулю для лучей всех направлений, входящих в состав этих пучков, и мы вообще не получим никакой интерференционной картины, нужной нам для измерительных целей.

Рассмотрим, как обстоит дело с возможными значениями x и Δi при падении под углом 45° на пластины A и B (образующие угол α между собой) расходящихся пучков лучей. Разберем два крайних случая:

1. Пусть ребро двугранного угла α параллельно плоскости падения оси пучка SC на пластину A (рис. 1). Практически, поскольку было пояснено выше, что направление SC горизонтально, указанное условие эквивалентно тому, что пластины A и B образуют как бы «скаты крыши» или, наоборот, «стенки горизонтального желоба». Легко видеть, что для тех лучей в нашем пучке, которые будут распространяться между пластинами перпендикулярно к вертикальной биссектрисе двугранного угла α , величина Δi будет равна нулю. Другими словами, в нашем пучке найдутся лучи, имеющие одинаковые углы падения на обе пластины и для этих лучей $\Delta i = 0$ и $x = 0$. Следовательно, в этом случае мы можем иметь нулевой порядок интерференции и, работая с белым светом, мы получим в фокальной плоскости объектива зрительной трубы ахроматическую горизонтальную интерференционную полосу.

¹⁾ Разумеется, эти соображения справедливы при измерениях показателя преломления слабо диспергирующих сред. При работе с сильно диспергирующими средами, введенными в интерферирующие лучи, никакой интерференционной ахроматической полосы вообще не будет. О том, как исследуются показатели преломления в этом случае, см. в конце описания задачи.

Параллельно этой полосе расположатся интерференционные полосы следующих порядков. Они будут созданы лучами, входящими в состав наших световых пучков конечной угловой апертуры, но такими лучами, для которых Δi уже не будет равно нулю. Полосы эти будут цветными, так как каждая из них будет соответствовать разности хода Δx для световых волн различной длины λ . Таким путем по обе стороны ахроматической полосы сформируется нужная нам для измерительных целей интерференционная картина. Ее, разумеется, можно будет получить, не только пользуясь белым светом, но и в монохроматическом свете, но она будет менее удобна для измерительных целей.

2. Пусть ребро двугранного угла между пластинами A и B перпендикулярно к плоскости падения светового пучка SC (см. рис. 1). Это значит, что пластины образуют «вертикальный клин». В этом случае очевидно, что в нашем световом пучке SC (падающем под углом 45° к пластинам A и B) не найдется лучей, перпендикулярных к горизонтальной биссектрисе двугранного угла между пластинами. Это значит, что в используемых световых пучках не будет лучей, имеющих одинаковые углы падения на обе пластины; Δi и x не будут равны нулю и нулевой интерференционной полосы получить будет нельзя. Следовательно, интерференционной картины в белом свете не будет. Но в монохроматическом свете, который допускает наблюдение интерференции при большей разности хода, вертикальные полосы равного наклона, соответствующие на этот раз высоким порядкам интерференции, можно наблюдать и в этом случае.

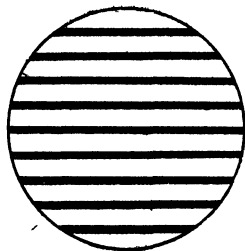


Рис. 2.

Практически при работе с интерферометром Жамена ребро двугранного угла между его пластинами бывает приблизительно горизонтально и соответственно также почти горизонтальными бывают параллельные ему интерференционные полосы, в центре которых располагается ахроматическая полоса. Вид подобной интерференционной картины представлен на рис. 2.

Заслуживает внимания еще вопрос о расстоянии между интерференционными полосами. Как легко видеть из выражения (8'), угловое расстояние δi между соседними интерференционными полосами будет определяться приращением величины x на длину одной световой волны. Следовательно, при $i \approx 45^\circ$ и $n = 1,5$ можно записать

$$\frac{na \cdot \delta i}{2(1,5^2 - 0,5)^{3/2}} = \lambda, \text{ откуда } \delta i = \frac{4,6\lambda}{na}.$$

Из полученного выражения мы видим, что угловое расстояние между интерференционными полосами (а следовательно, и линейное

расстояние между ними в фокальной плоскости объектива зрительной трубы) возрастает по мере увеличения длины волны света и по мере уменьшения угла α между пластинами A и B . Первое указывает на зависимость положения интерференционных полос от спектрального состава используемого света. Каждой длине волны λ используемого излучения будет соответствовать своя система интерференционных полос. Другими словами, это означает, что интерферометр Жамена дает дисперсию в направлении, перпендикулярном к расположению полос в интерференционной картине. В некоторых задачах физической оптики, например при изучении явлений дисперсии света в веществе, спектральное разложение, даваемое интерферометром Жамена, широко используется (см., например, [1], § 148, а также описание задачи 133).

Зависимость ширины полос от угла α между пластинами указывает на то, что при больших значениях этого угла интерференционные полосы могут стать так мелки, что не будут разрешаться зрительной трубой, но будут давать в ней сплошной светлый фон. Это надо иметь в виду при юстировках интерферометра Жамена. Юстировку интерферометра надо всегда начинать при положении пластин, близком к взаимной параллельности.

Применение интерферометра для измерения показателя преломления. Наблюдения описанной интерференционной картины могут позволить легко определить показатель преломления вещества, введенного в один из световых пучков 1 или 2 ¹⁾.

Пусть в пучок 1 введено тело длины L (например, кювета с газом) с показателем преломления n_r . Путь луча 2 по-прежнему проходит в воздухе с показателем преломления n_b . Тогда между лучами 1 и 2 возникнет разность хода $(n_r - n_b)L = y$, дополнительная к той, которая определяется выражением (8)²⁾.

Если $y = m\lambda$, где m — целое число, то, очевидно, наблюдавшаяся ранее в трубу интерференционная картина в монохроматическом свете испытает сдвиг на несколько полос. Это значит, что на место нулевой полосы станет полоса номер m и т. д.

Теперь можно написать $L(n_r - n_b) = m\lambda$, откуда

$$n_r = n_b + \frac{m\lambda}{L} = n_b + \frac{y}{L}. \quad (9)$$

Если величины n_b , $m\lambda = y$ и L известны, то из соотношения (9) можно найти неизвестную величину n_r . Отыскание всех необходи-

¹⁾ Если известен показатель преломления среды, через которую проходит другой световой пучок.

²⁾ Правда, к разности хода Δy добавится еще разность хода, обусловленная присутствием в луче 1 кроме исследуемого газа еще и торцевых стекол, замыкающих кювету, содержащую газ. Но это обстоятельство легко исключить, введя в луч 2 идентичную кювету, но заполненную воздухом. Так всегда и поступают, и мы не будем упоминать об этих стеклах. Кюветы в обоих случаях обозначены пунктиром на рис. 1.

мых величин, входящих в правую часть выражения (9), возможно на опыте, и неизвестный показатель преломления газа может быть найден по созданному им сдвигу интерференционной картины. Практически, однако, поступают несколько иначе.

Удобнее применять в интерферометре прием компенсационных измерений, широко распространенный в физике. Пусть мы наблюдаем в интерферометре картину, полученную с источником белого света и, следовательно, содержащую центральную ахроматическую полосу, изображение которой мы совместим с нитью в окуляре зрительной трубы. Пусть в обоих лучах интерферометра уже находятся две идентичные газовые кюветы, содержащие одинаковые газы. Если теперь заполнить кювету, находящуюся на пути луча 1, другим газом или изменить в этой кювете давление воздуха, то ахроматическая полоса, вместе со всей интерференционной картиной, сдвинется в поле зрения трубы.

Метод компенсации, или нулевой метод будет заключаться в том, чтобы, увеличивая оптический путь луча 2, заставить интерференционную картину вернуться в прежнее положение и вновь совместить ахроматическую полосу с нитью окуляра трубы. Узнав, насколько нам понадобилось увеличить оптический путь луча 2, мы будем знать величину y , входящую в формулу (9).

В такой постановке задача сводится к тому, чтобы иметь возможность осуществлять изменения оптического пути луча 2 и измерять его приращения y . И то и другое достигается в интерферометре Жамена путем применения калиброванного компенсатора разности хода для лучей 1 и 2.

Этот компенсатор реализуется следующим путем. В световые пучки 1 и 2 интерферометра вводятся, помимо измерительных кювет, две плоскопараллельные стеклянные пластинки одинаковой толщины (рис. 3; они не были показаны на рис. 1, чтобы не загромождать принципиальной схемы прибора). Пластинки могут вращаться вокруг горизонтальной оси и угол поворота может изменяться. По мере вращения пластин изменяется их эффективная толщина, пересекаемая пучками лучей 1 и 2. Если бы одинаковые пластинки были к тому же всегда строго одинаково расположены по отношению к световым пучкам, то они не вносили бы в эти пучки никакой разности хода. Но пластинки закрепляют на их общей горизонтальной оси так, что они образуют между собой небольшой

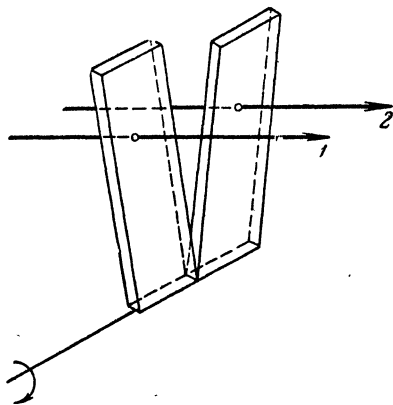


Рис. 3.

угол (порядка $10'$). Этот угол между пластинами показан в сильно преувеличенном виде на рис. 3. При наличии такого постоянного угла между пластинами их эффективная толщина для световых пучков 1 и 2 (см. рис. 1) будет неодинакова, за исключением только такой ориентации пластин в пространстве, когда биссектриса угла между пластинами перпендикулярна к направлению распространения обоих световых пучков. Поэтому при всякой произвольной ориентации пластин по отношению к падающим на них световым пучкам они будут вносить разность хода в проходящие сквозь них световые лучи. Эта разность хода будет меняться при поворотах пластин вокруг горизонтальной оси. На этом и основан принцип действия компенсатора в интерферометре Жамена. При его помощи можно восстанавливать расположение интерференционной картины, после ее сдвигов, вызванных изменением оптической длины путей лучей 1 и 2.

Для восстановления прежнего положения интерференционной картины компенсатор должен внести между лучами 1 и 2 разность хода противоположного знака по сравнению с этой разностью хода, которая была вызвана причиной, сдвинувшей интерференционную картину.

Для измерительных целей необходимо связать угол поворота компенсатора с той разностью хода, которую он вносит в световые лучи при каждой своей ориентации. Установление этой связи носит название калибровки компенсатора. Она осуществляется следующим образом.

Пусть мы наблюдаем интерференционную картину в монохроматическом свете. Тогда, вращая компенсатор и регистрируя углы его поворота, мы можем одновременно считать число интерференционных полос, прошедших через нить в поле зрения окуляра трубы прибора. Сдвиг всей картины на одну интерференционную полосу будет соответствовать изменению разности хода между световыми пучками на величину длины световой волны используемого монохроматического света. Таким путем можно установить зависимость между ориентациями компенсатора и вносимой им разностью хода в световые пучки, т. е. прокалибровать компенсатор. При наличии калиброванного компенсатора можно, пользуясь белым светом, вести нулевым методом измерения показателей преломления веществ, введенных в световые пучки интерферометра. Расчет неизвестных показателей преломления ведется по формуле (9), куда величина y подставляется соответственно осуществленным в ходе измерений углам поворота компенсатора.

Газовые кюветы, вставленные в интерферирующие световые пучки 1 и 2, представляют собой металлические трубки, замкнутые по концам одинаковыми плоскопараллельными стеклами. На боковой поверхности трубок имеются металлические штуцеры, на которые надеваются резиновые трубки, соединяющие

кюветы с соответствующими газовыми резервуарами и манометром. В нашем случае одна из кювет всегда соединена с атмосферным воздухом, а другая присоединена к замкнутому воздушному резервуару переменного объема. К этому же резервуару присоединен пружинный манометр, шкала которого градуирована в миллиметрах ртутного столба. Изменяя объем этого резервуара, мы можем изменять давление газа (воздуха) в присоединенной к нему замкнутой измерительной кювете и измерять при этом давление газа. Манометр показывает избыточное давление в газовой системе по сравнению с атмосферным.

Практически газовый резервуар переменного объема осуществлен в виде большого сильфона (гофрированной томпаковой трубы), замкнутого с одной стороны сплошной крышкой, с другой стороны — крышкой, имеющей штуцер

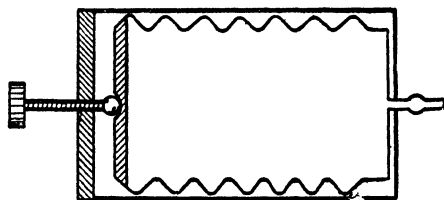


Рис. 4.

для соединения сильфона с помощью резиновых трубок с измерительной кюветой и манометром (рис. 4). Сильфон помещен в полный металлический цилиндр. Сжатие сильфона осуществляется посредством подвижного винтового нажима, упирающегося в глухую крышку сильфона.

Как явствует из описания работы интерферометра, при компенсационных измерениях показателей преломления необходим источник белого света. С другой стороны, для калибровки компенсатора прибора необходимо применение монохроматического света. Соответственно этим двум требованиям установка интерферометра снабжена двумя легко взаимозаменяемыми источниками. Режим работы обоих источников фиксирован и регулировке в ходе работы не подлежит. Из спектра ртутной лампы с помощью светофильтра может быть выделена зеленая линия $\lambda = 5460 \text{ \AA}$. Светофильтр помещается на подвижном устройстве и может вводиться в световой пучок по мере надобности.

Упражнение 1

Ознакомление с работой интерферометра и калибровка его компенсатора

Вся система интерферометра полностью отъюстирована и подготовлена для измерений. Она заключена в защитный футляр с прозрачными стенками и крышкой и легко обозрима. Никакой регулировке в ходе работы (за исключением поворотов компенсатора при измерениях) система интерферометра не подлежит.

Перед началом работы пластины компенсатора надо поставить вертикально. Поворот компенсатора осуществляется в приборах новых конструкций путем вращения ручки шарнирного механизма, соединенного с осью компенсатора. В приборах более старой конструкции ось вращения компенсатора бывает непосредственно выведена за пределы футляра интерферометра.

Регулировкой винтового нажима на сильфон надо привести показания газового манометра к нулю. После выполнения этих операций можно, пользуясь указаниями лаборанта, включить оба источника света, обслуживающих интерферометр. Затем надо установить в рабочее положение ртутную лампу и ввести светофильтр в первичный световой пучок. При этих условиях в зрительную трубу интерферометра должна быть видна интерференционная картина. Зрительная труба прибора обладает необходимыми степенями свободы (повороты, наклоны) для лучшего ее наведения на интерференционную картину. Кроме того, труба обладает регулируемой фокусировкой окуляра, устанавливаемой по глазам наблюдателя. Отсчетная нить (или крест) в окуляре трубы также имеет независимую фокусировку.

Резко сфокусировав интерференционную картину и нить в окуляре трубы, выводят светофильтр из первичного светового пучка и наблюдают интерференционную картину с полным линейчатым спектром ртутной лампы. В этом случае отчетливо видно различное положение интерференционных полос для различных спектральных линий ртутной дуги.

Затем передвигают на место ртутной лампы лампу накаливания. В этом случае в зрительную трубу должна быть видна характерная интерференционная картина с ахроматической полосой в центре, наблюдаемая от источников света со сплошным спектром. Если изображение ахроматической полосы в трубе оказывается не совпадающим с нитью в окуляре, то их приводят к совпадению изменением наклона трубы и небольшими поворотами компенсатора. Записывают рабочий нулевой отсчет φ_0 по шкале компенсатора, соответствующий совпадению ахроматической полосы с нитью окуляра.

Этот отсчет будет рабочим нулевым положением компенсатора. Затем возвращаются к работе с ртутной лампой и светофильтром. Небольшим изменением наклона трубы, не трогая компенсатора, наводят нить окуляра на центр ближайшей к ней интерференционной полосы и затем начинают калибровку компенсатора интерферометра. Для этого поворачивают по этапам компенсатор на углы, соответствующие каждый раз сдвигу интерференционной картины (относительно нити в окуляре неподвижной трубы) на две полосы, и записывают отсчеты φ на шкале компенсатора, соответствующие каждому такому сдвигу полос. Таким образом, калибруется компенсатор в пределах всей шкалы. Результаты калибровки

представляются в виде графика, на оси абсцисс которого откладываются деления $\varphi - \varphi_0$, а на оси ординат — разности хода $y = m\lambda$, выраженные в миллимикронах. Полученный график используется для обработки дальнейших измерений.

Упражнение 2

Изучение зависимости показателя преломления воздуха от давления

Вместо ртутной лампы в интерферометре снова используют лампу накаливания и устанавливают компенсатор на ранее найденный рабочий нулевой отсчет φ_0 . Наводят трубу на интерференционную картину так, чтобы нить в окуляре трубы совпала с ахроматической интерференционной полосой. Затем начинают через каждые 10 мм рт. ст. изменять давление воздуха в измерительной кювете интерферометра. После каждого повышения давления, не трогая трубы, приводят при помощи компенсатора ахроматическую полосу интерференционной картины к совпадению с нитью в окуляре трубы, записывают соответствующие отсчеты φ по шкале компенсатора и показания манометра.

Подобные измерения производят в пределах всего допустимого в приборе диапазона изменения давления, или, если он велик, то в пределах допустимых поворотов компенсатора. Производят аналогичные измерения, понижая постепенно, по этапам, давление газа в кювете до атмосферного и возвращая компенсатор к исходному положению.

Воспользовавшись результатами измерений, исправленными на величину рабочего нулевого отсчета на компенсаторе φ_0 и применяя калибровочный график компенсатора, находят для каждого значения давления воздуха величину разности хода y , входящую в расчетную формулу (9). Подставляя в формулу (9) эти величины и значение коэффициента преломления воздуха при условиях опыта, находят значения n_r для всех использованных значений давления воздуха¹⁾. Необходимая для расчета по формуле (9) длина кюветы L указывается непосредственно на установке. По найденным значениям n_r строят график зависимости показателя преломления воздуха от давления. Удобно строить график зависимости $(n_p - 1)10^4$ от избыточного давления P , выраженного в миллиметрах ртутного столба. По окончании измерений, используя график зависимости n от P , находят среднюю погрешность измерений показателя преломления. Учитывая, что сдвиг интерференционных полос может быть легко замечен с точностью до одной десятой доли ширины полосы, оценивают точность прибора в определении значений показателя преломления.

¹⁾ О приведении значения показателя преломления газа к условиям, отличным от нормальных, см. описание задачи 133.

В заключение заметим, что используемый прием измерений показателя преломления по сдвигам ахроматической интерференционной полосы пригоден только для сред с малой дисперсией в видимой части спектра. При необходимости применять интерферометр для измерений показателя преломления диспергирующих сред (например, стекол) измерения производятся в монохроматическом свете, и процесс измерений сводится тогда непосредственно к той операции, которая выполняется в настоящей задаче при калибровке компенсатора.

Технические данные установки. В задаче используется стандартный интерферометр ИЗК-453, выпускаемый нашей промышленностью. Однако прибор снабжен новым осветителем, допускающим быструю замену ртутной лампы лампой накаливания. Кроме того, прибор заключен в футляр, так как в противном случае вся система зеркал быстро запыляется и, главное, тепловые потоки в воздухе вызывают дрожание интерференционной картины. Наконец, прибор дополнен газовыми кюветами с плоскопараллельными стеклами высокого качества (полированными с точностью до 0,1 интерференционной полосы) и всей остальной описанной выше газовой системой. Зрительная труба прибора установлена на более удобном штативе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. М. Ф. Романова, Интерференция света и ее применения, ОНТИ, ГТТИ, 1937.

3. А. Н. Захарьевский, Интерферометры, Оборонгиз, 1952.

ЗАДАЧА 135

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЯВЛЕНИЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА

Интерферометр Майкельсона представляет собой классический пример двухлучевого оптического интерференционного прибора. Широкая известность этого интерферометра связана с его использованием в опытах, имевших целью обнаружить влияние орбитального движения Земли на скорость распространения света.

В настоящей задаче прибор применяется для качественного и количественного изучения некоторых основных интерференционных явлений: так называемых полос равной толщины, полос (колец) равного наклона, для измерения длин световых волн и показателей преломления различных оптических материалов. Принципиальная схема интерферометра изображена на рис. 1.

Пучок света от источника света I падает на полупрозрачную посеребренную светоразделительную пластинку P_1 , где он расщеп-

ляется на два луча 1 и 2 . Луч 1 , продолжая и после прохождения через пластинку Π_1 распространяться в прежнем направлении, падает на зеркало \mathcal{Z}_1 . После отражения от этого зеркала и вторичного отражения от светоразделительной пластинки Π_1 он распространяется по направлению наблюдения H . Луч 2 после выхода из светоразделительной пластинки достигает зеркала \mathcal{Z}_2 , отражается от него назад и через светоразделительную пластинку Π_1 идет также по направлению наблюдения H . (Роль пластинки Π_2 будет разъяснена ниже.)

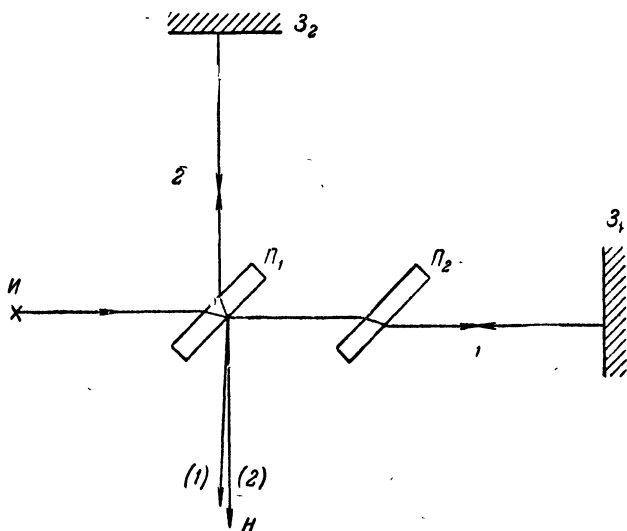


Рис. 1.

Легко видеть, что световые волны в лучах 1 и 2 , распространяющиеся по направлению наблюдения H , будут иметь между собой разность фаз, при условии, что оптические длины плеч интерферометра не равны друг другу. Плечами интерферометра принято называть расстояния от светоразделительной пластинки до зеркал прибора.

Широкое пространственное разделение плеч интерферометра Майкельсона делает его особенно удобным для создания разности фаз между лучами за счет введения в плечи прибора сред с различными показателями преломления.

Наличие двух когерентных лучей 1 и 2 определяет возможность получения интерференционной картины в приборе Майкельсона. Эту картину можно сфотографировать (или наблюдать глазом), если поместить объектив аппарата (глаз) на пути лучей, распространяющихся по направлению H .

Заметим, что светоразделительная пластинка Π_1 , имеющая конечную толщину, сама вносит некоторую разность хода для световых волн в лучах 1 и 2. Луч 1, прежде чем пойти по направлению наблюдения, пересекает светоразделительную пластинку один раз, а луч 2 — три раза. Для компенсации этой разности хода на пути луча 1 вставлена компенсационная пластинка Π_2 , через которую этот луч пройдет два раза (рис. 1).

Существенной особенностью конструкции рассматриваемого интерферометра является возможность поступательно перемещать зеркало Z_2 , тем самым изменяя длину плеча, соответствующего этому зеркалу.

Перемещения зеркала Z_2 изменяют разность хода интерферирующих лучей. С измерениями перемещений зеркала связаны все возможности применения интерферометра

как оптического измерительного прибора. Этот интерферометр дает возможность производить прямые измерения длин световых волн по сдвигу подвижного зеркала. Поэтому механизм перемещения этого зеркала представляет собой главную механическую деталь всей конструкции прибора. Этот механизм должен обеспечивать такое перемещение зеркала, при котором отражающая поверхность зеркала остается все время параллельной самой себе.

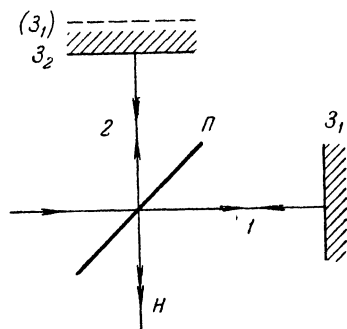


Рис. 2.

Другое зеркало Z_1 не может совершать поступательных перемещений, но зато имеются возможности изменять его наклон по отношению к зеркалу Z_2 . В частности, зеркало Z_1 может быть ориентировано и строго перпендикулярно зеркалу Z_2 . Зеркало Z_1 мы будем условно называть неподвижным зеркалом.

Легко видеть, что описанные две возможности управления зеркалами прибора обеспечивают условия для получения в интерферометре всех нужных случаев интерференции.

В самом деле, перемещения зеркала Z_2 (при условии что это зеркало строго перпендикулярно зеркалу Z_1) изменяют разность хода лучей 1 и 2, не изменяя их направлений. Это значит, что между зеркалами Z_1 и Z_2 фактически реализуется плоскопараллельный воздушный слой, толщина которого задается разностью длин плеч интерферометра. Этот слой удобно себе представить, построив изображение зеркала Z_1 в светоразделительной пластинке Π так, как это показано пунктиром (Z_1) на рис. 2. С помощью такого слоя можно получать локализованные в бесконечности интерференционные картины так называемых полос равного наклона. Очевидно,

что в этом случае на зеркала должен падать расходящийся пучок лучей, обеспечивающий широкий набор различных пространственных направлений интерферирующих лучей. Наблюдения интерференционной картины осуществляются в этом случае с помощью зрительной трубы (на рисунке не показана), наведенной на бесконечность.

Заметим, что поступательные перемещения зеркала Z_2 позволяют использовать это зеркало и как компенсатор. Действительно, если в плечо зеркала Z_1 введен материал с показателем преломления, отличным от показателя преломления воздуха, то удлинением плеча зеркала Z_2 можно скомпенсировать возникшую разность хода интерферирующих лучей. В интерферометрах других конструкций (Жамена, Рождественского, Релея) компенсация возникшей разности хода осуществляется стеклянными пластинками.

Наконец, прямая связь разности хода световых пучков с геометрическими размерами прибора позволяет применить его и для решения обратной задачи: сравнения перемещений зеркала с длиной световой волны. Не входя здесь в подробности такой постановки вопроса, напомним, что эти соображения положены в основу создания стандартного метра, размер которого выражен через длину волны красной линии кадмия¹⁾.

В другом случае наклон зеркала Z_1 по отношению к зеркалу Z_2 создает между отражающими поверхностями этих зеркал двугранный угол. Другими словами, между зеркалами образуется воздушный клин, толщина которого определяется наклоном зеркал и разностью длин плеч интерферометра в данных условиях (упоминаемый клин легко себе представить с помощью рис. 3)²⁾. Клин позволяет реализовать условия, необходимые для наблюдения интерференционной картины полос равной толщины — в нашем случае полос, параллельных ребру клина. Эта картина локализуется

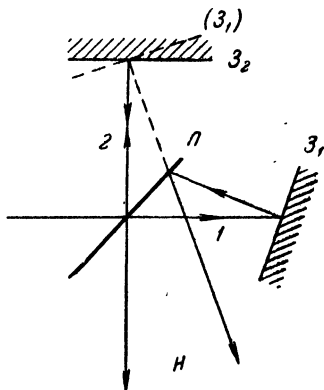


Рис. 3.

¹⁾ В Международной системе единиц (СИ) эту линию в спектре Cd заменяют линией $\lambda = 6057,8021 \text{ \AA}$ спектра ^{86}Kr .

²⁾ Ребро воздушного клина, образуемого плоскостями зеркала Z_2 и изображением в пластинке П зеркала (Z_1), может и не совпадать с центром зеркала Z_2 и даже вообще находиться за пределами поверхности зеркала Z_2 . Но для того чтобы наблюдать интерференцию в белом свете, когда необходимая малая разность хода между интерферирующими лучами, ребро воздушного клина должно непременно находиться в пределах поверхности зеркала Z_2 .

на поверхности клина, т. е. на «поверхности зеркал» или вблизи них, в зависимости от толщины клина¹⁾. Для наблюдения полос равной толщины необходимо освещение его поверхностей пучком света, близким к параллельному. Наблюдение этой интерференционной картины осуществляется либо глазом, аккомодированным на поверхность клина, либо через оптическую систему, дающую слегка увеличенное изображение интерференционных полос.

Локальные (местные) искажения прямолинейной формы интерференционных полос от клина, очевидно, бывают связаны с дефектами поверхностей зеркал. Параллельные прямолинейные полосы могут быть получены только при достаточно плоских (до 1—20 длины световой волны) отражающих поверхностях зеркал.

В заключение сделанного общего обзора особенностей интерферометра Майкельсона сделаем еще краткое замечание относительно требований к источнику света, используемого в подобном приборе. В этом отношении рассматриваемый интерферометр не отличается от других интерференционных приборов. Как и в других случаях, интерференцию при большой разности хода можно наблюдать только с помощью источника монохроматического света, или, по крайней мере, с помощью источника света, имеющего линейчатый спектр с редкими и тонкими спектральными линиями. Источник белого света допускает лишь наблюдение нескольких интерференционных полос низкого порядка. Источник белого света, используемый со светофильтром, допускает наблюдение несколько большего числа интерференционных полос.

Во всех перечисленных случаях наблюдение полос равной толщины осуществить практически гораздо легче, чем полос равного наклона, требующих строгой перпендикулярности зеркал прибора.

Наладка этого прибора (как и всех других интерферометров) начинается всегда с источником линейчатого спектра. Только убедившись в том, что достигнута хорошая видимость полос интерференции *самых низших порядков*, имеет смысл искать интерференционную

¹⁾ При указании локализации полос равной толщины в интерферометре Майкельсона иногда пишут, без всяких оговорок, что они расположены на поверхности зеркал. Такую формулировку нельзя понимать буквально уже потому, что на каждое зеркало падает по одному пучку света и этим пучкам до их воссоединения после вторичного прохождения через светоразделительную пластинку нет возможности встретиться и проинтерферировать. Смысл упоминаемой формулировки заключается лишь в том, что уже после вторичного прохождения через светоразделительную пластинку лучи 1 и 2 идут так, как будто бы они испытали отражение от поверхностей воздушного клина, изображенного линиями Z_2 и (Z_1) в верхней части рис. 3. Поэтому фокусировка интерференционной картины с помощью фотоаппарата или глаза действительно эквивалентна фокусировке поверхностей зеркал, которые сами, конечно, просто равномерно освещены раздельными световыми пучками.

картину в белом свете. Такой переход не труден только в том случае, если он может совершаться последовательно, путем постепенного увеличения ширины спектрального интервала, выделяемого из сплошного спектра специальным монохроматором, устанавливаемым на входе прибора. Интерференционная картина должна доводиться до самых низких порядков (при максимальной контрастности) для каждого нового значения расширяемого рабочего интервала длин волн. Тогда можно планомерно найти нулевой порядок интерференции и, переключившись на весь сплошной спектр, увидеть соответствующую ему интерференционную картину. Бессистемные поиски картины в белом свете бывают всегда совершенно бесплодны. Последнее замечание имеет силу для всех видов интерферометров.

Точно так же и переход от наблюдения полос равной толщины к наблюдению полос равного наклона (колец) можно также совершить только путем планомерных действий.

Сразу заметим, что как подготовка к наблюдению полос равного наклона, так и сами наблюдения колец, выполняемые неизбежно при значительной разности хода, осуществляются *только в свете туннельной лампы*.

Получив четкую картину прямолинейных полос равной толщины, надо изменением наклона зеркала Z_1 предельно расширять эти полосы, что будет соответствовать уменьшению угла клина и приближению зеркал к перпендикулярности (см. рис. 2). Только в том случае, когда все поле зрения заполнится одноцветной широкой интерференционной полосой, имеет смысл переходить к поискам полос равного наклона. Для этого надо заменить осветительную входную щель прибора матовым стеклом и перейти на наблюдения в зрительную трубу (о том, как это делается в данном приборе, сказано ниже).

Видимые в телескоп кольца могут быть расположены часто или редко, в зависимости от того, насколько толст воздушный плоскопараллельный слой, образованный зеркалами (см. рис. 2).

Очевидно, что для изменения диаметров колец надо поступательно перемещать зеркало Z_2 . При уменьшении толщины воздушного слоя диаметр каждого кольца будет уменьшаться. При увеличении толщины этого слоя — кольца будут расширяться. Изменение диаметров колец, без их деформации, возможно только при строго поступательных перемещениях подвижного зеркала. В противном случае кольца будут деформироваться в систему параллельных полос. Тогда после каждого существенного перемещения зеркала Z_2 надо корректировать форму интерференционных колец легким изменением наклона зеркала ¹⁾.

¹⁾ Во избежание недоразумений заметим, что в других интерферометрах полосы равного наклона могут быть получены и от клиновидного слоя (см., например, описание задачи 134).

Конструкция прибора. Используемый в практикуме интерферометр представляет собой современный учебно-демонстрационный прибор. Элементы его конструкции столь близко соответствуют принципиальной схеме прибора, что нет надобности описывать его подробно, тем более, что прибор легко обозрим через окна в его корпусе. Остановимся только на некоторых его деталях и на механизмах управления прибором.

Интерферометр работает в практикуме с двумя источниками света: ртутной лампой и лампой накаливания. Обе лампы смонтированы на ползушке, могущей скользить вдоль отрезка оптической скамьи, установленной вблизи прибора. Ртутная лампа включается через специальное пусковое устройство. Это же устройство имеет понижающий трансформатор для питания лампочки накаливания. Перед лампами расположен на отдельной стойке первый конденсор.

Перед входом света в систему прибора имеется подъемная стойка, на которой установлена поворотная призма. С помощью этой призмы можно, в случае необходимости, повернуть световой пучок на 90° и направить его в небольшой монохроматор, установленный на станине прибора.

Если световой пучок не направляется призмой в монохроматор, то он поступает в конденсорную систему, снабженную вращающейся обоймой со светофильтрами. Смена фильтров осуществляется поворотом от руки края обоймы, через небольшое окошечко в кожухе конденсорной системы. Каждый светофильтр снабжен номером (белая цифра на обойме), поясненным на специальной табличке, расположенной около прибора. Участок обоймы, не имеющий белой цифры номера фильтра, соответствует полному выключению фильтров и пропусканию через конденсорную систему всего светового потока от используемой в данный момент лампы.

На выходе конденсорной системы имеется устройство, позволяющее установить перед входом в прибор либо раздвижную щель (для получения полос равной толщины), либо матовое стекло для получения полос равного наклона (колец). Матовое стекло обеспечивает набор различных углов падения света на зеркала в первичном световом пучке. Замена щели на матовое стекло осуществляется поворотом от руки всей головки со щелью, как целого, на 90° .

Передвижение салазок, на которых установлено подвижное зеркало, может осуществляться двумя винтами. Один винт с крупным шагом (его видно через крышку прибора) осуществляет грубое перемещение зеркала, необходимое при существенных изменениях соотношения длин плеч интерферометра. Для измерительных целей эта винтовая подача практически не используется, и ручка вращения этого винта наружу прибора не выведена.

Другая, тонкая подача салазок осуществляется в небольшом измерительном диапазоне винтом с малым шагом. Шестерня и червячная передача для плавного вращения

этого винта вынесены наружу в центральной части станины прибора.

Измерения перемещения зеркала осуществляются с помощью особого индикатора часового типа, расположенного непосредственно на салазках зеркала. Этот индикатор дает точность отсчета $0,002$ мм. Он виден через окно, расположенное в правой хвостовой части прибора. Отсчет по индикатору, соответствующий возможности наблюдать интерференцию в белом свете, указан вблизи индикатора.

Ориентация зеркала Z_1 интерферометра (по отношению к подвижному зеркалу Z_2) регулируется двумя микрометрами, выступающими наружу через стенку кожуха этого зеркала. Отсчеты на этих микрометрах, соответствующие удобному наблюдению полос равной толщины, указаны на приборе.

Между центральной частью прибора, содержащей светоразделительную и компенсационную пластинки, и неподвижным зеркалом имеется столик. На этот столик помещаются подлежащие исследованию прозрачные объекты, вводимые в 1-й луч интерферометра. В нашем приборе на этом столике находится стеклянный диск в металлической оправе. Этот диск поворотом за ручку, выведенную за пределы защитного прозрачного кожуха, вокруг горизонтальной оси может либо вводиться в световой пучок, падающий на неподвижное зеркало, либо выводиться из него. Второй стеклянный диск установлен на поперечной ползушке в другом плече интерферометра. Назначение обоих стеклянных дисков разъясняется в описании упражнения 5.

В передней части прибора расположена наблюдательная система интерферометра. Путем перемещения простой системы зеркал можно вести наблюдение интерференционных картин либо через телескоп (полосы равного наклона), либо через слабый окуляр (полосы равной толщины). На крышке прибора расположены надписи, указывающие, как пользоваться той или иной оптической системой. Переключение световых пучков из одной системы в другую осуществляется вращением одного зеркала, поворотная ручка которого выведена над крышкой прибора. (Некоторые неудачные детали переключения зеркал в наблюдательной части прибора в практике были устранены. Соответственно две излишние ручки на крышке прибора не используются.)

Упражнение 1

Подготовка установки к измерениям, наблюдения полос равной толщины

Цель упражнения практически познакомить студентов с работой прибора и интерференционной картиной полос равной толщины.

Для подготовки прибора к первым наблюдениям необходимо выполнить следующее.

1. Установить, соответственно рекомендованным отсчетам, оба зеркала интерферометра.

2. Переключить на центральный окуляр (для наблюдения полос равной толщины) световой пучок в наблюдательной части прибора.

3. Вывести из плеч интерферометра оба стеклянных диска, используемых в упражнении 5. Один диск выводится вращением его вокруг горизонтальной оси, другой — путем перемещения его на ползушке.

4. Установить открытую щель на выходе монохроматора.

5. Выключить призму монохроматора и опустить столик с поворотной призмой перед входом света в прибор.

6. Установить светофильтр № 4 (зеленый).

7. Передвинуть в рабочее положение ртутную лампу, убедившись, что световой блик от лампы попадает на вход прибора.

После выполнения этих указаний можно наблюдать интерференционную картину, фокусируя ее окуляром по глазам.

8. Плавным вращением ручки перемещать зеркало Z_1 и наблюдать смещение интерференционных полос в поле зрения окуляра.

9. Производя небольшие перемещения микрометров, управляющих наклонами неподвижного зеркала Z_1 , наблюдать изменение ширины и ориентации интерференционных полос.

10. Провести те же наблюдения с различными светофильтрами и, выключив полностью светофильтры, в белом свете ртутной лампы (обойма со светофильтрами устанавливается в положение без номера).

11. Поднять столик с поворотной призмой и направить свет в монохроматор, открыть входную щель монохроматора, включить монохроматор ручкой, установленной на осветительной системе. Вращая барабан монохроматора, просмотреть интерференционную картину в спектре ртутной лампы, разложенном монохроматором.

12. Получив интерференционную картину в свете зеленой линии спектра ртути, плавно вращая ручку винтовой подачи подвижного зеркала, наблюдать сдвиг интерференционных полос и потренироваться в отсчете числа полос, проходящих через поле зрения окуляра.

13. Опустить подъемный столик с поворотной призмой, выключить монохроматор. Восстановить положение зеркал по рекомендациям для данной установки отсчетам. Передвинуть осветитель так, чтобы свет от лампочки накаливания попадал в осветитель.

14. Ведя непрерывные наблюдения в окуляр, *плавно и очень медленно* передвигая подвижное зеркало, найти интерференционную картину в белом свете. Записать точный отсчет на индикаторе, соответствующий совпадению ахроматической интерференционной полосы с нитью в окуляре.

Упражнение 2

Измерение длин световых волн по сдвигу интерференционных полос равной толщины

1. Не изменяя положения зеркал, после наблюдения интерференции в белом свете вернуться к интерференционной картине для зеленой линии спектра ртути, видимой через монохроматор. Сделать полосы вертикальными, изменяя наклон зеркала Z_1 .

2. Промерить по индикатору не менее пяти раз параллельное перемещение зеркала Z_2 , соответствующее прохождению через поле зрения окуляра ста интерференционных полос. Найти длину волны зеленой ртути λ , пользуясь соотношением $\lambda = 2\delta/N$, где δ — перемещение зеркала Z_2 , соответствующее сдвигу картины на N полос.

3. Произвести те же измерения и расчеты для сине-фиолетовой линии ртутного спектра, выделив ее монохроматором.

Упражнение 3

Измерение разности длин волн двух близких линий ртутного спектра

Интерференционная картина, полученная от двух спектральных линий, близких по длине волны, отличается следующей особенностью. Интерференционные полосы в такой картине, по мере изменения разности хода между интерферирующими лучами, становятся то более, то менее четкими.

Эта картина периодических пространственных «биений» есть результат суперпозиции двух интерференционных картин, с несколько различными пространственными периодами. Ее удобно использовать для измерения по так называемому *методу совпадений* разности длин волн, создающих интерференционную картину перемежающейся четкости.

1. Получить с помощью монохроматора интерференционную картину в желтом свете ртутной лампы.

2. Измерить несколько раз по индикатору перемещения L зеркала Z_2 , соответствующие появлению в поле зрения окуляра 11 областей «смазывания» интерференционной картины. По найденному перемещению зеркала найти $\delta = L/10$.

3. Найти разность $\Delta\lambda$ длин волн двух желтых линий спектра ртути, пользуясь соотношением $\Delta\lambda = \lambda_{cp}^2/2\delta$, где $\lambda_{cp} = (\lambda_1 + \lambda_2)/2 = 5780 \text{ \AA}$. Приведенное соотношение для расчета $\Delta\lambda$ при условии $\lambda_2 - \lambda_1 \ll \lambda$ легко получить из следующих соображений. Пусть при разности длин плеч интерферометра d_1 мы наблюдаем интерференционный максимум порядка k_1 для спектральной линии с длиной волны λ_1 . Тогда, очевидно,

$$2d_1 = k_1\lambda_1. \quad (1)$$

С другой стороны, если эта же разность хода $2d_1$ соответствует интерференционному минимуму для спектральной линии с длиной волны λ_2 , то

$$2d_1 = k_1\lambda_2 + \frac{\lambda_2}{2}. \quad (2)$$

Одновременное выполнение соотношений (1) и (2) будет условием получения первого «смазывания» интерференционной картины. Следующее (по ходу перемещения зеркала Z_2) «смазывание» интерференционной картины будет наблюдаться при такой разности длин плеч интерферометра d_2 , когда

$$2d_2 = k_2\lambda_1 \quad (3)$$

и

$$2d_2 = k_2\lambda_2 + \frac{3}{2}\lambda_2. \quad (4)$$

Совместное решение уравнений (1) — (4) дает

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \Delta\lambda = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{2(d_2 - d_1)} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{2\delta} \approx \frac{\lambda_{\text{ср}}^2}{2\delta},$$

где $\lambda_{\text{ср}} = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$ и δ — перемещение подвижного зеркала, необходимое для перехода от наблюдений одного случая «смазывания» интерференционной картины к смежному случаю. Аналогично (1) — (4) и, конечно, с тем же окончательным результатом для $\Delta\lambda$ можно написать условие для наблюдения периодически появляющихся (при изменениях разности хода лучей в интерферометре) контрастных участков интерференционной картины, когда светлые (и, соответственно, темные) полосы, полученные для длин волн λ_1 и λ_2 , совпадают друг с другом. Легко видеть, что описанный способ отыскания $\Delta\lambda$ не требует предварительных точных измерений величины λ_1 и λ_2 в отдельности.

Упражнение 4

Измерение интерференционным методом ширины полосы пропускания светофильтра

1. Вернуться к интерференционной картине в белом свете, выключив монохроматор, и перейти вновь к лампе накаливания.

2. Вводить по очереди разные светофильтры (из числа интерференционных фильтров, смонтированных в прибор) и для каждого светофильтра просчитать полное число N (по обе стороны от нулевой полосы) видимых полос (порядков интерференции).

3. Пользуясь соотношением $\Delta\lambda = 2\lambda/N$, найти спектральную ширину $\Delta\lambda$ полосы пропускания каждого светофильтра. Здесь λ — длина волны центра полосы пропускания данного светофильтра. Она указана на приборе. Написанное выражение для $\Delta\lambda$ легко получить, исходя из условия, что исчезновение интерференционной

картины будет иметь место, когда интерференционная полоса порядка $(m + 1)$ для длины волны λ (начало исследуемого непрерывного спектрального интервала) накладывается на интерференционную полосу порядка m для длины волны $\lambda + \Delta\lambda$ (конец исследуемого спектрального интервала). В силу непрерывности набора используемых длин волн в пределах интервала $\Delta\lambda$ наблюдение интерференции порядка выше m станет невозможным.

Таким образом, при исчезновении интерференционной картины $(m + 1)\lambda = m(\lambda + \Delta\lambda)$. Отсюда находим значение $\Delta\lambda = \lambda/m$. Множитель 2 в приведенном выше выражении для $\Delta\lambda$ введен потому, что рекомендованное для измерений значение $N = 2m$, так как подсчитывается число полос N , видимое по обе стороны от нулевой полосы.

Упражнение 5

Измерения показателя преломления интерференционным методом

Целью настоящего упражнения является измерение показателя преломления стекла n_c .

Пусть в одно из двух равных плеч интерферометра дополнительно вводится стеклянная пластинка толщиной d . Очевидно, что тогда наблюдаемая в белом свете интерференционная картина исчезнет, так как между интерферирующими лучами возникнет разность хода $2d(n_c - n_v) \approx 2d(n_c - 1)$, где n_v — показатель преломления воздуха.

Для того чтобы восстановить интерференционную картину в поле зрения трубы (вновь привести к нити окуляра ахроматическую центральную интерференционную полосу), необходимо увеличить длину другого плеча интерферометра на величину $\delta = 2d(n_c - 1)/2 = d(n_c - 1)$. Другими словами, надо скомпенсировать в другом плече интерферометра разность хода интерферирующих лучей, возникшую в результате постановки стеклянной пластинки. Если этим путем интерференционная картина восстановлена (подвижное зеркало удалено на отрезок δ) и величина δ измерена по показаниям индикатора интерферометра, то из последней формулы, зная d , можно найти: $n_c = 1 + \delta/d$.

Перечисленные операции и осуществляются в настоящем упражнении. Однако практическое выполнение изложенного метода нуждается в некотором искусственном приеме. Дело в следующем. Подвижное зеркало интерферометра имеет и з м е р я е м ы е перемещения только в пределах трех миллиметров. Учитывая, что $n_c \approx 1,5$, мы легко найдем, что перемещением подвижного зеркала можно скомпенсировать разность хода, вносимую стеклянной пластинкой с толщиной d , только в том случае, если d не больше 1,5 мм. Таким образом, для измерения показателя преломления стекла надо из него изготовить плоскопараллельную пластинку

толщиной не более 1,5 мм. Но дело в том, что изготовить плоскопараллельную пластинку такой толщины и диаметром в 50 мм с качеством поверхностей, пригодных для интерферометрических измерений, не представляется возможным из-за деформаций, возникающих в тонком слое стекла. С более же толстой стеклянной пластинкой нам не позволит работать наш интерферометр.

Поэтому практически поступают так: из стекла одного и того же сорта изготавливаются две толстые плоскопараллельные пластинки, но с разностью толщин около 1 мм. Затем, в процессе измерений, в одно плечо интерферометра вводится одна пластинка толщиной d_2 , а в другое — вторая пластинка толщиной d_1 . Ясно, что такой прием эквивалентен введению в одно из плеч интерферометра пластинки толщиной $d = d_2 - d_1$. Сдвиг интерференционной картины, вызванный этим слоем стекла, уже может быть скомпенсирован удлинением второго плеча интерферометра за счет удаления подвижного зеркала. Именно так и делается в настоящем упражнении. Этим объясняется наличие в приборе двух подвижных стеклянных дисков (на столике и на ползушке) в обоих плечах интерферометра. Толщина диска, находящегося на столике, $d_2 = 6,2$ мм; толщина диска на ползушке $d_1 = 5$ мм. Следовательно, $d = 1,2$ мм. Соответствующее величине $1,2 (n_c - 1)$ значение δ определяется в ходе опыта по сдвигу подвижного зеркала, необходимому для восстановления интерференционной картины, после введения обоих стеклянных дисков в световые пучки.

Необходимо отметить, что при описанных интерференционных измерениях показателя преломления, выполняемых в белом свете, возникает еще следующее обстоятельство. Все сорта стекла обладают дисперсией и поэтому показатель преломления стекла, определяющий разность хода двух лучей, в один из которых введена стеклянная пластинка, будет зависеть от длины световых волн. Поэтому, передвигая подвижное зеркало, невозможно полностью восстановить ту интерференционную картину, которая наблюдалась в белом свете, до введения в плечи интерферометра стеклянных пластинок. Вместо прежней картины в поле зрения прибора после надлежащего компенсационного сдвига подвижного зеркала будет видна целая серия близко расположенных друг к другу интерференционных картин разного цвета, соответствующих разным длинам волн, входящих в состав видимого спектра. Центральную полосу нулевого порядка каждой такой приблизительно монохроматической интерференционной картины можно поочередно приводить к совпадению с нитью окуляра, соответствующим перемещением подвижного зеркала. Если при этом измерять по индикатору необходимые перемещения подвижного зеркала, то можно находить значения показателя преломления для разных длин волн. Иначе говоря, интерферометр открывает возможность изучить дисперсию исследуемого стекла. Необходимо только указать,

каким образом определяются те длины волн, для которых производится измерения показателя преломления.

Подобное определение длин волн совсем грубо можно сделать по цвету различных систем поочередно наблюдаемых интерференционных полос. Соответствие между цветом интерференционных полос и длиной волны можно установить, пользуясь каким-либо хорошим цветным изображением сплошного спектра, на котором нанесена шкала длин волн. Более точно то же самое можно сделать, выделяя из сплошного спектра отдельные его участки с помощью имеющихся в интерферометрической установке калиброванных светофильтров или с помощью монохроматора, на барабане вращающейся призмы которого имеется шкала длин волн выпускаемого из щели монохроматора излучения. Используя монохроматор и ртутную лампу, можно измерять значения показателей преломления стекла для спектральных линий ртути, расположенных в видимой части спектра. Однако это сделать нелегко, так как в случае интерференционных картин, получаемых от источника с линейчатым спектром, отыскание нулевой полосы является делом трудным. Для выполнения настоящего упражнения надо произвести следующие операции:

1. Вращением вокруг горизонтальной оси ввести в световой пучок стеклянный диск, расположенный на столике в плече неподвижного зеркала интерферометра, ведя при этом в окуляр наблюдения за интерференционной картиной. Очевидно, что нулевой порядок интерференции и вся интерференционная картина будут при этом исчезать по мере вдвигания пластинки в поле зрения.

2. С помощью ползушки ввести в световой пучок подвижного зеркала второй стеклянный диск.

3. Отодвигая подвижное зеркало, компенсировать разность хода между световыми пучками, создавшуюся в результате неодинаковой толщины стеклянных дисков. Компенсационный сдвиг подвижного зеркала должен составить около 1 мм. Поэтому при приближении отсчета по индикатору к значению, измененному на 1 мм по сравнению с отсчетом на нулевую полосу в отсутствии стеклянных дисков, надо внимательно следить в окуляр за появлением интерференционной картины. Очевидно, что теперь из-за спектрального разложения этой интерференционной картины, в результате дисперсии в стеклянных дисках, она уже не может быть столь яркой, как в прежних условиях.

4. Вводя поочередно светофильтры в первичный световой пучок, приводят к нити окуляра сдвигами зеркала Z_2 центры интерференционных картин для разных длин волн и регистрируют соответствующие им сдвиги зеркала.

Закончив измерения, находят по приведенной выше формуле значения показателя преломления стекла для нескольких значений длины световой волны.

5. Пользуясь отсчетами на индикаторе, в процессе наводки интерференционной картины на нить окуляра трубы, необходимо определить точность интерферометра в отношении измерений показателя преломления. Используя полные записи измерений показателей преломления, необходимо определить среднюю точность всего метода измерений показателя преломления.

Упражнение 6

Наблюдение интерференционных полос равного наклона (колец) и измерение по ним длины световой волны

1. Вывести стеклянные диски из плеч интерферометра и восстановить интерференционную картину в белом свете лампы накаливания.

2. Перейти к наблюдениям интерференционной картины нулевого порядка в белом свете ртутной лампы.

3. Медленно и плавно изменяя наклон неподвижного зеркала, расширить интерференционные полосы настолько, чтобы все поле зрения было окрашено цветом какой-либо одной интерференционной полосы. Это будет означать, что воздушный клин между зеркалами превратился практически в плоскопараллельный воздушный слой.

4. Заменить входную щель прибора матовым стеклом. Это можно сделать, поворачивая головку со щелью как целое вокруг горизонтальной оси.

5. Переключить световой пучок в наблюдательной системе на телескоп для наблюдения полос равного наклона (колец).

6. Ведя непрерывные наблюдения в телескоп, перемещать подвижное зеркало, двигая его к положению, соответствующему рекомендованному для наблюдения колец отсчету.

7. Пронаблюдать систему интерференционных колец с различными светофильтрами. Зарисовать систему видимых в телескоп интерференционных колец, указав закономерность чередования в ней цветов. Воспользовавшись значениями отсчетов на индикаторе, соответствующих нулевой разности хода лучей в интерферометре и той разности хода, при которой наблюдается система колец, указать номера порядков интерференции для всех зарисованных колец.

8. Измерить несколько раз по индикатору смещения δ подвижного зеркала Z_2 , соответствующие исчезновению или возникновению в центре интерференционной картины 100 колец.

Найти длины волн соответствующих спектральных линий, пользуясь соотношением

$$\lambda = \frac{2\delta}{100}.$$

Технические данные установки. В работе используется учебно-демонстрационный интерферометр Майкельсона марки ИЗК-452, выпускаемый нашей промышленностью. Однако в приборе произведены многочисленные переделки, необходимые для использования его в перечисленных выше упражнениях (сделан новый осветитель со сменными лампами накаливания и ртутной лампой, установлена поворотная призма, позволяющая включать в работу и выключать монохроматор, усилены пружины, управляющие обратным ходом каретки подвижного зеркала, заменен индикатор перемещений зеркала, изменена наблюдательная система прибора, установлена ползушка для введения стеклянного диска в плечо подвижного зеркала, металлические крышки футляра интерферометра, недопускавшие обзора его внутреннего устройства, заменены прозрачными и т. д.). В работе используется ртутная лампа ПРК-2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, изд. 4-е, Гостехиздат, 1957.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. А. А. Майкельсон, Исследование по оптике, Госиздат, 1928.

3. А. А. Майкельсон, Световые волны и их применение, ОНТИ, 1934.

4. М. Ф. Романова, Интерференция света и ее применение, ОНТИ, 1937.

5. А. Н. Захарьевский, Интерферометры, Оборонгиз, 1952.

6. Р. Дитчберн, Физическая оптика, «Наука», 1965.

ЗАДАЧА 136

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ

В задаче определяется постоянная дифракционной решетки и длина световой волны по непосредственному измерению угла дифракции на гониометре-спектрометре ГС-30. Кроме того, определяется угловая дисперсия решетки и дается понятие о ее разрешающей способности.

Введение. Дифракционной решеткой называют всякую периодическую (или близкую к периодической) структуру, влияющую на распространение волн той или иной природы. Простейшая оптическая дифракционная решетка представляет собой стеклянную пластинку, на которой с помощью делительной машины нанесен ряд параллельных штрихов. Места, прочерченные делительной машиной, рассеивают свет, так что в направлении наблюдения попадает лишь его ничтожная часть. Штрихи являются, таким образом, практически непрозрачными промежутками между неповрежденными частями пластинки — щелями.

Кроме стеклянных дифракционных решеток в учебной практике применяются так называемые репки, полученные путем изготовления желатиновых отпечатков, копий с металлических отражательных решеток. Желатиновые отпечатки помещаются во

избежание повреждений между двумя стеклянными плоскопараллельными пластинками. В последнее время для учебных занятий применяются решетки, легко изготавливаемые из засвеченных и обработанных фотопластинок, на которых резцом делительной машины осторожно снимается слой фотоэмульсии.

В простейшем случае нормального падения света на прозрачную дифракционную решетку с шириною прозрачных участков a и

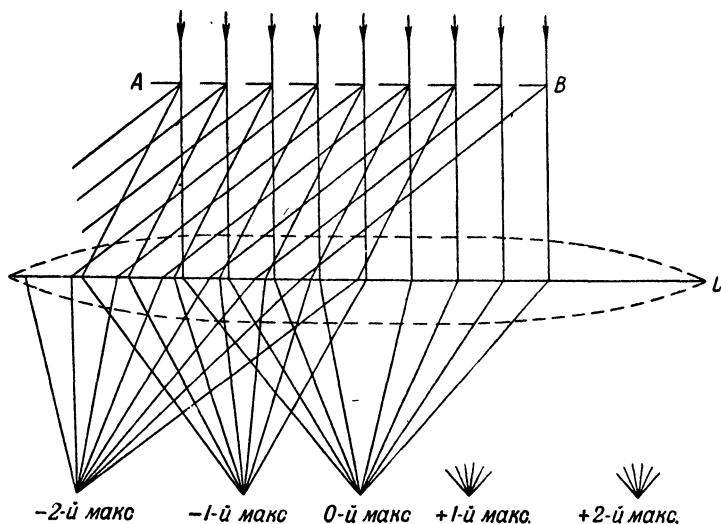


Рис. 1.

непрозрачных b направления на главные дифракционные максимумы определяются равенством

$$k\lambda = (a + b) \sin \varphi = d \sin \varphi,$$

откуда

$$\sin \varphi = \frac{k\lambda}{d}, \quad (1)$$

где φ — угол дифракции, λ — длина световой волны, k — порядок спектра ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), $d = (a + b)$ — так называемая *постоянная решетки*. При $k = 0$ условие максимума удовлетворяется для всех длин волн, т. е. при $\varphi = 0$ наблюдается центральная светлая полоса. Два знака \pm для всех остальных значений k соответствуют двум системам спектров, расположенных симметрично справа и слева от центральной светлой полосы (рис. 1).

Предельное число спектров, которое можно получить при помощи решетки, дается соотношением

$$k \leq \frac{d}{\lambda}. \quad (2)$$

Основными характеристиками дифракционной решетки являются ее разрешающая способность и дисперсия.

Разрешающую способность решетки можно рассчитать, пользуясь условием Релея, по которому две монохроматические спектральные линии еще разрешаются (видны раздельно) в том случае, когда главный максимум одной линии попадает на место минимума второй, ближайшего к главному максимуму (рис. 2). Из этого условия следует, что разрешающая способность решетки

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kN, \quad (3)$$

где N — число штрихов решетки. В решетке большая разрешающая способность достигается за счет больших значений N , так как порядок k невелик.

Дисперсия определяется угловым расстоянием между двумя спектральными линиями, отнесенным к разности их длин волн,

$$D = \frac{\delta\varphi}{\delta\lambda}, \quad (4)$$

где $\delta\lambda$ выражено в ангстремах (\AA). Дисперсия может также определяться линейным расстоянием δs между спектральными линиями, выраженным в миллиметрах, если измерение ведется при помощи трубы, снабженной окулярным микрометром. Измеренное расстояние должно быть отнесено к $\delta\lambda$. Так как $\delta s = F \cdot \delta\varphi$, где F — фокусное расстояние объектива трубы, то линейная дисперсия

$$\frac{\delta s}{\delta\lambda} = DF.$$

Угловую дисперсию для решетки получаем, дифференцируя формулу (1)

$$D = \frac{k}{d \cos \varphi}. \quad (5)$$

Для небольших углов отклонения дисперсия решетки постоянна; $\delta\varphi$ пропорционально $\delta\lambda$. Поэтому дифракционные спектры иногда называются «нормальными» в отличие от спектров, получаемых с помощью стеклянных призм, у которых угловая дисперсия в красной части спектра меньше, чем в фиолетовой.

Описание и установка прибора. Описание гониометра-спектрометра, способа его установки и ртутной лампы дано в задаче 128.

Установка решетки. Когда установка спектрометра закончена, следует установить дифракционную решетку. Для этого, вращая зрительную трубу относительно оси прибора, наводят крест окуляра на щель, освещенную ртутной лампой, и закрепляют трубу в этом положении; затем ставят на столик решетку так, чтобы штрихи

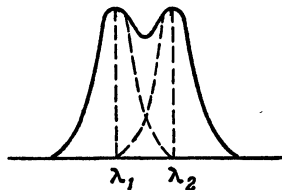


Рис. 2.

ее были вертикальны, т. е. параллельны оси вращения прибора, а ее плоскость — перпендикулярна к оси коллиматора. Наклоняя и вращая столик, получают в поле зрения изображение окулярного креста, отраженное от плоскости решетки или от стеклянных пластинок, в которых зажата реплика. Совмещают изображение вертикального штриха в окуляре с крестом, а горизонтального штриха — с его изображением, как и в случае установки с плоско-параллельной пластинкой. Наклонять следует *только столик*, а не трубу, так как установка спектрометра уже закончена.

Поворачивая столик с решеткой на 180° , проверяют установку решетки. Она считается установленной, если в обоих положениях совмещаются изображения вертикального штриха и щели с центром креста.

В одном из этих двух положений столик с решеткой закрепляют и отсчитывают по лимбу направление на первичный световой пучок. При данной установке решетки это будет также направлением на максимум нулевого порядка.

Упражнение 1

Определение постоянной решетки и ее угловой дисперсии

Измерения. Вращают трубу, например влево, до тех пор, пока в ней не покажется зеленая линия ртути ($\lambda = 5461 \text{ \AA}$) первого спектра. Наводят на нее трубу и производят отсчет. Продолжая вращать трубу в эту же сторону, находят ту же линию в спектре второго порядка, наводят на нее трубу и производят отсчет. Чем выше порядок спектра, тем обычно меньше становится его яркость.

Те же установки и отсчеты проделывают по правую сторону от нулевого максимума, вращая трубу в обратную сторону.

Подставляя в формулу (1) найденные из наблюдений величины φ для соответствующих значений k , вычисляют постоянную данной решетки.

Точно так же определяют углы φ_1 и φ_2 для двух желтых линий ртути и, взяв длины волн этих линий из таблицы 12 (в конце книги), вычисляют угловую дисперсию решетки по формуле (4).

Упражнение 2

Определение неизвестных длин волн спектральных линий и разрешающей способности решетки

Измерения. Установив решетку с известной постоянной на столике спектрометра и поместив перед щелью ртутную лампу, устанавливают крест в трубе спектрометра на нулевой максимум и производят отсчет.

Вращают трубу в какую-нибудь сторону, пока в ней не покажутся нужные линии спектра первого порядка. Устанавливают

на них по очереди крест и производят отсчеты. Продолжая вращать трубу, находят линии спектра второго порядка и т. д. Те же измерения продельывают по другую сторону от нулевого максимума.

Подставив в формулу (1) значение постоянной решетки и найденные из наблюдений величины φ для соответствующих k , определяют длины волн исследуемых линий.

Для того чтобы оценить разрешающую способность решетки, надо иметь источник света, спектр которого богат тесно расположенными линиями, и заметить, какая пара линий в этом спектре при работе с данной решеткой представляется как одна линия независимо от геометрического увеличения зрительной трубы. Разность длин волн этих двух линий даст величину $\Delta\lambda$. Очевидно, что в спектрах разных порядков будут казаться слившимися разные пары линий, и величина $\Delta\lambda$ будет меньше для спектров высоких порядков в соответствии с общими соображениями о разрешающей способности дифракционной решетки.

Можно оценить разрешающую способность и иначе. Именно, зная постоянную решетки и измерив линейкой длину решетки, можно найти число штрихов в ней N . (Разумеется, такая оценка числа N предполагает, что освещены и работают все штрихи решетки.) Порядок дифракционного спектра k , входящий в выражение для разрешающей способности, надо взять из опыта, определив, какой наивысший из дифракционных спектров имеет еще достаточную для наблюдения интенсивность (в редких случаях у учебных решеток k оказывается больше, 3 или 4).

Технические данные установки. Задача поставлена на гониометре ГС-30; дифракционные решетки могут иметь от 50 до 200 штрихов на мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева, Курс физики, т. III, Физматгиз, 1962.
3. С. Э. Фриш, Техника спектроскопии, Изд. ЛГУ, 1936.
4. Р. Дитчберн, Физическая оптика, «Наука», 1965, гл. 6.

ЗАДАЧА 137

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЙ ДИФРАКЦИИ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛУЧАХ НА ОТДЕЛЬНОЙ ЩЕЛИ И НА ПРОСТЕЙШИХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТКАХ

Настоящая задача посвящена ознакомлению с основными явлениями дифракции света в параллельных лучах на отдельной щели и на системах, составленных из постепенно возрастающего числа параллельных щелей.

Описание приборов. Принципиальная схема установки изображена на рис. 1. Свет от источника 1, предпочтительно с линейчатым спектром (ртутная лампа, газоразрядная трубка и т. д.), проходит через светофильтр 2, конденсор 3 и падает на входную щель коллиматора 4. Выходящий из коллиматора параллельный пучок лучей попадает на непрозрачное препятствие 5, содержащее необходимое число просветов (одна или несколько щелей), на которых и происходят изучаемые в настоящей задаче дифракционные явления.

Далее располагается установленная на бесконечность зрительная труба 6, при помощи которой производятся все наблюдения

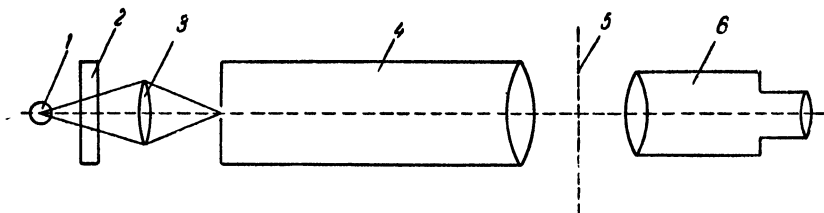


Рис. 1.

изучаемых дифракционных явлений. Дифракционная картина получается в фокальной плоскости объектива трубы, а окуляр играет роль лупы, в которую картина рассматривается. В нашем случае этот окуляр выполняет вместе с тем роль измерительного прибора, так как он снабжен винтовым микрометром, позволяющим делать необходимые промеры на дифракционной картине.

Практически описанная оптическая система реализована в нашем случае следующим образом. Все нужные для работы приборы располагаются на длинной оптической скамье, установленной на специальной подставке. Ртутная лампа заключена в специальный осветитель, перед которым расположен конденсор. Перед окном осветителя, на его стенке, с наружной стороны имеется передвижная рамка, в которую могут быть помещены светофильтр и ослабитель света, если в них встречается надобность. Перед осветителем располагается коллиматор.

Установке коллиматора на бесконечность соответствует отсчет 50,0 по его шкале, находящейся на трубе коллиматора справа от щели (смотря по ходу светового луча). Щель коллиматора имеет постоянную ширину 0,05 мм. Установка коллиматора на бесконечность выполнена и выдвигной патрубком коллиматора закреплен. Положение коллиматора на оптической скамье фиксировано. Поскольку из коллиматора выходит параллельный пучок лучей, расстояние между коллиматором и остальными частями применяемой оптической системы принципиально не играет роли. Однако

ввиду наличия в комнате посторонних источников света удобно ставить зрительную трубу на расстоянии 30 см от коллиматора, когда его корпус защищает объектив трубы от постороннего света. Посередине между трубой и коллиматором помещается ползушка со столиком для исследуемых объектов (щели, решетки)¹⁾.

Оптическая система трубы включает, помимо объектива, окуляр с винтовым микрометром, который студенты получают у лаборанта на время работы. В поле зрения этого окуляра имеются нанесенные на стекло зачерненные штрихи (два вертикальных штриха и крест), которые могут перемещаться при помощи микрометрического винта, головка которого представляет собой барабан с делениями. Цена одного деления барабана 0,01 мм. Отсчет целых оборотов барабана микрометра производится по горизонтальной шкале, видимой в окулярном микрометре. Окулярный микрометр вставляется в патрубок окулярной части трубы и зажимается в нем винтовым зажимом (способ правильной фокусировки окулярного микрометра приведен дальше, при описании подготовки всей установки к измерениям).

Фокусировка зрительной трубы осуществляется обычным путем при помощи кремальеры. Отметим, что окулярная часть трубы включает автоколлимационное устройство с осветителем (см. описание задачи 128), но оно в настоящей задаче не используется. Как легко видеть, непосредственно на установке механическое устройство держателя трубы дает все степени свободы, необходимые для ее удобного использования.

Исследуемые объекты, т. е. щели или дифракционные решетки, сделаны следующим образом: фотопластинка подвергнута интенсивному и длительному освещению, после чего она проявлена и отфиксирована обычным способом. В результате такой обработки на поверхности стекла получается совершенно непрозрачный слой фотоэмульсии. Удаляя отдельные участки этого слоя при помощи острого стального резца, получают в непрозрачном слое либо отдельные прорезы (щели), либо систему параллельных прорезей (решетку). Для этого стальной резец закрепляется в делительную машину, на супорте которой находилась подготовленная фотопластинка. Необходимо отметить, что обращение с подобными решетками требует осторожности и брать решетку следует только за края пластинки, окантованные черной бумагой. При работе пластинка стороной, покрытой желатиной и фотоэмульсией, устанавливается обязательно к объективу трубы.

¹⁾ Конец оптической скамьи может (по конструкции всей установки) вращаться вокруг вертикальной оси. Однако в условиях настоящей задачи такое вращение не нужно, а поэтому этот конец скамьи закреплен в положении, когда он перпендикулярен основной оптической скамье. На этот отрезок скамьи ставится и на нем закрепляется ползушка со столиками, снимаемыми в ходе опыта с рабочего участка скамьи.

Необходимые для работы решетки хранятся отдельно от установки и выдаются студентам только на время выполнения измерений.

Фотопластинки с отдельными щелями или решетки вставляются в специальный держатель (стойку), установленный на столике. Штырь такого столика установлен в ползушке. Таких столиков со штырем в ползушке имеется на установке два. На одном из столиков установлена стойка для установки щелей и решеток.

На краю другого столика установлена раздвижная щель. Щечки этой щели раздвигаются или сближаются вращением винта с барабанчиком. Винт в верхней части щели служит для регулировки параллельности щечек щели. Раздвижная щель используется для первых качественных наблюдений дифракции на щели.

Количественные наблюдения производятся на щелях постоянной ширины, прорезанных вышеуказанным способом в зачерненной эмульсии фотопластинки. Ширина щелей, изготовленных на делительной машине, известна нам точнее, чем ширина раздвижной щели, и поэтому прорезанные щели служат для количественных наблюдений.

Столик под стойкой, в которую вставляются щели постоянной ширины, имеет еще специальное приспособление: приставной вращающийся экран с микрометрической подачей. Устройство этого экрана легко понять непосредственно на установке, если здесь пояснить его назначение. Дело в том, что важное качественное и количественное изменение дифракционной картины дает переход от случая одной щели к случаю двух щелей. Поставленная в стойку система двух щелей, благодаря наличию передвижного экранчика, позволяет легко наблюдать переход от одной щели к двум щелям и обратный случай. Экранчик может прикрывать одну из щелей, не создавая помех для прохождения света через другую щель. Вращение нижнего опорного сектора у экранчика предусмотрено для того, чтобы подводить край экранчика к самой стеклянной поверхности пластинки и тем самым исключать паразитную подсветку через прикрытую экранчиком щель.

Пусковое устройство обслуживает помещенную в осветительную лампу. Вся система питается от сети переменного тока напряжением 220 в, снимаемого с помещенного на стене лабораторного распределительного щитка. В щель лампы введен амперметр. Практические указания по включению лампы приведены непосредственно на установке.

Подготовка установки к измерениям. 1. Подготовка к измерениям начинается с фокусировки окулярного микрометра. Для этого окулярный микрометр (еще не надетый на трубу) приближается к глазу и направляется на какой-нибудь удаленный светлый освещенный предмет (белый абажур лампы, потолок) или в ясную погоду на небо. Плавным вращением рифленого кольца окуляра

надо добиться ясной видимости креста в поле зрения микрометра. Очевидно, что никаких иных предметов в поле зрения окуляра при этом видно не будет. После того, как четкое изображение креста получено, микрометр дальнейшей перефокусировке в процессе работы не подлежит и может быть вставлен и закреплен винтовым зажимом в окулярной части зрительной трубы.

2. Осветитель устанавливается на расстоянии 5—25 см от входной щели коллиматора, после чего зажимной винт ползушки осветителя немедленно затягивается на оптической скамье. Вообще следует помнить, что зажимные винты ползушек всех расположенных на оптической скамье приборов должны быть всегда затянуты, за исключением моментов передвижения приборов вдоль скамьи, когда они поддерживаются рукой.

С разрешения преподавателя или дежурного лаборанта после проверки ими исправности электропроводки производится включение на щитке того рубильника, к клеммам которого присоединена вся установка.

3. После установления нормального режима горения лампы подготавливается к работе оптическая труба, установленная на расстоянии 30 см от коллиматора ¹⁾. При работе во вполне темном помещении упомянутое расстояние может, конечно, иметь любое значение. Для работы труба при помощи описанных ранее винтов направляется вдоль оптической оси коллиматора. На пути светового пучка устанавливается зеленый светофильтр. Поместив глаз вблизи окуляра, плавно изменяют направление трубы до тех пор, пока в ней не появится пятно зеленого света. Только после этого вращением головки кремальеры трубы следует фокусировать изображение входной щели коллиматора, не изменяя произведенной ранее фокусировки креста в окуляре.

После того как получено резкое изображение щели коллиматора ²⁾, плавным вращением установочных винтов трубы приводят изображение щели в центр поля зрения трубы. Никаких световых пятен, бликов, кроме изображения щели, при этом в поле зрения трубы быть не должно. Если все эти условия выполнены, установку можно считать подготовленной к измерениям.

Измерения и их обработка. Для измерений на середине расстояния между трубой и коллиматором помещаются поочередно

¹⁾ Нормальному режиму лампы соответствует сила тока около 1а. Лампа разгорается через 3—5 минут после ее включения.

²⁾ Ширина щели (около 0,05 мм) и используемый осветитель обеспечивают яркое изображение щели, заметить которое не представляет никаких трудностей даже при дневном свете комнаты. Отсутствие изображения может быть вызвано исключительно неправильной ориентацией трубы. Отыскание изображения щели коллиматора производится, разумеется, в отсутствие дифракционных объектов между трубой и коллиматором. Искомой установке трубы на бесконечность соответствует приблизительно отсчет 11,3 по нониусу на окулярном тубусе трубы.

обе ползушки; либо со столиком и раздвижной щелью, либо с держателем щелей постоянной ширины и экранчиком. При этом в трубе можно наблюдать различные дифракционные картины.

Изучению и измерению подлежит пространственное распределение максимумов и минимумов наблюдаемых дифракционных картин. Все измерения производятся при наведении креста окулярного микрометра на соответствующие участки дифракционной картины при помощи вращения барабана окулярного микрометра при неизменном, разумеется, положении всех прочих регулировочных подач трубы. Отсчеты, соответствующие каждой наводке креста, прочитываются на шкале и барабане микрометра и записываются.

Известно, что для явлений дифракции в параллельных лучах (так называемая фраунгоферова дифракция) характерным являются направления, в которых распространяются дифрагировавшие световые пучки. Для того чтобы перейти от линейных измерений микрометром картин, получившихся в фокальной плоскости трубы, к углам, определяющим направления дифрагировавших световых волн, надо взять отношение перемещений креста микрометра при последовательном визировании на два направления (первоначального и дифрагировавшего лучей) к фокусному расстоянию объектива зрительной трубы $F = 42 \text{ см}^1$).

График дифракционной картины можно и приближенно построить непосредственно по отсчетам микрометра.

Далее, очевидно, что микрометр позволяет определять только положение максимумов или других характерных элементов дифракционной картины, но не интенсивность света в этих участках. Однако для той части результатов наблюдений, которая будет представлена в виде графиков, важно давать хотя бы совсем приближенную, относительную оценку интенсивности участков дифракционной картины.

Упражнение 1

Дифракция на одной щели

Приступая к наблюдению дифракционных картин, надо иметь в виду следующие обстоятельства. Во-первых, при наблюдении дифракции на объекте с малым числом щелей резко уменьшается световой поток, попадающий в объектив. Поэтому надо тщательно

¹⁾ При измерениях ширины максимумов в картине со многими максимумами лучше визировать на середину минимумов между близкими максимумами, если это допускает интенсивность картин. При измерениях углов дифракций нет необходимости отсчитывать их всегда от направления на максимум нулевого порядка. Точнее, измерять двойные углы между симметрично расположенными частями дифракционной картины и потом делить результаты на два, получая, таким образом, значения углов дифракции, которые входят в расчетную формулу.

центрировать поперечными перемещениями конденсора изображение разряда в лампе на входной щели коллиматора, добиваясь оптимальной для глаза яркости картины (не следует забывать затягивать зажим осветителя на скамье в каждом его новом положении).

Может оказаться, что при наблюдении дифракционной картины от одной узкой щели, или от небольшого числа узких щелей крест микрометра будет плохо заметен на фоне дифракционной картины. В таком случае надо временно выдвинуть в сторону рамку со светофильтром и, пользуясь дифракционной картиной в белом свете, поставить крест микрометра на одну из светлых полосок картины, что уже не представит затруднения. После этого, поставив на место светофильтр, уже нетрудно заметить крест микрометра. В дальнейшем для измерений следует крест медленно передвигать, улавливая его появление на соседней и последующих светлых полосках дифракционной картины. При этом надо наперед знать, в какую сторону будет смещаться крест при вращении барабана микрометра в ту или иную сторону. Все трудные — вследствие малой интенсивности — наблюдения дифракционной картины надо вести в затемненной комнате, адаптируя глаз не менее 1—3 минут для каждой картины.

Во-вторых, надо иметь в виду, что резкость контуров дифракционных максимумов никогда, по самому существу дела, не может быть такой же, как у изображения щели коллиматора при ее прямом наблюдении в трубу. Поэтому, наблюдая дифракционные картины в параллельных лучах, бессмысленно пытаться их «лучше сфокусировать», если труба была предварительно установлена на бесконечность при помощи наблюдения щели коллиматора.

В-третьих, надо помнить также, что перефокусировка по каким-либо причинам креста нитей в окуляре расфокусирует всю трубу и после такой операции необходимо, сняв объект со скамьи, вновь сфокусировать щель коллиматора при помощи кремальеры, точно так, как это было сделано перед началом измерений.

Порядок дальнейших операций следующий:

1. Поместить на скамью столик с раздвижной щелью и провести несколько раз качественные наблюдения над дифракционной картиной, изменяя ширину раздвижной щели. Следует начинать с широкой щели, когда видна многолинейчатая дифракционная картина, и, уменьшая ширину щели, заканчивать, когда в поле зрения окуляра виден только один широкий и слабый дифракционный максимум нулевого порядка.

2. Сняв со скамьи столик с раздвижной щелью, поставить на скамью столик со стойкой для прорезных щелей. В эту стойку помещаются щели разной ширины¹⁾.

¹⁾ Перечень используемых в работе щелей приложен непосредственно к установке.

Промерить микрометром положение нескольких максимумов и минимумов дифракционной картины, ширину центрального максимума и построить график этой картины. Дифрагирующий объект располагается приблизительно посередине между объективами трубы и коллиматора. Измерения проводятся с зеленым светофильтром.

3. Найти угловую ширину $\Delta\alpha$ центрального дифракционного максимума.

4. Пользуясь условием, что угловая ширина $\Delta\alpha$ центрального дифракционного максимума связана с шириной щели b и длиной световой волны λ соотношением $\Delta\alpha = 2\lambda/b$, найти длину используемой световой волны λ . Это будет приближенное значение λ . (более точное значение определяется в упражнении 3).

Упражнение 2

Дифракция на двух и более щелях

Объектом исследования служит укрепленная на стойке зачерненная фотопластинка с прорезанными на ее эмульсии двумя щелями, или металлическая пластинка с пропиленными щелями. В ходе выполнения упражнения надлежит:

1. Качественно наблюдать изменение дифракционной картины при закрывании одной из щелей экранчиком.

2. Промерить положение и ширину главных дифракционных максимумов. Результаты представить в виде таблицы и графика ¹⁾.

3. Найти угловую ширину главных дифракционных максимумов.

4. Воспользовавшись значением длины волны λ , найденным из измерений с отдельной щелью и условием, что направления на главные максимумы дифракционной картины удовлетворяют соотношению $d \sin \varphi = n\lambda$, найти значение постоянной решетки d ($d = a + b$), где b — ширина каждой щели и a — ширина непрозрачного промежутка между щелями, n — порядок дифракционного максимума. Полагая $\sin \varphi \approx \varphi \approx \Delta x/f$, найти φ — угол дифракции, т. е. угол между направлением на данный дифракционный максимум и на максимум нулевого порядка.

Вставляют по очереди в стойку пластинки с разным числом прорезанных щелей и производят измерения положения и по воз-

¹⁾ При работе с несколькими щелями и различными дифракционными решетками могут возникнуть затруднения с идентификацией центрального дифракционного максимума (максимума нулевого порядка) среди прочих близлежащих дифракционных максимумов. В таких случаях надо на время выдвинуть светофильтр из светового пучка. Тогда максимум нулевого порядка может быть идентифицирован по отсутствию окраски как полоска спектрально неразложенного белого света. О способе визирования и измерения углов дифракции см. примечание к стр. 502.

возможности ширины главных максимумов дифракционной картины. Результаты представить в виде таблицы и графика. Находят угловую ширину главных максимумов и значения постоянных d для всех исследуемых решеток.

Упражнение 3

Дифракционные решетки

1. Промерить положение главных дифракционных максимумов нескольких порядков, используя решетки с известной постоянной. Найти точнее значение длины волны зеленой линии спектра ртути, определенное ранее из картин дифракции на отдельной щели.

2. Выдвинуть светофильтр из светового пучка и, промеряя одну дифракционную картину с наилучшим разрешением спектральных линий, найти длину волны желтой и фиолетовой линий спектра ртути.

3. Ведя наблюдения без светофильтра, убедиться в том, что разрешающая способность дифракционной решетки определяется числом штрихов решетки и порядком дифракционного спектра. При этом надо так варьировать освещенность входной щели коллиматора, чтобы яркость дифракционной картины осталась постоянной.

Технические данные установки. В установке используется ртутная лампа ДРС-50, могут быть также применены лампы марок ПРК-4 и ПРК-2, выпускаемые нашими заводами. Коллиматорным объективом служит Индустар И-13 с фокусным расстоянием 30 см. В качестве окуляра к зрительной трубе с фокусным расстоянием 42 см использован винтовой окулярный микрометр марки АМ-9. Установка может быть собрана на оптической скамье марки ОСК-1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. Г. С. Горелик, Колебания и волны, Физматгиз, 1959.

ЗАДАЧА 138

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЙ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА КРУГЛЫХ И ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЯХ И ДИСКАХ

Известны два существенно различных случая дифракционных явлений.

В первом случае расстояние от точечного источника света до дифракционного отверстия (или препятствия) и расстояние от последнего до точки наблюдения дифракционной картины очень велики или бесконечны. В этом случае имеет место дифракция плоских световых волн, так называемая *дифракция Фраунгофера*. Обычно освещение дифракционного отверстия осуществляется при

помощи светового пучка, идущего из коллиматора, а наблюдение дифракционной картины ведется в зрительную трубу. Коллиматор и зрительная труба установлены на бесконечность. Распределение интенсивности света в дифракционной картине определяется направлением распространения дифрагированных плоских световых волн и зависит от длины световой волны и формы и размеров отверстия.

Во втором случае оба упомянутых выше расстояния (или хотя бы одно из них) конечны. В этом случае имеет место дифракция сферических (или плоских и сферических) световых волн, так называемая *дифракция Френеля*. Наблюдение дифракционной картины производится при помощи лупы или микроскопа. Распределение интенсивности света в дифракционной картине определяется не только длиной световой волны и диаметром отверстия, но и расстоянием от источника света до отверстия и от отверстия до точки наблюдения. Непрерывно изменяя расстояние от отверстия до точки наблюдения, можно изучить распределение интенсивности света во всем пространстве за отверстием, получающееся в результате дифракции Френеля.

Существенные различия этих случаев дифракционных явлений приводят естественно к тому, что настоящая задача делится на две в значительной степени самостоятельные части, каждая из которых служит для изучения одного из основных случаев дифракционных явлений.

Часть первая

Изучение явлений дифракции плоских световых волн на круглых и прямоугольных отверстиях и дисках (дифракция Фраунгофера)

Описание приборов. Оптическая схема, служащая для наблюдения явлений дифракции плоских световых волн, изображена на рис. 1.

Свет от источника линейчатого спектра S проходит через конденсор L и светофильтр P и падает на круглое входное отверстие

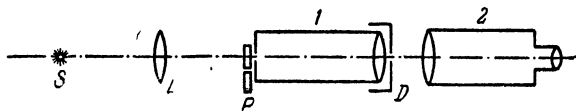


Рис. 1.

коллиматора I , играющее роль точечного источника света, расположенного в фокусе объектива коллиматора.

Плоские световые волны, выходящие из объектива коллиматора, падают на экран D с круглым или прямоугольным отверстием, на котором и происходят изучаемые дифракционные явления. Далее располагается установленная на бесконечность зрительная

труба 2, при помощи которой производятся наблюдения дифракционных картин.

Практически описанная оптическая схема реализуется в первой части задачи следующим образом. Все приборы расположены на оптической скамье в порядке, соответствующем оптической схеме (рис. 1).

Ртутная лампа сверхвысокого давления (СВДШ-250) заключена в специальный кожух с окнами для прохождения света. В эти окна вставлены стекла, предохраняющие находящиеся в лаборатории от действия ультрафиолетового излучения лампы. Конденсором служит линза с фокусным расстоянием $F = 75$ мм.

Для получения возможно более параллельного светового пучка круглое входное отверстие коллиматора имеет очень небольшой диаметр (0,05 мм). Это отверстие сделано в тонкой алюминиевой фольге, которая укреплена вместе с защищающим ее от механических повреждений стеклом в специальной оправе. Коллиматор установлен на бесконечность. На оправе входного отверстия коллиматора имеется специальное приспособление, позволяющее легко вдвигать в световой пучок светофильтры для выделения отдельных спектральных линий ртути (зеленой линии $\lambda = 5460$ Å и желтой линии $\lambda = 5780$ Å). На оправу объектива коллиматора могут поочередно надеваться круглые крышки, на которых размещены дифракционные объекты.

Зрительная труба с окулярным микрометром установлена на бесконечность. Установке на бесконечность соответствует нулевой отсчет по продольной шкале выдвижного патрубка. Плавное перемещение этого патрубка с окулярным микрометром производится при помощи кремальеры. Зрительная труба укреплена на специальном штативе, позволяющем оптимальным образом ориентировать ее в пространстве.

Окулярный микрометр служит как для наблюдения, так и для промеров дифракционных картин. Для этого окуляр имеет микрометрический винт, головка которого представляет барабан с делениями. Цена одного деления барабана 0,01 мм. Отсчет целых оборотов барабана производится по продольной неподвижной шкале, видимой из-под края барабана.

Исследуемые дифракционные объекты сделаны следующим образом. Круглые отверстия фиксированного диаметра непосредственно просверлены в упомянутых выше круглых крышках, надеваемых на объектив коллиматора. В качестве круглого отверстия с плавно изменяющимся диаметром используется ирисовая диафрагма, укрепленная на такой же крышке. Величина диаметра диафрагмы определяется по шкале, нанесенной на крышке под рычажком диафрагмы. Прямоугольное отверстие выполнено в виде рамки, внутренняя сторона которой образована обыкновенными лезвиями от безопасной бритвы.

Для получения дифракционной картины достаточно больших угловых размеров необходимо использовать очень небольшое дифракционное отверстие. Однако такое отверстие пропускает мало света и получающаяся от него дифракционная картина имеет недостаточную для визуального наблюдения интенсивность, даже при использовании в качестве источника света такой яркой лампы, как СВДШ-250. Эту трудность можно обойти следующим образом. Из теории известно, что в случае дифракции плоских световых волн перемещение отверстия в плоскости экрана не должно сказываться на форме и угловых размерах дифракционной картины. Поэтому если в экране сделать много беспорядочно расположенных одинаковых отверстий, то дифракционная картина от них будет такая же, как и от одного отверстия, а ее интенсивность будет равна сумме

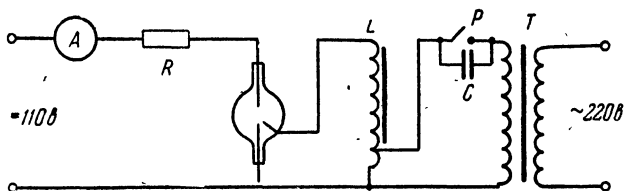


Рис. 2.

интенсивностей, даваемых каждым отверстием в отдельности. Беспорядочное расположение отверстий (дисков) позволяет избежать интерференционных эффектов, зависящих не от формы и размеров отдельного отверстия, а от порядка в их расположении на экране.

На основании изложенных соображений изготовлены крышки с большим числом беспорядочно расположенных одинаковых малых круглых отверстий, позволяющих наблюдать дифракционные картины достаточной интенсивности.

Для наблюдения дифракции на дисках использован тот же принцип. В круглом окошке в одной из крышек между двумя стеклами зажата фотопленка, на которой фотографическим путем нанесены в полном беспорядке непрозрачные кружки одинакового диаметра.

В комплект дифракционных объектов входят:

- 1) ирисовая диафрагма,
- 2) одиночное отверстие диаметром 0,90 мм,
- 3) множество отверстий диаметром 0,90 мм,
- 4) множество отверстий диаметром 0,50 мм,
- 5) прямоугольное отверстие 0,59 × 0,92 мм,
- 6) стекло с множеством нанесенных на него непрозрачных кружков диаметром 0,52 мм.

Схема электрической части установки, обеспечивающей питание и поджиг ртутной лампы СВДШ-250, а также контроль режима работы, изображена на рис. 2.

К лампе СВДШ-250 подводится постоянное напряжение 110 в. После поджига лампы протекающий через нее ток измеряется амперметром A (0—10 а). Ток в лампе ограничивается сопротивлением R — реостатом с закрепленным в определенном положении движком.

Для первоначального поджига газового разряда в этой лампе имеется специальный электрод в форме острия. К этому острию подводят импульсы высокого напряжения для создания искрового разряда, который и вызывает возникновение дуги. Импульсы высокого напряжения создаются в особой пусковой части электрической схемы. Она состоит из индукционной катушки L с железным сердечником, емкости C , прерывателя и понижающего трансформатора T 220/12 в, первичная обмотка которого включается в сеть (220 в). При замкнутом прерывателе через небольшую часть витков катушки протекает переменный ток, поступающий со вторичной обмотки понижающего трансформатора. При размыкании цепи прерывателем P в индукционной катушке индуцируется импульс высокого напряжения порядка 10—15 кв. Прерыватель выполнен в виде звонковой кнопки.

Подготовка установки к измерениям. Подготовка установки к измерениям проводится следующим образом:

1. Прежде всего следует провести фокусировку окулярного микрометра. Для этого его нужно снять с зрительной трубы, приблизить к глазу и направить на удаленный светящийся предмет (окно, плафон лампы, потолок). Плавным вращением рифленого кольца окуляра нужно добиться того, чтобы крест и шкала с делениями были четко видны. После этого окуляр надевается до упора на патрубок зрительной трубы и закрепляется зажимным винтом.

2. Далее под руководством преподавателя или лаборанта осуществляется пуск ртутной лампы сверхвысокого давления СВДШ-250. Подготовка к пуску заключается в следующем. В розетку « = 110 в » включается вилка шнура питания лампы. В розетку « ~ 220 в » включается вилка шнура первичной обмотки понижающего трансформатора пускового устройства. После этого лаборант проверяет готовность электрической части установки и включает на распределительном щитке рубильники « ~ 220 в » и « = 110 в ».

Для пуска лампы следует несколько раз нажать и отпустить кнопку пускового устройства. В момент зажигания ток лампы должен иметь значение порядка 10 а. Далее следует процесс разогревания лампы, продолжающийся примерно 5 мин. В течение этого времени необходимо внимательно следить за показаниями амперметра. По мере разогревания лампы сила тока постепенно падает до значения 3,5—4 а, являющегося нормальным для рабочего режима лампы.

После того как лампа станет гореть устойчиво, можно прекратить непрерывное наблюдение за показаниями амперметра, однако

в течение всей работы периодический контроль режима лампы необходим. В случае резкого изменения режима работы лампы необходимо сразу выключить лампу, вынув вилку из розетки «= 110 в», и позвать лаборанта для устранения неполадок. *Снятие кожуха с лампы или удаление защитного стекла из его окна студентам категорически воспрещается.*

3. Установить зрительную трубу на бесконечность. Для этого необходимо при помощи кремальеры установить нуль на шкале выдвижного патрубку против обреза неподвижной части зрительной трубы. Поставив один из светофильтров перед входным отверстием коллиматора, посмотреть в окуляр зрительной трубы. В нем должно быть видно резкое яркое изображение входного отверстия коллиматора, который уже установлен на бесконечность и не подлежит регулировке.

Измерения и их обработка. На объектив коллиматора поочередно надеваются крышки с дифракционными объектами. При этом в зрительную трубу можно наблюдать различные дифракционные картины.

Изучению и измерению подлежит пространственное распределение максимумов и минимумов наблюдаемых дифракционных картин. Все измерения производятся путем наведения креста окулярного микрометра на соответствующие участки дифракционной картины при помощи вращения барабана микрометра. Отсчеты, соответствующие каждой наводке креста, прочитываются на неподвижной шкале и барабане окулярного микрометра и записываются.

Все наблюдаемые в этом упражнении дифракционные картины обладают центральной симметрией, и пространственное распределение в них максимумов и минимумов однозначно определяется измерением их положений относительно центра картины. Поэтому удобно производить отсчеты по горизонтальной линии, пересекающей центр картины.

Известно, что для явлений дифракции плоских световых волн характерным параметром являются направления, по которым распространяются дифрагированные световые пучки. Для перехода от линейных измерений микрометром в фокальной плоскости объектива зрительной трубы к углам дифракции надо взять отношение перемещений креста микрометра Δx при последовательном визировании на два направления (первоначального и дифрагировавшего световых пучков) к фокусному расстоянию объектива зрительной трубы. Так следует поступать, когда при обработке результатов измерений потребуются абсолютные значения углов дифракции, входящие в расчетные формулы.

Визирование креста микрометра в центр дифракционной картины часто бывает затруднительным из-за сравнительно больших размеров центрального максимума и может привести к снижению точности измерения. С большей точностью могут быть определены

диаметры светлых и темных колец в случае круглого отверстия и расстояния между симметричными максимумами и минимумами в случае прямоугольного отверстия. Указанная выше величина Δx находится в этом случае как половина диаметра дифракционного кольца или полного расстояния между симметричными максимумами.

Все наблюдения дифракционных картин следует вести в затемненной комнате, адаптируя глаз не менее 1—3 минут для каждой картины. Упражнения рекомендуется проводить в следующем порядке.

Упражнение 1

Дифракция на круглом отверстии

В этом упражнении производятся первые качественные наблюдения дифракции света на круглом отверстии.

Надеть на объектив коллиматора крышку с ирисовой диафрагмой, предварительно определив, при каком положении рычажка она открыта и при каком имеет минимальный диаметр. Наблюдать, как изменяется изображение входного отверстия коллиматора при постепенном уменьшении диаметра отверстия диафрагмы. Определить величину диаметра диафрагмы, при котором изображение входного отверстия теряет четкость и, постепенно размываясь, переходит в дифракционную картину.

Надеть на объектив коллиматора крышку с одиночным отверстием диаметром 0,90 мм и зарисовать наблюдаемую от него дифракционную картину.

Упражнение 2

Дифракция на множестве круглых отверстий

Надеть на объектив коллиматора поочередно сначала крышку с отверстиями диаметром 0,90 мм, а затем крышку с отверстиями диаметром 0,50 мм. Произвести измерения положений максимумов и минимумов для обоих значений диаметров отверстий. Для каждого значения диаметра провести два измерения с разными светофильтрами.

Пользуясь расчетными формулами для направлений максимумов и минимумов, определить длины световых волн, выделяемых использованными светофильтрами из спектра ртутной лампы.

Приведем расчетные формулы для дифракции плоских световых волн на круглом отверстии:

$$\text{для минимумов} \quad \frac{R}{\lambda} \sin \varphi_n = 0,61; \quad 1,12; \quad 1,62; \quad 2,12,$$

$$\text{для максимумов} \quad \frac{R}{\lambda} \sin \varphi'_n = 0; \quad 0,81; \quad 1,33; \quad 1,85.$$

Здесь R — радиус отверстия, λ — длина световой волны; φ — угол дифракции, т. е. угол между направлением первичного светового пучка и направлением, соответствующим максимуму или минимуму интенсивности дифрагировавшего света.

Упражнение 3

Дифракция на дисках

Надеть на объектив коллиматора крышку, в окне которой между стеклами зажата фотопленка с отпечатками непрозрачных дисков малого диаметра.

Наблюдать качественно дифракционную картину. Сравнить ее с дифракционной картиной, наблюдаемой от круглых отверстий. Объяснить особенности дифракционной картины с точки зрения принципа Бабиня (см., например, [2]).

Упражнение 4

Дифракция на прямоугольном отверстии

Надеть на объектив коллиматора крышку с прямоугольным отверстием. Наблюдать дифракционную картину и установить связь между ориентировкой картины в поле зрения окуляра и ориентировкой сторон прямоугольного отверстия на объективе коллиматора. Обратит внимание на наличие в углах дифракционной картины слабых вторичных максимумов, объяснить их происхождение.

Поворачивая крышку коллиматора, произвести измерения дифракционной картины по двум направлениям, перпендикулярным к сторонам отверстия. Для каждого направления произвести два измерения с разными светофильтрами. Используя расчетные формулы, определить длины световых волн, выделяемых светофильтрами из спектра ртутной лампы.

Приводим расчетные формулы для дифракции плоских световых волн на прямоугольном отверстии:

$$\text{для минимумов } \sin \psi_n = n \frac{\lambda}{A}, \quad \sin \varphi_m = m \frac{\lambda}{B},$$

$$\text{для максимумов } \sin \psi'_n = C_n \frac{\lambda}{A}, \quad \sin \varphi'_m = C_m \frac{\lambda}{B},$$

где A и B — размеры сторон прямоугольного отверстия, а n и m — целые числа и $C_0 = 0, C_1 = 1,43, C_2 = 2,45, C_3 = 3,47, C_4 = 4,48...$

Часть вторая

Изучение явления дифракции сферических волн на круглом отверстии
(дифракция Френеля)

Описание приборов. Оптическая схема для наблюдения явления дифракции сферических световых волн на круглом отверстии изображена на рис. 3.

Свет от источника линейчатого спектра S проходит через конденсор L и светофильтр P и падает на круглое отверстие S' малого диаметра, играющее роль точечного источника света. В дальнейшем мы будем называть это отверстие входным. Распространяющиеся от него сферические волны падают на круглое отверстие D , на котором и происходит изучаемое явление дифракции света. Далее располагается окуляр, при помощи которого производятся наблюдения дифракционных картин на разных расстояниях за отверстием.

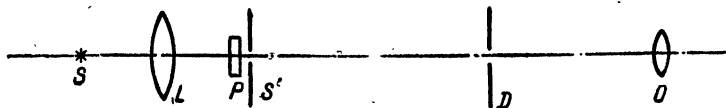


Рис. 3.

Практически описанная схема реализуется следующим образом. Приборы расположены на оптической скамье в порядке, соответствующем оптической схеме (рис. 3).

В этой части задачи используется та же ртутная лампа сверхвысокого давления, которая используется в первой части задачи. Конденсором служит линза с фокусным расстоянием 75 мм. Входное отверстие, имеющее диаметр 0,05 мм, сделано в тонкой алюминиевой фольге, установленной вместе с защищающим ее от механических повреждений стеклом в специальной оправе на трубе. На противоположном конце этой же трубы укреплен металлический диск с просверленным в его центре круглым дифракционным отверстием, диаметр отверстия 0,60 мм.

На оправе входного отверстия имеется приспособление позволяющее легко вдвигать в световой пучок светофильтр для выделения зеленой линии ртути, $\lambda = 5460 \text{ \AA}$.

Положение на скамье лампы, конденсора и трубы с входным и дифракционным отверстиями фиксированы и не подлежат изменению. Окуляр установлен на поперечных салазках с винтовой подачей. Его можно передвигать вдоль оптической скамьи и его рейтер имеет специальный вырез с отметкой для отсчета положения окуляра по масштабной линейке, укрепленной на оптической скамье.

Подготовка установки к измерениям. 1. Под руководством преподавателя или лаборанта произвести включение и зажигание ртутной лампы сверхвысокого давления. Порядок проведения этой операции изложен выше при описании первой части задачи (см. стр. 509).

2. Ввести в световой пучок светофильтр.

3. Придвинуть окуляр к дифракционному отверстию и при помощи поперечных салазок установить его в такое положение, при котором дифракционная картина будет видна в центре поля зрения окуляра.

Измерения и их обработка. Освещенность центра дифракционной картины в случае дифракции сферических световых волн зависит от числа полностью открытых зон Френеля n , которое определяется по формуле (см. [1])

$$n = \frac{D^2}{4\lambda} \frac{a+b}{ab},$$

где D — диаметр отверстия, a и b — расстояния центра отверстия соответственно от источника света (входного отверстия) и от точки наблюдения, λ — длина световой волны.

Возможны два варианта изучения рассматриваемого явления. В первом варианте изучается зависимость освещенности центра дифракционной картины от диаметра отверстия при неизменных расстояниях a и b . Во втором варианте изучается зависимость освещенности центра дифракционной картины от величины одного из расстояний, a или b , при неизменных величинах другого расстояния и диаметра дифракционного отверстия.

В настоящей задаче применен второй вариант, т. е. изучается зависимость освещенности центра картины от расстояния точки наблюдения от отверстия b при фиксированных и известных величинах диаметра отверстия ($D = 0,6$ мм) и его расстояния от источника света (входного отверстия) $a = 300$ мм.

Для ряда значений расстояний b экспериментально (описываемым ниже способом) определяется число открытых зон Френеля n .

Полученный таким образом ряд пар соответственных значений b_n и n используется для вычисления из приведенной выше формулы длины световой волны λ .

Измерения производятся в следующем порядке. Сначала окуляр приближают к дифракционному отверстию и добиваются такого положения, при котором края отверстия четко видны в окуляр. Очевидно, что при этом точка наблюдения совпадает с плоскостью отверстия. Соответствующее положение окуляра отсчитывают по масштабной линейке, укрепленной на оптической скамье, и полученный отсчет записывают. Этот отсчет в дальнейшем мы будем называть нулевым, так как при этом расстояние между отверстием и точкой наблюдения $b = 0$. Затем, постепенно отодвигая окуляр

от дифракционного отверстия, наблюдают изменения освещенности центра дифракционной картины при непрерывном увеличении расстояния b . При этом наблюдается чередование света и темноты в центре картины. Известно, что минимальная освещенность наблюдается, когда открыто четное число зон Френеля. По мере удаления точки наблюдения от дифракционного отверстия число открытых зон Френеля уменьшается. В описанной выше установке величины диаметра отверстия и его расстояния от источника света (от входного отверстия), а затем интервал возможных перемещений окуляра подобраны таким образом, чтобы при максимальном удалении окуляра от отверстия была открыта примерно одна зона Френеля.

Учитывая это обстоятельство, легко можно определить число открытых зон Френеля для каждого положения окуляра, при котором наблюдается минимум освещенности центра картины. Для этого из наиболее удаленного от отверстия положения окуляра, при котором открыта одна зона Френеля и в центре картины наблюдается свет, окуляр нужно постепенно приближать к отверстию.

Первое появление темноты в центре картины будет означать, что полностью открыто две зоны Френеля; соответствующее положение рейтера окуляра отсчитывается и записывается. При дальнейшем приближении окуляра снова свет сменится темнотой в центре картины. Это будет означать, что открыты четыре зоны Френеля и т. д. Таким образом, берут отсчеты всех последовательных положений рейтера окуляра, при которых наблюдается минимальная освещенность центра картины, записывая одновременно число n полностью открытых в этих положениях зон Френеля.

Расстояния каждого из найденных положений точки наблюдения от дифракционного отверстия b_n находят, беря разности соответствующих им отсчетов положений рейтера окуляра и нулевого отсчета. Из полученных для каждого положения точки наблюдения значений b_n и n по расчетной формуле вычисляют длину световой волны.

Технические данные установки. В работе используются объектив коллиматора И-13 ($F = 300$ мм), зрительная труба ОТ-1 ($F = 270$ мм); конденсорные линзы 3—4-кратные лупы; лампа СВДШ-250; в пусковом устройстве используется автомобильная bobина.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. А. Зоммерфельд, Оптика, ИЛ, 1953.
3. Р. В. Поль, Оптика и атомная физика, «Наука», 1966.

ЗАДАЧА 139

ЗОННАЯ ПЛАСТИНКА

Целью настоящей задачи является изучение дифракции Френеля и ее применение для объяснения принципа действия зонных пластинок. В данной задаче применяется отражательная зонная пластинка — вогнутое сферическое зеркало, с поверхности которого снят кольцами по определенному закону зеркальный слой.

Рассмотрим сначала плоскую зонную пластинку, работающую в проходящем свете. Между источником света (точка A на рис. 1) и точкой наблюдения B поместим зонную пластинку Σ так; чтобы разность оптических путей между лучами, проходящими через соседние прозрачные кольца, составляла $\pm \lambda$. Тогда, как известно,

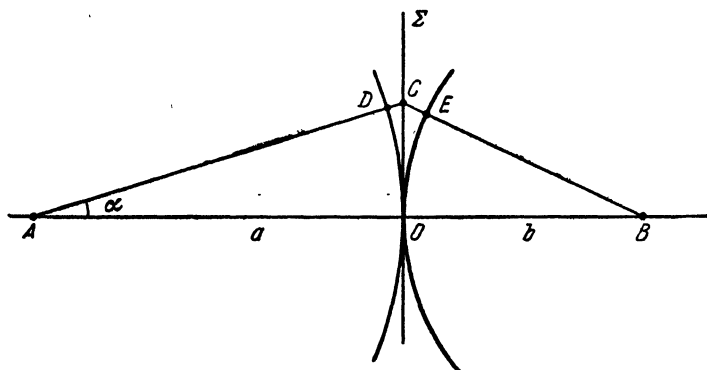


Рис. 1.

в точке B мы увидим изображение источника. В этом случае расположение прозрачных колец пластинки и их размеры будут совпадать с расположением и шириной зон Френеля, радиусы которых связаны с расстояниями источника и его изображения от центра пластинки приближенным соотношением:

$$r_n = \sqrt{\frac{ab}{a+b} n\lambda}. \quad (1)$$

Обычно этим соотношением руководствуются при изготовлении зонных пластинок, работающих в проходящем свете. Однако изготовить их весьма трудно, так как даже в пластинках небольших размеров диаметром около 10 мм число зон достигает нескольких тысяч, если расстояния a и b невелики и составляют несколько десятков сантиметров.

Для получения зонной пластинки больших размеров с широкими кольцами С. М. Райский предложил использовать вогнутое сферическое зеркало, с поверхности которого снят кольцами отра-

жающий слой. Рассчитаем, каковы должны быть размеры оставшихся зеркальных колец, чтобы они совпадали с зонами Френеля. Для этого необходимо, чтобы разность хода двух лучей, отраженных от двух соседних колец, составляла $\pm \lambda$. Обратимся к рис. 2.

Пусть Σ — поверхность сферического зеркала радиуса R с центром кривизны в точке O . В точках A и B находятся соответственно источник света и его изображение. Расстояния от источника до зеркала обозначим a , от изображения до зеркала b . Найдем

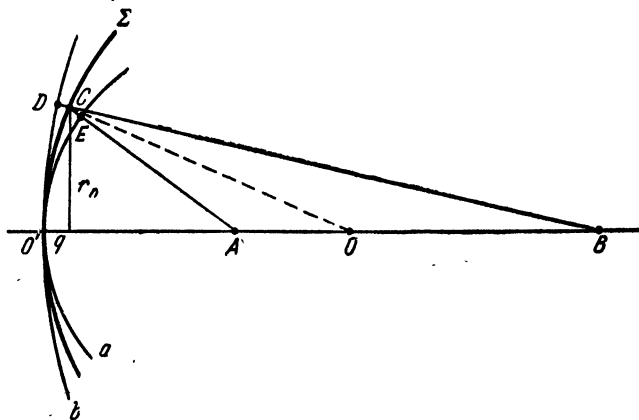


Рис. 2.

разность оптических путей двух лучей, один из которых отражается от некоторой произвольной точки зеркала C , а второй — от центра зеркала O' .

Из рис. 2 видно, что эта разность равна

$$\Delta = S - S_0 = ACB - AO'B = EC - CD,$$

причем

$$EC = \sqrt{r_n^2 + (a - q)^2} - a, \quad (2)$$

$$CD = b - \sqrt{r_n^2 + (b - q)^2}. \quad (3)$$

Здесь r_n — расстояние точки C до оси зеркала, а $q = R - \sqrt{R^2 - r_n^2}$. Подставляя значения q в (2) и (3) и пренебрегая членами, содержащими r_n в степени выше второй, приближенно получим

$$\Delta = S - S_0 = CE - CD = \frac{r_n^2}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} - \frac{2}{R} \right). \quad (4)$$

Чтобы изготовить вогнутую отражательную зонную пластинку, дающую изображение точки A в точке B , следует оставить на поверхности зеркала лишь такие кольцевые зоны, отражающие свет, для которых разность хода Δ принимает значения 0 (для центрального отражающего диска), $\pm \lambda$ (для первого отражающего кольца),

$\pm 2\lambda$ (для второго отражающего кольца)... $\pm m\lambda$ (для m -го отражающего кольца).

Если эти условия соблюдены с точностью до $\pm \lambda/4$, то отражающие кольца на поверхности зеркала по своим размерам и расположению совпадут с зонами Френеля при данном положении точек A и B . Пусть снят зеркальный слой со всех четных зон Френеля. Тогда, если центральному отражающему диску приписан индекс $m = 0$, ширина каждого m -го зеркального кольца будет равна ширине n -й зоны Френеля при $n = 2m + 1$, а внутренний радиус кольца совпадает с внешним радиусом n -й зоны, т. е. $r_m = r_n$ при $m = n/2$.

Итак, для получения изображения в точке B необходимо, чтобы $\Delta = \pm m\lambda$, а величина r_n равна радиусу n -й зоны Френеля или внутреннему радиусу m -го отражающего кольца. Тогда соотношение (4) примет следующий вид:

$$\pm \frac{2m\lambda}{r_m^2} = \pm \frac{n\lambda}{r_n^2} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} - \frac{2}{R}. \quad (5)$$

Проанализируем полученное выражение: при $R = \infty$ (плоское зеркало) формула (5) переходит в выражение (1), выведенное для зонной пластинки, работающей в проходящем свете.

При $m = 0$ выражение (5) переходит в обычную формулу для вогнутого сферического зеркала, а размеры первой зоны становятся произвольными. Полученное при этом изображение называют геометрическим или дифракционным изображением нулевого порядка, так как в точку изображения все лучи приходят без сдвига фаз.

Далее, если $m \neq 0$, то присутствие в формуле (5) двух знаков означает, что имеется два изображения источника. Если оптический путь от источника к изображению для нецентрального луча больше, чем для центрального, т. е. $S_B - S_0 > 0$, то точка B будет находиться ближе к поверхности зеркала, чем геометрическое (нулевое) изображение, если же $S_B - S_0 < 0$, то точка B будет находиться по другую сторону геометрического изображения, дальше от поверхности зеркала. Особенно наглядно это иллюстрирует рис. 3, на котором источник света помещен в центре кривизны зеркала в точке O .

Эти два изображения B' и B'' называют дифракционными изображениями первого порядка, так как в этом случае, подчеркнем еще раз, разность хода между лучами, отраженными от двух соседних отражающих колец зонной пластинки, равна $\pm \lambda$.

Зонные пластинки дают также по два дифракционных изображения 3-го, 5-го, 7-го и т. д. порядков, расположенных по обе стороны от геометрического (нулевого) изображения.

Дифракционные изображения 3-го порядка создаются в тех точках оптической оси, для которых при данном положении источ-

ника на поверхности каждого отражающего кольца укладывается по три зоны Френеля. Однако изображения 3-го порядка образованы лучами, приходящими лишь из одной нескомпенсированной зоны на поверхности каждого зеркального кольца (волны, приходящие от двух смежных зон, смещены по фазе на $\pi/2$ и, интерферируя в точках изображений, дают амплитуду, равную нулю). Следовательно, лучи, участвующие в создании изображений ± 3 -го порядка, приходят из соседних отражающих колец зеркала с разностью хода $\pm 3\lambda$, а интенсивность изображений приблизительно в 9 раз меньше интенсивности ± 1 -го порядка.

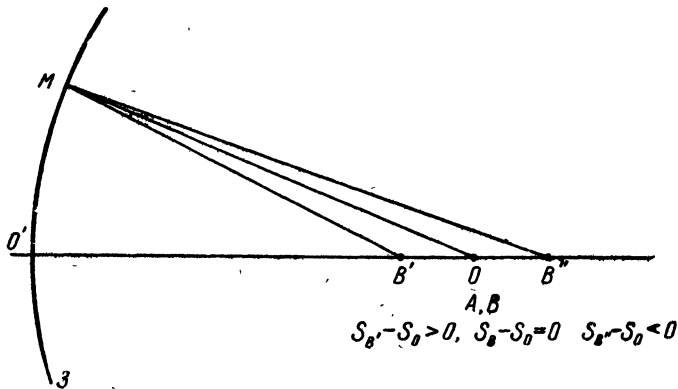


Рис. 3.

Дифракционные изображения ± 5 -го порядка создаются в тех точках на оптической оси, для которых при данном положении источника на поверхности каждого отражающего кольца укладывается по пять зон Френеля. Лучи, участвующие в образовании изображений ± 5 -го порядка, приходят из соседних отражающих колец также только от одной нескомпенсированной зоны и поэтому их разность хода $\pm 5\lambda$, а интенсивность изображений приблизительно в 25 раз меньше интенсивности ± 1 -го порядка.

Аналогичные рассуждения можно продолжить и далее для более высоких нечетных порядков. Очевидно, дифракционные изображения четных порядков вообще не могут наблюдаться, так как для них в каждом отражающем кольце укладывается по 2, 4 и т. д. зон Френеля, действие которых взаимно компенсируется.

Положение изображений высших порядков можно найти, если заменить в формуле (5) величину $\pm \lambda$ величинами $\pm 3\lambda$ (для ± 3 -го порядка), $\pm 5\lambda$ (для 5-го порядка) и т. д. Обобщенный вид выражения (5) будет

$$\pm \frac{(2k-1)n\lambda}{r_n^2} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} - \frac{2}{R}, \quad (6)$$

где k — целые числа, указывающие порядок дифракционных изображений.

Из этого выражения следует, что по мере увеличения порядка дифракционные изображения B' и B'' и т. д. будут приближаться к поверхности зеркала, если $S_B - S_0 > 0$, и удаляться от него, если $S_B - S_0 < 0$.

Каждое изображение, даваемое зонной пластинкой, окружено значительным фоном, образованным лучами, формирующими другие изображения (см. рис. 4).

Зонная пластинка, работающая в проходящем свете, также дает дифракционные изображения высших порядков. Однако, если для отражающей пластинки разность хода определялась разностью отрезков $CE - CD$, то для пластинки, работающей на просвет, разность хода определяется суммой соответствующих отрезков $CE + CD$ (ср. рис. 1 и 2) и поэтому не может принимать отрицательных значений. Вследствие этого дифракционные изображения высших порядков всегда располагаются ближе к зонной пластинке, чем изображение первого порядка.

Наконец, к приведенным выше результатам можно прийти и другим путем, если рассматривать отражательную пластинку как оптическую систему, состоящую из собирающего зеркала и зонной диафрагмы, которая близко расположена к зеркалу и работает в проходящем свете. Главное фокусное расстояние системы F_c связано с главными фокусными расстояниями элементов, составляющих систему, известным соотношением

$$\frac{1}{F_c} = \frac{1}{F_s} + \frac{1}{F_{пл}}, \quad (7)$$

где $F_s = R/2$, а $F_{пл}$ легко найти из выражения (1), полагая $a = \infty$ и приравнявая b фокусному расстоянию пластинки $F_{пл} = r_n^2/n\lambda$.

Фокусные расстояния 3-го, 5-го и т. д. порядков, очевидно, равны соответственно $F_{пл}/3$, $F_{пл}/5$ и т. д.

Далее, можно обычным способом связать положение источника и его изображения с фокусным расстоянием системы, состоящей из вогнутого зеркала и любой зонной пластинки

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F_c}. \quad (8)$$

Отсюда получим для зонной пластинки, работающей в отраженном свете, выражение (5)

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} - \frac{2}{R} = \frac{n\lambda}{r_n^2},$$

а для пластинки, работающей в проходящем свете

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{n\lambda}{r_n^2}.$$

Таким образом, зонные пластинки действуют, как обычные оптические системы, обладающие значительным хроматизмом, причем в отличие от линзовых систем более длинным волнам соответствуют меньшие фокусные расстояния.

Убедимся теперь в том, что в случае одинакового положения источника света и его изображения относительно зонной пластинки размеры отражающих колец зеркальной пластинки должны быть значительно больше, чем размеры колец у пластинки, работающей в проходящем свете.

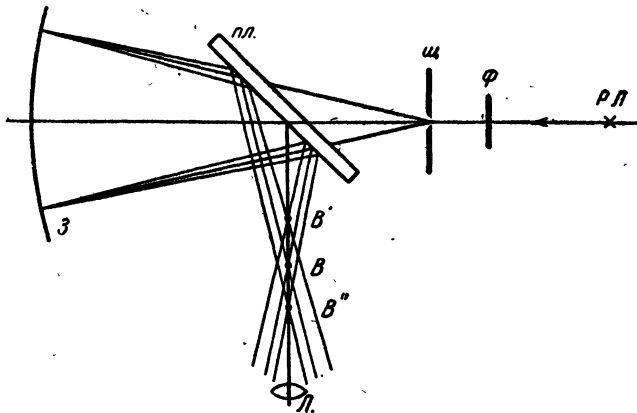


Рис. 4.

Сопоставление пластинок удобнее всего выполнить для дифракционного изображения первого порядка и притом когда источник света помещен в центр кривизны зеркала $a = R$.

Тогда для пластинки, нанесенной на поверхность вогнутого зеркала, и соответственно для плоской пластинки имеем

$$\frac{r_n^2}{n\lambda} = \frac{ab}{a-b} \quad \text{и} \quad \frac{r'_n{}^2}{n\lambda} = \frac{ab}{a+b}.$$

Из этих выражений получаем

$$\frac{r_n^2}{r'_n{}^2} = \frac{a+b}{a-b},$$

т. е. радиусы колец (или зон Френеля) для зеркальной пластинки значительно превышают соответствующие зоны для плоской пластинки. Пусть, например, $a = 100$ см, $b = 98$ см, $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ см и диаметр пластинок $D = 10$ см. Тогда на поверхность плоской пластинки нужно нанести 10000 зон при ширине последнего кольца 2,5 мкм, а на поверхность зеркала всего 100 зон при ширине последнего кольца 250 мкм. Таким образом, нарезка зон на поверхности

сферического зеркала представляет сравнительно нетрудную механическую задачу.

Описание установки. Установка для изучения действия отражательной зонной пластинки (рис. 4) состоит из сферического зеркала, с зеркальной поверхности которого снят кольцами отражающий слой; оптической скамьи с перпендикулярным отростком; ртутной лампы *РЛ*; щели *Щ*, на которой укреплены светофильтры; плоскопараллельной стеклянной пластинки *ПЛ* и лупы для наблюдения *Л*. Все эти части установки при помощи специальных оправ и штырей, вставленных в рейтеры, помещаются на оптическую скамью, вдоль которой они могут свободно перемещаться. Кроме того, ртутная лампа, щель и плоскопараллельная пластинка укреплены на салазках, позволяющих смещать их в направлении, перпендикулярном к оптической скамье.

Следует отметить, что установка зеркала и ртутной лампы по высоте произведена заранее и изменению во время работы не подлежит. Зеркало при помощи винта, помещенного на оправе, можно поворачивать на небольшие углы вокруг горизонтальной оси. Повороты зеркала вокруг вертикальной оси осуществляются от руки при помощи специальной червячной передачи. Плоскопараллельная пластинка также может поворачиваться вокруг вертикальной оси.

Упражнение 1

Определение радиуса кривизны зеркала

Для определения радиуса кривизны зеркала сдвигают в сторону светофильтры и убирают с оптической скамьи плоскопараллельную пластинку, затем зажигают ртутную лампу.

Для удобства наблюдения за лучом света, отраженным от зеркала, максимально разводят щечки щели и, слегка поворачивая зеркало вокруг вертикальной оси, находят направление отраженного пучка и положение изображения щели на листе белой бумаги. Далее передвигают щель вдоль оптической скамьи до тех пор, пока изображение щели не окажется в плоскости самой щели. В этом случае расстояние между щелью и поверхностью зеркала будет равно двойному фокусному расстоянию зеркала или радиусу его кривизны. Это расстояние измеряют по масштабной линейке, прикрепленной к оптической скамье. Затем смещают щель на 10—15 см и несколько поворачивают зеркало. Снова находят положение щели, при котором ее изображение совпадает с плоскостью самой щели. Опыт повторяют не менее трех раз. Из полученных данных для *R* находят среднее. (Напомним, что положение поверхности зеркала и щели могут не соответствовать положению указателей на их рейтерах. В этом случае вводится поправка, указанная лаборантом.)

Упражнение 2

Определение радиусов колец зонной пластинки

Устанавливают перед щелью зеленый светофильтр, пропускающий линию спектра ртути 5460 Å. Щель устанавливают на двойном фокусном расстоянии от поверхности зеркала. Перемещением салазок, на которых установлена щель, добиваются совмещения изображения щели с самой щелью. Это улучшает качество изображения и облегчает последующие вычисления.

Затем щель и зеркало закрепляют. Между ними помещают, для удобства наблюдения, плоскопараллельную пластинку высокого качества, которая поворачивает часть отраженного от зеркала пучка в направлении отростка оптической скамьи. Пластинка имеет отступления от плоскопараллельности не более чем $\lambda/4$, и поэтому она не создает существенной разности хода для интерферирующих лучей и не вносит заметных искажений в дифракционную картину, даваемую зонным зеркалом. На отростке скамьи помещается лупа, укрепленная на рейтере, который также может свободно перемещаться вдоль отростка. Слегка поворачивая плоскопараллельную пластинку вокруг вертикальной оси и передвигая рейтер, на котором она укреплена, добиваются, наблюдая в лупу, чтобы дифракционные изображения всех порядков попадали в поле зрения лупы. Так как отражение происходит на двух поверхностях пластинки — передней и задней, то каждое изображение в поле зрения лупы будет раздвоено.

Выполнив юстировку, приступают к измерениям. Для этого, передвигая рейтер лупы вдоль скамьи, находят в поле зрения лупы четкое изображение нулевого максимума. По масштабу, прикрепленному к скамье, отсчитывают, с точностью до миллиметра, положение рейтера. Затем передвигают рейтер с лупой вперед, находят и записывают положение изображений +1-го, +3-го и +5-го порядков. Прodelывают те же измерения, передвигая рейтер с лупой в другую сторону от геометрического изображения. Все упражнение повторяют не менее трех раз. Вычисляют среднее значение расстояний между дифракционными и геометрическим (нулевым) изображениями δ_k . Для вычисления радиуса центрального диска r_1 (1-й зоны Френеля) воспользуемся формулой (6). Для случая, когда источник расположен в центре кривизны зеркала, $a = R$, $b = R \pm \delta_k$ и формула (6) принимает вид

$$\pm \frac{(2k-1)\lambda}{r_1^2} = \frac{1}{R \pm \delta_k} - \frac{1}{R}. \quad (9)$$

Так как выполненные измерения дают 6 независимых опытных значений δ_k , то следует вычислить для каждого δ_k соответствующие r_1 и оценить погрешность результата.

Упражнение 3

Определение длины волны синей линии спектра ртути

Убирают зеленый светофильтр и заменяют его синим. Сохраняя взаимные расположения щели, зеркала и плоскопараллельной пластинки, при которых выполнялось упражнение 2, повторяют измерения расстояний между дифракционными изображениями 0-го и ± 1 -го порядков, 0-го и ± 3 -го порядков, затем по формуле (9) вычисляют длину волны синей линии ртути. Из четырех значений λ находят среднее и оценивают погрешность результата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. С. М. Райский, УФН, т. XVII, вып. 4 (1952), 515—536.
3. Р. В. Поль, Оптика и атомная физика, «Наука», 1966.

ЗАДАЧА 140

ИЗУЧЕНИЕ РОЛИ ДИФРАКЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ
В ФОРМИРОВАНИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Как известно, в огромном большинстве случаев методы лучевой (геометрической) оптики достаточны для исследования вопросов получения оптического изображения при помощи различных оптических систем.

Но, когда дело касается изучения деталей действия оптических систем, приходится учитывать волновые свойства света. Эти свойства проявляются тем сильнее, чем ближе линейные размеры изучаемых объектов к длине световой волны. Именно поэтому учет дифракционных явлений имеет особое значение в микроскопии.

Цель настоящей задачи заключается в том, чтобы при помощи ряда простых опытов получить качественные и количественные иллюстрации дифракционной теории оптического изображения несамоосветящегося объекта.

Схема опыта представлена на рис. 1. Параллельный пучок света проходит сквозь объект исследования *I*, действительное изображение которого *III* создается объективом *II*. Для простоты дальнейших рассуждений мы считаем, что роль объекта выполняет черно-

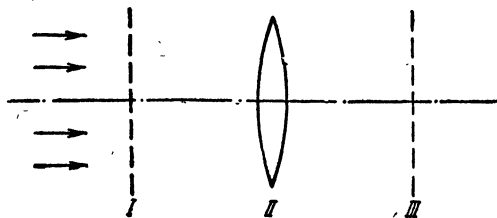


Рис. 1.

белая дифракционная решетка, сечение которой плоскостью чертежа представлено пунктиром *I* на рис. 1. Мы предполагаем, что у объектива полностью исправлены все виды аберраций. Не представляло бы трудности, пользуясь законами геометрической оптики, построить изображение решетки *III*, даваемое объективом *II*. При таком построении изображения, даваемого совершенным объективом, диаметр объектива не должен учитываться. От диаметра объектива будет зависеть лишь освещенность изображения, но не его качество. Между тем опыт показывает, что не только качество, но и общий характер изображения, даваемого объективом микроскопа, может зависеть от диаметра его отверстия.

В общем случае можно сказать, что чем больше апертура объектива, тем полнее даваемое им изображение воспроизводит детали изучаемого объекта.

Исходя из волновых свойств света, мы должны считаться с тем, что на нашем объекте будет происходить дифракция света. Дифрагировавшие на отдельной щели нашей решетки световые пучки представлены на рис. 2. Дифрагировавшие на двух щелях световые пучки представлены на рис. 3. Эти световые пучки собираются потом в фокальной плоскости объектива,

где они дают систему так называемых дифракционных спектров или дифракционных максимумов. На рис. 2 и 3 показаны (для наглядности) только по два дифрагировавших пучка и соответственно только по два дифракционных максимума ± 1 -го порядка.

Далее, за фокальной плоскостью объектива, эти световые пучки вновь расходятся, перекрывая друг друга и интерферируя между собой. Поэтому действительное изображение объекта, даваемое объективом микроскопа, является результатом интерференции когерентного излучения световых пучков, расходящихся из каждого дифракционного максимума, а сами дифракционные максимумы, расположенные в фокальной плоскости объектива, можно рассматривать как некоторую систему когерентных источников излучения. Эти сообра-

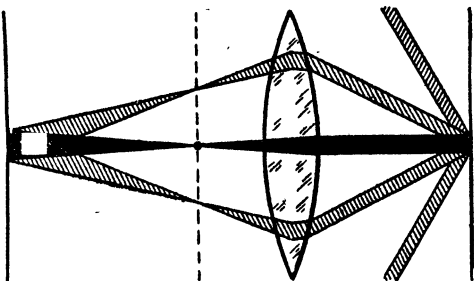


Рис. 2.

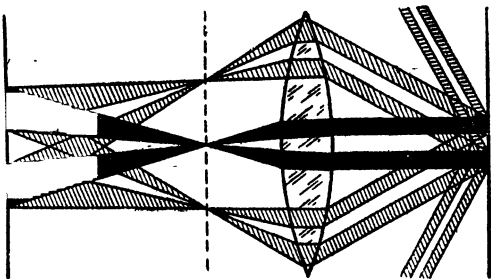


Рис. 3.

жения Аббе являются весьма плодотворными для выяснения условий, при которых объектив микроскопа может давать изображения, наиболее полно воспроизводящие структуру исследуемого объекта.

Опыт показывает, что соответствие между структурой объекта и структурой его изображения зависит от того, сколько дифрагировавших на объекте световых пучков и какие именно пучки перехватываются входной линзой объектива. Этому утверждению эквивалентна и такая формулировка. Соответствие между структурами объекта и его изображения зависит от того, какое число когерентных световых источников, получающихся в фокальной плоскости объектива, и какие именно из этих источников участвуют в дальнейшей интерференции, формирующей оптическое изображение.

Практически вторая формулировка будет для нас удобнее, потому что при экспериментах, имеющих целью иллюстрировать концепцию Аббе, гораздо легче управлять числом участвующих в интерференции вспомогательных когерентных источников света (дифракционных максимумов), чем предварительно перехватывать до объектива на выбор отдельные дифрагировавшие световые пучки. На самом же деле при нормальной работе микроскопа происходит обратное: конечные размеры объектива лимитируют число перехваченных им дифракционных пучков, идущих от рассматриваемого объекта. Это обстоятельство особенно сильно проявляется при рассмотрении малых объектов. Дифрагировавшие от них световые пучки отклоняются на большие углы друг от друга и от направления первичного освещения объекта и в результате этого не всегда попадают в объектив микроскопа.

Пусть поставленная в фокальной плоскости объектива щель пропускает только один, например центральный, дифракционный максимум. В таком случае никакой интерференции за щелью не будет и соответственно никакого изображения решетки не получится. Плоскость изображения будет равномерно освещена. Можно сказать, что мы получим в этом случае изображение такого объекта, который дает в фокальной плоскости объектива только один центральный дифракционный максимум. Таким объектом является большое равномерно освещенное отверстие. Если же мы пропустим через щель какие-нибудь два соседних дифракционных максимума, то в плоскости изображения будет интерференционная картина, соответствующая известному случаю синусоидального распределения интенсивности в интерференционном поле от двух когерентных источников света ¹⁾. Эта интерференционная картина будет пред-

¹⁾ Практически надо иметь в виду, что наш глаз вследствие присущих ему недостатков в оценке распределения интенсивности света воспримет синусоидальное пространственное распределение интенсивности как систему темных и светлых полос, освещенность которых изменяется скачком от нуля до единицы. Истинное распределение интенсивности в интерференционной картине можно найти путем ее микрофотометрирования с помощью фотоэлектрического микрофотометра.

ставлять собой то оптическое изображение нашей дифракционной решетки, которое можно получить, используя свет только двух дифракционных максимумов. Если мы будем расширять щель, пропуская через нее большее число дифракционных максимумов, то мы будем получать все более четкие изображения нашего объекта.

Поучительным будет результат наблюдения изображения при выделении с помощью диафрагмы различных комбинаций дифракционных максимумов. Так, если мы выделим два не смежных дифракционных максимума, например максимумы $(+1, -1)$ или $(0, -2)$, или $(-1, -3)$, то мы обнаружим уменьшение вдвое расстояния между интерференционными полосами (изображениями штрихов решетки), видимыми в плоскости изображения¹⁾. Этот результат легко понять, исходя из того известного положения, что расстояние между интерференционными полосами обратно пропорционально расстоянию между когерентными источниками света, вызвавшими интерференцию. Поскольку в нашем случае это расстояние удвоилось, расстояние между полосами (изображениями штрихов решетки) сокращается в два раза.

Проиллюстрируем подобные явления еще другим примером, который будет в дальнейшем предметом экспериментального изучения в настоящей задаче. Пусть роль объекта, стоящего перед объективом, играет черно-белая сетка (двумерная дифракционная решетка), показанная на рис. 4. Этой сетке в фокальной плоскости объектива будет соответствовать дифракционная картина, представленная фотографией (рис. 5). На репродукции видны только по три ряда вертикальных и горизонтальных наиболее интенсивных дифракционных максимумов. Если часть их будет перехвачена какой-нибудь диафрагмой, расположенной в фокальной плоскости объектива, то изображение сетки перестанет воспроизводить детали ее устройства. На последующих рис. 6 показаны фотографии сетки, полученные при различном диафрагмировании ее дифракционных спектров. Слева вверху над каждой фотографией приведена схема из девяти крестиков и точек. Эти девять значков символически изображают девять центральных дифракционных спектров, видимых в числе прочих на рис. 5. Крестики соответствуют пропущенным сквозь диафрагму дифракционным максимумам (спектрам), точки — непропущенным. Расположенный справа от каждой таблички снимок есть результат фотографирования нашей сетки в условиях, соответствующих пропусканию сквозь диафрагму только тех спектров, которые помечены крестиками на соответствующей данному снимку табличке.

Рис. 6, а соответствует снимку сетки, сделанному через диафрагму, пропустившую один дифракционный максимум. Никакого изображения сетки при

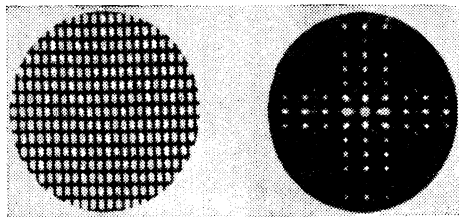


Рис. 4.

Рис. 5.

¹⁾ Считая эквивалентными в этом рассуждении любые пары дифракционных максимумов, мы пренебрегаем возможным неравенством их интенсивностей и некоторым неравенством расстояний между ними. В упражнениях настоящей задачи такие пренебрежения допустимы.

этом, очевидно, не получается. Далее мы видим (рис. 6, б), что пропускание сквозь диафрагму двух дифракционных максимумов, лежащих в горизонтальной плоскости, приводит к тому, что в плоскости изображения представлены только вертикальные штрихи сетки. Наоборот, пропускание сквозь диафрагму вертикальных спектров (рис. 6, д) приводит к появлению в плоскости изображения одних

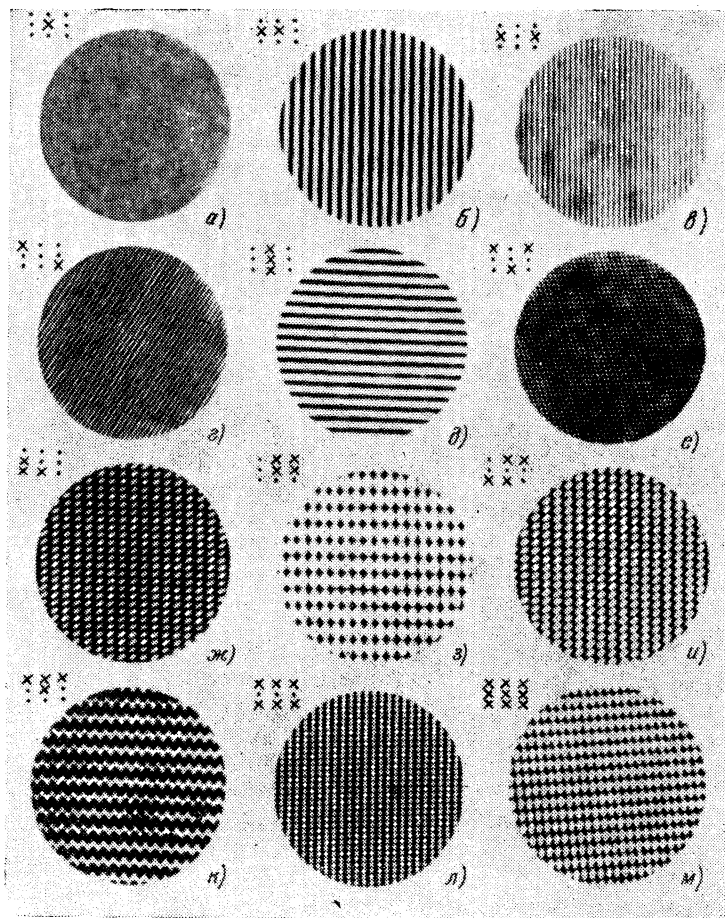


Рис. 6.

только горизонтальных линий объекта — сетки. Весьма характерен рис. 6, в, на котором мы видим, что избирательное пропускание сквозь диафрагму только лишь ± 1 порядков приводит к изменению в два раза видимого через объектив периода вертикальных штрихов решетки. Прочие рис. 6 иллюстрируют характерные случаи так называемых «ложных» структур, наблюдаемых при избирательном диафрагмировании нескольких дифракционных максимумов,

На основании приведенных примеров легко прийти к выводу, что три отверстия в диафрагме, расположенные так, чтобы пропускать три дифракционных максимума порядков, например, 0, +1 по горизонтали и +1 по вертикали или максимумы соответственно 0, +1 и -1 и т. д., позволят наблюдать правильную периодичность структуры объекта.

Рассмотренные примеры участия различных дифракционных максимумов в формировании оптического изображения иллюстрировали вопрос о соответствии между геометрической структурой изображения и структурой объекта. Сделаем теперь замечание о значении числа используемых максимумов для контрастности наблюдаемого изображения. Опыт показывает, что требование контрастности изображения будет тем лучше удовлетворено, чем большее число дифракционных



Рис. 7.

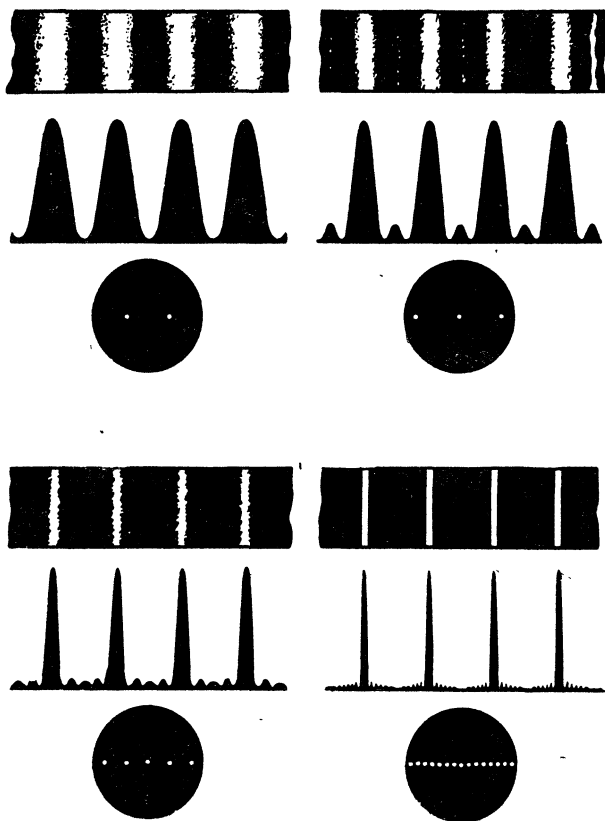


Рис. 8.

максимумов (вспомогательных когерентных источников света) будет участвовать в интерференции, формирующей оптическое изображение. Физический смысл этого результата можно понять из следующих соображений. Один

дифракционный максимум нулевого порядка создает в плоскости изображения однородный освещенный фон. Каждая пара дифракционных максимумов с одинаковыми индексами ($\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$) даст в своей интерференционной картине синусоидальное распределение освещенности, причем пространственный период этого распределения будет уменьшаться по мере роста расстояния между работающими дифракционными максимумами. Таким образом, оптическое изображение есть результат суперпозиции когерентных интерференционных картин указанного типа на когерентном с ними однородном фоне нулевого максимума. По мере роста числа накладывающихся картин контуры объекта будут вырисовываться все более четко¹⁾. Сказанное можно пояснить при помощи следующих рисунков.

На рис. 7 представлен объект наблюдения: решетка с узкими щелями и широкими непрозрачными промежутками между ними. На рис. 8 показаны для четырех различных случаев: фокальная плоскость объектива микроскопа с видимым на ней числом используемых дифракционных максимумов; график распределения интенсивности в интерференционной картине, получаемой в плоскости изображения; фотография изображения, полученного с помощью используемых дифракционных максимумов. Приведенные рисунки показывают, как возрастает соответствие между контурами объекта и его изображения по мере роста числа используемых дифракционных максимумов.

Описание оптической установки. Используемая в работе оптическая система собрана на оптической скамье. Ее схема изображена на рис. 9. Источником света *1* служит восьмивольтовая лампочка,

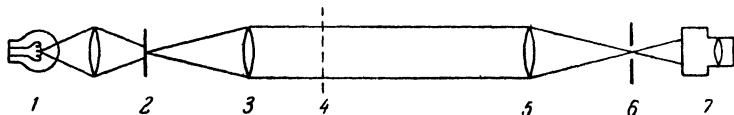


Рис. 9.

питаемая от понижающего трансформатора, включенного через автотрансформатор ЛАТР. Эта лампочка помещается в стандартном осветителе от микроскопа, содержащем конденсор и ирисовую диафрагму, и устанавливается на штыре рейтера оптической скамьи. За этим осветителем помещаются, в случае надобности, светофильтры. Они на нашем рисунке не показаны.

Световой пучок из осветителя падает либо на диафрагму с малым круглым отверстием 2, либо на щель постоянной ширины. Обе они устанавливаются поочередно на специальном столике, штырь которого входит в рейтер оптической скамьи. Установка диафрагмы или щели определяется тем, какие объекты исследования используются в соответствующих упражнениях задачи. При наблюдениях двумерной структуры целесообразнее пользоваться диафрагмой с круглым отверстием, а при работе с одномерной структурой (решеткой) удобнее работать со щелью. Работа начинается с круглым отверстием.

¹⁾ Это будет происходить аналогично формированию резкой дифракционной картины при увеличении общего числа щелей дифракционной решетки.

За диафрагмой с круглым отверстием или щелью располагается коллиматорный объектив 3, дающий параллельный пучок света для освещения исследуемого объекта. Диафрагма с круглым отверстием (или щель) должна всегда располагаться в фокальной плоскости этого объектива. Надо обратить внимание на то, что держатель этого объектива, так же как и держатели других приборов на скамье, имеет винтовую микрометрическую подачу в направлении, перпендикулярном скамье. Такие подачи используются при центровке всех деталей на скамье.

За объективом, на столике, в специальном держателе помещается исследуемый объект 4: сетка или решетка, наштабированная на зачерненной фотопластинке. Работа начинается с сеткой.

Далее за объектом на оптической скамье помещается объектив 5, с фокусным расстоянием 27 см, идентичный коллиматорному. Этот объектив, который мы в дальнейшем будем называть *наблюдательным* объективом, имитирует в нашей установке объектив микроскопа. С его помощью получается оптическое изображение, служащее предметом исследований в настоящей задаче.

За объективом, на специальном столике с двумя горизонтальными и одной вертикальной микрометрической подачей, помещаются в специальных держателях диафрагмы — маски 6, предназначенные для пропускания в нужных случаях только некоторых комбинаций дифракционных спектров. На специальной стойке на столике установлена лупа, облегчающая наблюдение дифракционной картины и отверстий в масках при их совмещении в последующих упражнениях. При работе с двумерной решеткой масками служат латунные пластинки, в которых просверлены круглые отверстия в сочетаниях, соответствующих приведенным на рис. 6 и некоторым другим. Описанные винтовые подачи столика позволяют юстировать расположение просверленных отверстий по дифракционной картине, фокусируемой на поверхность пластинки. В случае работы с объектом в виде простой одномерной дифракционной решетки в фокальной плоскости объектива получается система дифракционных спектров в виде полосок. Для них роль диафрагмы-маски выполняет стеклянная зачерненная пластинка, в которой оставлены прозрачными две полоски, пропускающие только дифракционные спектры ± 2 -го порядка. При работе с простой дифракционной решеткой (а в некоторых случаях и с двумерной решеткой) роль диафрагмы может выполнять и раздвижная щель, позволяющая вырезать из дифракционной картины спектры разных порядков. Такая щель, подставка которой снабжена также всеми необходимыми винтовыми подачами, помещается на отдельном рейтере, устанавливаемом вместо столика с масками на скамью. Щель может регулироваться по ширине и, кроме того, особый винт позволяет регулировать параллельность щечек щели. Наконец, щель может вращаться вокруг горизонтальной оси (вокруг оптической оси всей установки). Это

вращение позволяет ориентировать прорез щели различным образом по отношению к дифракционной картине, даваемой объектом и наблюдательным объективом.

За масками (или за щелью) помещается на рейтере и поперечных салазках штатив, несущий окулярный тубус 7 (рис. 9) некоторой зрительной трубы без объектива. На этот тубус надевается и зажимается винтом окулярный винтовой микрометр, служащий для наблюдения и промеров исследуемого оптического изображения и размеров объекта. Окулярный тубус трубы имеет крепление, снабженное рядом винтовых подач (наклон, вращение и т. д.), обеспечивающих возможность правильной постановки окуляра при работе.

Подготовка установки к измерениям. Перед началом измерений необходимо рационально расположить на оптической скамье все детали установки. Приблизительное расположение рейтеров всех деталей указано на установке. Раздвижная щель и маски не ставятся на оптическую скамью при первоначальной юстировке системы. Ниже указано, когда их надо поместить на скамью.

Центры всех размещенных на скамье приборов должны находиться на одной высоте. Обычно это условие соблюдено, так как кольца, фиксирующие высоту штырей, уже установлены в нужных положениях. В случае децентрировки системы по высоте надо сдвинуть все приборы вплотную и, поместив глаз на уровне центра одного из них, отрегулировать высоту всех остальных приборов по первому прибору. Центрировку приборов в горизонтальной плоскости надо производить с помощью поперечных винтовых салазок, имеющихся под каждым прибором. Эта центрировка производится всегда по ходу работы, при включенной лампе.

Положение патрона лампы в осветителе допускает некоторые вариации. Рекомендуется располагать патрон так, чтобы гладкая цилиндрическая часть его выступала приблизительно на 6 мм из-под края неподвижной части осветителя. При этих условиях входная диафрагма установки будет покрыта ярким, но сильно размытым изображением спирали лампы прямоугольной формы площадью порядка 1 см². Вращением патрона лампы надо ориентировать изображение спирали так, чтобы ее витки были горизонтальны. Это удается проверить, несмотря на размытость изображения спирали, на диафрагме с круглым отверстием.

Объектив коллиматора должен быть установлен так, чтобы из него выходил пучок параллельных лучей. Об этом можно судить, помещая за объективом листок белой бумаги. Если на листке бумаги виден равномерно освещенный светлый круг, диаметр которого не зависит от расстояния от бумаги до объектива, то последний установлен правильно. Если работа производится со щелью, вместо диафрагмы, то по мере удаления бумаги от объектива круг будет растягиваться по высоте. Если светлый круг, получаемый на бумаге

от лучей, выходящих из коллиматора, искажен по форме или имеет цветные пятна, то установка этой части оптической системы произведена неправильно.

Когда описанные требования выполнены, то на столик для установки объекта надо поставить сетку. Располагать ее надо таким образом, чтобы ее плоскость проходила через центр столика и была перпендикулярна к световому пучку, распространяющемуся из коллиматора.

Дальнейшая юстировка системы производится следующим образом. Помещая листок белой бумаги за наблюдательным объективом, проверяют, насколько равномерно объектив заполнен светом. Регулируют с этой целью положение объектива поперечными салазками. Затем перемещают лист бумаги в фокальную плоскость объектива и убеждаются в том, что в этой плоскости расположена система дифракционных спектров. Передвигая лист бумаги дальше, к окуляру, убеждаются в том, что постепенно размывающиеся спектры, образующие общий, сливающийся световой блик, попадают в тубус наблюдательного окуляра. Если световой блик не входит в тубус окуляра, то регулируют положение штатива окуляра и наклоны самого окуляра до тех пор, пока это условие не будет выполнено.

Объект должен быть виден как система черных прямоугольников с узкими просветами между ними на равномерно освещенном неокрашенном фоне. Точная фокусировка объекта (сетки) по глазу наблюдателя осуществляется плавным движением кремальеры окулярного тубуса¹⁾.

Если окажется, что поле зрения или изображение объекта окрашены, то это свидетельствует о неправильной юстировке всей системы или самого окуляра. Надо иметь в виду, что сильный пятнадцатикратный окуляр весьма чувствителен ко всяким перекосам в его установке. Их необходимо устранить, пользуясь винтовыми подачами у держателя окулярного тубуса.

Необходимо также до начала измерений рассмотреть картину дифракционных спектров, которые при юстировке установки были видимы невооруженным глазом или через расположенную на столике лупу лишь в виде мелких светлых точек, на бумаге, помещенной в фокальной плоскости наблюдательного объектива. Для рассмотрения спектров в деталях выдвигают вперед рейтер, несущий окулярный тубус так, чтобы плоскость креста нитей окуляра совпала с плоскостью локализации дифракционных спектров. Затем

¹⁾ Фокусировка креста нитей в окуляре осуществляется совершенно независимо от фокусировки объекта наблюдения вращением рифленого кольца на краю оправы самого окуляра. Фокусировку креста нитей можно производить и предварительно до установки окуляра на его тубус. Для этого надо направить снятый с тубуса окуляр на освещенную бумагу, абажур лампы и т. п. и, вращая упомянутое кольцо, добиться резкой видимости креста нитей.

небольшими перемещениями рейтера вдоль оптической скамьи или кремальеры окулярного тубуса добиваются отчетливой видимости спектров. При этом должно быть видно симметричное расположение спектров, изображенное на рис. 5. Фокусировку спектров надо осуществлять, добиваясь максимальной резкости центрального бесцветного пятна дифракционной картины, т. е. ее спектра нулевого порядка — изображения входной круглой диафрагмы оптической системы. Неизбежные механические дефекты на краях отверстия являются хорошими объектами для резкой фокусировки спектра нулевого порядка.

Рекомендуется рассмотреть ту же дифракционную картину и со светофильтрами.

По окончании этих наблюдений возвращают рейтер окуляра вновь к концу оптической скамьи, на прежнее место, и опять отчетливо фокусируют изображение сетки.

Наблюдения, измерения и их обработка. 1. Пользуясь винтовым окулярным микрометром, измеряют период горизонтальных ячеек сетки. Для этого ориентируют окуляр на тубусе трубы так, чтобы при вращении барабана микрометра крест нитей перемещался перпендикулярно вертикальным штрихам сетки. Для измерения периода сетки перемещают крест нитей на длину десяти периодов сетки и потом делят разность отсчетов на микрометре на десять. Такие измерения проделывают несколько раз на разных участках изображения сетки.

2. Устанавливают на скамью рейтер со столиком для постановки на него масок и ставят держатель с первой маской — одним круглым отверстием. Пользуясь винтовыми подачами столика и ведя наблюдения дифракционной картины через лупу, установленную на столике, добиваются совпадения этого отверстия с центральным дифракционным пятном картины. Наблюдают в окуляр в белом свете и со светофильтрами получаемую при этих условиях (в соответствии с теорией Аббе) равномерную освещенность плоскости изображения. Переходят к следующим маскам в порядке их номеров зарисовывают и промеряют окулярным микрометром наблюдаемые через них изображения. Каждое зарисованное изображение снабжается табличкой (согласно обозначениям, принятым на рис. 6) тех дифракционных спектров, которые использовались при получении данного изображения. Положение каждой маски требует отдельной юстировки по отношению к дифракционной картине. Сравнивают измеренные через маски значения видимых периодов решетки с их значениями, вычисленными по значениям расстояний между пропущенными сквозь маски дифракционными максимумами. Расстояние между двумя соседними максимумами принимается за единицу.

3. Заменяют столик с масками рейтером с раздвижной целью и передвижениями щели фокусируют на ее щечки дифракционную картину. Затем, варьируя ширину щели, ее расположение и ориен-

тацию по отношению к дифракционной картине, зарисовывают наблюдаемые в окуляр изображения сетки. Одним из наиболее убедительных опытов, поясняющих роль тех или иных использованных дифракционных спектров, являются наблюдения объекта при чередующихся горизонтальных и вертикальных ориентациях щели.

4. Убирают со скамьи щель и светофильтр, заменяют входную круглую диафрагму всей системы щелью, а сетку одномерной дифракционной решеткой. Юстируют положение всех деталей на оптической скамье, так же как это делалось перед началом опытов с сеткой.

5. С помощью окулярного микрометра измеряют период дифракционной решетки, так же как это делалось в случае сетки.

6. Помещают в установку красный светофильтр и ставят на скамью столик для масок и маску с двумя прорезами, предназначенную для диафрагмирования трех центральных спектров от дифракционной решетки. Юстируют положение маски и измеряют период дифракционной решетки окулярным микрометром в этих условиях. Сравнивают полученный результат с прежними измерениями, выполненными без маски.

7. Заменяют столик с масками раздвижной щелью и, сфокусировав на ее щечках при помощи микрометрических подач дифракционную картину, ведут наблюдения решетки при разных ширинах и положениях щели по отношению к дифракционной картине. Результаты наблюдений зарисовывают. Следует обратить внимание на изменение четкости изображения дифракционной решетки, видимое через окуляр по мере изменений ширины щели и по мере использования наблюдательным объективом возрастающего числа дифракционных максимумов, пропускаемых щелью. Наблюдения следует начать с пропускания через щель одного максимума нулевого порядка.

8. Заключительное упражнение проводится для количественного доказательства дифракционной природы всех наблюдавшихся явлений. Это доказательство можно осуществить, вычислив длину световой волны из измерений дифракционной картины.

Для этой цели убирают со скамьи столик с масками и придвигают измерительный окуляр к наблюдательному объективу так, чтобы дифракционные спектры могли быть отчетливо сфокусированы окуляром. Для ослабления чрезмерной яркости картины можно поместить перед входной щелью системы матовое стекло или листок папиросной бумаги.

Измеряют расстояние Δl между симметрично расположенными красными, желтыми, зелеными и синими полосами спектров нескольких порядков. Зная фокусное расстояние объектива ($f = 27 \text{ см}$), находят углы дифракции $\varphi = \Delta l/2f$. Используя ранее найденное значение постоянной решетки d , вычисляют средние значения длин

волн λ красной, желтой и т. д. частей видимого спектра, пользуясь формулой $\lambda = d\Delta l/n2f$, где n — порядок дифракционного спектра.

Технические данные установки. В основу установки положена спектроскопическая скамья марки ОСК-1, выпускаемая нашей промышленностью. Используется осветитель от микроскопа марки ОИ-7, зрительная труба марки ОТ-1. Поставленный на отдельном рейтере объектив этой трубы служит наблюдательным объективом системы. Укороченный окулярный тубус этой трубы снабжен винтовым окулярным микрометром АМ-9. В качестве коллиматорного объектива может быть использован ахромат с фокусным расстоянием 27 см.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. К. Михель, Основы теории микроскопа, Гостехиздат, 1955.

ЗАДАЧА 141

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛНАХ

Целью настоящей задачи является изучение явления дифракции света на ультразвуковой дифракционной решетке, измерение скорости звука в жидкости оптическим методом и непосредственное наблюдение ультразвуковых волн в жидкости.

Схема опыта, позволяющего наблюдать изучаемое явление, представлена на рис. 1 (вид установки сбоку). Свет от источника 1

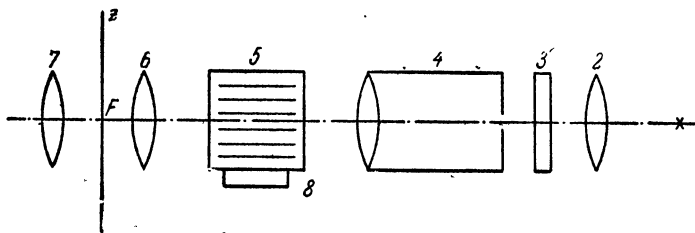


Рис. 1.

(например, от ртутной лампы), пройдя через конденсор 2 и светофильтр 3, освещает входную горизонтальную щель коллиматора 4, формирующего пучок параллельных лучей. Этот пучок лучей проходит через плоскопараллельную стеклянную кювету с жидкостью 5, объектив 6 и попадает в отсчетный микроскоп 7, сфокусированный на фокальную плоскость объектива 6¹⁾. Очевидно, что при этих усло-

¹⁾ Поскольку в настоящей задаче наблюдается дифракция света в параллельных лучах, расстояние между объективом и кюветой может быть произвольным. Однако в целях удобства выполнения второго упражнения задачи объектив 6 расположен приблизительно на двойном фокусном расстоянии от плоскости выходного окна кюветы.

виях в микроскоп будет видно изображение горизонтальной щели коллиматора. Но если через дно кюветы *б* в жидкость снизу входят ультразвуковые волны, распространяющиеся вверх вдоль оси *z* (перпендикулярно световому пучку, идущему из коллиматора), то картина в фокальной плоскости объектива *б* станет сложнее.

В этом случае в жидкости в направлении оси *z* будет распространяться волна давления

$$P = P_0 + \delta P \cos \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{z}{v} \right),$$

где P_0 — среднее давление в жидкости, δP — амплитуда давления в ультразвуковой волне, T — период ультразвука, v — скорость его распространения, t — время. Некоторое мгновенное расположение фронтов звуковых волн в жидкости, заполняющей кювету, например расположение максимумов давления в волне, представлено на рис. 1 системой горизонтальных линий, перпендикулярных к оси *z* и расположенных на расстояниях Λ друг от друга (Λ — длина звуковой волны). Очевидно, что волне давления будет соответствовать распространяющаяся в том же направлении волна плотности жидкости. Но ввиду того, что показатель преломления μ зависит от плотности вещества, распространение ультразвуковой волны в жидкости приведет к распространению в ней синусоидальной неоднородности показателя преломления

$$\mu = \mu_0 + \delta\mu \cos \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{z}{v} \right),$$

где $\delta\mu$ — амплитуда изменений показателя преломления в ультразвуковой волне.

Таким образом, при наличии в жидкости ультразвука световой пучок будет проходить через среду с периодически изменяющимся вдоль оси *z* (а также и во времени) показателем преломления μ . Пространственный период изменения показателя преломления вдоль оси *z* будет Λ . По отношению к световым волнам, распространяющимся из коллиматора, ультразвуковые волны будут играть роль дифракционной решетки с периодом Λ , если Λ достаточно мало. Соответственно этому в фокальной плоскости объектива будет видно не только единственное изображение входной щели коллиматора, но целая дифракционная картина.

Ультразвуковая дифракционная решетка, порождающая эту картину, обладает рядом принципиально важных особенностей, на которых следует специально остановиться. Как известно, дифракционные решетки могут быть амплитудными, фазовыми и одновременно амплитудно-фазовыми. Амплитудные решетки, например типа чередующихся прозрачных и непрозрачных параллельных полосок, пространственно модулируют амплитуду на фронте падающих на решетку световых волн. Фазовые решетки представляют собой структуры с периодически изменяющимися в пространстве длинами оптического пути для падающих на решетку световых волн. В результате прохождения света через такие решетки возникает пространственное периодическое изменение фазы световой волны в

направлении, перпендикулярном к направлению ее распространения¹⁾. Амплитуда волны при этом не будет изменяться вдоль по фронту волны. На рис. 2, а представлена простейшая амплитудная решетка, а на рис. 2, б изображена простейшая синусоидальная фазовая решетка, осуществленная в виде тонкого плоско-параллельного слоя прозрачного вещества

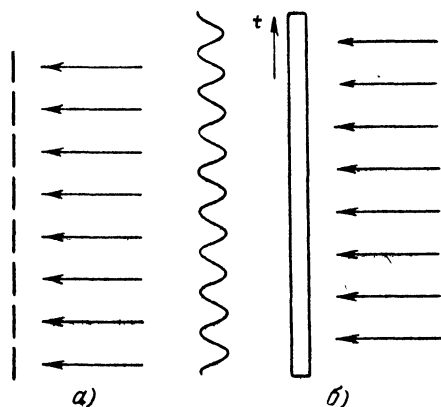


Рис. 2.

с синусоидальным распределением показателя преломления в этом веществе вдоль оси z . При прохождении плоской световой волны через первую решетку амплитуда на фронте падающих на решетку волн будет периодически скачкообразно изменяться от 0 до некоторого A_{\max} . В результате прохождения света через вторую решетку ранее плоский волновой фронт станет синусоидальным (рис. 2, б). Звуковые волны, распространяющиеся перпендикулярно световому пучку, соответствуют как раз случаю второй решетки, т. е. случаю фазовой дифракционной решетки, если длина волны звука Λ достаточно мала²⁾.

Кинематическое условие дифракции, определяющее направления на дифракционные

максимумы после выхода света из фазовой решетки (если считать ее достаточно тонкой в направлении распространения света), может быть записано так:

$$\Lambda \sin \varphi = n\lambda, \quad (1)$$

где φ — угол дифракции, $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ — порядок дифракционного максимума и λ — длина световой волны.

Вопроса о распределении интенсивности в картине дифракции света на ультразвуке мы здесь не затрагиваем, так как он является более сложным. Необходимо отметить, что представление ультразвуковой решетки как плоской фазовой решетки является также существенным упрощением задачи. В некоторых случаях (очень короткие ультразвуковые волны или большая толщина пересекаемого света ультразвукового столба) эффекты, связанные с объемной природой ультразвуковой решетки, становятся весьма существенными (см. литературу к задаче).

При малых углах дифракции координаты дифракционных максимумов в фокальной плоскости объектива описываются соотношением

$$\Delta z_n = nF \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (2)$$

¹⁾ Следует иметь в виду, что фазовые решетки могут быть и отражательными. Таковы, например, отражательные дифракционные решетки направленного действия.

²⁾ Здесь необходимо отметить, что трактовка ультразвуковой решетки исключительно как фазовой решетки является приближенной. Вопрос о характере ультразвуковой решетки уточняется ниже, там где обсуждается возможность непосредственного ее наблюдения.

получаемым из (1) при малых φ , где Δz_n — координата n -го дифракционного максимума, отсчитанная от центрального спектра нулевого порядка в направлении, перпендикулярном к оси первичного светового пучка.

В последнем соотношении F обозначает фокусное расстояние объектива 6. При рассмотрении общей картины дифракции света на ультразвуковой решетке мы не учитывали того обстоятельства, что эта фазовая решетка не является статической, какой может быть фазовая решетка, сделанная из какого-либо прозрачного вещества. Поставим вопрос о том, не отразится ли на оптической дифракционной картине то, что наша фазовая решетка реализуется акустической волной. Легко видеть, что это обстоятельство не внесет изменений в угловое распределение дифракционных максимумов и формула (1) останется в силе. В самом деле, параллельное перемещение всякой дифракционной решетки не изменяет получаемой с ее помощью дифракционной картины. В нашем случае время прохождения света сквозь решетку мало по сравнению с периодом акустического колебания и поэтому дифракционное условие определяется мгновенным распределением показателя преломления в акустической волне. Пространственный же период решетки, несмотря на ее движение, остается всегда неизменным и равным Λ . Поэтому угловое дифракционное условие (1) для направлений на максимумы света остается неизменным, несмотря на движение фазовой решетки.

Также обстоит дело и при дифракции света на стоячих акустических волнах, которые могут быть получены наложением друг на друга бегущей и отраженной звуковых волн ¹⁾. Для дифракции на каждой из этих двух волн в отдельности справедливо все сказанное выше о дифракции на бегущей волне. Что же касается результирующего пространственного периода фазовой решетки, образованной стоячими волнами, то он равен, конечно, опять Λ , так как пространственный период мгновенного распределения давления в стоячей волне всегда остается равным длине исходной бегущей волны. Таким образом, условие (1) остается в силе и для стоячей волны, но, конечно, с теми же ограничениями, которые были указаны при его первоначальном написании.

Но из сказанного о применимости одинакового дифракционного условия для статических и для акустических фазовых решеток не следует делать вывода о полной тождественности действия на дифрагирующий свет тех и других решеток. Между теми и другими решетками есть и принципиальная разница. При дифракции света на статической решетке спектральный состав дифрагировавшего света остается неизменным. Между тем ультразвуковая решетка модулирует по частоте падающий на нее свет (см. [2]). Это значит, что световые пучки, образующие дифракционные максимумы различных порядков, будут некогерентны между собой. Качественно причину изменения частоты света, дифрагировавшего на ультразвуковой решетке, всего проще понять исходя из того, что дифракцию света на акустических волнах можно рассматривать как его отражение от движущихся фронтов этих волн. В таком случае изменение частоты дифрагировавшего света есть прямой результат эффекта Допплера. Полная и стройная теория всей совокупности явлений, происходящих при дифракции света на ультразвуковых волнах, была дана С. М. Рытовым (см. [4]).

Для настоящей задачи важнейшим результатом проведенного рассмотрения явления дифракции света на ультразвуковых волнах являются соотношения (1) или (2), открывающие возможность находить длины ультразвуковых волн Λ по измерениям φ или Δz .

¹⁾ При той схеме опыта, которая изображена на рис. 1, встречная к первоначальной отраженная волна возникает на верхней границе жидкости и воздуха. Подробности об этом см. ниже.

В свою очередь найденные значения длин ультразвуковых волн могут быть использованы для расчета скорости звука $v = \lambda \cdot \nu$ в той среде, в которой происходила дифракция света на акустических волнах. Задаваемая генератором частота ультразвука ν может быть измерена совершенно независимо от λ . По дифракции света на ультразвуке отыскивается скорость звука в жидкости в первом упражнении настоящей задачи.

Описание ультразвуковой установки: Оптическая часть установки вполне соответствует принципиальной схеме, изображенной на рис. 1. Поэтому мы останавливаемся здесь на объяснении лишь некоторых деталей ее устройства, сосредоточивая внимание в основном на ее акустической части, о которой еще ничего не было сказано. Оптическая установка смонтирована целиком на оптической скамье. Свет ртутной лампы, питаемой через специальный пускатель с дросселем от сети переменного тока напряжением 220 в, проходит через сменные светофильтры, установленные в револьверном держателе перед горизонтальной входной щелью коллиматора. Система достаточно светосильна для того, чтобы работать и без конденсора 2 (рис. 1). Расположение всех упомянутых приборов, так же как и почти всех остальных частей оптической системы, размещенной на скамье, фиксировано и регулировке не подлежит. Фиксирована также и оптимальная для измерений ширина горизонтальной входной щели коллиматора. Коллиматор системы установлен на бесконечность. Горизонтальность его оси обеспечивается регулировочным винтом, установленным под корпусом коллиматора. Поперечная центровка объектива b обеспечивается поперечными винтовыми салазками. Имеющийся в комплекте установки специальный нож, облегчающий непосредственные наблюдения акустических волн, описан ниже во втором упражнении задачи, где он применяется. За объективом расположен на скользящей вдоль оптической скамьи подставке окулярный микрометр¹⁾. Окулярный микрометр расположен так, что его винт и головка вертикальны, и, следовательно, крест нитей перемещается также в вертикальном направлении. Держатель микрометра имеет тонкую винтовую регулировку продольных перемещений с помощью винтовых салазок, установленных на держателе. Другие поперечные винтовые салазки, установленные также под микрометром, служат для его центровки в направлении, перпендикулярном к оптической скамье.

Обратимся теперь к рассмотрению сосуда с жидкостью. Заметим прежде всего, что сосуд 1 с окошком 2 (рис. 3) жестко установлен на особом столике, снабженном снизу двумя регулировочными винтами (третий, имеющийся под столиком винт с более короткой головкой, расположенный ниже упомянутых двух винтов, фиксирует столик на штыре держателя и ни при каких условиях не регулируется).

¹⁾ О работе окулярного винтового микрометра см. описание задачи 137.

Регулировочные винты дают возможность наклонять плоскость столика вокруг двух взаимно перпендикулярных горизонтальных осей и таким образом устанавливать столик горизонтально. Конструкция столика тождественна с конструкцией столиков, имеющих на спектрометрах-гонометрах задачи 128.

Под сосуд с жидкостью идет коаксиальный высокочастотный кабель, подводящий напряжение к пьезоэлементу, возбуждающему ультразвук в сосуде с жидкостью. Этим пьезоэлементом является в нашем случае керамическая поляризованная пластинка из титаната бария (BaTiO_3), колеблющаяся под действием переменного электрического напряжения, подводимого к ней по коаксиальному кабелю. Пластинка посеребрена с обеих сторон. Одной стороной она плотно прижата к тщательно полированному и смазанному маслом дну сосуда с жидкостью, а другой — к свинцовому диску, служащему одним из электродов, подающих напряжение на пластинку титаната бария (рис. 3). Обе пластинки помещены в держатель 5, снабженный изолирующей подкладкой 4, и удерживаются при помощи специальной накидной гайки. Другим электродом служит тонкая кольцевая шайба, охватывающая периферию верхней поверхности титаната (на рисунке не показана).

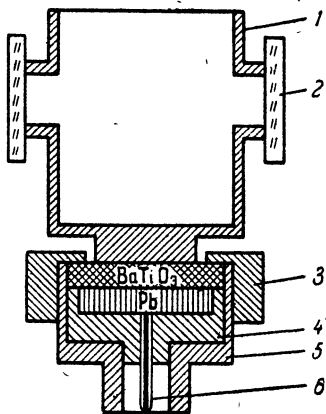


Рис. 3.

Вся система пьезоэлемента требует весьма тщательной сборки и юстировки, которые могут быть выполнены только специалистами.

Возбуждаемые переменным электрическим полем колебания титаната бария передаются дну сосуда с жидкостью и, далее, через дно сосуда и самой жидкости.

В результате через жидкость могут распространяться снизу вверх ультразвуковые волны, поверхности равных фаз которых горизонтальны. Эта система волн и образует фазовую дифракционную решетку, через которую распространяется параллельный пучок света, идущий из коллиматора. Расположение получающейся дифракционной решетки в вертикальном направлении делает теперь понятным, почему щель коллиматора установлена горизонтально.

Теперь уместно рассмотреть условия, при которых в столбе жидкости может образоваться не только система бегущих акустических волн, но и система волн стоячих. Для образования стоячих волн необходима интерференция двух встречных систем когерентных волн одинаковой амплитуды. Поэтому стоячие волны получаются практически всегда путем использования интерференции

волн падающих и волн отраженных. Очевидно, что в этом случае необходимо, чтобы плоскость источника, излучающего нормально к своей поверхности плоские волны, была бы параллельна некоторой отражающей эти волны поверхности. В нашем случае излучающей поверхностью является дно сосуда, а отражающей — поверхность жидкости в сосуде. Поверхность жидкости всегда горизонтальна. Значит, для получения стоячих акустических волн надо расположить горизонтально и дно сосуда. Поэтому сосуд установлен на столике с регулируемым наклоном.

Рассмотрим действие всей оптической системы.

Как уже указывалось в отсутствие ультразвуковых колебаний объектив, расположенный за сосудом с жидкостью, дает в своей фокальной плоскости действительное изображение входной щели коллиматора. Это изображение можно, разумеется, видеть на любом экране, например на белой бумаге, располагаемой в фокусе объектива. Можно также рассматривать это изображение в увеличенном виде, фокусируя на него окулярный микрометр. Если в результате прохождения через жидкость ультразвука в ней образовалась дифракционная решетка, то на этой решетке имеет место дифракция света, и в фокальной плоскости объектива получится ряд горизонтальных дифракционных максимумов (освещенных полосок)¹⁾. Центральная из этих полосок будет так называемым дифракционным максимумом нулевого порядка. Полоски, расположенные выше и ниже него, будут соответственно дифракционными максимумами ± 1 -го, ± 2 -го и т. д. порядков.

Если щель коллиматора освещена белым светом (т. е. если в револьверной диафрагме перед щелью введено отверстие без светофильтра), то дифракционный максимум нулевого порядка будет белым, а максимумы последующих порядков — окрашенными по краям, совершенно так же, как и при работе со всякой дифракционной решеткой. Введение того или иного светофильтра монохроматизирует картину. Всю эту дифракционную картину можно в нашей установке видеть и промерять в увеличенном виде окулярным микрометром. Линейные отрезки $\Delta z_{\pm n}$ между симметричными дифракционными максимумами порядков $\pm n$, деленные на фокусное расстояние объектива F , дают, очевидно, удвоенные углы (2φ) дифракции света на ультразвуковой решетке. Поэтому

$$\sin \varphi \approx \varphi \approx \frac{\Delta z_{\pm n}}{2F}. \quad (3)$$

Электрическая система, обслуживающая установку, состоит из генератора стандартных сигналов ГСС-6 (см. описание задачи 107),

¹⁾ Увидеть на каком-либо экране раздельно эти тесно расположенные полоски без окулярного микрометра при применяемых в настоящей задаче частотах ультразвука невозможно.

задающего напряжения небольшой амплитуды (1,5 в), но строго определенных частот, и стоящего на его выходе апериодического, достаточно широкополосного усилителя. Схема этого усилителя и его параметры приведены на рис. 4.

Задача усилителя заключается в том, чтобы во всем используемом в настоящей работе диапазоне частот без какой-либо настройки увеличивать снимаемое с ГСС-6 напряжение от 1,5 в до 15—20 в,

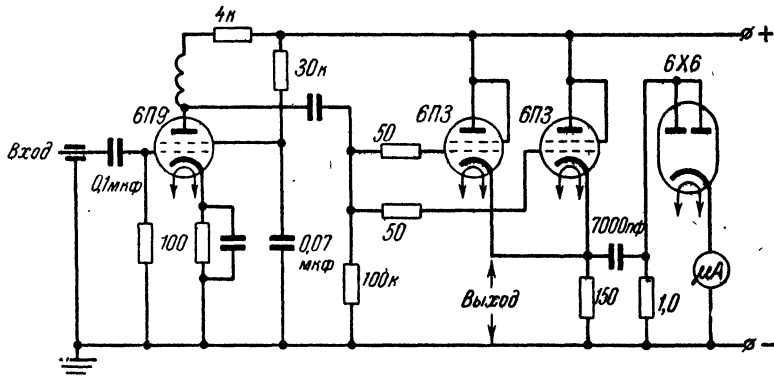


Рис. 4.

т. е. до значения, необходимого для возбуждения достаточно интенсивных колебаний пластины титаната бария, служащего пьезоэлементом системы. Коаксиальный кабель, подведенный к дну сосуда с жидкостью, подводит напряжение с усилителя к титанату бария.

В схеме усилителя надо обратить внимание на три отдельные его части, имеющие разные назначения. Непосредственное усиление сигнала с ГСС-6 дает входная лампа усилителя 6П9. За этой лампой стоит так называемый катодный повторитель, собранный на двух соединенных в параллель лампах 6П3. Катодный повторитель представляет собой усилитель с отрицательной обратной связью, дающий выходное напряжение в фазе с входным (отсюда название катодный повторитель). Катодный повторитель имеет коэффициент усиления по напряжению меньше единицы, но зато он освобождает генератор от нагрузок, включенных далее в схему (титанат бария).

Наконец, третьей частью усилителя является простой катодный вольтметр, составленный из служащего детектором диода 6Х6, конденсатора, сопротивления и микроамперметра, позволяющего измерять ток через диод, а в конечном счете и напряжение выхода с катодного повторителя.

Для точного измерения того же выходного напряжения с усилителя (при его регулировках) на передней панели усилителя резервировано еще гнездо для фишки прецизионного катодного вольтметра ВКС. В ходе выполнения задачи усилитель, разумеется, не регулируется.

Вся система ГСС и усилителя позволяет подавать на пластинку титаната бария напряжение разных частот, переходя от одной частоты к другой изменением настройки только ГСС и имея возможность всегда отсчитывать по ГСС значение используемой частоты.

Таким образом, можно возбуждать колебания пластинки титаната бария на разных ее собственных частотах (возбуждать разные гармоники основной частоты пластинки титаната бария). О возбуждении этих гармоник можно судить (при действующей оптической системе) по появлению дифракционных картин.

Так как две найденные таким образом смежные частоты излучающих колебаний пластинки титаната бария будут $(2k + 1)$ -й и $(2k + 3)$ -й гармониками пластинки, то разность этих двух смежных частот дает удвоенную основную (наинизшую) частоту собственных колебаний (основной тон) титаната v_0 ¹⁾.

Зная, что основное колебание пьезоэлемента возникает, когда толщина пластинки D равна половине длины волны возникающих упругих колебаний в титанате бария Λ_T , не представляет труда найти скорость упругих волн (звука) и в пластинке титаната бария

$$v_T = 2Dv_0. \quad (4)$$

Таким образом, используя явление дифракции света на ультразвуковых волнах в жидкости, на этот раз уже только как индикатор наличия интенсивных колебаний в пьезоэлементе, можно найти скорость звука в материале пьезоэлемента.

Подготовка установки к измерениям. Проверяют состояние установки. Неподвижные при измерениях детали оптической системы и скользящий рейтер держателя микрометра должны быть расположены у соответствующих отметок. Рейтер с держателем ножа со скамьи снят.

Уровень дистиллированной воды в сосуде должен стоять выше верхнего края окон. Диафрагмы объектива коллиматора и наблюдательного объектива — на отсчете 22. Перед щелью коллиматора установлен зеленый светофильтр (при наблюдении сбоку стекло светофильтра выглядит желтым).

Специальные указания о подготовке к работе и об использовании генератора стандартных сигналов и усилителя приводятся непосредственно в практикуме.

После проверки и подготовки установки просят лаборанта включить рубильник 220/127 в на щитке, от которого подается питание ртутной лампы и напряжение во все розетки. Затем включают тумблер на пускателе ртутной лампы и ее выключатель на столе. Если лампа сразу не загорается, то при включенном тумблере нажимают несколько раз кнопку пускателя.

Предоставив ртутной лампе разогреться, включают тумблер на панели ГСС; при этом загорается красная контрольная лампочка этого генератора. Вскоре измеритель выхода ГСС — стрелка при-

¹⁾ Интенсивные пьезоэлектрические колебания пластинки происходят только на нечетных гармониках ее основного тона, когда на поверхностях пластинки заряды разных знаков.

бора с надписью μV — отклоняется почти на всю шкалу прибора. Это соответствует напряжению выходного сигнала 1,5 в. Затем включают тумблер на панели выпрямителя, питающего усилитель. После прогрева выпрямителя включенный на контроль выхода с усилителя микроамперметр (на панели усилителя) покажет ток не менее 30—40 мка.

После включения высокочастотной аппаратуры переводят ручку «установка несущей» ГСС в крайнее левое положение, сводя таким образом к нулю напряжение выходного сигнала с ГСС и напряжение усиленного сигнала с усилителя.

Но вся система этих приборов остается включенной.

После этих операций, когда ртутная лампа разгорится, пользуясь продольными винтовыми салазками, тщательно фокусируют микрометром изображение щели коллиматора через зеленый светофильтр¹⁾. Просматривают изображение щели без светофильтров и со светофильтрами. Если изображение щели коллиматора сразу не видно в микрометр и нет явных признаков того, что вся оптическая система разъюстирована по высоте (в последнем случае обращаются к помощи преподавателя), то надо поместить белую бумагу перед тубусом микрометра и проверить, попадает ли на него свет от изображения щели, даваемого основным объективом системы. Если он не попадает, то регулируют наклон коллиматора до тех пор, пока световой блик не расположится впереди тубуса микрометра, на уровне его горизонтального диаметра. При этом условии щель будет видна в микрометр. Четкое изображение щели получается при существенном диафрагмировании объектива коллиматора. Затем плавным вращением вправо ручки с надписью «установка несущей» на панели ГСС устанавливают на выходе генератора напряжение около 1,5 в, которое измеряется по прибору с надписью μV на панели ГСС. Напомним, что если усилитель работает нормально, то на его измерителе выхода должен быть отсчет не менее 30 мка.

Теперь, не прекращая тщательных наблюдений через окулярный микрометр за изображением щели коллиматора (полученным с зеленым светофильтром), начинают очень медленно вращать ручку тонкой регулировки частоты генератора ГСС. Таким образом, плавно изменяя частоту генератора в обе стороны вокруг первоначально установленного значения 1600 кГц (5-й диапазон), обнаруживают появление оптической дифракционной картины.

Сначала параллельно первоначальному изображению щели коллиматора появляются слабые дифракционные максимумы ± 1 -го порядка.

¹⁾ Напомним, что крест нитей в окуляре микрометра фокусируется отдельно от фокусировки всего микрометра. Крест нитей фокусируется вращением оправы окулярной линзы микрометра (см. описание задачи 137).

Затем, по мере приближения частот ГСС к одной из собственных частот пластинки титаната бария, интенсивность этих максимумов увеличивается и, наконец, становятся заметными и менее интенсивные дифракционные максимумы ± 2 -го и даже ± 3 -го порядков. Отметим, что по причинам, в которые мы здесь не можем вдаваться, вблизи каждой резонансной частоты пластинки титаната бария — частоты, определяемой соображениями, изложенными перед формулой (4), существует еще вторая резонансная частота, для которой амплитуда колебаний невелика.

Наши наблюдения должны во всех случаях относиться к интенсивным дифракционным картинам.

После настройки ГСС на максимум интенсивности дифракционной картины можно считать подготовку установки к измерениям законченной.

Упражнение 1

Наблюдения дифракции света на ультразвуковых волнах и измерение скорости звука дифракционным методом

При максимальной яркости и четкости дифракционной картины измеряют несколько раз винтовым окулярным микрометром линейные расстояния $\Delta z_{\pm n}$ между дифракционными максимумами ± 1 -го, ± 2 -го, ± 3 -го порядков. Прodelывают это с зеленым или синим светофильтрами для линий ртути с длинами волн 5460 Å и 4358 Å. Записывают частоту генератора ГСС, при которой были выполнены измерения. Прodelывают те же измерения для частот около 2240 кГц (5-й диапазон) и около 1000 кГц (4-й диапазон). При каждой перестройке частоты ГСС доводят до возможного максимума его выходное напряжение. (Надо иметь в виду, что контрольный выходной прибор усилителя будет давать неодинаковые выходные напряжения на разных частотах, несмотря на одинаковые выходные напряжения с ГСС. Это связано с несовершенством частотной характеристики усилителя.) Из формулы (2) находим

$$\Lambda = \frac{2nF\lambda}{\Delta z_{\pm n}}. \quad (5)$$

Пользуясь этой формулой и измеренными значениями $\Delta z_{\pm n}$ (фокусное расстояние объектива $F = 30$ см, цена деления окулярного микрометра 0,01 мм), находят Λ для всех частот, использованных при наблюдениях дифракции, после чего вычисляют значение скорости звука в воде

$$v_{зв} = \Lambda \nu. \quad (6)$$

Затем, пользуясь известным соотношением $v_{зв} = \sqrt{1/\beta_s \rho}$, где β_s — адиабатическая сжимаемость воды, а ρ — ее плотность, находят значение β_s для воды.

Пользуясь формулой (4) и значениями разностей смежных резонансных частот пластинки титаната бария, соответствующих наблюдавшимся дифракционным картинам, находят скорость ультразвука в титанате бария. Толщина используемой пластинки титаната бария равна 6,5 мм. Пользуясь формулой

$$v_T = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}},$$

где v_T — скорость распространения продольных волн в твердом теле, E — модуль упругости вещества тела, а ρ — его плотность (для титаната бария $\rho = 5,23 \text{ г/см}^3$) и σ — коэффициент Пуассона, равный в данном случае 0,3, вычисляют модуль упругости титаната бария.

Упражнение 2

Непосредственные наблюдения ультразвуковых волн в жидкости и измерения их длины

Относительно непосредственного наблюдения ультразвуковых волн, как пространственных неоднородностей, возникающих в оптически прозрачном веществе при распространении в нем упругих волн, надо сделать несколько замечаний. Надо выяснить, каким образом становится видимой фазовая дифракционная решетка, которую мы рассматривали выше, и какое значение для наблюдения ультразвуковых волн имеет ее движение.

Фазовая дифракционная решетка невидима, если в плоскости изображения интерferируют все дифрагировавшие на решетке световые пучки. Для того чтобы она стала видимой, необходимо изменить фазу или и фазу и амплитуду некоторых дифрагировавших на решетке световых пучков. При наблюдениях макрообъектов применяются с той же целью теневые методы. Ультразвуковая решетка может быть видима без этих вспомогательных приемов потому, что она не есть чисто фазовая решетка, но является также в известной степени и амплитудной решеткой. Последнее обстоятельство может быть разъяснено следующим образом. Плоские световые волны, вступающие в жидкость, в которой распространяется ультразвук, попадают в среду с непрерывно изменяющимся показателем преломления, синусоидально отклоняющимся в пространстве от своего значения в невозмущенной среде. Как известно, в среде с непрерывно изменяющимся показателем преломления свет распространяется криволинейно. В нашем случае пространственная периодическая неоднородность среды приводит к тому, что вступающие в ультразвуковой столб световые пучки начинают сгущаться в пучностях показателя преломления и разрежаться в областях минимальных значений показателя преломления. Дальше, по мере продвижения света внутри ультразвукового столба, световые пучки будут вновь периодически сгущаться и разрежаться. Мгновенная картина распространения света в небольшом по высоте отрезке ультразвукового столба, высота которого равна удвоенной длине ультразвуковой волны, представлена на рис. 5. В этом отрезке ультразвукового столба прочерчены криволинейные траектории световых лучей, пересекающих возмущенную звуком среду. На этом рисунке отчетливо видно, что пространственная однородность светового пучка, имевшаяся до вступления его в жидкость, нарушена с пространственной периодичностью Λ . Это значит, что ультразвуковые волны образуют не только фазовую, но и амплитудную решетку. Последнее обстоятельство и определяет возможность непосредственной видимости ультразвуковой решетки во вполне прозрачной среде, даже при использовании всех дифрагировавших световых пучков. Для того чтобы видеть ультразвуковую

решетку в наиболее простых условиях, наблюдаемая в ней плоскость выбирается вблизи выходного окна кюветы.

Необходимо, однако, подчеркнуть, что описанный способ наблюдения обеспечивает правильную передачу пространственной периодичности ультразвуковой решетки, не давая распределения плотности вещества в ультразвуковой волне. Однако наблюдаемая пространственная периодичность ультразвуковой решетки воспроизводится с возможным изменением ее линейных размеров, за счет

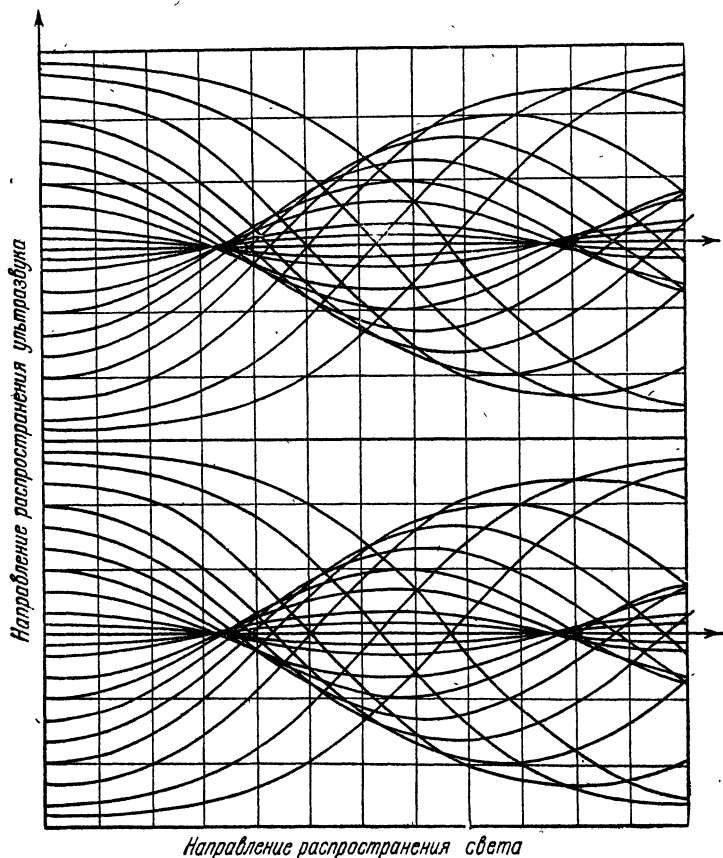


Рис. 5.

геометрического увеличения, даваемого объективом b нашей установки (рис. 1). Если объектив расположен точно на двойном фокусном расстоянии от выходного окна кюветы, то указанное увеличение равно единице. В нашем случае это увеличение несколько больше единицы и его значение указано непосредственно в надписи на установке.

Наблюдение изображения ультразвуковых волн, даваемого объективом, производится через тот же окуляр, который служил для промеров дифракционной картины, но рейтер окуляра устанавливается для этого на двойном фокусном расстоянии от объектива.

Если ультразвуковые колебания не очень интенсивны и проходящий сквозь них свет слабо пространственно модулирован по амплитуде, то для улучшения видимости акустических волн полезно применить теневой метод наблюдения. Сущность этого метода можно понять, исходя из дифракционной теории оптического изображения (см. [1] и описание задачи 140). Оптическое изображение объекта, вызвавшего дифракцию света, является результатом интерференции световых пучков, исходящих из дифракционных максимумов, образованных в фокальной плоскости объектива. В случае неглубокой пространственной амплитудной модуляции света структурой объекта в дифракционной картине большую интенсивность имеет максимум нулевого порядка. Этот максимум создает в плоскости изображения однородный светлый фон. Для улучшения видимости прозрачных структур полезно этот фон исключить, что можно сделать, прикрыв в фокальной плоскости объектива непрозрачным экранчиком дифракционный максимум нулевого порядка. Именно этот прием наблюдения, носящий название метода темного поля, используется в нашем случае для облегчения непосредственных измерений длины ультразвуковых волн в жидкости.

Для прикрывания максимума нулевого порядка можно использовать в качестве экранчика тонкую проволоку. Однако это технически неудобно и для этой цели проще воспользоваться специальным ножом.

За объектом, на скользящем вдоль оптической скамьи рейтере, располагается в особом держателе горизонтальный нож (лезвие бритвы). Держатель ножа имеет тонкую винтовую регулировку вертикального положения: подъем и опускание ножа осуществляется вращением гайки с накаткой. Кроме того, крепление ножа допускает регулировку наклона режущего края ножа в вертикальной плоскости, перпендикулярной к оптической оси системы. Эта регулировка наклона лезвия ножа осуществляется винтом, накатанная головка которого помещается под опорой держателя ножа. Если нож расположен в фокальной плоскости объектива и если край его лезвия параллелен дифракционным максимумам, то, перемещая нож по вертикали, например снизу вверх, можно прикрыть максимум нулевого порядка. При этом окажутся прикрытыми также и все дифракционные максимумы отрицательных порядков (-4 , -3 , -2 , -1), но это не мешает наблюдениям. Останутся открытыми все дифракционные максимумы положительных порядков, а они достаточны для формирования оптического изображения с пространственной периодичностью, равной пространственной периодичности структуры, вызвавшей дифракцию. Отсутствие дифракционных максимумов отрицательных порядков скажется только на интенсивности оптической картины. Но в нашем случае установка достаточно светосильна и можно одновременно с максимумом нулевого порядка прикрывать и все дифракционные максимумы отрицательных порядков. О том, как практически пользоваться ножом, сказано дальше при описании техники измерений. Картина ультразвуковых волн, видимость которой улучшена описанным приемом, промеряется винтовым окулярным микрометром.

Прежде чем переходить к описанию техники этих измерений, сделаем несколько замечаний относительно того, как проявляется при наблюдениях то обстоятельство, что наблюдаемая структура реализована изменяющейся во времени ультразвуковой решеткой. Здесь, так же как и при обсуждении вопроса о дифракции света, нам надо отдельно рассмотреть случаи бегущих и стоячих акустических волн.

Наблюдения бегущих звуковых волн глазом, как прибором, обладающим инерцией зрительного восприятия, невозможно. И при длительном фотографировании и при визуальном наблюдении бегущие акустические волны дадут слившийся равномерно освещенный фон. Фотографирование бегущих волн возможно только при кратковременном их освещении вспышкой электрического разряда.

Фотографирование с длительной экспозицией и визуальные наблюдения бегущих волн возможны также при их стробоскопическом освещении с частотой, равной или кратной частоте ультразвука. При значительном напряжении на выходе ультразвукового генератора возможно стробоскопическое освещение

бегущих волн газоразрядной трубкой, питаемой тем же генератором. Картина волн будет четкой только в том случае, если трубка будет освещать волны лишь в течение малой доли каждого периода колебаний напряжения генератора.

Иначе обстоит дело в случае стоячих волн. Узловые точки этих волн расположены на расстояниях $\Lambda/2$ друг от друга и неподвижны в пространстве. Между узлами смещений расположены элементы среды, периодически во времени образующие пучности смещений в ультразвуковых волнах. Поэтому при длительном фотографировании или при инерциальном визуальном наблюдении возможна регистрация усредненной во времени пространственной картины стоячих волн. Пространственный период этой картины, зарегистрированной при непрерывном освещении стоячих волн, будет, очевидно, равен $\Lambda/2$. Для дифракционных же оптических явлений на ультразвуковых волнах существенно мгновенное распределение показателя преломления в среде, а оно имеет и в бегущей и в стоячей волне один и тот же пространственный период Λ .

Для наблюдения и промеров ультразвуковых волн необходимо возбуждать в жидкости волны максимальной интенсивности. В данной установке нужные наблюдения всего лучше удаются при частоте 1600 кГц (5-й диапазон). Поэтому перед наблюдением ультразвукового поля надо вернуться к настройке ГСС на эту частоту и добиться, пользуясь верньером тонкой настройки частоты, максимальной интенсивности ультразвука в жидкости, о чем надо судить по числу видимых порядков дифракционных максимумов. Необходимо отчетливо видеть ± 3 порядка при работе с зеленым светофильтром.

Когда это условие достигнуто, можно приступить к наблюдениям ультразвуковых волн в жидкости. Сохраняя неизменной настройку ГСС, перемещают держатель окулярного микрометра в положение, соответствующее рекомендованному специально для этого случая отсчетам. Затем помещают на оптическую скамью держатель ножа в положение, также соответствующее рекомендованному. При этом плоскость лезвия ножа совпадает с фокальной плоскостью наблюдательного объектива. Диафрагма объектива коллиматора должна быть полностью открыта.

Пользуясь белым светом ртутной лампы, находят максимум нулевого порядка (тонкая яркая горизонтальная полоска) на лезвии ножа. Регулируя высоту и наклон ножа, приводят режущую кромку лезвия ножа в совпадение с этой светлой полоской. Затем, немного поднимая нож, перекрывают кромкой лезвия дифракционный максимум нулевого порядка. После этого в окулярный микрометр должна быть видна картина стоячих ультразвуковых волн в жидкости. Ее можно наблюдать либо в белом свете, либо с зеленым светофильтром. Стоячие ультразвуковые волны при пользовании белым светом видны как параллельные светлые и сероватые горизонтальные полоски. Для улучшения их видимости можно, не прекращая наблюдений за волнами, немного порегулировать наклон и высоту кромки ножа. Кроме того, можно также, не прекращая наблюдений за волнами, порегулировать верньером тонкой настройки частоту ГСС.

Впрочем, как правило, регулировка частоты, достигнутая при предварительном наблюдении интенсивной дифракционной картины, бывает наилучшей.

Не следует ожидать, что ультразвуковые волны могут быть видны так же четко, как, например, проволочная сетка. Ультразвуковые волны дают в жидкости лишь области большего или меньшего сжатия жидкости, которое распределено лишь в объеме по синусоидальному закону. Таким образом, контрастность наблюдаемой картины далека от контрастности абсорбционных структур. Поэтому не имеет смысла пытаться фокусировать картину путем перемещения окулярного микрометра вдоль оптической скамьи, если он уже поставлен на рекомендованный отсчет и нож прикрыл максимум нулевого порядка.

Существенно обратить внимание на то, как опускание ножа, приводящее к открыванию дифракционного максимума нулевого порядка, влечет за собой исчезновение картины ультразвукового поля. На этом частном примере наглядно видна возможность улучшения видимости, открывающаяся при воздействии на даваемую ими дифракционную картину.

После того как выполнены описанные качественные наблюдения дифракционной картины, производят несколько раз при помощи окулярного микрометра промер отрезка, равного десяти ультразвуковым полуволнам. Расстояние между каждой парой соседних видимых темных (или светлых) полосок в звуковом поле равно половине длины звуковой волны.

По найденным значениям длин акустических волн и по значениям использованных частот колебаний вычисляют скорость распространения звука в жидкости (воде).

Технические данные установки. В качестве источника света используется ртутная лампа ПРК-2, но могут использоваться также лампы ПРК-4 и ДРС-50. Коллиматорным и наблюдательным объективами служат объективы типа Индустар И-13 с фокусным расстоянием 30 см. В качестве окулярного микрометра используется винтовой микрометр марки АМ-9. Генератор стандартных сигналов ГСС-6 дополнен аperiodическим усилителем, схема и параметры которого приведены выше. При использовании некалиброванных по частоте генераторов необходим волномер. Установка может быть собрана на оптической скамье марки ОСК-1. Детали установки изготовлены на физическом факультете университета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957, § 57.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. Л. Бергман, Ультразвук, ИЛ, 1956.
3. Специальный физический практикум, под редакцией Г. В. Спивака, т. 1, Гостехиздат, 1945.
4. С. М. Рытов, Дифракция света на ультразвуковых волнах, Изв. АН СССР, серия физич., № 2, 223, 1937.

ЗАДАЧА 142

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКАХ

В задаче излагаются методы получения плоскополяризованного света, определяется направление колебаний плоскополяризованного света, пропущенного николем и естественным кристаллом исландского шпата, изучаются различные случаи интерференции поляризованного света, определяется толщина кристаллических пластинок и величина двупреломления кристаллической пластинки. Все указанные явления изучаются на простейшем приборе, на котором весьма наглядно с помощью отражения от черной стеклянной пластинки (диэлектрика) получается поляризованный пучок света.

Основные понятия. Плоскополяризованный свет характеризуется тем, что в нем колебания электрического вектора совершаются в одном, определенном направлении. Плоскость, содержащую это направление и направление светового пучка, называют *плоскостью колебаний*. В естественном свете плоскость световых колебаний хаотически меняет свое направление в пространстве. Плоскость,

перпендикулярная к той, в которой совершаются световые колебания, носит название *плоскости поляризации* данной волны. Таким образом, плоскость световых колебаний и плоскость поляризации взаимно перпендикулярны.

Получать линейно поляризованный свет можно следующими способами:

1. С помощью отражения от диэлектрика (стекло, вода и пр.). При этом в общем случае получается свет только частично поляризованный; но при некотором угле падения световой волны на зеркало поляризация делается полной. Это происходит в том случае, когда тангенс угла падения равен показателю преломления вещества, из которого сделано зеркало. Этот угол называется *углом полной поляризации* (или просто — углом поляризации) и для стекла равен $\sim 57^\circ$. При полной поляризации плоскость колебаний отраженной волны перпендикулярна к ее плоскости падения.

2. С помощью преломления в стеклянной пластинке. Здесь поляризация всегда неполная. В то время как отраженная волна при угле полной поляризации целиком поляризована, в пучке преломленном поляризованного света будет лишь столько, сколько его имеется в пучке отраженном. Например, в случае стекла из пучка, падающего на поверхность стекла под углом поляризации, отражается только $\frac{1}{7}$ часть, а $\frac{6}{7}$ проходят через стекло, но в этом последнем пучке поляризованного света будет тоже только $\frac{1}{7}$, остальные $\frac{5}{7}$ остаются естественным светом.

Чтобы достичь большей степени поляризации и в преломленном световом пучке, его пропускают под углом поляризации (под углом 57°) через стопу тонких стеклянных пластинок, наложенных одна на другую (стопа Столетова).

3. Третий способ получения поляризованного света — с помощью преломления естественного света в кристаллах; при этом наблюдается двойное преломление, т. е. разделение световой волны в кристалле на две, идущие с разными скоростями.

4. С помощью поляризационных призм и полярOIDов. В кристаллах оптически одноосных (исландский шпат, кварц и др.) волна, распространяющаяся в направлении оси симметрии высшего порядка, не претерпевает раздвоения, и свет не поляризуется. Направление, обладающее таким свойством, носит название *оптической оси*. Свет же, входящий в кристалл по всякому иному направлению, распадается на две полностью поляризованные волны с взаимно перпендикулярными плоскостями колебаний. Одна из этих волн, носящая название *обыкновенной*, распространяется во всех направлениях с одинаковой скоростью и, следовательно, характеризуется постоянным значением показателя преломления, обозначаемого n_0 . Направление световых колебаний в этой волне перпендикулярно к главному сечению кри-

сталла, т. е. к плоскости, проходящей через направление распространения света и направление оптической оси.

Вторая световая волна, называемая *необыкновенной*, распространяется в кристалле с различными скоростями в зависимости от направления распространения и, следовательно, характеризуется различными показателями преломления. Значение показателя преломления необыкновенной волны, максимально отличающееся от значения для обыкновенной волны, обозначается через n_e .

Обе световые волны, обыкновенная и необыкновенная, полностью поляризованы. При этом световые колебания необыкновенной волны совершаются в плоскости главного сечения кристалла, а колебания обыкновенной волны к ним перпендикулярны. Таким образом, общая поверхность световых волн в одноосном кристалле представляет собой сложную поверхность, состоящую из шара и эллипсоида, вписанного в шар (положительный кристалл) или описанного (отрицательный кристалл) вокруг шара; при этом шару соответствует обыкновенная волна, а эллипсоиду — необыкновенная. Линия, соединяющая точки касания эллипсоида и шара, будет направлением, в котором скорости обыкновенной и необыкновенной волн равны и, следовательно, не будет происходить явления двупреломления. Это и будет направлением оптической оси.

В оптически двуосных кристаллах поверхность световой волны имеет значительно более сложную форму и представляет собой двухполостную поверхность. Световая волна, попавшая в такой кристалл, распадается на две волны, световые колебания в которых совершаются в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Скорость распространения световых волн в различных направлениях различна, имеются лишь два направления, в которых скорости обеих волн равны. Эти два направления и будут *оптическими осями* кристалла. Угол между оптическими осями зависит от величины трех главных показателей преломления кристалла и может быть для разных веществ весьма различным. В том случае, когда острый угол между оптическими осями делится пополам направлением, в котором распространяются световые волны с максимальной и средней скоростью, кристалл считается оптически *положительным*. Если же в указанном направлении распространяются световые волны с минимальной и средней скоростями, кристалл считается оптически *отрицательным*. Плоскость, проходящая через оптические оси, называется *главным сечением* кристалла.

Отличить естественный свет от поляризованного и определить направления световых колебаний в нем можно при помощи *анализатора*; те же приборы служат и для получения поляризованного света. Анализатором служит прибор, носящий название *призмы Николя* или просто *николя*. Он состоит из длинного кристалла *abcd* (рис. 1) исландского шпата, разрезанного наклонно по плоскости *gf* на две части, склеенные затем канадским бальзамом. Если

естественная световая волна S падает на одну из коротких граней николя под углом не более 33° , то она всегда разделяется в кристалле на обыкновенную S_o и необыкновенную S_e волны, причем необыкновенная волна проходит через весь кристалл, тогда как обыкновенная, достигая канадского бальзама, претерпевает полное внутреннее отражение (показатель преломления канадского бальзама меньше показателя преломления исландского шпата для обыкновенной волны, но больше показателя преломления для необыкновенной волны). Таким образом, николь пропускает только необыкновенную волну, колебания которой совершаются в плоскости главного сечения.

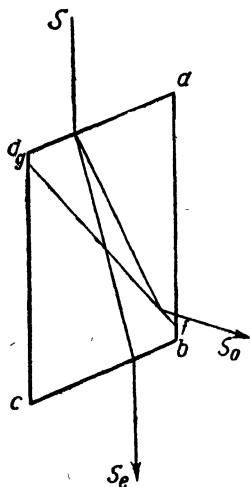


Рис. 1.

В натуральном ромбоэдре исландского шпата приходится иметь дело с обеими волнами сразу; оба световых пучка имеют одинаковую яркость, если они произошли из естественного света; но если на кристалл падает свет, уже поляризованный, яркости обоих пучков будут различны. Если пучок естественного света падает на грань кристалла нормально, то обыкновенная волна проходит через него без отклонения, а необыкновенная отклоняется в сторону и по выходе из кристалла идет параллельно обыкновенной волне. Поэтому, если вращать ромбоэдр вокруг направления пучка падающего света, вышедший из кристалла пучок обыкновенного света будет оставаться неподвижным, а пучок необыкновенного света будет вращаться вокруг него,

что дает возможность отличать их друг от друга. Если на анализатор падает свет, плоскость световых колебаний в котором составляет угол α с главной плоскостью анализатора, то интенсивность пропущенного анализатором света будет

$$I = I_0 \cos^2 \alpha,$$

где I_0 есть интенсивность падающего светового пучка. Если обе плоскости взаимно перпендикулярны, то будет полное затемнение поля.

Описание прибора. На горизонтальном основании укреплены две вертикальные стойки, короткая и длинная, между которыми зажимается пластинка из черного стекла P (рис. 2), вращающаяся вокруг горизонтальной оси. Пластинка представляет собой поляратор, так как рассеянный свет от осветителя, падающий на нее сбоку, после отражения становится линейно поляризованным. Поляризованный свет, полученный при отражении, направляется вертикально вверх к столику T . Столик снабжен кругом, разделенным на градусы и вращающимся в своей плоскости, причем углы

поворота отсчитываются при помощи неподвижного указателя. В круглый вырез столика помещается или стеклянная пластинка с начерченным на ней крестом, или металлическая диафрагма с круглым отверстием; таких диафрагм имеется две с отверстиями различных диаметров. На столик кладут кристаллические пластинки, подлежащие изучению.

В качестве анализатора A в данном приборе употребляется николь, помещающийся на верхней платформе Q . Деления на Q служат для определения положения анализатора относительно поляризатора P (т. е. относительного положения плоскости главного сечения анализатора и плоскости колебания света, отраженного от зеркала), для этого на анализаторе сделана сбоку метка — черная черта. Иногда анализатор заменяется ромбоэдром из исландского шпата (на рисунке не показано) для одновременного наблюдения обыкновенного и необыкновенного световых пучков.

При приборе имеется линза для более отчетливого рассматривания предметов, находящихся на столике T ; ее кладут на анализатор.

Установка прибора. Прежде всего следят за тем, чтобы центры кругов T и Q приблизительно находились на одной вертикали.

Прибор помещают на подставке несколько выше источника рассеянного света (например, матовой лампы); зеркало P наклоняют так, чтобы свет падал на него под углом поляризации и непосредственно отражался вертикально вверх. Для более легкого нахождения этого угла некоторые приборы снабжаются лимбом, а зеркало — указателем, скользящим по этому лимбу.

Свет, прошедший через анализатор, будет полностью поляризован, если можно найти такое положение анализатора, при котором светлый кружок в диафрагме, положенной на T , полностью исчезает. При этом плоскость световых колебаний будет перпендикулярна к плоскости падения естественного света на P .

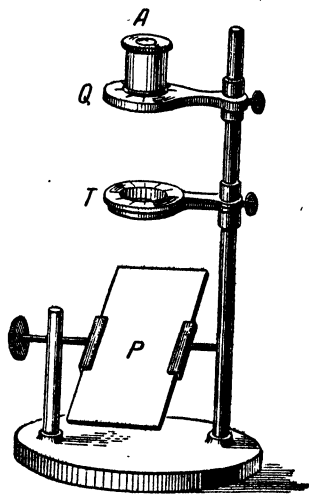


Рис. 2.

Упражнение 1

Изучение явлений, наблюдаемых в линейно поляризованном свете

1. Находят направление плоскости световых колебаний, пропускаемых анализатором, и направление плоскости его главного сечения по отношению к диагоналям. Для этого следят, как

изменяется освещение поля при вращении анализатора A на 360° ; отмечают те положения его относительно плоскости колебаний падающего света, при которых наблюдаются наибольшее и наименьшее освещение поля, и объясняют наблюдаемые изменения.

2. Вместо анализатора A помещают на платформу Q ромбоэдр из исландского шпата. При малой диафрагме на столике T через ромбоэдр видны два ее изображения в виде двух отдельных кружков, а при диафрагме с широким отверстием оба изображения отчасти налегают друг на друга. Эти изображения относятся к пучкам обыкновенного и необыкновенного света.

Определяют направление плоскости колебаний обыкновенного и необыкновенного света и положение главного сечения в ромбоэдре по изменениям интенсивности обоих изображений диафрагмы. Объясняют, почему при широкой диафрагме яркость общей части изображений при вращении остается одинаковой.

Упражнение 2

Изучение интерференции поляризованного света

Если между поляризатором P и анализатором A помещена двупреломляющая пластинка, вырезанная не перпендикулярно к оптической оси, то белый свет, прошедший из поляризатора через пластинку и анализатор, не будет вполне погашен ни при каком относительном положении указанных трех объектов, но выйдет окрашенным. Исключение будет только в том случае, когда главные направления в пластинке совпадают с главными направлениями перекрещенных поляризатора и анализатора. Получающаяся окраска — не монохроматическая, а сложная (смешанная) и более или менее разбавленная примесью белого цвета.

Окраска зависит также и от угла падения света на пластинку. Когда свет проходит параллельным пучком и сама пластинка плоскопараллельна, то все поле одинаково окрашено. Если пластинка не плоскопараллельная, то окраска будет различная, соответственно изменению толщины пластинки; так, сферически вогнутая или выпуклая пластинка даст цветные кольца, клинообразная — прямые полосы.

Описанное явление в общих чертах объясняется так: каждая монохроматическая волна поляризованного пучка света, вступая в двупреломляющую пластинку, вообще говоря, разделяется на две волны, поляризованные под прямым углом друг к другу, колебания в которых параллельны главным направлениям H_1 и H_2 (рис. 3). Эти волны при небольшом угле падения и при малой толщине пластинки идут в ней почти по одному направлению и выходят из нее, почти совпадая. Пройдя пластинку с различными скоростями, они приобретают некоторую разность хода и, следовательно, соответственную разность фаз. Вследствие взаим-

ной перпендикулярности колебаний они не могут интерферировать; при этом получается свет, поляризованный эллиптически. Анализатор A из каждой волны пропускает лишь компоненты, поляризованные в одной плоскости. Эти волны интерферируют в зависимости от разности хода, полученной ими в кристаллической пластинке, упомянутой в начале описания этого упражнения.

Эта разность хода различна для волн различного направления и различной длины. Таким образом, в выходящем из поляризационной системы световом пучке монохроматические составные части присутствуют не в такой пропорции, как первоначально, и световой пучок становится окрашенным.

Пусть монохроматический свет падает на пластинку нормально. На рис. 3 плоскость чертежа перпендикулярна к проходящему через точку O пучку света, PO — плоскость световых колебаний в поляризаторе, AO — в анализаторе, OH_1 и OH_2 — в кристаллической пластинке, $OK = a$ — амплитуда колебаний света, вышедшего из поляризатора. Анализатор пропустит лишь слагающие с колебаниями, направленными по OA ; амплитуды их будут $a \cos \alpha \cos \beta$ и $a \sin \alpha \sin \beta$. Две волны, окончательно выходящие из анализатора, получили в пластинке разность хода R и разность фаз δ . Волны эти, слагаясь, дают волну, амплитуда колебаний которой находится из уравнения

$$A^2 = a^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta + a^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \beta + 2a^2 \cos \alpha \cos \beta \sin \alpha \sin \beta \cos \delta.$$

Заменяя $\cos \delta = 1 - 2 \sin^2 \delta/2$, получим для интенсивности прошедшего света

$$\begin{aligned} I &= I_0 \left[(\cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta)^2 - 4 \cos \alpha \cos \beta \sin \alpha \sin \beta \sin^2 \frac{\delta}{2} \right] = \\ &= I_0 \left[\cos^2 (\alpha - \beta) - \sin 2\alpha \sin 2\beta \sin^2 \frac{\delta}{2} \right]. \end{aligned}$$

При скрещенных николях $\alpha = \beta + 90^\circ$,

$$I = I_0 \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\delta}{2}.$$

При параллельных николях $\alpha = \beta$

$$I = I_0 \left(1 - \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\delta}{2} \right).$$

Выразим разность фаз δ через показатели преломления волн. Пусть d — толщина пластинки, а v_1 и v_2 — скорости двух поляри-

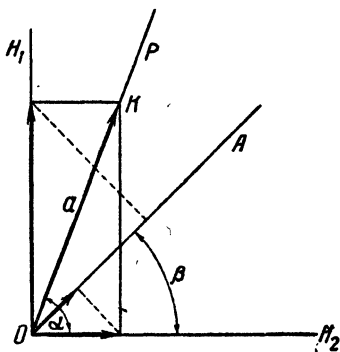


Рис. 3

зованных волн, распространяющихся в пластинке в одном и том же направлении. Зависимость разности хода R от d , v_1 и v_2 легко может быть выведена. Пусть время прохождения волны со скоростью v_1 через кристаллическую пластинку равно t_1 , а то же время для волны со скоростью v_2 равно t_2 . Тогда расстояние, пройденное первой волной в воздухе в момент, когда вторая волна выходит из кристалла в воздух, равно $(t_2 - t_1)v$, где v — скорость света в воздухе. Это выражение и есть разность хода R . Таким образом,

$$R = v(t_2 - t_1).$$

Заменяя t_2 и t_1 выражениями d/v_2 и d/v_1 , получаем $R = d(v/v_2 - v/v_1)$, а так как $v/v_2 = n_2$ и $v/v_1 = n_1$, где n — показатель преломления, а индексы 1 и 2 соответствуют большей и меньшей скорости распространения волны в кристалле, то $R = d(n_2 - n_1)$, следовательно, разность фаз

$$\delta = \frac{2\pi R}{\lambda} = \frac{2\pi d}{\lambda}(n_2 - n_1).$$

Итак, в случае P , перпендикулярного к A ,

$$I = I_0 \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\pi d}{\lambda}(n_2 - n_1). \quad (1)$$

Отсюда вытекает, что $I = 0$ в двух случаях: либо при $\alpha = 0$, либо при $\frac{\pi}{\lambda} d(n_2 - n_1) = m\pi$, где m — целое число или нуль.

Первое условие, $\alpha = 0$, означает, что направления колебания света в николях совпадают с направлениями колебаний света в пластинке, т. е. что в пластинке разложения света на две компоненты не происходит. Второе условие может быть осуществлено в следующих двух случаях: или при $n_2 - n_1 = 0$, т. е. если пластинка вырезана перпендикулярно к оптической оси, или при $d(n_2 - n_1) = m\lambda$, откуда видно, что пластинка будет казаться темной только в случае применения монохроматического света; в белом же свете будут уничтожаться только те световые колебания, для которых в данной разности хода укладывается целое число волн, и, следовательно, пластинка всегда будет казаться окрашенной в определенный цвет в зависимости от величины $d(n_2 - n_1)$.

Интенсивность света будет максимальной при $\alpha = 45^\circ$, т. е. в том случае, когда пластинка помещена так, что ее главные направления делят углы между главными направлениями анализатора и поляризатора пополам.

Вторым условием максимума для монохроматического света будет

$$\frac{\pi}{\lambda} d(n_2 - n_1) = (2m + 1) \frac{\pi}{2}, \quad \text{т. е. } d(n_2 - n_1) = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

Если P параллельно A , то

$$I = I_0 \left[1 - \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\pi}{\lambda} d (n_2 - n_1) \right]. \quad (2)$$

В этом случае условия интерференции будут обратны условиям, выведенным для P , перпендикулярного к A .

При наблюдении в белом свете интерференционные окраски при параллельных P и A будут дополнительными к окраскам, наблюдаемым в скрещенных P и A . В этом легко убедиться, заменяя анализатор ромбоэдром D и наблюдая через широкую диафрагму. Оба изображения будут отчасти накладываться друг на друга, и общая их часть будет оставаться все время белой.

Разность между длинами двух ближайших погашенных волн (а следовательно, и дающих свет) может быть вычислена из условия

$$(m - 1)\lambda = m(\lambda - \delta\lambda), \quad \text{откуда } \delta\lambda = \lambda/m,$$

т. е. чем больше m (чем больше разность хода), тем ближе в спектре будут расположены усиливающиеся волны. При достаточно большой разности хода свет очень многих длин волн во всех областях спектра даст максимум интенсивности, и прошедший свет будет казаться белым. Поэтому явление интерференции поляризованного света наблюдается только при малой разности хода, т. е. в тонких пластинках.

Установив A перпендикулярно к P , помещают на столик кварцевую пластинку. Требуется: найти и отметить направление колебаний света по отношению к ее сторонам a и b ; проследить, как будут изменяться окраска пластинки и интенсивность освещения в белом свете при вращении ее на 360° .

Поставив A параллельно P , проделывают то же самое и при помощи ромбоэдра убеждаются, что это изображение окрашено в дополнительный цвет по отношению к цвету, наблюдавшемуся в предыдущем случае.

Приведя пластинку в диагональное положение по отношению к A и P (главные направления в пластинке расположены под углом 45° к главным направлениям A и P), при A , перпендикулярном к P , определяют все изменения в цвете и интенсивности освещения пластинки при вращении анализатора на 360° и объясняют наблюдаемые явления.

Если при скрещенных P и A поместить под анализатором пластинку из кварца, дающую чувствительный оттенок ¹⁾,

¹⁾ Чувствительным оттенком называется оттенок лиловато-красного цвета, к изменениям которого особенно чувствителен человеческий глаз. Чтобы при скрещенных николях получить такой оттенок, следует взять пластинку из кварца, дающую разность хода около 560 мкм. При этом свет этой длины волны (желто-зеленый), согласно уравнению (1), будет целиком погашен, и пластинка будет казаться окрашенной в чувствительный оттенок.

а слюдяную пластинку в четверть волны¹⁾ положить на столик прибора, то интерференционная окраска, наблюдаемая в приборе, будет изменяться в зависимости от взаимного расположения кварцевой и слюдяной пластинок. При совпадении направлений колебаний света с большей скоростью распространения в кварцевой и слюдяной пластинках результирующая разность хода R будет равна сумме разностей ходов в обеих пластинках, R_k и $R_{сл}$, т. е.

$$R = R_k + R_{сл} = 560 \text{ мкм} + 147 \text{ мкм}$$

и окраска будет зеленовато-голубой. При перпендикулярности этих направлений разности хода будут вычитаться одна из другой, т. е.

$$R = R_k - R_{сл} = 560 \text{ мкм} - 147 \text{ мкм}$$

и окраска будет оранжево-желтой. В том случае, когда направления колебаний света в слюдяной пластинке совпадают с главными направлениями поляризатора и анализатора, даваемая ею разность хода будет равна нулю, и результирующая разность хода

$$R = R_k = 560 \text{ мкм},$$

т. е. будет сохраняться окраска чувствительного оттенка.

Поместив между скрещенными поляризатором и анализатором кварцевую пластинку чувствительного оттенка и какую-либо другую из имеющихся в наборе, следят за изменением окраски и интенсивности света при вращении пластинок, сначала исследуемой, а затем кварцевой. Требуется объяснить наблюдаемые явления.

Упражнение 3

Определение толщины кристаллической пластинки и величины двупреломления

1. Определение толщины кристаллической пластинки с помощью кварцевого клина. Этот клин (рис. 4) вырезается таким образом, чтобы острое ребро его (вершина) было параллельно одному из главных направлений кристалла. Если клин поместить в приборе между скрещенными поляризатором и анализатором ($P \perp A$) в диагональном положении так, чтобы длинная его сторона делила угол между P и A пополам, то в монохроматическом свете на всем протяжении клина наблюдаются светлые и темные полосы, параллельные острому ребру клина, равноотстоящие друг от друга. Темные

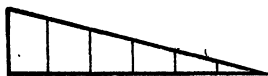


Рис. 4.

¹⁾ Под пластинкой в четверть волны подразумевают обычно пластинку, дающую разность хода в четверть длины волны желтой линии натрия.

полосы наблюдаются при разности хода

$$R = d(n_2 - n_1) = 2m \frac{\lambda}{2} = m\lambda,$$

а светлые — при

$$R = d(n_2 - n_1) = (2m + 1) \frac{\lambda}{2},$$

где d есть толщина клина, а m обозначает порядок полосы, т. е. целое число. Отсюда следует, что расстояние полос друг от друга возрастает пропорционально λ ; следовательно, для фиолетовых лучей полосы будут более сближены, чем для красных. Поэтому в белом свете на клине должны наблюдаться цветные полосы, окраска которых изменяется с толщиной клина почти в той же последовательности, как в кольцах Ньютона. При вращении клина вокруг падающего пучка света наблюдаются четыре положения, когда светлые полосы исчезают и все поле кажется темным. Это будет в том случае, когда главные направления H_1 и H_2 клина совпадают с направлением колебаний в P или A .

При $A \parallel P$ в этих четырех положениях клин будет казаться белым; в диагональных его положениях в монохроматическом свете будут наблюдаться светлые полосы там, где при скрещенных николях наблюдались темные полосы, и наоборот; в белом свете будут наблюдаться также цветные полосы, но дополнительные до белого по отношению к полосам при скрещенных николях.

По мере возрастания толщины клина окраска его в белом свете будет меняться, причем некоторые цвета будут периодически повторяться, например красный, фиолетовый, зеленый; поэтому эти спектры интерференции, так же как и спектры дифракции, разделяют на спектры 1-го, 2-го, 3-го и т. д. порядков и говорят, например, о красном цвете 1-го порядка, 2-го порядка и т. д. Различные цвета первых трех порядков очень яркие, и им соответствуют вполне определенные толщины клина; после 3-го порядка цвета начинают бледнеть и наиболее резко выступают только зеленый и красный; при большой толщине клина и эти цвета пропадают, и клин делается бесцветным, как это имеет место и для колец Ньютона. Это объясняется наложением в каждой точке друг на друга различных цветов, дающих при сложении белый свет.

В таблице 18 (в конце книги) для $P \perp A$ и для $P \parallel A$ даются последовательности цветов в спектрах первых трех порядков кварцевого клина, там же дана соответственная толщина клина в миллиметрах. Пользуясь этой таблицей, можно определить толщину данной кварцевой пластинки. Для этого следует наложить пластинку на клин так, чтобы в них совпадали разнородные главные направления (H_1 клина с H_2 пластинки); тогда в том месте, где толщина их одинакова, получится при $P \perp A$ черная полоса, а по обе стороны

е будут идти спектры 1-го, 2-го и т. д. порядков; сдвинув несколько пластинку в сторону параллельно острому ребру клина, увидим на клине, какому цвету и какому порядку соответствует окраска пластинки, и тогда толщина ее определится по таблице. Кроме того, можно таким же образом определить порядок окраски любой кристаллической пластинки и эквивалентную ей толщину кварцевого клина.

Все описанные здесь явления следует наблюдать на кварцевом клине как в монохроматическом свете (применяя светофильтры), так и в белом для $P \perp A$ и $P \parallel A$ при диагональном положении клина.

Далее следует для пластинок из кварца разной толщины определить цвет и порядок окраски, а также толщину пластинок, пользуясь таблицей 18. То же самое следует проделать для слюдяных пластинок в $\lambda/4$, $\lambda/2$ и т. д.; определить характер их окраски, порядок спектра и эквивалентную толщину кварцевой пластинки, пользуясь опять клином и таблицей.

2. Определение величины двупреломления кристаллической пластинки известной толщины. Величина двупреломления пластинки, выражаемая разностью между показателями преломления волн, идущих нормально к пластинке, получается из соотношения

$$R = d(n_2 - n_1),$$

где R — разность хода, даваемая пластинкой, d — ее толщина, а $(n_2 - n_1)$ — величина двупреломления. Характерной оптической константой для кристалла является величина наибольшего двупреломления $(n_g - n_p)$, где n_g есть наибольший показатель преломления, а n_p наименьший. Эта константа определяется на пластинке, вырезанной параллельно плоскости оптических осей в двуосном кристалле или параллельно оптической оси в одноосном.

Кристаллическая пластинка помещается между скрещенными поляризатором и анализатором так, чтобы направления колебаний в обыкновенной и необыкновенной волнах, распространяющихся в пластинке, образовали угол в 45° с главными направлениями поляризатора и анализатора. В этом случае пластинка будет наиболее ярко освещена.

Величина двупреломления определяется при помощи цветной номограммы двупреломления (см. таблицу 19 в конце книги). Она построена так, что по горизонтальной оси отложены величины разности хода в миллимикронах, а по вертикальной — толщины пластинки в миллиметрах. Сама таблица раскрашена, и каждой разности хода соответствует определенная интерференционная окраска. Так как зависимость между разностью хода, толщиной пластинки и величиной двупреломления линейная, то геометрическое место точек, характеризующих одинаковую величину двупреломления,

есть прямая линия. Для различных величин ($n_g - n_p$) она имеет разный наклон к горизонтальной оси. На верхнем и правом обрезах таблицы нанесены величины двупреломления, соответствующие каждой наклонной прямой.

Определение величины ($n_g - n_p$) производится следующим образом:

1) находят полосу, соответствующую по окраске цвету кристаллической пластинки, помещенной между скрещенными анализатором и поляризатором;

2) находят точку пересечения этой полосы с линией, соответствующей толщине пластинки;

3) по наклонной прямой, идущей из точки пересечения этих двух линий, на верхнем и правом обрезах таблицы находят величину двупреломления.

По величине разности хода и известному двупреломлению можно также решить обратную задачу, т. е. найти толщину пластинки.

Берут пластинку кристалла с известным двупреломлением, например гипсовую; ее двупреломление

$$n_g - n_p = 1,531 - 1,521 = 0,010$$

для $\lambda_{\text{на}}$. По таблице определяют ее разность хода и графически находят толщину: по линии — геометрическому месту точек с одинаковым двупреломлением — доходят до пересечения с полосой, имеющей ту же интерференционную окраску, что и пластинка. Из точки пересечения проводят горизонтальную линию и на левом краю таблицы отсчитывают толщину пластинки.

Полученный результат следует проверить делением величины разности хода, выраженной в миллимикронах, на заданную величину двупреломления для данного сечения кристалла.

Технические данные установки. Для выполнения задачи необходимо иметь ромбоэдр из исландского шпата, набор кварцевых, гипсовых или слюдяных пластинок толщиной от 0,02 до 0,2 мм, вырезанных соответствующим образом, кварцевую пластинку чувствительного оттенка, кварцевый клин 1-го, 2-го и 3-го порядков, набор слюдяных пластинок $\lambda/4$; $\lambda/2$ и λ , цветную номограмму двупреломления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. Курс физики под ред. Н. Д. Папалекси, т. II, Гостехиздат, 1947.
3. Р. Вуд, Физическая оптика, ОНТИ, 1936.
4. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева, Курс общей физики, т. III, Физматгиз, 1962.
5. Р. Дитчберн, Физическая оптика, «Наука», 1965, гл. 12.

ЗАДАЧА 143

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА

Задача заключается в ознакомлении с методами получения света с заданным состоянием поляризации и в ознакомлении со способами исследования состояния поляризации светового пучка.

Описание установки. На рис. 1 приведена схема установки. Свет от лампы накаливания 1 (автомобильная двенадцативольтовая лампочка, включаемая через понижающий трансформатор 220/12 в) проходит через два конденсора 2, 3 и падает на входную щель монохроматора М.

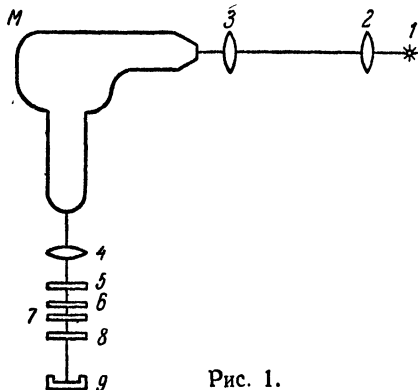


Рис. 1.

Расположение конденсоров, приемы их установки и схема монохроматора даны в описании задачи 159, в которой используется идентичный прибор.

Местоположение на скамье краев ползушек всех приборов задается отметками на боковых сторонах станин оптических скамей.

Монохроматический пучок света, выходящий через заднюю щель монохроматора, падает на объектив 4 ($f = 110$ мм), расположенный на определенном расстоянии от щели.

Этот конденсор дает слабо сходящийся пучок света, направленный на защищенный тубусом и закрытый крышечкой селеновый или кремниевый фотозлемент с запирающим слоем 9, установленный и фиксированный на конце оптической скамьи. Такой фотозлемент, как известно, может служить самостоятельным источником электродвижущей силы, и потому он непосредственно включается на гальванометр, установленный в отсчетном устройстве ПС-101.

Между стоящим на выходе монохроматора объективом и фотозлементом устанавливают все поляризационные приспособления. Они помещаются на горизонтальной планке с четырьмя гнездами, укрепленной на вертикальном штыре на отдельном рейтере. Система держателя поляризационных приспособлений фиксирована.

Поляризационные приспособления состоят из двух поляроидов 5 и 8 и двух кристаллических (слюдяных) пластинок 6 и 7, установленных во вращающихся оправках с градусными шкалами (цена деления шкалы 5°). Поляроиды так ориентированы в оправках, что они пропускают максимум света, когда на оправках обоих поляроидов отсчеты одинаковы.

Оправы всех поляризационных приспособлений имеют разрезные штыры, которые вставляются в гнезда вышеупомянутой гори-

зонтальной планки и затягиваются зажимными винтами. Штыри поляроидов вставляются в крайние гнезда планки.

Между монохроматором и фотоэлементом имеются неподвижные и раздвижные тубусы для защиты фотоэлемента от комнатного освещения. Кристаллические пластинки и поляроиды заклеены между стеклами. Одна из пластинок слюдяная, в $1/4$ длины волны λ_0 . Значение λ_0 близко к максимуму спектральной чувствительности фотоэлемента и к максимуму энергии в спектре используемого источника света.

Значение λ_0 указано непосредственно в надписи на установке. Вторая кристаллическая пластинка — слюдяная пластинка неизвестной (по условиям задачи) толщины.

Назначение кристаллических пластинок поясняется в дальнейшем. Оправы их совершенно идентичны с оправами поляроидов. Все поляризационные приспособления хранятся отдельно от установки и выдаются студентам только на время выполнения задачи. Остановимся теперь на тех функциях, которые выполняет каждая из основных частей установки.

1. Монохроматор позволяет выделять из сплошного спектра источника определенный спектральный интервал, ограниченный значениями длин волн λ и $\lambda + \Delta\lambda$. Вращением призмы монохроматора (посредством поворотов барабана с делениями) можно изменять значение λ , т. е. выделять спектральный интервал из разных участков сплошного спектра.

Необходимость использования света, близкого к монохроматическому в условиях настоящей задачи, вытекает из того, что создание определенной разности фаз между двумя колебаниями возможно только по отношению к колебаниям одной частоты. Получение же света с определенной состоянием поляризации требует, как известно, именно определенной разности фаз между складывающимися компонентами колебаний (о значениях амплитуд складывающихся колебаний для получения поляризованного света см. ниже пункт 3). Так, пластинка в $\lambda/4$, очевидно, является таковой только для определенного значения длины световой волны, которое и должно быть выделено монохроматором из сплошного спектра лампы накаливания.

Кроме того, использование монохроматора допускает возможность поочередно применять в работе световые пучки с разными значениями длин волн, что представляет интерес в некоторых описанных ниже упражнениях. Градуировочный график шкалы монохроматора помещен вблизи прибора.

2. Ближайший к выходной щели монохроматора поляроид позволяет получать линейно поляризованный свет.

Ориентация поляроида относительно проходящего через него пучка естественного света в общем случае, конечно, значения не имеет. В нашем случае другие поляризационные приспособления

будут в дальнейшем так ориентированы, что на вращающейся оправе этого поляроида удобно всегда иметь неизменный отсчет 0° .

Тогда световой вектор волны, прошедшей через поляризатор, направлен параллельно нулевому штриху на неподвижной части его оправы.

3. Пластика в $\lambda/4$ нужна прежде всего для получения света, поляризованного по кругу. Она же применяется для получения в некоторых случаях света, эллиптически поляризованного.

Наконец, она будет применяться и для анализа полученного с помощью другой пластинки эллиптически поляризованного света.

Ориентация пластинки в $\lambda/4$ имеет решающее значение для выполняемых ею функций. Поэтому она помещена во вращающуюся оправу. Ориентация пластинки по отношению к плоскости колебаний падающего на нее линейно поляризованного света определяет амплитуды образующихся в ней двух волн. Пластика дает волны равных амплитуд, нужные для получения света, поляризованного по кругу, только при определенных отсчетах на ее оправе. Поэтому, поворачивая оправу пластинки в другие положения, можно получить при помощи той же пластинки и эллиптически поляризованный свет.

Наконец, наличие в нашей установке монохроматора позволяет использовать ту же пластинку для получения эллиптически поляризованного света еще и другим способом. Именно, пропуская через ту же пластинку свет из монохроматора не той длины волны, на которую пластинка рассчитана, мы получим эллиптическое колебание, на этот раз за счет отличного от $\pi/2$ сдвига фаз между двумя перпендикулярными колебаниями, хотя эти колебания и будут иметь равные амплитуды.

В качестве двупреломляющих пластинок в поляризационных устройствах часто применяются пластинки из слюды вследствие легкости их изготовления и дешевизны. Слюда легко расщепляется по плоскостям спайности; тонкие пластинки из нее обладают значительной прочностью и не требуют оптической полировки. Слюда — двухосный кристалл, расщепляющийся по плоскостям, практически нормальным к биссектрисе острого угла между оптическими осями. Плоскость, проходящая через обе оптические оси, пересекает плоскость спайности в направлении, обычно обозначаемом γ . Перпендикулярное ему направление обозначается β . Двухосность кристалла в нашем случае роли не играет. При распространении света вдоль биссектрисы угла между осями двухосного кристалла все происходит так, как при распространении света в направлении, перпендикулярном к оптической оси одноосного кристалла.

Вступающая вдоль нормали к пластинке световая волна продолжает распространяться в пластинке по прежнему направлению. Однако линейно поляризованная волна распадается на две волны

с колебаниями, лежащими в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Эти две волны распространяются по одному направлению, но с разными скоростями. Так, в интересующей нас спектральной области показатель преломления для колебаний в направлении β будет $n_\beta = 1,5908$, а показатель преломления для колебаний в направлении γ будет $n_\gamma = 1,5950$; $n_\gamma - n_\beta = 42 \cdot 10^{-4}$.

Одно из упражнений настоящей задачи состоит в отыскании γ - и β -направлений в пластинке $\lambda/4$.

4. Заклеенная между стеклами и помещенная также во вращающейся оправе слюдяная пластинка неизвестной (по условиям задачи) толщины является прибором, формирующим свет с неизвестным состоянием поляризации.

5. Второй поляроид, стоящий на выходе поляризационного устройства, служит так называемым анализатором света. Повороты этого поляроида позволяют выпускать из поляризационной системы слагающие светового вектора по тем или иным пространственным направлениям, например, по выбранным осям координат. Очевидно, что величина этих слагающих зависит от состояния поляризации падающего на анализатор света, и их измерение необходимо для суждения о том, в каком состоянии поляризации был свет, падающий на анализатор.

6. Фотоэлемент, э. д. с. которого пропорциональна интенсивности падающего на него света, служит для измерения интенсивности пропущенного анализатором света, т. е. для измерений средних по времени квадратов только что упомянутых слагающих исследуемого светового вектора по тем направлениям, колебания вдоль которых пропускает анализатор.

Кроме описанных основных приборов, в комплект каждой установки входит ручной фонарь, питаемый от понижающего трансформатора, включаемого на первичное напряжение 127 в. Ручной фонарь применяется для освещения шкал на оправах поляризационных приспособлений. Надо следить за тем, чтобы яркий свет от этого фонаря не попал на фотоэлемент.

На пояснении роли конденсоров в оптической системе мы не останавливаемся. Заметим только, что диафрагма на ближайшем к входной щели конденсоре используется в качестве регулятора светового потока через установку.

Подготовка установки к измерениям. Проверяют, закрыта ли крышечка на предохранительном тубусе фотоэлемента.

Устанавливают на барабане монохроматора указанный для данного прибора отсчет, соответствующий длине волны λ_0 .

Сравнивают расположение осветителя и конденсоров перед входной щелью монохроматора с указаниями, данными в описании задачи 159. Расстояния между осветителем, конденсорами и входной щелью приблизительно соответствуют цифрам, данным в описании задачи 159,

Осветитель и конденсоры неподвижно закреплены на оптической скамье. Также фиксирована их высота. Для небольшого корригирования осветительной системы допустимо лишь осторожное пользование поперечными микрометрическими подачами конденсора и двумя винтовыми подачами кожуха осветителя.

Винт на заднем торце осветителя регулирует в узких пределах высоту расположения лампочки. Горизонтальная винтовая подача на кожухе осветителя регулирует поперечное перемещение лампочки на оси системы.

В каких случаях возможно применить эти регулировки осветителя, сказано ниже. Безусловно недопустимо знакомиться с действием этих регуляторов, произвольно вращая их головки и не контролируя одновременно работу монохроматора описанным ниже способом.

Ирисовая диафрагма на ближайшем к входной щели конденсоре при подготовке установки к измерениям должна быть полностью открыта.

Включают лампочку осветителя через понижающий трансформатор. Вилка трансформатора вставляется для включения в розетку с напряжением 220 в.

Если теперь окажется, что яркое световое пятно, имеющее в своем центре изображение спирали лампы, несколько сдвинуто в сторону от входной щели монохроматора, то приводят его на центр щели с помощью винтовой подачи ближайшего к входной щели конденсора. Как правило, использовать винтовую поперечную подачу дальнего от щели конденсора и тем более винтовые подачи осветителя не приходится.

Ширина входной и выходной щелей монохроматора установлена в 1 мм и никакой регулировке в процессе работы не подлежит.

После того как яркое световое пятно приведено на центр входной щели монохроматора, дальнейший контроль за ходом светового пучка в монохроматоре осуществляется через выходную щель прибора.

На белой бумаге, помещенной непосредственно за выходной щелью, должна быть видна яркая однородно освещенная цветная полоска (прямоугольник)¹⁾; на крышечке тубуса фотоэлемента должно быть овальное световое пятно.

Если эти требования удовлетворены, то установку можно считать подготовленной к измерению; если же нет, то осветительная система нуждается в более фундаментальной проверке.

Приближают глаз к выходной щели прибора; грань призмы монохроматора должна быть залита ослепительно ярким светом. Если

¹⁾ Разумеется, затвор за входной щелью монохроматора должен быть открыт, о чем можно судить по надписи на его рычажке.

это условие не удовлетворено (при ярком световом пятне на входной щели прибора), то это означает, что осветитель и конденсор перед входной щелью расцентрированы и входящий в щель пучок попадает не на объектив коллиматора, а на стенки его тубуса. В таком случае надо добиться правильного освещения грани призмы, действуя микрометрическими винтовыми подачами конденсоров и лампочки. После этого вновь проверяют световое пятно на белой бумаге за выходной щелью монохроматора и световое пятно на крышечке тубуса фотоэлемента.

Устанавливают в крайние гнезда планки поляроиды, устанавливают на шкалах обоих поляроидов отсчет 0° . После этого снимают крышечку с защитного тубуса фотоэлемента, включают освещение шкалы отсчетного устройства и наблюдают его показания. Если вся система установлена правильно, то гальванометр должен дать отклонение 500—600 делений шкалы в зависимости от величины отверстия в диафрагме конденсора. При этих условиях можно считать установку подготовленной к измерениям. Если показания гальванометра в отсчетном устройстве сильно занижены, то это свидетельствует о неправильной центрировке осветительной системы, и последняя должна быть вновь выверена.

Всякая регулировка нуля на отсчетном устройстве воспрещена.

Со всеми недоразумениями по этим вопросам нужно обращаться к дежурному лаборанту.

На миллиметровой бумаге надо подготовить несколько сеток полярных координат с радиусами-векторами, проведенными через каждые 5—10°. Длина радиуса-вектора 50 мм.

Упражнение 1

Исследование линейно поляризованного света

Поляроиды установлены в крайние гнезда планки. На оправах поляроидов установлен отсчет 0° . Гальванометр дает отклонение 500—600 делений шкалы.

Последовательно поворачивая поляроид-анализатор каждый раз на два деления шкалы, измеряют силу фототока для каждой ориентации поляроида. Проводят эти измерения для одного полного оборота поляроида вокруг оси светового пучка. На заготовленной координатной сетке в полярных координатах строят график измеренных интенсивностей света.

При дальнейшей обработке строят на той же координатной сетке график функции $\cos^2 \alpha$, где α — угол между ориентациями обоих поляроидов, и сравнивают его с вышеуказанным экспериментальным графиком.

Упражнение 2

Исследование пластинки $\lambda/4$. Получение света, поляризованного по кругу

Скрещивают поляроид-анализатор с поляризатором. Устанавливают между ними пластинку $\lambda/4$.

Последовательно поворачивают пластинку, каждый раз на два деления шкалы, измеряя силу фототока для каждой ориентации пластинки. Проводят эти измерения для одного полного оборота пластинки.

На заготовленной координатной сетке в полярных координатах строят график измеренных интенсивностей света. Находят на этом графике приблизительные значения четырех углов ориентации пластин, при которых интенсивность прошедшего через систему света близка к нулю ¹⁾.

Производят многократные измерения, через $5-10^\circ$, вблизи каждой из четырех ориентаций пластинки, при которых интенсивность света близка к 0° . Усредняя эти измерения, находят точные значения искомым четырех ориентаций пластинки.

Проводят на полярной диаграмме два диаметра через точки, соответствующие нулевой интенсивности света. Помечают концы одного диаметра

буквами β , а концы другого диаметра буквами γ . В нашем случае отметки β надо приписать тому диаметру, один из концов которого проходит через наименьший угловой отсчет на оправе пластинки (рис. 2) ²⁾. Теперь пластинка $\lambda/4$ ориентирована.

Поворачивая оправу пластинки, устанавливают на ней отсчет, соответствующий биссектрисе угла между β - и γ -направлениями. Теперь проходящий через пластинку свет должен быть поляризован по кругу.

Поворачивая анализатор (так же, как и прежде, степенями через $5-10^\circ$), измеряют интенсивность света (по величине фототока) на протяжении одного полного оборота анализатора. Строят в полярных координатах график распределения интенсивности по углам.

¹⁾ При совершенных поляризационных приспособлениях интенсивность света должна упасть до нуля.

²⁾ Это было установлено предварительным исследованием пластинки до ее заклейки между стеклами.

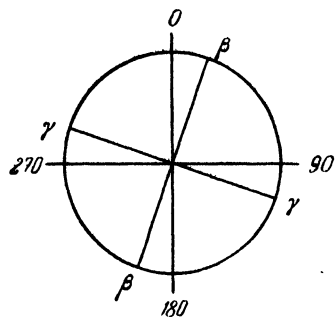


Рис. 2.

Упражнение 3

Получение и исследование эллиптически поляризованного света при помощи пластинки $\lambda/4$

Убедившись в том, что в результате второго упражнения свет поляризован по кругу, используют пластинку $\lambda/4$ для получения света, поляризованного эллиптически.

1. Изменяют найденную для получения круговой поляризации ориентацию пластинки $\lambda/4$ на $+30^\circ$ и на -30° . Для каждой ориентации пластинки производят (так же, как и в предыдущих случаях) анализ поляризованного света и немедленное построение графика распределения интенсивности.

Напомним, что максимумы и минимумы кривой распределения интенсивностей всегда промеряются многократно, так как именно они используются для перехода от кривой распределения интенсивностей к кривой, описывающей форму светового колебания.

Дальнейшая обработка результатов заключается в отыскании формы эллиптического светового колебания. Очевидно, что оси эллипса направлены по максимальной и минимальной хордам полученного графика. Отношение полуосей эллипса можно найти, извлекая квадратный корень из отношения длин этих хорд (фотоэлементом измеряют интенсивность света, пропорциональную квадрату амплитуды векторов E).

Сравнивают отношение полуосей эллипса, найденное на опыте, со значением отношения, которое теоретически должно иметь место при повороте пластинки на $\pm 30^\circ$.

Зная отношение полуосей эллипса a и b и их ориентацию, строят эллипс, пользуясь уравнением

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

2. Возвращают пластинку $\lambda/4$ в положение, соответствующее получению света, поляризованного по кругу. Изменяют длину волны света, выпускаемого монохроматором ¹⁾.

Проводят для обоих случаев тот же анализ поляризованного света, как и в случае 1 настоящего упражнения, и строят соответствующий график распределения интенсивности, а затем — эллипс, определяющий форму светового колебания.

Рассчитывают эллипс, исходя из сделанного изменения используемой длины волны, и строят рассчитанный эллипс. Сравнивают результат расчета с результатами опыта.

¹⁾ Нужное значение длины волны λ указывается непосредственно на установке.

Упражнение 4

Получение эллиптически поляризованного света при помощи слюдяной пластинки неизвестной толщины и его анализ

Восстанавливают на барабане монохроматора отсчет, соответствующий длине волны λ_0 .

Снимают с установки пластинку $\lambda/4$ и помещают в переднее из двух средних гнезд держателя штырь оправы со слюдяной пластинкой неизвестной толщины. Нужный для работы отсчет на оправе этой пластинки указан непосредственно на каждой установке для используемого на ней поляризационного набора.

Проводят обычный анализ получающегося с этой пластинкой поляризованного света и строят соответствующий график распределения интенсивности в полярных координатах.

Находят величину и ориентацию осей эллипса светового колебания и строят этот эллипс.

Устанавливают в держателе пластинку $\lambda/4$ последовательно с исследуемой пластинкой. Ориентируют пластинку $\lambda/4$ так, чтобы превратить эллиптически поляризованный свет в линейно поляризованный. Для этого устанавливают β -направление пластинки $\lambda/4$ параллельно длинной оси эллипса и γ -направление параллельно его короткой оси.

Анализируют свет, прошедший через обе слюдяные пластинки. Строят полярную диаграмму распределения интенсивности полученного линейно поляризованного света. Эта диаграмма будет иметь характерную форму «восьмерки» и поможет выяснить вопрос о направлении вращения конца светового вектора по эллипсу.

Световой вектор может обходить эллипс по часовой стрелке или против часовой стрелки. Другими словами, свет может быть правополяризованным или левополяризованным при одной и той же форме и размерах эллипса поляризации.

Очевидно, что различие в направлении вращения конца светового вектора по эллипсу определяется фазами двух складывающихся колебаний, направленных по большой и малой полуосям эллипса. Колебания эти обязательно отличаются по фазе на $\pi/2$, но эта разность фаз может иметь разные знаки ($\pm \pi/2$).

Расположим правовинтовую систему осей декартовых координат по осям построенного эллипса (см. выше), направив ось абсцисс по большой оси эллипса, а ось z — вдоль по направлению распространения света навстречу наблюдателю (рис. 3, а и б).

Таким образом, мы направим оси x и y системы координат по β - и γ -направлениям слюдяной пластинки, что и отмечено на рисунке пометкой осей координат двойными индексами β, x и γ, y .

Пользуясь такой системой координат и смотря навстречу световому пучку, можно сказать, что левое вращение светового вектора (рис. 3, а) будет иметь место, если до вступления в пластинку $\lambda/4$

колебания компонент вектора \vec{E} по двум осям x и y (после его выхода из неизвестной пластинки) могут быть записаны в следующей форме:

$$E_x = E_{x_0} \cos \omega t, \quad (1)$$

$$E_y = E_{y_0} \sin \omega t = E_{y_0} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (2)$$

Обратное — правое вращение (рис. 3, б) — будет иметь место, если компоненты вектора E по осям x и y имеют вид

$$E_x = E_{x_0} \cos \omega t,$$

$$E_y = -E_{y_0} \sin \omega t = E_{y_0} \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

После прохождения света через пластинку $\lambda/4$ между компонентами E_x и E_y появится дополнительный сдвиг фаз, равный $\pm \pi/2$,

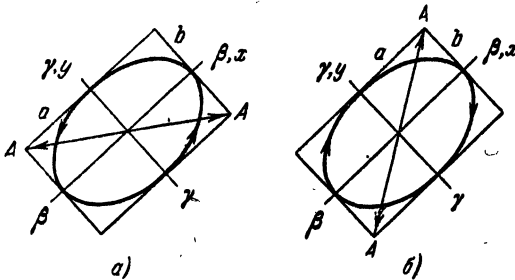


Рис. 3.

обусловленный разностью скоростей распространения в слюде света с компонентами электрического вектора вдоль β - и γ -направлений.

В первом случае эти компоненты по выходе из пластинки имеют вид

$$E_x = E_{x_0} \cos (\omega t - k_\beta d) = E_{x_0} \cos \left(\omega t - \frac{\omega}{v_\beta} d \right), \quad (3)$$

где $k_\beta = 2\pi/\lambda_\beta$ и v_β есть скорость распространения в пластинке волны с электрическим вектором, направленным вдоль оси β , и d — толщина пластинки $\lambda/4$. Соответственно,

$$\begin{aligned} E_y &= E_{y_0} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} - k_\gamma d \right) = E_{y_0} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \frac{\omega}{v_\gamma} d \right) = \\ &= E_{y_0} \cos \left(\omega t - \frac{\omega}{v_\beta} d - \frac{\omega}{v_\gamma} d + \frac{\omega}{v_\beta} d - \frac{\pi}{2} \right) = \\ &= E_{y_0} \cos \left[\omega t - \frac{\omega}{v_\beta} d + \frac{\omega d}{v_\beta v_\gamma} (v_\gamma - v_\beta) - \frac{\pi}{2} \right] = \\ &= E_{y_0} \cos \left(\omega t - \frac{\omega}{v_\beta} d - \pi \right) = -E_{y_0} \cos \left(\omega t - \frac{\omega}{v_\beta} d \right), \end{aligned} \quad (4)$$

так как для с л ю д ы $v_{\beta} > v_{\gamma}$ и, согласно определению пластинки $\lambda/4$, в этом случае $\omega d \left(\frac{1}{v_{\beta}} - \frac{1}{v_{\gamma}} \right) = \frac{\omega d}{v_{\beta} v_{\gamma}} (v_{\gamma} - v_{\beta}) = -\frac{\pi}{2}$. Формулы (3) и (4) показывают, что в результате прохождения через пластинку $\lambda/4$ поляризованный по л е в о м у кругу свет превратился в л и н е й н о п о л я р и з о в а н н ы й, суммарное колебание в котором происходит во втором и ч е т в е р т о м квадрантах нашей системы координат x , β и y , γ .

Во втором случае (правое вращение вектора E) компоненты электрического вектора по выходе из пластинки $\lambda/4$ запишутся в виде

$$E_x = E_{x_0} \cos(\omega t - k_{\beta} d), \quad (5)$$

$$\begin{aligned} E_y &= E_{y_0} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - k_{\gamma} d\right) = \\ &= E_{y_0} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - k_{\beta} d - k_{\gamma} d + k_{\beta} d\right) = \\ &= E_{y_0} \cos\left[\omega t - k_{\beta} d + \frac{\pi}{2} + (k_{\beta} - k_{\gamma}) d\right] = \\ &= E_{y_0} \cos(\omega t - k_{\beta} d), \end{aligned} \quad (6)$$

так так

$$(k_{\beta} - k_{\gamma}) d = -\frac{\pi}{2}.$$

Формулы (5) и (6) показывают, что в результате прохождения через пластинку $\lambda/4$ поляризованный по правому кругу свет превращается в л и н е й н о п о л я р и з о в а н н ы й, суммарное колебание в котором происходит в п е р в о м и т р е т ь е м квадрантах нашей системы координат.

На указанном различии в ориентации направлений колебаний линейно поляризованного света (квадранты II—IV или I—III), получающегося из света эллиптически поляризованного, основан способ определения направления вращения вектора E .

Проведем на том же рисунке 3,а прямую AA , направленную п а р а л л е л ь н о длинной хорде ранее построенной нами «восьмерки» (см. выше).

Если окажется, что прямая AA прошла через квадранты II—IV (рис. 3, а), то это будет значить, что анализируемый свет был левополяризованным. Если прямая AA пройдет через квадранты I—III (рис. 3, б), то — правополяризованным.

Таким же образом можно определять и направления вращения светового вектора в поляризованном по кругу свете.

В этом случае вследствие равенства амплитуд β - и γ -колебаний получим на выходе их пластинки $\lambda/4$ линейно поляризованный свет с направлениями колебаний, лежащими вдоль той или иной биссектрисы координатных углов, в зависимости от направления вращения вектора в анализируемом световом пучке.

Технические данные установки. В работе используется монохроматор марки УМ-2 с соответствующей осветительной и конденсорной системами. В качестве источника света используется автомобильная лампа мощностью 50 *вт*. Фотоэлемент включен в отсчетное устройство марки ПС-101, с зеркальным гальванометром. Оправы для поляроидных пленок и кристаллооптических препаратов, а также сами препараты изготовлены на физическом факультете Университета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. Р. В. Поль, Оптика и атомная физика, «Наука», 1966.

ЗАДАЧА 144

ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ ПРИ ПОМОЩИ КРИСТАЛЛ-РЕФРАКТОМЕТРА

Целью настоящей работы является измерение показателей преломления оптически анизотропных кристаллов и изотропных твердых тел.

Оптическая анизотропия среды заключается, как известно, в зависимости скорости света и показателя преломления вещества от направления распространения в нем света. Как показывает рассмотрение этих явлений, оптическая анизотропия среды приводит к поляризации распространяющегося в ней света.

Содержанием настоящей работы является измерение показателей преломления исландского шпата (кальцита CaCO_3), кварца (SiO_2) и, для сравнения с кристаллами, измерение показателей преломления некоторых изотропных тел (силикатных стекол).

Примененный в настоящей задаче метод измерений показателей преломления основан на использовании предельного угла преломления света на границе двух сред.

Сущность этого экспериментального приема, довольно широко распространенного в рефрактометрии (см. также задачу 129), легко понять из рассмотрения распространения света в изображенной на рисунке оптической системе (рис. 1).

Пусть пучок света падает на границу соприкосновения двух тел: стеклянной полусферы и расположенного на ней кристалла. Полусфера сделана из стекла с показателем преломления n_2 , превышающим показатель преломления n_1 исследуемого кристалла. Между поверхностью кристалла и полусферы имеется тонкий контактный слой жидкости, показатель преломления которой n удовлетворяет неравенству $n_1 < n < n_2$.

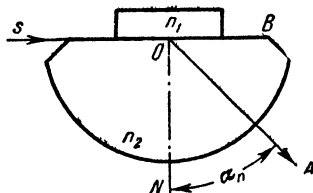


Рис. 1.

Рассмотрим вопрос о том, под какими углами могут войти в полусферу световые пучки, проникающие в нее сверху через кристалл или другое изучаемое тело.

Проведем вертикальный диаметр полусферы, являющийся одновременно и нормалью ON к поверхности соприкосновения сферы и исследуемого тела (образца).

Из элементарных соображений, основанных на законе преломления света и приведенного выше неравенства, можно утверждать следующее. При избранном способе освещения сферы сверху внутри нее смогут распространяться световые пучки лишь в определенном угловом диапазоне направлений между нормалью и некоторым крайним направлением OA (рис. 1). Световые пучки, направления распространения которых лежали бы в угловом диапазоне BOA , в полусфере распространяться не могут¹⁾.

Легко видеть, что предельный угол α_n с нормалью к полусфере ON будет образовывать после преломления световой пучок OA , ранее скользивший по горизонтальной поверхности полусферы и прилегающего к ней образца.

Можно связать направление распространения этого светового пучка в сфере с показателями преломления образца и сферы (показатель преломления промежуточного плоскопараллельного слоя контактной жидкости в этот расчет не войдет, потому что этот слой, как и всякая плоскопараллельная пластинка, не изменяет направления хода лучей).

Из закона преломления можно написать $\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{n_2}{n_1}$, где β — угол падения, в данном случае равный $\pi/2$. Отсюда искомая величина $n_1 = n_2 \sin \alpha_n$, т. е., зная из опыта значения n_2 и α_n , мы можем вычислить величину n_1 исследуемого образца. Фактически, при изготовлении полусферы из стекла с известным показателем преломления на опыте требуется измерять лишь значения предельных углов α_n .

Эти соображения и положены в основу устройства применяемого в настоящей задаче кристалл-рефрактометра.

Описание прибора. Практическое осуществление изложенного выше метода измерений весьма близко к приведенной выше принципиальной схеме опыта.

Центральной частью прибора (рис. 2) является полусфера 1, изготовленная из тяжелого оптического стекла (флинт. $n_2 = 1,73957$ для $\lambda = 5893 \text{ \AA}$).

На ее горизонтальную плоскость помещаются на контактной жидкости исследуемые образцы. Свет от используемого источника

¹⁾ Ясно, что здесь идет речь о возможных (и невозможных) направлениях распространения света, а вовсе не о возможности (или невозможности) просто заставить свет пройти через ту или иную точку внутри полусферы. «Осветить» можно, разумеется, любую точку внутри полусферы, но при принятом способе освещения нельзя заставить свет пройти через эту точку в любом направлении.

идет широким пучком на матовую боковую поверхность образца, обеспечивающую падение на границу раздела образца и сферы световых пучков всех направлений, в том числе и самого важного для измерений скользящего светового пучка.

Источником света служит натриевая лампа, установленная в цилиндрическом кожухе, укрепленном на штативе, стоящем рядом с кристалл-рефрактометром. В цепь постоянно введен нерегулируемый реостат, через который лампа включается в настольную розетку напряжением 220 в.

При включении лампы в ней сначала вспыхивает синеватый разряд в аргоне, а затем через 3—5 минут (после испарения разогретого разрядом натрия) разгорается желтым светом электрическая дуга в парах натрия.

Если лампа уже горела и была выключена, то повторное ее зажигание возможно лишь через 20 минут, т. е. после полного охлаждения лампы.

Отыскание предельного направления распространения света в полусфере осуществляется при помощи небольшой вращающейся коленчатой зрительной трубы 2 (рис. 2). Зрительная труба, как всегда при использовании труб для угловых измерений, наведена на бесконечность. В таком случае распределение света и тени в наблюдаемой через окуляр фокальной плоскости трубы позволяет судить о направлениях световых пучков, входящих в объектив трубы.

Каждому направлению, по которому распространяется свет, будет отвечать в фокальной плоскости трубы светлая точка; каждому направлению, в котором нет света, — темная точка.

Пусть труба вращается по дуге окружности, концентрической с полусферой, так что ось трубы всегда направлена к центру полусферы, по ее радиусу (рис. 3).

Если в результате такого вращения трубы видимый в ее окуляр крест нитей совпадает с границей света и тени, то это будет означать, что труба наведена своей оптической осью как раз на предельное (для данного образца) направление распространения света в полусфере (направление OA на рис. 1).

Верхняя, темная часть поля зрения трубы отвечает отсутствию световых пучков, направления распространения которых лежали

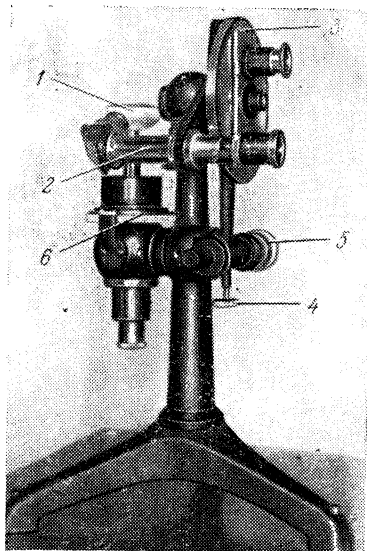


Рис. 2.

бы в пределах углового сектора BOA (рис. 1). Практически сделать прямую зрительную трубу, вращающуюся вокруг полусферы так, как это показано на рисунке, неудобно. Поэтому для удобства отсчетов прибор имеет коленчатую трубу 2 с поворотной призмой, как это показано на рис. 2. Короткое колено трубы, содержащее объектив, вращается так, что ее оптическая ось всегда направлена к центру полусферы. При этом длинное окулярное колено трубы, повернутое на 90° , вращается вокруг горизонтальной оси вместе с вертикальным лимбом.

Вращение трубы для наведения ее на границу света и тени производится от руки. Однако внизу под лимбом 3 имеется и микрометрическая винтовая подача 5, которая может использоваться после закрепления зажимного винта 4 (рис. 2). Микрометрический винт 5 снабжен делениями, используемыми только при некоторых дисперсионных измерениях, которые в настоящей задаче не производятся.

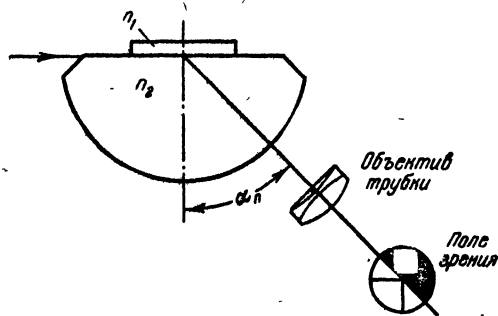


Рис. 3.

Измерив по вертикальному лимбу 3 нужный угол α_n оптической оси трубы с нормалью к полусфере и зная ее показатель преломления, мы уже можем найти искомую величину n_1 .

Практически, после измерения этого угла мы не делаем никаких расчетов, а пользуемся прилагаемыми к прибору таблицами, в которых приведены величины n_1 для всех возможных значений угла α_n .

В этом виде рефрактометр позволял бы измерять показатель преломления исследуемого образца только в одном направлении. Измерения его по различным направлениям требовали бы изготовления различно ориентированных образцов кристаллов.

Взамен этого полусфера кристалл-рефрактометра имеет возможность, вместе с поставленным на нее образцом, вращаться вокруг вертикальной оси. При этом углы поворота полусферы и образца могут измеряться по расположенному под сферой малому горизонтальному лимбу 6 (рис. 2).

Вращение изучаемого кристалла вокруг вертикальной оси обеспечивает возможность измерений его показателя преломления при разных азимутах его ориентации относительно распространяющихся в образце световых пучков.

Возможность изменения ориентации образца при измерениях показателя преломления является особенностью кристалл-рефрактометра. Это изменение ориентации образца излишне

в рефрактометрах, предназначенных для работы с одними лишь изотропными телами (стекла, пластические массы, жидкости) (см. задачу 129).

В приборе имеется еще одна деталь конструкции, также учитывающая специальное назначение прибора для работы с оптически анизотропными и поляризующими свет веществами.

В окуляр зрительной трубы вставлен полярOID. Вращение выходного колена окуляра вокруг оси трубы, за внешнее рифленое кольцо, позволяет изменять ориентацию этого поляроида.

Наличие такого поляроида существенно облегчает работу прибора с оптически анизотропными веществами. Как известно, в оптически анизотропном веществе при произвольной ориентации образца по отношению к падающему свету распространяются два световых луча, поляризованных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

При измерениях показателей преломления необходимо иметь возможность исследовать распространение каждого из этих двух лучей в отдельности. Чтобы разделить эти лучи и исследовать их порознь, когда они геометрически мало расходятся, надо использовать их различные состояния поляризации. Вращающийся поляроид позволяет гасить поочередно один из этих лучей и производить в это время измерения для другого.

В заключение сделаем несколько замечаний о достоинствах и недостатках применяемого в настоящей задаче метода измерений. Точность используемого метода меньше точности интерференционных способов измерения показателя преломления. Практически этот метод позволяет (при применении строго монохроматического света) находить значения показателя преломления с точностью до четвертого десятичного знака. Таким образом, применяемый метод стоит по точности на одном уровне с гониометрическим методом (задача 128) измерений показателя преломления, в котором используется призма, изготовленная из исследуемого вещества. Однако кристалл-рефрактометрический метод проще, так как он предъявляет минимальные требования к размерам, качеству и предварительной подготовке образца для измерений. Кроме того, осуществленный в несколько ином варианте кристалл-рефрактометрический метод допускает измерения показателей преломления непрозрачных объектов. В нем используется явление полного внутреннего отражения от границы оптически непрозрачного тела.

Еще одна возможность измерений показателя преломления кристаллов основана на применении так называемого поляризационного светофильтра и канавчатого спектра (см. задачу 146). Последний способ позволяет измерять дисперсию показателя преломления.

В некоторых случаях измерения показателей преломления кристаллов могут быть выполнены с помощью поляризационного микроскопа, но точность измерений в этом случае не превышает величины $\sim 10^{-2}$.

Подготовка прибора и измерения. 1. Снимают с полусферы защитную крышечку, опирающуюся на защитный кожух полусферы, и включают натриевую лампу на 220 в.

2. Включают вилку провода от трансформатора для питания лампочки подсветки шкалы в настольную розетку с напряжением

127 в. Включают в штепсельные гнезда на верхней панели трансформатора вилку вспомогательного карманного фонаря подсветки. Карманный фонарь имеет на корпусе еще выключатель, которым надо пользоваться при работе.

3. Если на горизонтальной поверхности полусферы остались следы контактной жидкости от прежних опытов, то ее протирают специальной салфеткой, делая легкие кругообразные движения. Нажим на поверхность полусферы или трение ее в радиальных направлениях совершенно недопустимы. Необходимо иметь в виду, что тяжелые сорта стекла с большими значениями показателей преломления чрезвычайно мягки, хрупки и ничтожное усилие их царапает и разрушает.

Если указанный метод протирки полусферы почему-либо не очищает ее, то необходимо обратиться к лаборанту. *Прикосновение к полусфере бумагой или пальцами недопустимо.*

4. Берут из коробки с исследуемыми образцами один из стеклянных цилиндров (они различаются по меткам на нерабочих торцах) и протирают его так же, как и полусферу.

5. Удерживая цилиндр за боковую поверхность вертикально, наносят на его верхний горизонтальный торец капельку контактной жидкости диаметром 2—3 мм. Капелька наносится кончиком специальной пробки, закрывающей флакон с контактной жидкостью.

Затем перевертывают цилиндр каплей вниз и ставят его с очень легким нажимом на центр полусферы. При этом капля контактной жидкости смачивает всю поверхность соприкосновения торца цилиндрика с полусферой. Наблюдаемая в дальнейшем оптическая картина будет испорчена, если контактная жидкость растечется из-под цилиндра по поверхности полусферы. Поэтому двигать поставленный цилиндр по поверхности полусферы не следует. Если излишек жидкости почему-либо все же растекся по поверхности полусферы, то необходимо снять цилиндр и, протерев его и полусферу салфеткой, проделать все операции сначала.

6. После этого можно приступать к наблюдениям в зрительную трубу (до того как цилиндр установлен, в трубу вообще света видно не будет). Необходимо отпустить зажимной винт под лимбом. Вращая трубу вокруг горизонтальной оси прибора, можно найти видимую в нее границу света и тени и навести на нее крест нитей. Это можно сделать от руки, но можно воспользоваться и микрометрическим винтом. Фокусировка трубы на бесконечность фиксирована и регулировке не подлежит.

Ориентация поляроида в окуляре трубы, при опытах с изотропным стеклом, существенного значения иметь не будет.

7. Установив крест нитей на границу света и тени, как это указано выше, производят отсчет предельного угла преломления по вертикальному лимбу и записывают его. При производстве отсчета подсвечивают лимб карманным фонариком. Вращая затем полусферу

вокруг вертикальной оси, т. е. изменяя азимут образца, ведут наблюдения в трубу за границей света и тени. Вращение полусферы производится двумя пальцами за рифленые края азимутального лимба, находящегося под полусферой. При работе со стеклянным образцом очевидно, что положение границы света и тени не должно зависеть от азимута образца, в чем легко убедиться на опыте. Наведя крест нитей несколько раз на границу света и тени, записывают всякий раз отсчеты по лимбу трубы. Для исключения мелких случайных ошибок рекомендуется сделать эти измерения при нескольких азимутальных ориентациях образца.

По среднему значению найденного таким образом угла определяют значение показателя преломления исследуемого образца стекла.

Затем проделывают такие же измерения с другим образцом стекла.

8. Переходят к измерениям с кристаллами исландского шпата и кварца. Образцы этих кристаллов вырезаны также в виде цилиндров. Оптическая ось кристаллов имеет теперь, в каждом цилиндре, характерное, специально выбранное направление, позволяющее наблюдать наиболее интересные явления двойного лучепреломления.

Мы не указываем здесь, как именно ориентированы оптические оси кристаллов в разных образцах. Одна из задач студентов в настоящем упражнении заключается в том, чтобы научиться самостоятельно устанавливать эти ориентации на основании собственных наблюдений.

Подготовка каждого образца к измерениям и установка его на полусфере производятся так же, как и для стеклянных образцов. Но отыскание в зрительную трубу границы света и тени будет теперь, вообще говоря, сложнее, чем для стеклянных образцов.

Во-первых, таких границ может быть две. Во-вторых, их наблюдения будут эффективны при двух разных ориентациях окулярного поляроида. Следовательно, отыскивая границу света и тени, надо не только перемещать зрительную трубу как целое, но и вращать в ней поляроид до тех пор, пока одна из границ не станет четкой. Несколько раз, наводя трубу на четкую границу света и тени, записывают соответствующие отсчеты по лимбу. Затем, изменяя азимут кристалла, через каждые 20° производят измерения предельного угла α_n .

Повернув поляроид на 90° , надо отыскать вторую границу света и тени для того же кристалла и проделать для нее те же измерения.

Такие измерения необходимо проделать для всех имеющихся при задаче образцов.

Обработка результатов измерения. 1. По значениям предельных углов для всех азимутов необходимо найти значения показателей преломления также для всех азимутов кристалла.

2. Найденные значения показателей преломления для исландского шпата надо представить в виде полярной диаграммы. Для этого надо построить через каждые 20° радиальную сетку с радиусами около 15 см и отложить по этим радиусам значения показателей преломления n_o и n_e в масштабе: $n = 1$ соответствует 5 см.

Соединив концы радиусов для n_o и n_e плавными кривыми, получают полярные диаграммы этих величин. Пользуясь полученным графиком, нужно определить оптический знак кристалла и направление его оптической оси по отношению к графику и ее расположение по отношению к оси цилиндрического образца кристалла.

Пользуясь тем же графиком, находят максимальную разность $\Delta n = n_e - n_o$, где Δn есть максимальная величина двойного лучепреломления. Из последней формулы находят величину Δn для исландского шпата.

3. Ввиду малой разности показателей преломления n_e и n_o для кварца строить для этого кристалла аналогичные графики нецелесообразно. Поэтому по результатам измерений показателей преломления кварца, проведенных с образцом, вырезанным перпендикулярно к оптической оси кристалла, находят для каждого угла поворота кристалла значения $\Delta n = n_o - n_e$. Усредняя значения Δn , находят величину двойного лучепреломления в кварце.

4. По результатам измерений показателей преломления n_o и n_e , проведенных с образцом кварца, вырезанным параллельно оптической оси, определяют оптический знак кристалла кварца и направление оптической оси в образце по отношению к геометрической оси используемого цилиндра.

Технические данные установки. Задача поставлена с кристалл-рефрактометром типа КРМ, выпускаемого нашей промышленностью. Однако в приборе произведен ряд переделок, в окуляре зрительной трубы установлен поляризатор, без которого, очевидно, работа кристалл-рефрактометра не бывает полноценной. Натриевая лампа марки ДНас18 принадлежит к серии так называемых спектральных ламп, выпускаемой нашей промышленностью. Ориентированные образцы исландского шпата и кварца изготовлены на физическом факультете университета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957, гл. XV, XVI и XXV.

2. М. Борн, Оптика, ДНТВУ, Харьков, 1937.

3. Р. Вуд, Физическая оптика, ОНТИ, 1936.

4. Н. М. Меланхолин и С. В. Грум-Гржимайло, Методы исследования оптических свойств кристаллов, Изд. АН СССР, 1952.

ЗАДАЧА 145

ИЗУЧЕНИЕ КРИСТАЛЛООПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ
ПРИ ПОМОЩИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО МИКРОСКОПА

В задаче рассматриваются методы применения поляризационного микроскопа для определения показателей преломления мелких зерен твердых веществ и определения различных оптических констант одноосных и двуосных кристаллов.

Описание прибора. Поляризационный микроскоп состоит из штатива *А* (рис. 1) с тубусом *Б*, в котором помещаются верхний николю-анализатор *В* и линза *Г*, применяемая для изучения явлений поляризации в сходящемся свете (линза Бертрана). Анализатор и линза *Г* могут выдвигаться из прорезей тубуса. В тубусе имеется также и третья прорезь *Д*, служащая для введения компенсаторов в оптическую систему микроскопа. Тубус можно поднимать и опускать при помощи винта *Ж* и микрометрического винта *З*. Перемещение последнего отсчитывается по делениям, нанесенным на головке винта. Обычно одно деление соответствует перемещению тубуса на 0,002—0,003 мм. Для удобства штатив можно ставить в любое наклонное положение, закрепляя его соответствующим винтом.

Объектив зажимается в пружинные щипцы, захватывающие своей вилкой шпенец на кольце объектива. В этом же кольце имеется приспособление для центровки объектива.

Объектив считается центрированным, если середина креста окуляра совпадает с осью вращения предметного столика *И*, на котором помещается исследуемый объект.

Столик может вращаться вокруг своей оси, причем угол поворота отсчитывается по лимбу на краю столика; достаточная точность отсчета 1° . Сбоку находится винт *К*, позволяющий закреплять предметный столик неподвижно. На столике находятся лапки *Л*, служащие для закрепления объекта на столике.

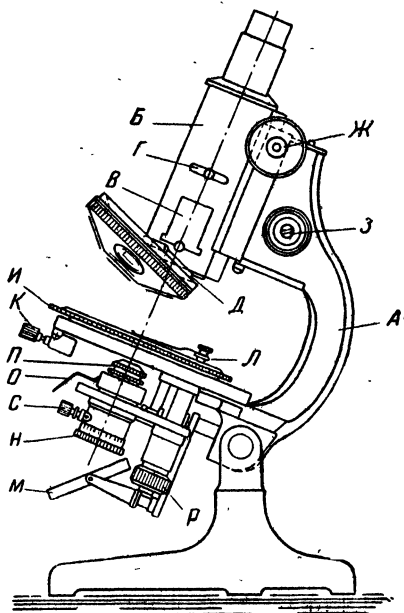


Рис. 1.

Осветительная система, находящаяся под столиком, состоит из зеркальца (плоского и вогнутого) M , поляризатора H с осветительной линзой и диафрагмой O и сменного конденсора Π с апертурой $0,5-1,3$. Для получения сильно сходящегося пучка света выше конденсора Π вводится при помощи рычажка дополнительный конденсор — линза Лазо (на чертеже не показана). Винт C служит для закрепления поляризатора в требуемом положении для наблюдений в скрещенных и параллельных николях. Вся осветительная система опускается при помощи бокового винта P и этим же винтом может быть отведена в сторону.

Кварцевая пластинка чувствительного оттенка вырезается таким образом, чтобы волна, направление колебаний которой параллельно длинной стороне пластинки, имела показатель преломления n_p , а волна с направлением колебаний вдоль короткой стороны — показатель преломления n_g (см. задачу 142). Создаваемая такой пластинкой разность хода равняется 555 мкм. Эта разность хода дает при скрещенных николях лилово-красную окраску, соответствующую границе первого и второго порядков (чувствительный оттенок). При этой окраске небольшое увеличение разности хода (на 50 мкм) дает уже синий цвет, а уменьшение — оранжево-красный. Кварцевый клин — см. описание кварцевого клина в задаче 142.

Установка микроскопа. Для освещения исследуемого объекта в большинстве случаев применяется специальный осветитель или сильная электрическая лампа с матовым стеклом для получения рассеянного света. Объектив с увеличением $8,8 \times$ помещается в щипцы тубуса. Анализатор и линза Γ выдвигаются из тубуса. Не вставляя окуляр, смотрят в тубус микроскопа и, перемещая зеркальце, добиваются наилучшего освещения поля зрения. При этом диафрагма в осветительной системе должна быть открыта полностью. Затем в тубус вставляют окуляр, снабженный крестом, вводят анализатор, отпускают винт C и вращают поляризатор до тех пор, пока поле зрения не будет максимально затемнено. Максимальное затемнение поля зрения указывает на скрещенное положение николей.

Затем следует определить направление световых колебаний, пропускаемых поляризатором. Для этого вынимают анализатор, отвинтив винт, закрепляющий его в тубусе микроскопа. Приложив анализатор к глазу, наблюдают отражение света от какой-либо блестящей поверхности (например, ящика микроскопа). Поворачивая николь, отмечают разницу в интенсивности проходящего света. Зная направление колебаний отраженного света, определяют, таким образом, направление колебаний, пропускаемых анализатором, а следовательно, и поляризатором, так как положение скрещенности николей уже проверено.

Для того чтобы во время работы всегда знать направление световых колебаний, пропускаемых николями, проверяют совпадение

креста окуляра с направлением световых колебаний, пропускаемых поляризатором и анализатором. Расположение креста проверяется по кристаллу черной слюды (биотита) в шлифе. В слюде хорошо видны трещины спайности — направления, по которым кристалл слюды легко раскалывается на тончайшие листочки. Выдвинув анализатор, поворачивают предметный столик так, чтобы трещины спайности были параллельны одной из ветвей креста окуляра. Затем вдвигают анализатор. При этом должно наступать полное затемнение кристалла, так как плоскость спайности биотита совпадает с одним из главных сечений эллипсоида показателей преломления. Если полное затемнение не достигается, то это означает, что крест окуляра не совпадает с направлением световых колебаний, пропускаемых николями. Подобный дефект в микроскопе является весьма существенным, и его исправление следует поручить специалисту-оптику.

Центрировка объектива. Если объектив не центрирован, то все точки объекта при вращении предметного столика описывают окружности, центр которых не совпадает с крестом в поле зрения окуляра. Задачей центрировки является совмещение центра вращения поля зрения с центром креста окуляра. Быстро вращая столик в обе стороны, отмечают на глаз его центр вращения, затем, действуя перпендикулярными друг к другу центрировочными винтами, находящимися в оправе объектива, стараются совместить центр вращения поля зрения с центром креста. Повторяя последовательно эти действия несколько раз, уточняют центрировку и таким образом совмещают ось объектива с осью вращения столика.

Измерения. После установки поляризационного микроскопа приступают к измерениям.

Упражнение 1

Определение показателей преломления порошков методом световой полоски (иммерсионный метод)

Для применения этого метода необходим только один николю. Поэтому анализатор следует выдвинуть из тубуса микроскопа. Если определяются показатели преломления кристаллического порошка, то вначале исследуемый обломок кристалла ставится (вращением столика микроскопа) в положение погасания при скрещенных николях, а потом уже удаляется анализатор. Для лучшего наблюдения следует брать объектив с большим увеличением ($20\times$ или $40\times$).

Определение показателя преломления основано на наблюдении перемещения световой полоски на границе двух сред с различными показателями преломления. Показатель преломления может быть определен, если показатели преломления обеих сред различаются хотя бы на $0,002$ — $0,003$. Наблюдаемое образование и смещение

световой полоски вызывается особенностью явлений, протекающих на границе двух различно преломляющих сред. Эти явления в основном могут быть объяснены с помощью рис. 2.

Так, если лучи 1, 2, 3, 4, 5 из конденсора K (рис. 2) падают сходящимся пучком на границу двух сред с показателями преломления n и N , где $N > n$, то луч 3 пройдет вдоль границы раздела,

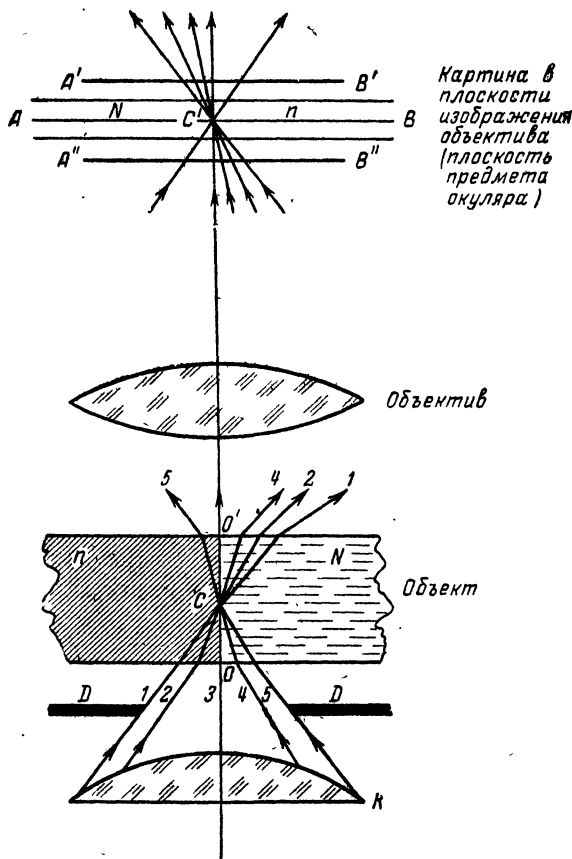


Рис. 2.

лучи 1, 2 преломятся на границе OO' и пройдут в среду с показателем преломления N , луч 5 преломится на границе OO' и пройдет в среду n , а луч 4 испытает полное внутреннее отражение на границе раздела и в левую среду не попадет. Таким образом, среда с большим показателем преломления N будет освещена сильнее, чем среда с меньшим показателем преломления n . Диафрагма DD срезает крайние лучи, ослабляя интенсивность световых пучков, выходящих слева (луч 5), повышая этим контрастность границы сравнения.

Объектив сводит прошедший через препарат свет в плоскости изображения и дает обратное действительное изображение, которое и рассматривается в окуляр. При точной фокусировке плоскость предмета окуляра (плоскость изображения объектива) AB проходит как раз через точку C' . Если поднять тубус микроскопа, плоскость изображения объектива опустится, и плоскость предмета окуляра пересечет пучок света, собранный объективом, выше точки C' по линии $A'B'$. Наблюдателю будет казаться, что на среде с большим показателем преломления имеется белая полоска, которая будет отодвигаться в среду с большим показателем преломления по мере поднятия тубуса микроскопа. Если опустить тубус микроскопа ниже, плоскость предмета окуляра пересечет пучок ниже точки C' , по линии $A''B''$, и белая полоска переместится на среду с меньшим показателем преломления. Очевидно, что световая полоска может быть использована в качестве простого и удобного признака, позволяющего установить, имеет ли исследуемое вещество больший, или меньший показатель преломления по сравнению с окружающей его средой.

Если при подъеме тубуса микроскопа световая полоска смещается на исследуемое вещество (внутри), а при опускании тубуса — наружу, т. е. на окружающую среду, то исследуемое вещество имеет показатель преломления б о л ь ш и й, чем у окружающей среды. В случае полного совпадения показателей преломления исследуемого вещества и окружающей среды полоска полностью исчезает, и вещество становится невидимым, как бы «растворяясь» в жидкости.

Для измерения показателя преломления помещают немного исследуемого порошка на предметное стекло: Смачивают порошок 1—2 каплями одной из жидкостей, имеющихся в наборе. При этом отмечают номер жидкости и ее показатель преломления, данный в приложенном к набору списке. Каплю покрывают покровным стеклом и весь препарат помещают на предметный столик микроскопа. Для устранения явления дисперсии препарат освещают монохроматическим светом, что увеличивает точность измерения. В случае применения белого света полоска может исчезнуть только тогда, когда совпадают дисперсии жидкости и вещества, что бывает практически очень редко. Микроскоп фиксируется на границу между обломком вещества и жидкостью. Поднимая тубус, отмечают, в какую сторону движется световая полоска.

Приготавливают препарат с какой-либо другой жидкостью и вновь повторяют наблюдение. Систематическим подбором жидкостей добиваются исчезновения световой полоски. Зная показатель преломления жидкости при данных условиях (температуры и длины волны), определяют показатель преломления исследуемого вещества.

Во избежание повреждения фронтальной линзы объектива наблюдение следует всегда проводить, п о д н и м а я т у б у с м и к р о с к о п а и обязательно закрывая препарат покровным стеклом.

При измерении показателей преломления описанным методом (иммерсионным) следует иметь в виду, что в то время, как в изотропных средах показатель преломления постоянен в любом направлении, для анизотропных кристаллических сред в каждом данном обломке всегда будут наблюдаться два показателя преломления в зависимости от того, как направлены световые колебания волн, выходящих из поляризатора. Наиболее резко они будут отличаться один от другого, если перед измерением кристалл будет поставлен в положение затемнения при скрещенных николях.

В этом случае можно определить оба показателя преломления, сделав два измерения при положениях столика микроскопа, отличающихся на 90° . Для определения максимального и минимального показателей преломления в общем случае необходимо провести возможно большее количество измерений в различно ориентированных обломках одного и того же кристаллического вещества.

Упражнение 2

Определение толщины кварцевых пластинок и величины двупреломления кристаллов

Разность хода волн связана с толщиной пластинки d и с величиной двупреломления ($n_g - n_p$) следующим соотношением:

$$R = d(n_g - n_p)$$

(см. задачу 142).

1. На предметный столик микроскопа помещают между скрещенными николями пластинку кварца так, чтобы она имела наиболее интенсивную окраску. Для этого, вращая столик с пластинкой, предварительно находят положение наибольшего затемнения поля зрения, а затем поворачивают столик микроскопа на 45° против часовой стрелки. Затем вводят в прорезь D (рис. 1) кварцевый клин и наблюдают получающееся изменение интерференционных окрасок при продвижении клина; они или падают до черной или повышаются в порядке шкалы Ньютона. Во втором случае столик следует повернуть на 90° , и тогда компенсация разности хода (получение затемнения) может быть достигнута без труда. Зная толщину клина для окраски соответствующего порядка (погашенной при наложении на пластинку), по таблице 18 (в конце книги) находят искомую толщину пластинки.

2. Между скрещенными николями помещают кристаллическую пластинку известной толщины. Вводят кварцевый клин и, как только что описано, добиваются затемнения поля зрения. Зная для клина порядок интерференционной окраски, соответствующей затемнению поля зрения, по цветной номограмме двойного светопреломления (табл. 19) находят величину двупреломления исследуемой пластинки.

Упражнение 3

Определение оптического знака одноосных кристаллов и оптического знака и угла оптических осей двуосных кристаллов в сходящемся свете

Для получения сильно сходящегося пучка света в осветительную систему микроскопа вводится дополнительный конденсор (линза Лазо). Для увеличения апертуры и максимального использования пучка расходящихся лучей, вышедших из кристалла, включается объектив с максимальным увеличением ($60\times$), после чего проводится его тщательная центровка.

В случае исследования толстых пластинок или кристаллов с большим двупреломлением могут быть использованы объективы $40\times$ или даже $20\times$, так как указанные объективы позволяют получить заметную разность хода для волн, образующих малые углы с оптической осью, или в случае двуосного кристалла с биссектрисой острого угла между оптическими осями.

Получающаяся интерференционная картина наблюдается либо непосредственно при вынудом окуляре, либо с окуляром при включенной дополнительной линзе Г. Окуляр вместе с линзой образуют оптическую систему, позволяющую рассматривать интерференционную фигуру с увеличением в 2—3 раза. Фокусировка позволяет вести наблюдения лицам с любым зрением.

Следует иметь в виду, что при применении объектива с большим увеличением расстояние между его фронтальной линзой и препаратом очень мало, и возникает опасность при неосторожной работе раздавить препарат и фронтальную линзу. Поэтому следует сначала довести объектив до соприкосновения с препаратом, наблюдая сбоку положение объектива, затем уже фокусировать изображение только подниманием тубуса, вращая фокусировочный винт против часовой стрелки.

Для изучения кристаллов в сходящемся свете применяются шлифы кристаллов, вырезанные перпендикулярно к оптической оси (для одноосных) и к биссектрисе острого угла оптических осей (для двуосных).

Краткая теория. 1. Явления в одноосных кристаллах, вырезанных перпендикулярно к оптической оси. В параллельных лучах такая пластинка ведет себя как изотропное тело и не обнаруживает никаких признаков двупреломления. В сходящемся пучке света она дает характерные фигуры интерференции. Если наблюдать явления в монохроматическом свете при скрещенных николях, то в микроскопе будет видна интерференционная фигура, состоящая из концентрических темных и светлых колец, пересеченных черным крестом, ветви которого сходятся в центре колец и расширяются к краям поля зрения. Расстояние между темными и светлыми кольцами для красного света больше, чем для синего. Поэтому при наблюдении

в белом свете интерференционная фигура представляет собой цветные кольца (изохроматические линии), окраска которых меняется при переходе от одного кольца к другому согласно шкале колец Ньютона. Пересекающие их черные кресты носят название *изогиры*. Понятно, что фигура не меняется при вращении пластинки вокруг направления светового пучка. Если же повернуть один из николей на 90° , то изохроматические линии изменят свою окраску на дополнительную, а черный крест заменится белым. Чем толще пластинка и чем больше величина двупреломления кристалла, тем ближе лежат изохроматические линии друг к другу.

Для определения оптического знака одноосного кристалла применяется кварцевая пластинка чувствительного оттенка. Как было уже указано, такая пластинка ориентирована так, что волна с направлением колебаний, параллельным длинной стороне пластинки,

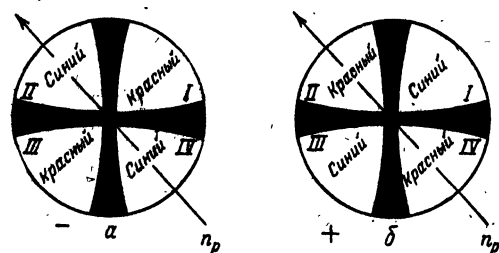


Рис. 3.

имеет большую скорость распространения, т. е. меньший показатель преломления (n_p). Кварцевая пластинка вводится в прорезь микроскопа и при этом наблюдается изменение окраски интерференционной картины: крест окрасится в лилово-красный цвет, а в накрест лежащих квадрантах появится синяя или красная (оранжевая) окраска. Оптический знак кристалла будет положительным, если в квадрантах, пересекаемых длинной стороной пластинки, появится красная (оранжевая) окраска, а в двух других — синяя (рис. 3). При этом в сильно двупреломляющих или толстых пластинках окрашивание заметно в частях креста непосредственно около его центра.

Для объяснения этого правила приходится вспомнить два положения:

1) одноосный кристалл считается положительным, если скорость необыкновенной волны меньше скорости обыкновенной ($n_o < n_e$), и отрицательным, если скорость необыкновенной волны больше скорости обыкновенной ($n_e < n_o$);

2) колебания необыкновенной волны лежат в плоскости, проходящей через направление падающей волны и оптическую ось, т. е. по радиусам наблюдаемой фигуры интерференции. Очевидно, что направления колебаний обыкновенной волны в любой точке фигуры будут совпадать с касательными к изохроматическим кольцам.

На основании этих общих положений легко понять, на чем основывается изложенное правило определения оптического знака одноосного кристалла.

При совпадении направления световых колебаний волны в кварцевой пластинке, обладающих наибольшей скоростью распространения (т. е. тех, для которых показатель преломления имеет значение n_p), с направлением световых колебаний в исследуемом кристалле, распространяющихся с наименьшей скоростью, т. е. тех, для которых показатель преломления имеет значение n_g , происходит уменьшение разности хода волн, и соответствующие места в интерференционной фигуре окрашиваются в красный цвет. Как было указано, направлению радиусов интерференционной фигуры соответствуют колебания необыкновенной волны и, следовательно, скорость необыкновенной волны меньше скорости обыкновенной ($n_e > n_o$), а это и есть условие для оптически положительного кристалла. Для накрест лежащих квадрантов световые колебания, совпадающие с длинной стороной кварцевой пластинки, совпадают с направлением световых колебаний обыкновенной волны в исследуемой пластинке, и в данном случае будет наблюдаться увеличение разности хода, а указанные квадранты окрасятся в синий цвет. В случае оптически отрицательного кристалла, очевидно, будет наблюдаться обратное расположение интерференционных окрасок.

2. Явления в оптически двуосных кристаллах, вырезанных перпендикулярно к биссектрисе острого угла между оптическими осями. Если между скрещенными николями поместить пластинку двуосного кристалла, вырезанную перпендикулярно к биссектрисе острого угла между оптическими осями (или, как говорят, перпендикулярно к острой биссектрисе), то в параллельных лучах освещенность поля зрения при вращении предметного столика будет изменяться и лишь при четырех положениях пластинки поле зрения будет затемненным. Затемнение будет наблюдаться при условии, что плоскость главного сечения (плоскость оптических осей) будет совпадать с главными сечениями поляризатора или анализатора.

При исследовании такой пластинки в сходящемся свете будут наблюдаться различные картины. Если наблюдать в сходящемся свете пластинку, поставленную так, что в параллельном свете поле зрения затемнено, то будет видна интерференционная фигура в виде серии темных и светлых лемнискат с двумя фокусами, расположенными в местах выхода оптических осей. В случае применения белого света лемнискаты будут окрашены в цвета колец Ньютона. Лемнискаты пересекаются темным крестом с неравномерно широкими ветвями. В направлении плоскости оптических осей расположится более узкая ветвь, а в направлении, перпендикулярном к ней, — более широкая и размытая. При вращении предметного столика ветви креста расходятся в две ветви гиперболы, расходящиеся на максимальное расстояние при положении главного

сечения под углом 45° к главным сечениям николей. Вершины гиперболы совпадают с выходом оптических осей.

В двуосных кристаллах в направлении биссектрисы острого угла между оптическими осями распространяются световые волны с наименьшей и средней скоростями, которым соответствуют показатели преломления n_g и n_m в случае оптически отрицательных кристаллов и световые волны с наибольшей и средней скоростями (n_p и n_m) в случае оптически положительных кристаллов.

Для определения оптического знака исследуемую пластинку ставят в положение наибольшей освещенности и затем в прорезь вводят кварцевую пластинку чувствительного оттенка так, чтобы ветви гиперболы пересекались длиной ее стороной. Кристалл

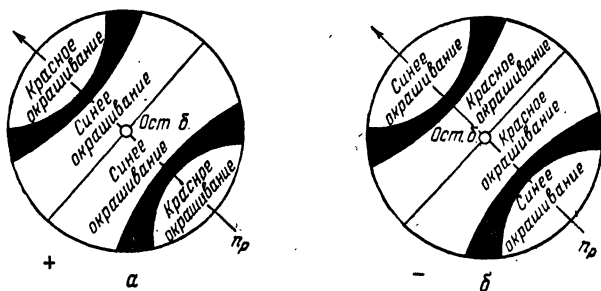


Рис. 4.

будет оптически положителен, если пространство между ветвями гиперболы окрасится в синий цвет. В этом случае в направлении острой биссектрисы распространяются световые волны со средней и минимальной скоростями. В случае оптически отрицательного кристалла будет наблюдаться красная или оранжевая окраска между ветвями гиперболы, так как в направлении острой биссектрисы будут распространяться световые волны со средней и максимальной скоростями (рис. 4).

Следует отметить, что вне ветвей гиперболы появятся обратные окраски, так как в пространстве, расположенном вне ветвей гиперболы, направления колебаний волн поменяются местами и там, где располагались колебания волн с максимальной скоростью, расположатся колебания волн с наименьшей скоростью и наоборот. Это объясняется тем, что пространство, расположенное вне вершин гиперболы, является областью, относящейся к тупому углу между оптическими осями (областью тупой биссектрисы), а там, естественно, условия оптического знака будут обратными условию для области биссектрисы острого угла. Пользуясь пластинкой, вырезанной перпендикулярно к биссектрисе острого угла, можно также определить величину угла между оптическими осями,

если угол не очень велик и это допускает апертура объектива. Если известен угол оптических осей, измеренный в воздухе $2E$, то можно вычислить истинный угол между осями $2V$. Действительно, пусть в кристалле свет идет по направлению OA и OB , совпадающему с направлениями оптических осей (рис. 5). Тогда угол AOB , равный $2V$, и есть угол между оптическими осями. В воздухе свет пойдет по направлению BF и AF' и угол $2E$ будет видимым в воздухе углом между оптическими осями. Половины этих углов связаны между собой законом преломления

$$\sin V = \frac{\sin E}{n_m}.$$

Если известны E и n_m , можно определить V .

Видимый угол между оптическими осями $2E$ приближенно можно определить, измеряя окулярным микрометром расстояние между вершинами гиперболы на интерференционной фигуре, характерной для разреза, перпендикулярного к острой биссектрисе. Половина этого расстояния D может быть принята пропорциональной синусу E половины угла между оптическими осями, помноженному на некоторый коэффициент K , зависящий от оптической системы микроскопа. Исключить этот коэффициент можно путем измерения величины D для кристалла, обладающего известным углом между оптическими осями, который может быть измерен более точными методами. Тогда

$$D = K \sin E,$$

$$D' = K \sin E',$$

$$\sin E = \frac{D}{D'} \sin E'.$$

Эта пропорциональность между D и E справедлива лишь для близких по величине углов между оптическими осями, для сильно различающихся углов она может достигать 10—12°.

Таким образом, для измерения угла между оптическими осями указанным методом необходимо иметь хотя бы одну эталонную пластинку из кристалла с известным углом между оптическими осями. Чаще всего применяется для этой цели пластинка белой слюды (мусковита), в которой легко измерить угол между оптическими осями более точным методом.

Измерения. Помещая на предметный столик микроскопа поочередно все имеющиеся кристаллические пластинки и устанавливая микроскоп на наблюдение в сходящемся свете, отделяют одноосные кристаллы от двуосных.

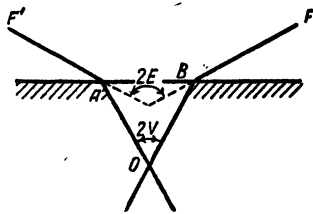


Рис. 5.

Определяют оптический знак одноосных кристаллов при помощи кварцевой пластинки чувствительного оттенка. Определяют оптический знак двуосных кристаллов при помощи кварцевой пластинки.

Определяют видимый и истинный углы между оптическими осями при помощи окулярного микрометра и эталонной пластинки. Для пересчета величины видимого угла между оптическими осями $2E$ в величину $2V$ пользуются таблицей значений среднего показателя преломления n_m для различных кристаллов. (Таблица выдается при выполнении задачи.)

Технические данные установки. При выполнении работы необходимо иметь, кроме поляризационного микроскопа МП-2 с принадлежностями, набор иммерсионных жидкостей, порошки кристаллов и стекла, кристаллические пластинки, вырезанные перпендикулярно и параллельно оптической оси (одноосные кристаллы) и перпендикулярно острой биссектрисе (двуосные кристаллы), шлиф с кристаллами биотита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Гостехиздат, 1957 г.
2. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева, Курс общей физики, т. III, Физматгиз, 1962.
3. С. Д. Четвериков, Методика кристаллооптических исследований шлифов, Госгеолгиздат, 1949.
4. Н. М. Меланхолин, Измерение показателей преломления под микроскопом иммерсионным методом, Изд. АН СССР, 1949.
5. Н. М. Меланхолин и С. В. Грум-Гржимайло, Методы исследования оптических свойств кристаллов, Изд. АН СССР, 1954.
6. В. Б. Татарский, Кристаллооптика и иммерсионный метод, «Недра», 1965.

ЗАДАЧА 146

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЙ ХРОМАТИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

Цель настоящей задачи заключается в спектроскопическом изучении явлений интерференции света в кристаллических пластинках¹⁾.

В ходе выполнения задачи количественно исследуются те случаи интерференции поляризованного света, которые приводят к возникновению окраски — селективной спектральной прозрачности вполне бесцветных кристаллических пластинок, когда они просматриваются между поляризатором и анализатором. В данной

¹⁾ Для выполнения настоящей задачи безусловно необходимо знакомство в объеме общего курса физики с сущностью явлений поляризации света. Необходимо также внимательное изучение описаний задач 143 и 142 (особенно введения и упражнения 2 к задаче 143 и введения к задаче 142).

задаче изучаются явления в плоскопараллельной пластинке одноосного кристалла, вырезанной параллельно оптической оси.

Если монохроматический плоскополяризованный свет падает нормально на такую пластинку, то при вступлении в пластинку свет распадается на две волны (луча) ¹⁾, поляризованные соответственно параллельно и перпендикулярно оптической оси кристалла. Обе волны распространяются в пластинке по одному направлению, но с разными скоростями. В результате, проходя через пластинку, колебания в этих двух волнах приобретают некоторую разность фаз. Если, далее, по выходе этих двух волн (лучей) из кристаллической пластинки пропустить их через анализатор, то он выделит из обеих когерентных волн способные интерферировать колебания одного направления. Следовательно, интенсивность света за анализатором будет зависеть от разности фаз, приобретенной в кристалле обеими волнами (обыкновенным и необыкновенным лучами).

На рис. 1 линии OD' и OD'' дают направления колебаний векторов электрической индукции для обыкновенного и необыкновенного лучей, OP — направление колебаний, пропускаемых поляризатором, OA — направление колебаний, пропускаемых анализатором, OE — амплитуда электрического вектора падающей волны; OD_1 и OD_2 — проекции вектора OE на главные направления кристалла, OD_3 и OD_4 — составляющие колебаний, пропускаемые всей системой.

Интенсивность света, прошедшего данную систему (поляризатор — кристалл — анализатор), в случае плоскополяризованного монохроматического пучка света будет (см. задачу 142)

$$I = E^2 \left[\cos^2 \psi - \sin 2\varphi \sin 2(\varphi - \psi) \sin^2 \frac{\delta}{2} \right], \quad (1)$$

где разность фаз

$$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda} (n_e - n_o). \quad (2)$$

Здесь d — толщина пластинки, λ — длина волны света в вакууме, n_o и n_e — показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей.

Смысл углов φ и ψ ясен из рис. 1.

Рассмотрим два важных частных случая.

¹⁾ В рассматриваемом случае направления лучей и волновых нормалей совпадают.

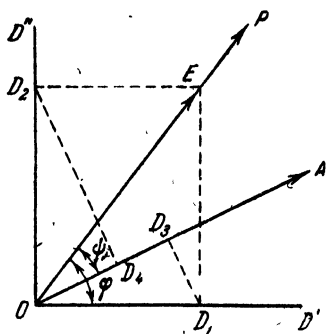


Рис. 1.

1. $A \perp P$, анализатор и поляризатор скрещены, $\psi = \pi/2$. Тогда

$$I_{\perp} = E^2 \sin^2 2\varphi \sin^2 \frac{\delta}{2}. \quad (3)$$

Интенсивность света обращается в нуль либо при

$$\varphi = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \dots \quad (4)$$

т. е. когда направления колебаний, пропускаемых поляризатором и анализатором, совпадают с главными направлениями в кристалле, либо при

$$\delta = 2\pi, 4\pi, 6\pi, \dots \quad (5)$$

В первом случае темнота будет наблюдаться для всех длин волн, так как состояние поляризации света, вышедшего из поляризатора, не изменяется в результате прохождения света сквозь пластинку.

Во втором случае темнота будет наблюдаться лишь для определенных длин волн. При выполнении условия (5) свет, прошедший пластинку, сохранит свое первоначальное направление поляризации и не будет пропущен анализатором. Однако условие (5) не может одновременно выполняться для всех длин волн, поэтому в отличие от первого случая темнота будет лишь для отдельных участков спектра, характеризующихся дискретным набором значений длин волн.

Максимальная интенсивность $I_{\perp} \sim E^2$ будет при

$$\varphi = \frac{\pi}{4}, \frac{3}{4}\pi, \frac{5}{4}\pi, \dots \text{ или } \delta = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots \quad (6)$$

При выполнении этих условий направление колебаний света, прошедшего через пластинку, изменится на 90° и будет параллельно анализатору. Таким образом, весь свет, пропущенный поляризатором, будет пропущен и анализатором.

2. $A \parallel P$, анализатор и поляризатор параллельны, $\psi = 0$

$$I_{\parallel} = E^2 \left[1 - \sin^2 2\varphi \sin^2 \frac{\delta}{2} \right]. \quad (7)$$

Явления в этом случае оказываются дополнительными к случаю $A \perp P$. Направления минимумов определяются условиями

$$\varphi = \frac{\pi}{4}, \frac{3}{4}\pi, \frac{5}{4}\pi, \dots \text{ или } \delta = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots \quad (8)$$

Минимумы являются совершенно темными лишь при одновременном выполнении обоих условий (8) и (9).

Максимальная интенсивность получается либо при

$$\varphi = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \dots, \quad (9)$$

либо при

$$\delta = 2\pi, 4\pi, 6\pi, \dots \quad (10)$$

Целью экспериментальных упражнений является изучение интерференции в кристаллической пластинке в случае падающего на пластинку белого света и определение двойного лучепреломления кристаллической пластинки.

Оптическая схема опыта дана на рис. 2.

Источник света S помещается в фокусе объектива L_1 , который посылает параллельный пучок света через поляризатор P , кристаллическую пластинку K и анализатор A . Объектив L_2 посылает на щель спектрографа Sp сходящийся пучок. Расстояние между объективом L_2 и щелью спектрографа подбирается так, чтобы щель высотой 8—10 мм была равномерно освещена.

В качестве источника света используется лампа накаливания. Поляризатором и анализатором служат пластинки поляроидов. Поляризатор, анализатор и кристаллическая пластинка укреплены

в специальные оправы, могущие вращаться вокруг горизонтальной оси, причем угол поворота вокруг этой оси отсчитывается по специальному лимбу. Оправы легко вставляются в соответствующие гнезда 1, 2, 3, обозначенные на панели держателя.

Приступая к работе, прежде всего следует отъюстировать данную оптическую систему. При этом поступают следующим образом. Источник света устанавливают в фокусе объектива L_1 так, чтобы его изображение попадало на нижнюю часть щели, т. е. освещало нижнее отверстие диафрагмы с фигурными вырезами ¹⁾. Положение объективов L_1 и L_2 фиксировано на скамье. Далее ставят в гнездо 1 поляризатор P так, чтобы поляроид оказался расположенным перпендикулярно оптической оси и чтобы световой пучок проходил через середину поляризатора. Закрепляют установочный винт поляроида. В гнездо 3 устанавливают аналогичным образом другой поляроид — анализатор A . Скрещивают анализатор и поляризатор. Для этого вращают анализатор вокруг горизонтальной оси, пока освещенность щели спектрографа не обратится в нуль. Это положение соответствует углу $\psi = \pi/2$. Затем ставят в гнездо 2 кристаллическую пластинку и также закрепляют ее винтом. При этом появляется некоторая освещенность щели спектрографа. Вращая кристаллическую пластинку вокруг горизонтальной оси, добиваются исчезновения освещенности щели спектрографа. Для большей точности установки можно помещать перед щелью листок белой бумаги. Это положение, соответствующее углу $\varphi = 0$, отсчитывают по лимбу. Далее поворачивают кристаллическую пластинку на 45°

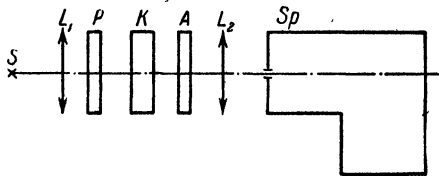


Рис. 2.

¹⁾ См. описание задачи 151.

вокруг горизонтальной оси. Теперь система отъюстирована. С помощью лупы наблюдают полученный спектр. Он представляет собой систему максимумов и минимумов (рис. 3; внизу дан спектр железа).

Минимумы получаются для тех длин волн, для которых выполнено условие (5), это соответствует условию

$$\lambda k = d \Delta n, \quad (5a)$$

где k — целое число, $\Delta n = n' - n''$. Максимумы получаются для тех длин волн, для которых выполнено условие (6), что соответствует условию

$$\frac{\lambda}{2} (2k + 1) = d \Delta n. \quad (6a)$$

Снимают полученный спектр на фотопластинке.

Для определения Δn нужно знать длины волн, соответствующие минимумам и максимумам интенсивности. Определение длин волн

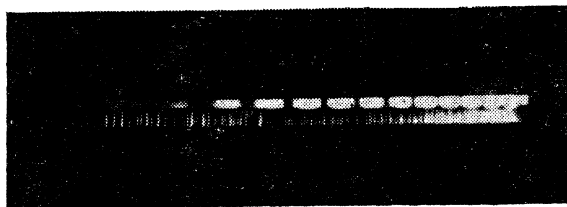


Рис. 3.

производится при помощи спектра излучения железа. При этом, не трогая кассеты, закрывают шторку, укрепленную в спектрографе, передвигают диафрагму на щели спектрографа так, чтобы оказалась открытой верхняя часть щели спектрографа (см. описание задачи 151). Вынимают из гнезд поляризатор, анализатор и кварцевую пластинку и снимают со скамьи лампу накаливания. На левом конце скамьи расположен уже отъюстированный дуговой штатив с железными электродами. С устройством его следует ознакомиться по заводскому описанию.

Включают дугу и производят снимок спектра железа. Далее закрывают крышку кассеты, вынимают кассету из спектрографа и в специальной фотокомнате проявляют, фиксируют и моют фотопластинку. Полученный снимок необходимо показать преподавателю. Если снимок сделан правильно, то его сушат с помощью вентилятора. Подобный снимок приведен на рис. 3.

Далее вторично устанавливают лампу накаливания, поляризатор, анализатор и кристаллическую пластинку. Прodelьывают вторично юстировку этой системы и наблюдают с помощью лупы систему максимумов и минимумов. Поворачивают анализатор на

90° (при этом $\psi = 0$) и снова наблюдают систему максимумов и минимумов. Убеждаются в том, что картины в этом случае являются дополнительными друг к другу. Эта часть упражнения прodelывается визуальнo.

По окончании вышеуказанных работ с кристаллической пластинкой № 1 прodelывают те же опыты с пластинкой № 2, отличающейся от первой своей толщиной. Толщина кристаллических пластинок указывается на установке.

После этого обрабатывают полученный ранее снимок на компараторе. Цель этой обработки — определить длины волн, соответствующие минимумам интенсивности. Для этого прежде всего следует расшифровать спектр железа. Эту расшифровку делают с помощью специального атласа спектров (см. [4, 5]). (Вместо атласа спектров можно использовать фотопластинку со снятым спектром железа, на которой указаны длины волн ряда линий железа. Такая пластинка находится у лаборанта.) Далее определяют длины волн, соответствующие минимумам интенсивности на сплошном спектре, пользуясь методом линейной интерполяции (см. задачу 151). Если обозначить длины волн, соответствующие минимумам интенсивности, через $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots$ и т. д. (всего нужно определить 10÷12 минимумов), то из условия (5а) следует

$$\left. \begin{aligned} \lambda_0 k &= d \Delta n, \\ \lambda_1 (k + 1) &= d \Delta n, \\ \lambda_2 (k + 2) &= d \Delta n, \\ &\dots \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Здесь k — неизвестное целое число (дисперсия Δn мала и мы ею пренебрегаем). Отсюда легко получить следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} (\lambda_0 - \lambda_1) k &= \lambda_1, \\ \left(\frac{\lambda_0 - \lambda_2}{2} \right) k &= \lambda_2, \\ &\dots \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Учитывая эти соотношения, производят дальнейшую обработку снимка следующим образом: составляют таблицу, указанную ниже.

Обработка результатов измерений

№№	λ	$\frac{\lambda_0 - \lambda_i}{i} \quad (i = 1, 2, 3, \dots)$	$k = \frac{\lambda_i}{\lambda_0 - \lambda_i} \cdot i$
0	λ_0	—	—
1	λ_1	$\frac{\lambda_0 - \lambda_1}{1}$	$\rightarrow \frac{\lambda_1}{\lambda_0 - \lambda_1} \cdot 1$

Из полученных значений k берут среднее $k_{\text{ср}}$. Наконец, определяют Δn по формуле (5а), т. е. $\Delta n = \frac{\lambda_0}{d} k_{\text{ср}}$.

Технические данные установки. Задача может быть поставлена с любым спектрографом со стеклянной оптикой. В частности, подходящим спектрографом является ИСП-51.

Источник сплошного спектра — автомобильная лампа накаливания. Источник линейчатого спектра — дуга между железными электродами, укрепленными в универсальном штативе ПС-164 (или ПС-162), питаемая от генератора переменного тока ПС-39. (Эти детали входят в комплект принадлежностей для эмиссионного анализа, выпускаемых нашей промышленностью).

Стеклянные ахроматические объективы L_1 и L_2 (рис. 2) имеют фокусные расстояния 110 и 210 мм. Поляризатор и анализатор приготовлены из поляроидов. Исследуемые пластинки приготовлены из кристаллического кварца. Оптическая ось кварца параллельна плоскости пластинки. Толщины исследуемых пластинок около 1 и 2 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. М. Борн, Оптика, ДНТВУ, Харьков, 1937.
3. А. Зоммерфельд, Оптика, ИЛ, 1953.
4. С. К. Калинин, Л. Э. Наймарк, В. Л. Марзуванов и К. И. Исмагулова, Атлас спектральных линий для стеклянного спектрографа, Госгеолгиздат, 1956.
5. С. К. Калинин, А. А. Явнель, Л. Э. Наймарк, Атлас дугового и искрового спектров железа, Металлургиздат, 1953.

ЗАДАЧА 147

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

В работе с помощью полутеневого сахариметра измеряется удельное вращение плоскости поляризации раствором сахара известной концентрации и определяется процентное содержание сахара в исследуемых растворах. Указанный метод широко применяется в лабораториях химической, пищевой и нефтяной промышленности.

Если в пространство между двумя скрещенными николями (или поляроидами) поместить сосуд с раствором сахара, то в монохроматическом свете наблюдается просветление поля, которое, однако, возможно вновь погасить, вращая анализатор вправо или влево на некоторый угол. Это явление объясняется способностью раствора сахара вращать плоскость поляризации и носит название *вращения*

плоскости поляризации. Известно много веществ, обладающих этим свойством, их называют веществами, оптически активными; к их числу принадлежит ряд жидких и твердых органических веществ: нефть, винная кислота и др., а также некоторые минералы — кварц, киноварь и др.

Различают вращение *правое*, или *положительное*, когда вещество вращает плоскость поляризации по стрелке часов для пучка света, падающего в глаз наблюдателя, и *левое*, или *отрицательное*, при вращении плоскости поляризации в обратном направлении. В случае твердого вещества угол вращения пропорционален толщине проходящего светом слоя, а в случае раствора, кроме толщины слоя, он пропорционален еще концентрации активного вещества раствора. Кроме того, угол поворота зависит и от длины волны падающего света.

В случае раствора имеем

$$\alpha = [\alpha] cl;$$

здесь α — угол поворота, l — толщина слоя, c — концентрация раствора, а $[\alpha]$ — коэффициент, который определяет удельное вращение данного вещества, т. е. раствора в слое толщиной $l = 10$ см при концентрации его $c = 1$ моль/л. Постоянная вращение $[\alpha]$ примерно обратно пропорциональна квадрату длины волны ($[\alpha] \sim 1/\lambda^2$).

Измерение угла поворота плоскости поляризации из двух установок николя-анализатора на темноту поля зрения в отсутствие и присутствии оптически активного вещества крайне приближенно, так как человеческий глаз не может точно отметить положение, в котором анализатор установлен на полное затемнение поля зрения. Поэтому при измерениях применяются полутеневые поляриметры, устанавливаемые не на темноту поля зрения, а на равное освещение двух половин поля зрения, и поляриметры, снабженные бикварцем и компенсатором, у которых установка производится на равенство окраски двух половин поля зрения. Оценка равенства окраски недостаточно объективна; у различных наблюдателей отсчеты могут заметно отличаться. Поэтому в настоящее время применяются почти исключительно полутеневые поляриметры, позволяющие измерить поворот плоскости поляризации с точностью до $0,01^\circ$.

Краткая теория прибора. В полутеневом поляриметре диаметр CC' разделяет поле зрения на две половины (рис. 1). В одной половине световые колебания лежат в плоскости P_1 , а в другой — в плоскости P_2 ; обе плоскости составляют между собой малый угол φ . Если оба световых пучка пропустить затем через анализатор, у которого плоскость колебаний A перпендикулярна к P_2 , то световой

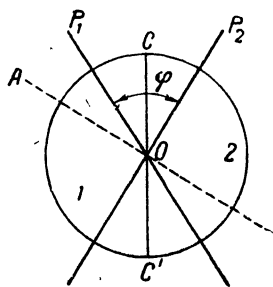


Рис. 1.

пучок половины 2 будет погашен и поле зрения в этой половине будет черное, тогда как часть света половины 1 будет пропущена анализатором и потому поле этой половины будет более или менее светлое. Если анализатор расположен так, что плоскость колебаний перпендикулярна к плоскости колебаний P_1 , то, очевидно, будет наблюдаться обратное явление. Ясно, что оба поля будут иметь одинаковое освещение только при положении $A \perp OC$ или $A \parallel OC$ (рис. 2). Линия OC делит угол между векторами OP_1 и OP_2 пополам. (Векторы OP_1 и OP_2 изображают амплитуды колебаний в обеих половинах поля зрения.) Очевидно, что установка положения

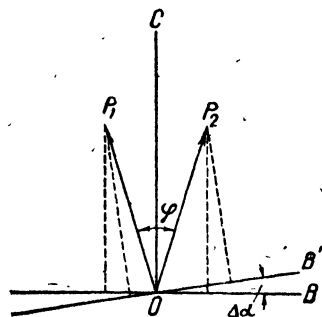


Рис. 2.

анализатора на равенство освещения сначала в пучке света, идущего через воздух, а затем через оптически активное вещество, позволит по углу поворота анализатора определить и угол α поворота плоскости поляризации в исследуемом веществе.

Положение анализатора $A \perp OC$, дающее слабое освещение (полутень), более выгодно в отношении точности установки на равенство освещений, благодаря физиологическим особенностям глаза, более чувствительного к изменениям малых (до известного предела) интенсивностей.

Эту последнюю установку анализатора на равное освещение (полутени) обоих полей можно делать тем точнее, чем меньше угол φ между плоскостями колебаний поляризатора.

Для того чтобы убедиться в этом, рассмотрим рис. 2. Выравнивая интенсивности обеих половин поля зрения, необходимо поставить анализатор в положение $OB \perp OC$. В действительности же допускается некоторая ошибка, и прибор считается установленным, например, в положении OB' . Ошибка эта характеризуется малым углом $\Delta\alpha$. При правильной установке отношение интенсивностей

$$\frac{I_1}{I_2} = 1,$$

при ошибочной установке имеем

$$\begin{aligned} \frac{I_1}{I_2} &= \frac{I_0 \sin^2 \left(\frac{\varphi}{2} + \Delta\alpha \right)}{I_0 \sin^2 \left(\frac{\varphi}{2} - \Delta\alpha \right)} = \\ &= \left(\frac{\sin \frac{\varphi}{2} \cos \Delta\alpha + \cos \frac{\varphi}{2} \sin \Delta\alpha}{\sin \frac{\varphi}{2} \cos \Delta\alpha - \cos \frac{\varphi}{2} \sin \Delta\alpha} \right)^2 = \left(\frac{1 + \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} \operatorname{tg} \Delta\alpha}{1 - \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} \operatorname{tg} \Delta\alpha} \right)^2. \end{aligned}$$

Полагая, что $\Delta\alpha$ очень мало, можно приближенно написать, что

$$\frac{I_1}{I_0} = 1 + 4 \Delta\alpha \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}.$$

Следовательно, ошибка в процентах равна

$$\Delta p = (4 \Delta\alpha \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} \cdot 100) \%,$$

где $\Delta\alpha$ выражено в радианах. При пересчете на градусы найдем, что угловая ошибка (в градусах) будет

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta p}{7} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}.$$

Если, например, ошибка в оценке интенсивностей (Δp) достигает 2%. то ошибка в установке ($\Delta\alpha$) при

$$\varphi = 1^\circ \quad \Delta\alpha = 0,0025^\circ,$$

$$\varphi = 2^\circ \quad \Delta\alpha = 0,005^\circ,$$

$$\varphi = 8^\circ \quad \Delta\alpha = 0,02^\circ.$$

Отсюда следует, что при достаточно малом φ можно измерять α с большей точностью и, следовательно, производить отсчет с точностью по крайней мере до сотых долей градуса.

При этом надо иметь в виду, что освещенность полей ослабевает с уменьшением φ , а потому приходится пользоваться сильными источниками света; если же это невозможно или если исследуемый раствор сильно поглощает свет, то φ приходится увеличивать, хотя и в ущерб точности; поэтому в некоторых более совершенных приборах угол φ можно изменять.

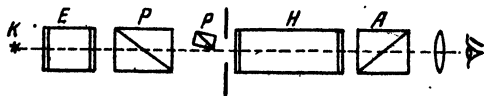


Рис. 3.

Описание прибора. Полутеневого поляриметра, как и всякий поляризационный прибор, состоит из двух основных частей: поляризатора и анализатора (рис. 3). Поляризатор состоит из двух поляризационных призм, большой P и помещенной тут же за ней маленькой p . Главные сечения этих призм, а следовательно, и соответствующие плоскости световых колебаний, составляют между собой небольшой угол. Свет, исходящий от источника K , пройдя через трубу E , о назначении которой будет сказано в дальнейшем, проходит через николю P . Часть света, поляризованного в определенной плоскости, попадает затем в сахариметрическую трубку H , наполненную вращающим веществом, и, наконец, — в анализатор A . Другая же часть света, прежде чем попасть в эту трубку, проходит николю p , вследствие чего плоскость поляризации его несколько изменяется. Таким образом, если анализатор установлен на полное

затемнение одного из световых пучков, то другой пучок будет им отчасти пропускаться. Поле зрения, ограниченное диафрагмой, разделяется вследствие этого на две половины, линией раздела которых является ребро призмы p .

Анализатор устанавливается на равное освещение полей при отсутствии вращающего вещества в трубке H , а затем — после заполнения трубки H вращающим веществом. При этом плоскость колебаний светового вектора в пучках, освещающих обе половины поля зрения, повернется на угол α . На этот же угол придется повернуть и анализатор.

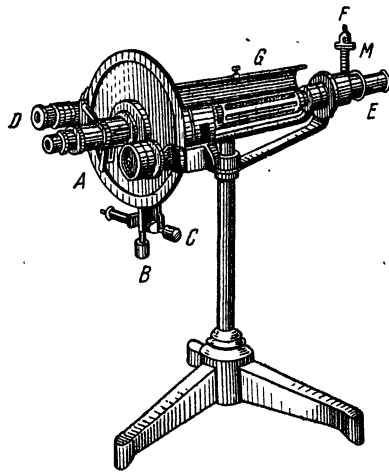


Рис. 4.

Анализатор, находящийся в передней части прибора (рис. 4), можно поворачивать на произвольный угол при помощи рукояток A , освободив предварительно зажимной винт B ; медленное же вращение его производится микрометрическим винтом C после предварительного закрепления винта B . Отсчеты углов производятся в лупы D по двум нониусам, находящимся на концах одного из диаметров круга с делениями, связанного с анализатором, и дающим точность до сотых долей градуса. Находящаяся между анализатором и поля-

ризатором сахариметрическая трубка помещается в особой камере G . Угол между главными сечениями призм P и p (рис. 3) можно изменять путем поворота призмы p на небольшой угол при помощи особого рычажка F (рис. 4), конец которого перемещается при этом по сектору M с делениями.

Источник света при работе с полутеневым поляриметром должен быть монохроматическим. Если же он не монохроматический, то на пути света помещается светофильтр, пропускающий свет только в узком интервале длин волн.

Измерения. Вынув трубку H и поместив перед прибором источник света, устанавливают окуляр так, чтобы ясно видеть линию раздела поля зрения; затем приводят анализатор в нулевое положение, при котором обе половины поля зрения имеют одинаковое затемнение.

Сделав отсчет на круге, поворачивают анализатор немного в сторону, вновь приводят его в нулевое положение и делают новый отсчет на круге. Эта операция повторяется несколько раз, после чего находится среднее нулевое положение анализатора на круге.

Помещают в камеру G трубку с раствором сахара известной концентрации, содержащим C граммов сахара на 100 см^3 раствора, и поворачивают анализатор настолько, чтобы получить равенство затемнения обеих половин поля. Эту операцию повторяют также несколько раз, всякий раз отводя анализатор в сторону и приводя его опять в нулевое положение. Взяв среднее из произведенных отсчетов, находят угол α , на который была повернута плоскость поляризации.

Вычисления. Из полученных результатов вычисляют удельное вращение сахара. Толщину слоя l измеряют обыкновенно в дециметрах, а концентрацию c — в граммах вещества, заключающегося в 1 см^3 раствора; часто вместо c берут C — количество вещества, заключающееся в 100 см^3 раствора, так что $C = 100 c$, и таким образом,

$$\alpha = [\alpha] \frac{Cl}{100}, \text{ откуда } [\alpha] = \frac{100\alpha}{Cl}. \quad (1)$$

Эта формула служит для определения удельного вращения сахара в растворе, если известна величина его вращения α при определенных c и l . Вместо концентрации c или C иногда дают плотность раствора d и процентное содержание вещества p в растворе. Тогда на 100 г раствора приходится p граммов вещества, и следовательно, в 1 см^3 раствора заключается $\frac{pd}{100} \text{ г}$, поэтому

$$\alpha = [\alpha] \frac{lpd}{100}, \text{ откуда } [\alpha] = \frac{100\alpha}{lpd}. \quad (2)$$

Повторяют те же измерения для растворов сахара неизвестной концентрации и из данных наблюдений вычисляют процентное содержание сахара в каждом растворе по формуле (2).

Способом, аналогичным описанному, помимо вращения плоскости поляризации в растворе сахара, измеряют величину вращения в пластинках кристаллического кварца. Эти пластинки вырезаны перпендикулярно к оптической оси кристалла.

Технические данные установки. Задача может быть поставлена с поляриметром марки СМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. Курс физики, под редакцией Н. Д. Палекси, т. II, Гостехиздат, 1948.
3. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева, Курс общей физики, т. III, Физматгиз, 1962.
4. Р. Вуд, Физическая оптика, ОНТИ, 1936.

ЗАДАЧА 148

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ
МАГНИТНОГО ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Явление вращения плоскости поляризации света, проходящего через вещество, помещенное в магнитное поле, имеет большое принципиальное значение. Благодаря открытию этого явления (Фарадей в 1846 г.) была впервые установлена тесная связь оптических и электромагнитных явлений.

Описанию сущности магнитного вращения и его связи с явлением Зеемана в спектрах поглощения в современных учебниках оптики всегда отведено столь значительное место, что здесь нет надобности повторять этот материал (см., например, [1]). Обратим только внимание на то, что в учебной литературе объяснение магнитного вращения плоскости поляризации (на основе расщепления на две части оптической дисперсионной кривой вещества при обратном эффекте Зеемана) часто ограничивается случаем диамагнитных тел. Так как на нашей установке можно ознакомиться также с вращением плоскости поляризации в парамагнетике (водный раствор хлорного железа), происходящим в данном случае в сторону, обратную по отношению к вращению в диамагнетиках, то с теорией этого случая нужно ознакомиться по литературе [2]. В последних, как известно, направление вращения плоскости поляризации света, распространяющегося параллельно или антипараллельно полю, совпадает с направлением тока в обмотке магнита, создавшего поле.

С только что сформулированной характерной зависимостью направления магнитного вращения плоскости поляризации от направления поля (но не от направления распространения света!) также представляется возможность познакомиться в ходе выполнения настоящей задачи.

Переходим непосредственно к описанию используемой в практике магнитооптической установки.

Описание оптической системы и магнита. Общая схема установки приведена на рис. 1.

1. **Устройство поляриметра.** Как видно из рисунка, входная и выходная части поляриметра смонтированы непосредственно на внешних торцах полюсов магнита \mathcal{Z} . Детали поляриметра расположены на движках и могут быть сдвинуты в сторону от канала, просверленного в магните \mathcal{Z} . Подобный сдвиг деталей поляриметра бывает нужен только при юстировке установки. При нормальной работе установки движки помещаются против отверстий канала магнита.

С устройством поляриметра можно подробно ознакомиться по заводскому описанию прибора, прилагаемому к задаче. Здесь мы только подчеркнем физические принципы его устройства.

Используемый поляриметр принадлежит к классу полутене-вых поляриметров. Их принцип действия и даваемые ими преимущества при измерениях пояснены в описании задачи 147. Отметим здесь те особенности, которые отличают используемый поляриметр от описанного в упомянутой задаче. Два световых пучка с несколько различными ориентациями линейно поляризованных колебаний, необходимые для полутеневого метода, осуществляются в описываемом приборе следующим способом. Первоначально, при помощи поляроида Π , поставленного на выходе из коллиматора 2 прибора, получается линейно поляризованный свет. Роль этого поляроида полностью совпадает с ролью первого николя в оптической системе, изображенной в описании задачи 147.

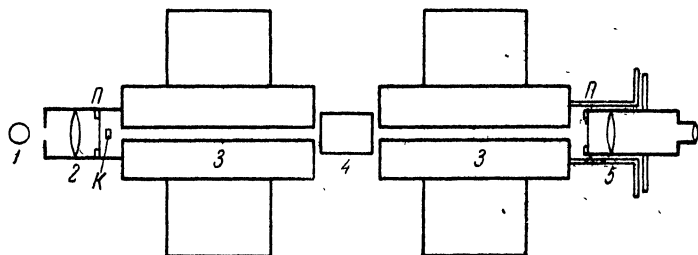


Рис. 1.

Далее, непосредственно за этим поляроидом, помещается плоско-параллельная кварцевая пластинка K , вырезанная параллельно оптической оси кварца. Пластинка эта перекрывает некоторую часть сечения светового пучка. В нашем случае пластинка имеет форму прямоугольника, прикрывающего центральную часть диска поляроида. Толщина кварцевой пластинки подбирается так, чтобы выходящий из нее свет продолжал оставаться линейно поляризованным, как и до вступления в пластинку, но чтобы направление колебаний в нем составляло некоторый небольшой угол с прежним направлением колебаний до вступления света в пластинку. Это будет иметь место, если кварцевая пластинка будет пластинкой в пол волны, т. е. если $d(n_e - n_o) = (2k + 1)\lambda/2$, где d — толщина пластинки, а n_e и n_o — соответственно два главных показателя преломления кварца. Изменение на угол φ направления колебаний светового вектора на выходе из пластинки по отношению к направлению его колебаний при входе в пластинку обеспечивается соответствующей ориентацией оптической оси кристалла (параллельно которой вырезана пластинка) по отношению к световому вектору в падающей волне. Именно, угол между световым вектором в этой волне и оптической осью пластинки должен быть равен $\varphi/2$, если мы желаем получить изменение направления плоскости колебаний светового вектора на угол φ по отношению к его первоначальной ориентации в

пространстве. Таким образом, кварцевая пластинка выполняет ту же роль, какую выполняет второй, маленький николь в оптической системе, изображенной в описании задачи 147.

После кварцевой пластинки через каждое поперечное сечение прибора распространяются параллельно друг другу три световых пучка. Два крайних прошли только через входной поляризатор, а центральный прошел еще через кварцевую пластинку. Этим путем реализованы условия, необходимые для полутеневых измерений.

Далее, по ходу световых лучей схема рассматриваемого прибора совпадает со схемой прибора, описанного в задаче 147; только в качестве анализатора в нашем приборе используется поляризатор P , а не николь. За поляризатором помещается зрительная труба B , для рассматривания через анализатор трех фотометрических полей (двух симметрично расположенных сегментов круга поляризатора и прямоугольника кварцевой пластинки), получающихся у входа в прибор.

В связи с использованием кварцевой пластинки K на входе прибора заметим, что применение такого способа реализации полутеневого метода ограничивает возможность использования света различного спектрального состава при работе с прибором. В самом деле, кварцевая пластинка, как разъяснено выше, должна быть полуволновой. Она может быть таковой только для монохроматического света определенной длины волны. В данном случае нельзя использовать в приборе поочередно свет различных длин волн и изучать явление дисперсии вращения плоскости поляризации, как это можно делать на приборе с николями. В нашем случае поляриметр рассчитан на работу только с монохроматическим желтым светом, близким к свету натриевого пламени.

Устройство механических деталей поляриметра и осветителя к нему настолько просто, что не представляет труда разобраться в их действии, пользуясь заводским описанием прибора и обращаясь за разъяснениями к преподавателю или дежурному лаборанту. Укажем лишь, что фокусировка фотометрических полей осуществляется продольным скользящим перемещением муфты на окуляре. Повороты системы окуляра и анализатора осуществляются при помощи вращения рифленого диска, находящегося на радиальном рычажке фрикциона. Рифленый диск надо вращать двумя пальцами, тогда фрикцион катится по лимбу. Надо сразу, начиная работу с прибором, уяснить себе, что рифленый диск вращается вокруг оси, всегда совпадающей с одним из радиусов лимба и только в результате возникающего качения фрикцион перемещается в плоскости лимба. Попытка поворачивать анализатор и окуляр давлением на рычажок, выступающий из диска, приведет только к порче фрикциона, обеспечивающего при правильном его использовании весьма плавное вращение анализатора и окуляра. При этом может быть полностью использован нониус прибора, допускающий отсчеты углов с точностью до $0,05^\circ$ на своем лимбе.

2. Работа с магнитом. Схема включения магнитов 3 (рис. 1), обслуживающих его реостатов, амперметра и перекидного рубильника помещена непосредственно на установке. Там же помещена инструкция к включению, выключению и переполюсовке питания магнита. Отметим здесь лишь те физические соображения, на основании которых составлена эта инструкция.

Используемый магнит обладает значительной индуктивностью. Поэтому при его в к л ю ч е н и и в момент протекания в обмотках большого тока в цепи магнита возникают большие э. д. с. самоиндукции. Эти э. д. с. самоиндукции могут легко пробить между-слойную изоляцию обмотки магнита и тем самым вывести его из строя. Следовательно, размыкание цепи магнита при окончании работы с ним или в целях изменения направления тока в его обмотке допускается лишь при минимальном токе через обмотку ($\approx 0,1$ а), т. е. при полностью введенных реостатах в цепи магнита. Конкретные указания к применению этого обязательного правила работы с большими магнитами изложены в инструкции.

Кроме условий сохранности магнита, при работе с ним должны соблюдаться специфические условия сохранности для включенных в его цепь реостатов. Дело в том, что при используемом диапазоне токов в цепи магнита (0,1—5 а) в схему его питания неизбежно включены реостаты различных сопротивлений, рассчитанные на различные токи. Поэтому сопротивления высокоомных реостатов, рассчитанных на малые токи, нельзя оставлять частично введенными в схему, когда сопротивления низкоомных реостатов уже выведены. В этом случае через еще оставшиеся под током витки высокоомных реостатов пройдет разрушительный для них ток.

Правила предохранения высокоомных реостатов от подобных перегрузок также указаны в инструкции. Первоначальное включение постоянного напряжения 110 в со щитка на схему прибора осуществляется только дежурным лаборантом. Дальнейшие включения и выключения магнита выполняются только при минимальном токе через его обмотки и осуществляются с помощью настольного перекидного рубильника.

Нужные для работы значения напряженности магнитного поля и соответствующие им значения токов в обмотках магнита указаны в калибровочной таблице, помещенной непосредственно на установке.

3. О б ъ е к т ы и с с л е д о в а н и я. Диамагнитными объектами исследования служат два стеклянных блока длиной по 4 см, изготовленных из тяжелых сортов стекла типа флинт, и слой воды толщиной 5 см, помещенный в плоскопараллельную кювету. Парамагнитным объектом исследования служит слой водного раствора хлорного железа толщиной 5 см, находящийся в плоскопараллельной стеклянной кювете. Все объекты исследования полностью подготовлены к измерениям и никакой регулировке не подлежат.

Объекты исследования 4 (рис. 1) укреплены на столике, помещенном на штыре, закрепленном в рейтере. Этот рейтер перемещается по отрезку оптической скамьи, закрепленному на станине магнита, перпендикулярно магнитному полю. Рейтер снабжен пружинным шариковым фиксатором, а скамья — соответствующими сферическими отверстиями для задержки шарика фиксатора. Положению каждого объекта исследования точно между отверстиями каналов в полюсах магнита соответствует определенное положение фиксатора. Поэтому, плавно перемещая рейтер с объектами наблюдений вдоль оптической скамьи от одного положения фиксатора до другого, можно вводить в работу поочередно все объекты исследования. Фиксированные рабочие положения рейтера ощущаются рукой по легкому упору, который она встречает, при каждом срабатывании фиксатора под скользящим вдоль по скамье рейтером.

Измерения и их обработка. 1. Ознакомившись с имеющимися при установке указаниями по включению источника света (натриевая лампа или лампа накаливания, используемая со светофильтром), просят лаборанта включить рубильник распределительного щитка, обслуживающего розетку переменного тока напряжением 220 в, питающего пусковое устройство лампы. Включают пусковое устройство лампы.

2. Вводят в рабочее положение между полюсами магнита стеклянный блок № 1. Проверяют, что движки с деталями поляриметра на торцах магнита стоят в крайних положениях, против канала в полюсах магнита. Продольными перемещениями скользящей муфты окуляра вдоль оси зрительной трубы фокусируют фотометрические поля поляриметра. Вращением выходного поляроида-анализатора (как сказано выше, путем вращения радиального рифленого диска и качения его по фрикциону) уравнивают освещенность фотометрических полей. Это делают, как всегда при фотометрических измерениях с поляризационными фотометрами, в условиях минимальной освещенности всего поля зрения в окуляре (см. пояснения к рис. 1 и 2 в описании задачи 147). Эта минимальная освещенность всего поля зрения достигается соответствующей взаимной ориентацией поляризатора и анализатора прибора.

Произведенное в этих условиях уравнение освещенностей всех трех фотометрических полей будет соответствовать рабочему нулевому отсчету на лимбе поляриметра, используемому при дальнейших измерениях. Нулевой рабочий отсчет определяется несколько раз и каждый раз заново для каждого нового объекта исследования. Результаты всех определений рабочего нулевого отсчета записываются.

3. Полностью вводят сопротивление всех реостатов магнита. Ставят перекидной рубильник в такое положение, при котором цепь магнита разомкнута. Просят лаборанта включить постоянное напряжение 110 в на распределительном щитке.

Замыкают под наблюдением лаборанта цепь магнита перекидным рубильником. Сообразуясь с инструкцией по управлению реостатами, устанавливают в цепи магнита рекомендованные в калибровочной таблице значения тока. Для каждого значения напряженности магнитного поля вращением поляроида-анализатора производят несколько раз выравнивание освещенностей фотометрических полей, записывая каждый раз соответствующие отсчеты на лимбе прибора.

4. Полностью вводя в цепь магнита сопротивления всех реостатов и доведя силу тока через магнит до минимума ($\sim 0,1$ а), переполюсовывают питание магнита с помощью перекидного рубильника. Повторяют в условиях изменившегося направления магнитного поля все измерения, сделанные при первоначальном направлении магнитного поля.

5. Проводят с другими объектами весь цикл измерений, указанный для стеклянного блока № 1.

6. Строят графики зависимости угла вращения плоскости поляризации α от величины и направления напряженности магнитного поля.

7. Пользуясь этими графиками, или формулой, связывающей непосредственно угол поворота плоскости поляризации с напряженностью магнитного поля, находят постоянную Верде для каждого исследованного вещества ¹⁾. Постоянную Верде принято выражать в угловых минутах на сантиметр пути света в данном веществе при напряженности магнитного поля в один эрстед.

8. Используя теоретическое выражение для постоянной Верде R

$$R = \frac{e\lambda}{2mc^2} \frac{dn}{d\lambda},$$

находят отношение e/m для частиц, определяющих оптическую дисперсию (а следовательно и магнитное вращение плоскости поляризации) вещества. В последней формуле m и e — соответственно масса и заряд частиц, c — скорость света в вакууме, λ — длина световой волны, $dn/d\lambda$ — производная показателя преломления вещества по длине волны. Эту формулу имеет смысл применять в нашем случае только для воды, как единственного используемого в опытах индивидуального вещества. Значение $dn/d\lambda$ для воды вблизи длины волны 6000 Å равно $3 \cdot 10^{-6}$ Å⁻¹. Надо иметь в виду, что приведенная формула точно справедлива для атомарных газов. Поэтому в нашем случае она может дать только правильный порядок величины e/m для электронов, ответственных за дисперсию вещества в оптической

¹⁾ Для раствора хлорного железа обработка результатов ограничивается построением графика, так как постоянную Верде при наложении двух эффектов, диамагнитного в воде и парамагнитного в хлорном железе, вычислять нецелесообразно.

области спектра. Однако полученное значение e/m все же позволяет однозначно установить, что явление вращения плоскости поляризации в магнитном поле обязано своим происхождением воздействию магнитного поля именно на электроны вещества.

Технические данные установки. В работе используется магнит, изготовленный в мастерских физического факультета, дающий напряженность магнитного поля в зазоре 5 см между полюсами около 5000 эрстед. На торцах магнита смонтированы поляризационные детали кругового поляриметра марки СМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. М. В. Волькенштейн, Молекулярная оптика, Гостехиздат, 1951.

ЗАДАЧА 149

ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПАРОВ И ГАЗОВ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СМЕСЕЙ СОЛЕЙ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

Для качественных исследований видимой части спектра применяются различного типа спектроскопы; один из наиболее простых типов состоит из коллиматорной трубы A со щелью S и объективом O_1 , призмы D , зрительной трубы B с объективом O_2 , трубы C со шкалой N и объективом O_3 (рис. 1 и 2).

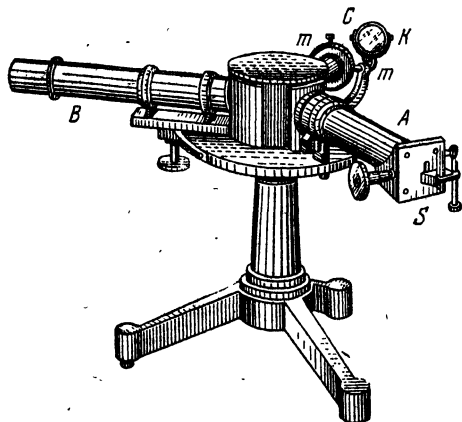


Рис. 1.

Назначение коллиматора — дать параллельный пучок света, падающий на призму D спектроскопа. Для этого щель коллиматора установлена в фокальной плоскости объектива O_1 параллельно преломляющему ребру призмы. Ширину щели S можно изменять при помощи винта x (рис. 3).

Призма спектроскопа обычно устанавливается под углом наименьшего отклонения, т. е. в том ее положении, когда ход лучей, лежащих в плоскости, перпендикулярной к преломляющему ребру (плоскость главного сечения) призмы, симметричен; внутри призмы преломленный луч идет параллельно основанию призмы.

Дело в том, что для призмы, как для оптической системы, не обладающей осью симметрии, не существует параксиального пучка

лучей, по отношению к которому абберационные ошибки оптической системы практически устранены. В случае преломления в призме астигматизм косых пучков (см. задачу 127) отчетливо проявляется. Элементарный расчет хода лучей в призме всегда делается только для луча, лежащего в плоскости главного сечения призмы. Между

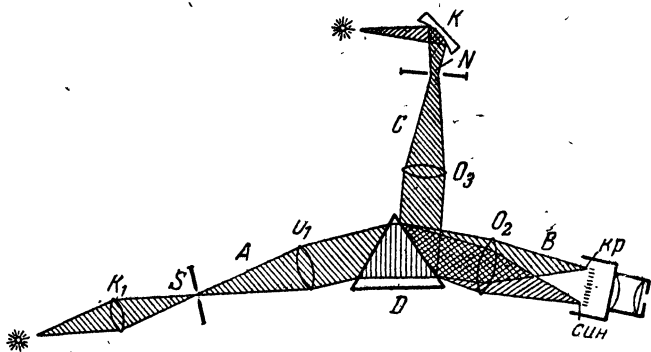


Рис. 2.

тем из коллиматора на призму падают лучи, проходящие через призму и в других плоскостях. Отклонение, даваемое призмой для них, будет иным, чем для лучей, лежащих в плоскости главного сечения. Поэтому, например, изображение щели, даваемое призмой, изгибается в вертикальной плоскости симметрично относительно центра щели. Выпуклость изображения щели бывает обращена к красному концу спектра.

Отсутствие искажений в ширине изображения, очевидно, важно для наблюдения близких спектральных линий.

Описанный выше и другие недостатки качества изображения, даваемого призмой, до известной степени устраняются установкой призмы под углом наименьшего отклонения. Но при такой установке призмы значительно проигрывают в величине дисперсии, даваемой призмой. Поэтому вышеуказанное правило установки призмы в случаях, когда от спектроскопа требуется большая дисперсия, оставляют без внимания. (Подробный разбор работы призмы можно найти в книге Г. Г. Слюсарева, «Геометрическая оптика».)

Пучок света из объектива O_1 падает на переднюю грань призмы D (рис. 2), в которой испытывает спектральное разложение и выходит параллельными пучками разных цветов и направлений в зависимости от длины волны света.

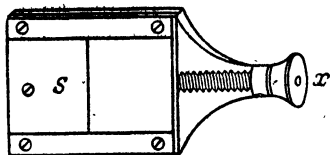


Рис. 3.

Пройдя призму, световые пучки поступают в оптическую трубу через объектив O_2 . Так как выходящие из призмы параллельные пучки различных цветов имеют различное направление, то в фокальной плоскости линзы O_2 получается ряд параллельных различно окрашенных изображений щели, образующих видимый спектр. Эти изображения рассматривают через окуляр трубы B .

Для измерения относительного положения полос в спектре служит труба C со шкалой N (рис. 2). Шкала эта, нанесенная на стекле и состоящая из светлых штрихов на темном поле, освещается вспомогательным источником света при помощи маленького зеркала K . Пучки света, идущие от шкалы, находящейся в фокальной плоскости линзы O_3 , отражаются от ближайшей к зрительной трубе грани призмы и дают действительное изображение шкалы в фокальной плоскости линзы O_2 . Таким образом глаз видит через окуляр одновременно налагающиеся друг на друга изображения спектра и шкалы. Боковые пучки, падающие на призму, задерживаются специальным колпачком, надеваемым на призму D .

Для градуирования шкалы спектроскопа используется богатый линиями спектр неоновой лампы. Неоновая лампа представляет собой лампу тлеющего разряда, в которой используется свечение, сосредоточенное в основном в пространстве между электродами, имеющими форму двух параллельных дисков. Нормальная плотность тока в лампах этого типа равна $2,5 \text{ ма/см}^2$. Сила тока через лампу ограничивается сопротивлением, включенным последовательно с лампой. Сопротивление обычно помещается в ножке неоновой лампы.

Спектр неона состоит из отдельных в большинстве своем довольно ярких линий. Длины волн некоторых из них приведены в таблице 37. Зная положение линий определенной длины волны на шкале спектроскопа, можно построить график градуировки этой шкалы.

Упражнение 1

Подготовка прибора к измерениям и градуировка его шкалы в длинах волн

Коллиматор прибора устанавливается на бесконечность — для этого выдвигают патрубков со щелью до совпадения соответствующей кольцевой метки на патрубке с обрезом конца основной трубы коллиматора. Ширину щели устанавливают около $0,5 \text{ мм}$.

Помещают перед входной щелью коллиматора включенную неоновую лампу так, чтобы свет разряда в ней освещал щель прибора. Наблюдают в зрительную трубу спектроскопа спектр неоновой лампы и фокусируют линии этого спектра перемещениями окуляра трубы. При этом, очевидно, зрительная труба оказывается сфокусированной на бесконечность для каждой спектральной линии.

Регулируя освещение шкалы N наклонами зеркальца K и передвигая шкалу вдоль оси трубы C , добиваются того, чтобы деления и цифры шкалы были также отчетливо видны через трубу. Подсветка шкалы осуществляется от какого-либо вспомогательного источника белого света.

Сужая до предела надежной видимости входную щель коллиматора, наблюдают расположение изображений спектральных линий неона на шкале спектроскопа. При недостаточной их видимости с узкой щелью регулируют положение неоновой лампы перед коллиматором до тех пор, пока не будет получена максимальная освещенность изображения линий в поле зрения окуляра трубы. Область наиболее яркого свечения неоновой лампы расположена между ее электродами.

В тех случаях, когда в щель коллиматора попадает недостаточно света, между щелью прибора и источником света помещается конденсор. Это приходится делать, в частности, в тех случаях, когда горячий источник света нельзя поставить близко к щели коллиматора, так как он может ее нагреть. Расчет положения однолинзового простейшего конденсора производится на основании следующих простых соображений.

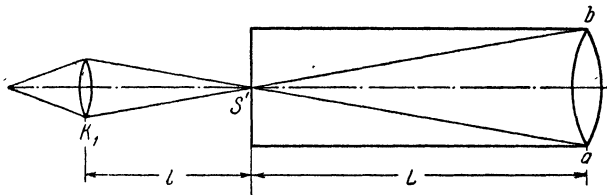


Рис. 4.

Конденсор K_1 (рис. 4) помещают так, чтобы прошедший через него свет заполнял сечение конуса $S'ab$, образованного щелью коллиматора и световыми пучками, идущими от краев конденсорной линзы к объективу коллиматора. Расстояние l конденсорной линзы от щели при этом определяется из пропорции

$$\frac{D}{d} = \frac{L}{l},$$

где D и d — диаметры линз коллиматора и конденсора, а L и l — их расстояния от щели. Источник света помещают на таком расстоянии от линзы, чтобы его отчетливое изображение находилось в плоскости щели коллиматора.

Отсчитывают и записывают положение спектральных линий неона на шкале спектроскопа. Пользуясь одновременно описанием и таблицей спектральных линий неона, помещенной в настоящей книге, записывают значения длин волн наблюдаемых линий.

Шкала должна быть так расположена в поле зрения окуляра трубы, чтобы на ней укладывались все линии видимой части спектра неона. Если красная или синяя часть спектра не умещается на шкале, то регулируют положение шкалы установочными винтами m , n (рис. 1).

По окончании этих измерений строят градуировочный график прибора, откладывая по оси абсцисс деления шкалы прибора, а по оси ординат значения длины волн, соответствующие наблюдавшимся линиям.

Упражнение 2

Изучение спектров излучения паров щелочных металлов и спектральный анализ смеси их солей

Измерения. Установив прибор, как было описано, вносят в пламя горелки поочередно фитили, пропитанные растворами солей щелочных металлов, имеющих в наборе, и отмечают положение линий спектра для каждой соли. Нанеся на миллиметровую бумагу деления, соответствующие делениям шкалы, зарисовывают на ней положения линий; такое построение делается для спектра каждой соли в отдельности. При этом необходимо иметь в виду, что, во-первых, для каждой новой соли безусловно необходимо брать свежий асбестовый фитиль, так как иначе неизбежно произойдет загрязнение нового раствора прежней солью, во-вторых, необходимо следить за тем, чтобы шкала оставалась неподвижной, если же она сместилась, ее надо снова установить по спектральным линиям неоновой лампы.

Пользуясь градуировочным графиком шкалы спектроскопа и данными о положении на ней спектральных линий исследованных химических элементов, составляют таблицу значений длин волн основных спектральных линий, найденных в спектре каждого элемента.

Вносят в пламя газовой горелки фитили с растворами неизвестных сочетаний ранее исследованных солей, определяют положение их спектральных линий на шкале прибора и зарисовывают спектры на миллиметровой бумаге. Сравнивая эти рисунки с рисунками спектров ранее уже исследованных солей, определяют, какие щелочные металлы присутствуют в каждом исследуемом растворе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Л а н д с б е р г, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. Курс физики, под редакцией Н. Д. П а п а л е к с и, т. II, Гостехиздат, 1947.
3. С. Э. Ф р и ш, Техника спектроскопии, Изд. ЛГУ, 1936.

ЗАДАЧА 150

ИЗУЧЕНИЕ СЕРИАЛЬНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ В СПЕКТРЕ ВОДОРОДА

Одной из важнейших закономерностей, известных в строении атомных спектров, является сериальное строение этих спектров. Сериальные закономерности представляют собой яркое проявление квантовых свойств излучающих атомных систем.

Спектральные линии атомного спектра элемента могут быть объединены в определенные, закономерно построенные группы или в так называемые *серии*. Длины волн всех линий, принадлежащих к одной и той же серии, закономерно связаны между собой. В наиболее простой форме сериальные закономерности проявляются в спектре одноэлектронного атома — водорода, для которого они и были впервые открыты.

Настоящая задача посвящена изучению одной из спектральных серий водородного спектра — *серии Бальмера*, лежащей в видимой части спектра. Длины волн спектральных линий этой серии удовлетворяют соотношению

$$N = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (1)$$

В этом соотношении $N = \frac{1}{\lambda}$ — так называемое волновое число линии. Волновые числа выражаются в $см^{-1}$ (в обратных сантиметрах), R — *постоянная Ридберга*, константа, неизменная для всех серий в спектре водорода. Величина n есть квантовое число, которое для первых трех линий спектра водорода, обозначаемых символами H_α , H_β , H_γ , принимает соответственно значения 3, 4, 5.

Целью настоящей задачи является: измерение длин волн трех линий в спектре водорода H_α , H_β , H_γ и вычисление значения постоянной Ридберга с помощью каждого найденного значения длины волны и соответствующего ему значения числа n . Критерием справедливости сериальной закономерности будет служить постоянство значения R , найденного совершенно независимо во всех трех случаях. Измерение длин волн линий водородного спектра производится при помощи дифракционной решетки и спектрометра — гониометра. Применяемый метод вполне тождествен с методом, описанным в задаче 136, для измерения длин волн спектра ртути. Однако отличительной чертой эксперимента в данной задаче является применение в качестве источника света высоковольтной водородной газоразрядной трубки, обеспечивающей излучение спектра а т о м о р н о г о водорода.

Описание экспериментальной установки. Устройство водородной трубки показано на рис. 1. Водородная трубка представляет собой стеклянную трубку, наполненную водородом под давлением около 5—10 мм рт. ст. Разряд в трубке происходит между металлическими электродами 1 и 2, впаянными в нижние колена трубки. К этим электродам подается переменное напряжение в 2000—3000 в. Сила тока в трубке составляет 10—15 ма. Основное свечение водорода происходит в капиллярном горизонтальном колене трубки. В этом колене плотность тока максимальна и соответственно максимальна и яркость свечения. Наблюдение свечения трубки производится поэтому в торец капилляра. Трубка имеет еще два отростка;

отросток 3 заполнен едким натрием, отросток 4 — окисью меди. Мы не можем здесь входить в детали описания разряда в водороде, но укажем только на основную трудность получения разряда, пригодного для намеченных измерений. Дело в том, что водород, при нормальных условиях, является молекулярным газом. Между тем нужный нам спектр излучается атомарным водородом. Наличие же молекулярного водорода в трубке приводит к излучению в разряде молекулярного спектра, затрудняющего наблюдение спектральных линий атомного спектра. Окись меди легко отдает атомарный кислород, который, реагируя с молекулярным водородом в трубке,

образует молекулы воды. Эти молекулы воды в электрическом разряде разлагаются, образуя атомарный водород. Излишек молекул воды поглощается едким натрием. Для более интенсивного выделения кислорода из окиси меди содержащий ее отросток трубки периодически прогревается специальной обмоткой, питаемой вспомогательным током подогрева.

К водородной трубке подводится высокое напряжение, и поэтому она вместе с повышающим трансформатором заключена в металлический заземленный кожух осветителя. *Вскрывать этот кожух студентам категорически воспрещается.* Осветитель включен в сеть через ЛАТР, расположенный на столе и управляющий током в первичной обмотке повышающего трансформатора. Повышать с помощью ЛАТР напряжение надо до минимального значения, при котором начинается устойчивый разряд в водородной трубке, видимый через окно в осветителе. Для обзора водородной трубки вто-

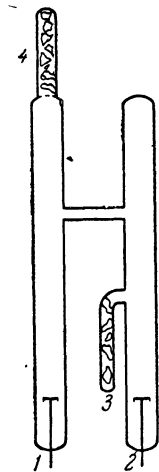


Рис. 1.

рой ее экземпляр помещен под стеклом вблизи осветителя. Прогрев рабочей трубки осуществляется лаборантом в нужных случаях.

Перед окном осветителя расположен конденсор, концентрирующий свечения газа в капилляре на входную щель коллиматора гониометра. При правильном положении конденсора на щели гониометра при включенной трубке должно быть видно красно-фиолетовое световое пятно.

В работе применяется гониометр того же типа, что и в задаче 128. Поэтому его установка распадается, так же как и в том случае, на два этапа: 1) установка самого гониометра с помощью плоскопараллельной стеклянной пластинки, 2) установка дифракционной решетки на столике гониометра.

Приводим некоторые подробности, относящиеся к применяемой дифракционной решетке. В настоящей работе нужна большая светосила решетки и большая дисперсия. Не располагая светосильной решеткой с малой постоянной, мы применяем здесь реплику (желатинный отпечаток) с нужной решетки. Реплика удовлетворяет

нужным требованиям, имея большую площадь и постоянную, равную $d = 1,688 \cdot 10^{-4}$ см. Но качество получаемого с ее помощью спектра несомненно хуже, чем качество спектра от оригинальной дифракционной решетки. В частности, в результате заклейки реплики между стеклами возможны явления волнистости спектральных линий, особенно когда качество заклейки неудовлетворительно. Поэтому не следует пытаться устранять недостатки спектра фокусировкой окуляра. Это же обстоятельство несколько ухудшает условия правильного контроля за качеством установки реплики на столике гониометра, как это обычно делается с помощью световых бликов и автоколлимационного окуляра наблюдательной трубы.

Подготовка к измерениям, измерения и их обработка. Производят установку (юстировку) гониометра и установку дифракционной решетки на его столике.

Включают, с разрешения лаборанта, осветитель с водородной трубкой. Обращаем еще раз внимание на необходимость соблюдения предосторожностей при работе с осветителем. В частности, до его включения необходимо проверить, заземлен ли его корпус, с помощью штекера, включаемого в специальную клемму осветителя. Провод от штекера идет к клемме «земля» на распределительном щитке лаборатории. Проверяют правильность фокусировки конденсором на щель коллиматора света водородной трубки. (Обращаем внимание, что щель коллиматора имеет постоянную, нерегулируемую ширину.)

Затем приступают к наблюдениям водородного спектра.

Приводим некоторые пояснения к видимой картине водородного спектра. Начинать поиски нужных линий надо с красной интенсивной линии H_α водорода. Ее легко найти и она не может быть спутана с молекулярными полосами в спектре. Вторая линия H_β — зелено-голубая. В промежутке между H_α и H_β лежит ряд красно-желтых молекулярных полос сравнительно слабых. Перед линией H_β лежат еще слабые, размазанные темно-зеленые молекулярные полосы. Третья линия H_γ — фиолетовая, тождественная по окраске с известной фиолетовой линией спектра ртути. Этой линии предшествуют две слабые и размазанные молекулярные фиолетовые полосы.

Рассмотрев спектр водорода и надежно установив, какие именно линии этого спектра соответствуют линиям H_α , H_β , H_γ , приступают к измерениям. Начинать их надо с красной линии H_α . Углы дифракции измеряют с помощью гониометра обычным образом (см. описание задачи 136). Измерения продлевают для спектров +1-го и -1-го порядков для всех трех линий.

По найденным углам дифракции с помощью формулы $d \sin \varphi = \lambda$ вычисляют значения длин волн всех трех линий. Затем вычисляют с точностью до одного обратного сантиметра волновые числа этих же линий. Подставляя в формулу (1) найденные на опыте волновые

числа трех линий и указанные выше значения квантового числа n для каждой линии, вычисляют постоянную Ридберга для трех линий. Значение постоянной Ридберга надо вычислять с точностью до одного обратного сантиметра.

Технические данные установки. В установке используется водородная гейслерова трубка марки ГВ-3 лаборатории источников света ГОИ, осветитель марки ОМС, гониометр марки ГС-30.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. Р. Дитчберн, Физическая оптика, «Наука», 1965.

ЗАДАЧА 151

ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРОГРАФА И ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИН ВОЛН СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Цель данной задачи состоит в изучении спектрографа и в ознакомлении с методами определения длин волн спектральных линий.

Теория. Спектрограф — прибор, пространственно разделяющий лучи различных длин волн и позволяющий получить фотографическое изображение спектра, является наиболее распространенным прибором, применяемым при решении большинства спектрально-аналитических задач.

В задаче используется кварцевый спектрограф ИСП-22. Главная часть любого спектрографа — диспергирующее устройство, которое отклоняет проходящее через него излучение разных длин волн на разные углы. В спектрографе ИСП-22 это диспергирующее устройство состоит из призмы Корню. На рис. 1 она обозначена буквой P . Описание призмы Корню будет дано ниже.

Помимо диспергирующей призмы, спектрограф обладает коллиматором и камерой. Назначение коллиматора — направлять на призму параллельный пучок света. В спектрографе ИСП-22 коллиматор состоит из зеркального объектива L_1 и щели D (рис. 1). Щель помещается в фокальной плоскости зеркального объектива, представляющего собой сферическое вогнутое зеркало с наружным отражающим слоем. Фокусное расстояние коллиматорного объектива одинаково для всех длин волн и равно 600 мм. Угол между оптической осью пучка, падающего на коллиматорный объектив, и оптической осью пучка, отраженного от коллиматорного объектива, равен 2° .

Назначение камеры спектрографа — фокусировать излучение различных длин волн в плоскости фотопластины. В спектрографе ИСП-22 камера состоит из двух кварцевых линз L_2 и L_3 и кассеты K , представленной на рисунке отрезком прямой.

Наблюдаемые визуально или фотографически спектральные линии представляют собой изображения входной щели, образованные оптической системой спектрографа. Фокусное расстояние камерного объектива зависит от длины волны света. Для света, длина волны которого $\lambda = 2573 \text{ \AA}$, оно равно 831 мм. Для больших длин волн фокусное расстояние больше, для меньших — меньше. Чтобы весь спектр получился на фотопластинке сфокусированным одновременно, плоскость кассеты K наклонена к оси камерного объектива под углом $41^\circ 40'$. Положение призмы и всех объективов, а также наклон кассеты вполне определены и в готовом приборе не изменяются.

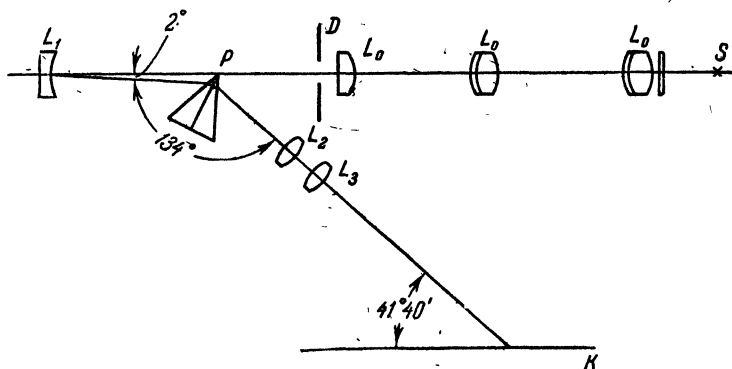


Рис. 1.

Осветительная часть состоит из источника света S — дуги между металлическими электродами и трех конденсорных линз L_0 . Действие трехлинзового конденсора разъясняется в задаче 154 (см. рис. 6).

Важной характеристикой спектрографа является его дисперсия, т. е. способность различно отклонять лучи разных длин волн, так что они выходят из диспергирующей системы под различными углами и фокусируются в различных местах фотопластинки. Угловой дисперсией называется отношение $\Delta\theta/\Delta\lambda$, где $\Delta\theta$ — разность углов выхода для двух лучей, длины волн которых отличаются на $\Delta\lambda$. Она выражается в радианах на ангстрем. Линейной дисперсией называется отношение $\Delta x/\Delta\lambda$, где Δx — расстояние на фотопластинке между двумя спектральными линиями, которые отличаются друг от друга на $\Delta\lambda$. Она выражается в миллиметрах на ангстрем. Если фокусное расстояние камерного объектива равно f , то имеет место соотношение

$$\Delta x = f \Delta\theta, \quad \text{или} \quad \frac{\Delta x}{\Delta\lambda} = f \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda},$$

т. е. линейная дисперсия равна угловой дисперсии, умноженной на фокусное расстояние камерного объектива¹⁾). Для характеристики спектрографов вместо линейной дисперсии часто употребляют обратную ей величину $\Delta\lambda/\Delta x$, которую выражают обычно в ангстремах на миллиметр.

Другой важной характеристикой спектрографа является его разрешающая сила. Под разрешающей силой понимают отношение наблюдаемой длины волны к наименьшей разности двух длин волн, которые еще могут быть разрешены. Разрешающая сила призмы

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = l \frac{dn}{d\lambda}, \quad (1)$$

здесь l — длина основания призмы, $dn/d\lambda$ — дисперсия вещества, из которого сделана призма. Вывод этой формулы дается в любом курсе оптики (например,

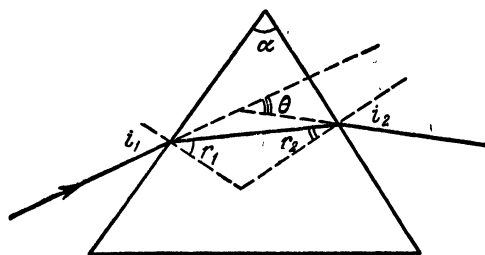


Рис. 2.

Ландсберг, «Оптика») и здесь не приводится. В выражение для разрешающей силы входит дисперсия вещества призмы. Найдем связь между этой величиной и величиной линейной дисперсии спектрографа. Для этого рассмотрим подробнее прохождение света через призму (рис. 2).

Падая на призму, луч испытывает два преломления и в результате отклоняется на угол θ . Если принять обозначения углов, которые даны на рис. 2, то $\theta = i_1 + i_2 - \alpha$.

В случае, когда луч проходит призму симметрично, т. е. когда $i_1 = i_2$ (следовательно, и $r_1 = r_2 = \alpha/2$), угол отклонения θ будет меньше, чем для любого другого угла падения.

В этом случае говорят, что призма установлена под углом наименьшего отклонения. Угол наименьшего отклонения связан с показателем преломления n вещества, из которого сделана призма, и с преломляющим углом призмы α соотношением:

$$n = \frac{\sin \frac{\theta_{\min} + \alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (2)$$

¹⁾ Если фокальная плоскость камерного объектива составляет с его оптической осью угол $\alpha \neq \pi/2$, то расстояние на фотопластинке между двумя спектральными линиями будет $\Delta x' = \Delta x / \sin \alpha$. В этом случае линейная дисперсия

$$\frac{\Delta x'}{\Delta\lambda} = \frac{f}{\sin \alpha} \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda};$$

Вывод этого соотношения дается во всех книгах, указанных в списке литературы, и здесь не приводится.

Условие минимума угла отклонения соответствует наилучшему качеству изображения спектра (минимуму астигматизма), поэтому оптика спектрографов обычно юстируется возможно ближе к положению наименьшего отклонения. При данном положении призмы условие минимума угла отклонения строго может быть соблюдено только для одной длины волны. Обычно призму устанавливают в положение наименьшего отклонения для той длины волны, которая распространяется параллельно оптической оси камеры. Спектрограф ИСП-22 установлен на минимум отклонения для света длины волны 2573 Å.

Рассмотрим дисперсию призмы вблизи угла наименьшего отклонения (θ_{\min} в дальнейшем будем обозначать через θ).

Из формулы (2) следует

$$\frac{dn}{d\lambda} = \frac{\cos \frac{\alpha + \theta}{2}}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \frac{d\theta}{d\lambda}.$$

Учтем, что

$$\sin \frac{\alpha + \theta}{2} = n \sin \frac{\alpha}{2} \quad \text{при} \quad i = \frac{\alpha + \theta}{2}; \quad r = \frac{\alpha}{2}.$$

В результате получим

$$\frac{dx}{d\lambda} = f \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{2f \sin \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}. \quad (3)$$

Формула (3) строго выполняется для малых $d\theta$, но фактически она почти верна даже для $d\theta$ порядка 8—10°.

Обычно формулой (3) пользуются при расчете спектрографов для определения углового расстояния между двумя крайними лучами спектра, подлежащего исследованию, при известной дисперсии материала, из которого сделана призма. Мы же, наоборот, воспользуемся формулой (3) для того, чтобы по измеренной нами линейной дисперсии спектрографа $dx/d\lambda$ определить неизвестную нам дисперсию материала, из которого сделана призма, $dn/d\lambda$. Эта величина необходима для определения разрешающей способности спектрографа.

Изучаемый спектрограф ИСП-22 предназначен для работы в ультрафиолетовой области спектра. Стекло не пригодно для работы в этой области из-за сильного поглощения ультрафиолетового излучения. Прозрачным материалом для ультрафиолетовой области является кварц. Поэтому и призма, и камерный объектив сделаны из кварца. При изготовлении призмы из кварца приходится принимать во внимание наличие в кварце двойного лучепреломления (см. [1]).

Чтобы избежать мешающего действия двойного лучепреломления, призма вырезается из кристалла кварца таким образом, чтобы оптическая ось лежала в главном сечении призмы параллельно основанию призмы. Тогда лучи, проходящие через призму под углом наименьшего отклонения, а следовательно, параллельно ее основанию, не дают двойного лучепреломления. Лучи же, проходящие призму под другими углами, разделяются на два: обыкновенный и необыкновенный, что ведет к раздвоению изображений спектральных линий, даваемых спектрографом. Однако для лучей, проходящих вблизи минимума отклонения, это раздвоение настолько мало, что оно незаметно. Кварц отличается не только способностью давать двойное лучепреломление, но и способностью вращать плоскость

поляризации света (см. [1]). Для избежания раздвоения линий, связанного с этим вращением, призма обычно склеивается из двух половин, из которых одна делается из правовращающего кварца, а другая из левовращающего (рис. 3).

В изучаемом приборе призма Корню имеет преломляющий угол 60° и основание призмы $AC = 47$ мм.

На широком конце корпуса спектрографа смонтирована кассетная часть. Для перемещения кассеты служит ходовой винт, расположенный внизу кассетной части с маховичком, снабженным шариковым фиксатором.

Четыре последовательные положения фиксатора соответствуют одному обороту маховичка, т. е. перемещению кассеты на 10 мм. Перемещение кассеты может быть отсчитано по расположенной справа миллиметровой шкале. Кассета двумя своими клиновыми выступами надевается на шипы кассетной рамки, помещаемой в конце кассетной части спектрографа, и прижимается к ее опорной плоскости, чем достигается воспроизводимость положения фотографической пластинки в приборе. Закрепление кассеты на рамке осуществляется при помощи защелки, расположенной внизу кассетной части. Барабанчик сверху кассетной части служит для включения скрытой в камерной части корпуса миллиметровой шкалы. При выполнении данной задачи миллиметровая шкала не используется, и этот барабанчик трогать не следует.

Задача включает 2 упражнения: 1) исследование дисперсии и разрешающей способности спектрографа; 2) определение длин волн спектральных линий. Для выполнения обоих упражнений необходимо сфотографировать спектр меди и спектр исследуемого вещества. Оба спектра снимаются на одной пластинке. Чтобы при переходе от известного спектра к исследуемому спектру не приходилось

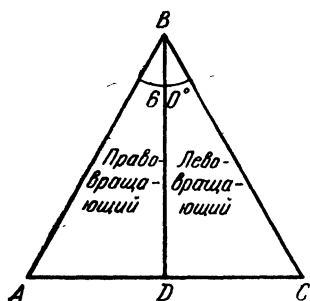


Рис. 3.

смещать пластинку, пользуются специальной диафрагмой с фигурными вырезами (рис. 4).

Диафрагма устанавливается перед щелью спектрографа в специальной оправе и может перемещаться в направлении, перпендикулярном к оптической оси спектрографа. С ее помощью можно не только ограничить высоту щели, но и освещать различные ее участки. В данной задаче используется левый фигурный вырез диафрагмы. Если перед щелью установлена левая часть выреза, то средняя часть щели открыта, верхняя и нижняя части щели закрыты. Положение выреза относительно щели контролируется верхней шкалой, нанесенной на диафрагме. Одно деление шкалы соответствует высоте щели 1,2 мм. Если перед щелью установлена правая

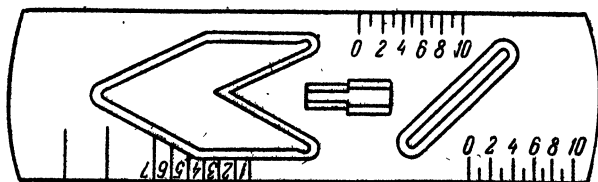


Рис. 4.

часть выреза, то открыты верхняя и нижняя части щели, средняя часть щели закрыта. Положение выреза относительно щели контролируется правой нижней шкалой. Отсчеты по обоим шкалам читаются против края корпуса щели.

Фигурный вырез позволяет снимать в средней части щели (левая часть выреза) исследуемый спектр, а сверху и снизу от него (правая часть выреза) спектр сравнения (в нашем случае — спектр меди).

Оба выреза при этом устанавливаются по шкалам на одно и то же деление. В нашем случае оба выреза следует устанавливать на деление 4.

Такой способ съемки двух спектров позволяет их совместно компарировать без введения каких-либо поправок на взаимное смещение спектров, связанное с перемещением кассеты.

Получение спектрограмм. После ознакомления с прибором следует приступить к съемке известного спектра (спектра меди) и спектра исследуемого вещества. Для получения спектра меди в качестве источника света используют дугу между медными электродами. Прежде всего берут два медных электрода, удаляют окислы на их концах и вставляют в специальный штатив. Расстояние между электродами должно быть 5—7 мм. Устройство штатива дается в заводском описании, с которым необходимо познакомиться до начала работы. Источник света должен быть установлен на оси спектрографа. Правильность установки электродов проверяется по положению изображения электродов на диафрагме, расположенной

перед второй линзой трехлинзового конденсора ¹⁾. Отчетливое изображение электродов должно быть симметричным относительно отверстия в этой диафрагме. Если это условие не выполнено, то перемещают электроды относительно первого конденсора, пользуясь винтами штатива или передвигая электроды вручную. Во время фокусировки электродов нельзя изменять положение конденсоров на оптической скамье. После установки электродов между ними при помощи специального генератора зажигается дуга. Схема генератора дается в заводском описании его, с которым также необходимо познакомиться до начала работы. Щель спектрографа закрывается крышкой с крестообразной маркой в круге. При правильной

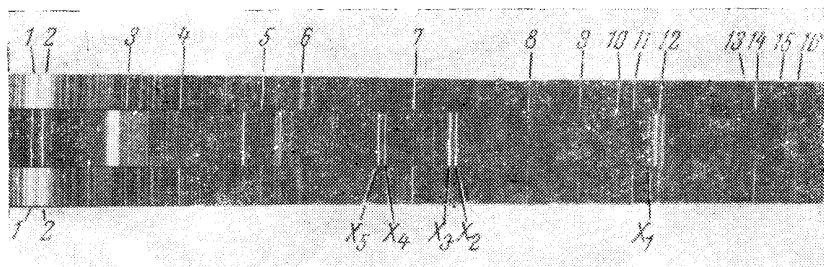


Рис. 5. Длины волн некоторых спектральных линий меди (Å)

1 — 3273,96; 2 — 3247,54; 3 — 3063,42; 4 — 2961,17; 5 — 2824,37; 6 — 2766,37;
7 — 2618,37; 8 — 2492,15; 9 — 2441,64; 10 — 2406,67; 11 — 2392,63; 12 — 2369,89;
13 — 2303,12; 14 — 2293,84; 15 — 2276,25; 16 — 2263,08.

установке дуги крестообразная марка в круге должна быть равномерно освещена. Если это условие не выполняется, то, следовательно, нарушена правильная установка трехлинзового конденсора. В этом случае следует обратиться к дежурному преподавателю или лаборанту. Менять положение линз трехлинзового конденсора студентам воспрещается.

Проверив правильность установки дуги и трехлинзового конденсора, дугу выключают. При помощи барабана сверху щели устанавливают нужную ширину щели. Отсчет ширины щели производится по шкале барабана с ценой деления 0,001 мм. Спектр меди и исследуемого вещества следует снимать со щелью 0,01 мм. Устанавливают диафрагму с фигурным вырезом, помещенную перед щелью спектрографа на деление 4 снизу. При этом спектр меди получится в верхней и нижней частях снимка (рис. 5) ²⁾. Заряжают кассету спектрографа (за фотопластинками следует обращаться к дежур-

¹⁾ Для получения изображения электродов на диафрагме в качестве источника света используют лампу накаливания, вмонтированную в штатив.

²⁾ Видимый участок спектра можно наблюдать с помощью лупы в крайней правой части кассеты.

ному лаборанту). Фотопластинка заряжается в фотокабине при темно-красном свете, кладется эмульсией вниз на нижние пазы кассеты. Зарядив кассету, необходимо проверить, плотно ли закрыты крышка и шторка кассеты. Заряженную кассету вставляют в кассетную рамку спектрографа и закрепляют при помощи специальной защелки. Устанавливают кассету на деление 10, затем выдвигают вверх переднюю шторку кассеты при закрытой крышке на щели спектрографа. Теперь установка полностью подготовлена к производству снимка. Включают дугу, снимают крышку на щели спектрографа и производят снимок спектра меди (крышка выполняет роль затвора).

После этого закрывают крышку на щели спектрографа и выключают дугу. Вынимают медные электроды и вместо них вставляют электроды из исследуемого вещества. Вновь устанавливают дугу на оси спектрографа (естественно, что эта установка делается с закрытой крышкой на щели спектрографа). Диафрагму с фигурным вырезом ставят на деление 4 сверху, при этом спектр исследуемого вещества получится в середине снимка.

Не трогая кассету, открывают крышку на щели спектрографа и производят снимок спектра исследуемого вещества. По окончании экспозиции закрывают щель спектрографа крышкой и выключают дугу.

Перемещают кассету на 20 делений (т. е. устанавливают ее на деление 30) и вновь делают оба снимка, но уже с другими экспозициями. Всего делают три пары снимков при следующих положениях кассеты и с экспозициями, приведенными в таблице:

Положение кассеты	Экспозиция снимка спектра меди	Экспозиция снимка спектра исследуемого вещества
10	2 мин.	15 сек.
30	4 мин.	30 сек.
50	6 мин.	1 мин.

Получив последний снимок, шторку кассеты задвигают и кассету вынимают.

Фотопластинку проявляют в фотокабине при темно-красном свете: время проявления — 6 мин., время фиксирования — 10—12 мин.

В процессе проявления и фиксирования фотопластинка должна лежать в кювете эмульсией вверх и полностью покрываться раствором. Между проявлением и закреплением фотопластинку необходимо тщательно промыть в холодной воде.

По окончании закрепления фотопластинка промывается под проточной холодной водой 5—10 мин. и сушится у вентилятора.

Упражнение 1

Исследование дисперсии и разрешающей способности спектрографа

Для выполнения этого упражнения используют один из полученных снимков спектра меди (наиболее подходящий по почернению). Спектр меди считается известным и отождествляется с помощью атласа спектральных линий (см. [7, 8]). Вместо атласа можно использовать расшифрованную спектрограмму меди, которая выдается лаборантом.

Дальнейшая обработка пластинки проводится при помощи компаратора. Перед началом работы с компаратором следует познакомиться с заводским описанием его. При помощи компаратора промеряют положение всех линий спектра меди. Далее строят дисперсионную кривую, откладывая на миллиметровке результаты измерений на компараторе по оси ординат, а длины волн по оси абсцисс. Через полученные таким образом точки проводят плавную кривую. С помощью этой дисперсионной кривой определяют линейную дисперсию и величину, ей обратную (т. е. $dx/d\lambda$ и $d\lambda/dx$) для разных длин волн. Строят график зависимости $d\lambda/dx$ от λ .

Для длины волны 2573 \AA определяют разрешающую способность спектрографа по формуле (1). При этом $dn/d\lambda$ определяют по формуле (3), используя измеренное значение $dx'/d\lambda$ для этой длины волны; n определяют по формуле (2), считая, что излучение с длиной волны 2573 \AA выходит из призмы параллельно оси камерного объектива (см. рис. 1); величина основания призмы и фокусное расстояние камерного объектива указывались раньше.

По формуле (1) мы определяем так называемую теоретическую разрешающую способность спектрографа. Несвершенство оптической системы, а также конечная величина зерен фотоэмульсии приводят к тому, что в действительности разрешающая способность спектрографа меньше теоретической разрешающей способности.

Упражнение 2

Определение длин волн спектральных линий

Цель второго упражнения — ознакомление с методами определения длин волн спектральных линий и применение этих методов к определению длин волн пяти спектральных линий, обозначенных через X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 (рис. 5).

В настоящее время определение длин волн спектральных линий является одним из наиболее точных физических измерений. Существует много различных способов, позволяющих определять длины волн спектральных линий с точностью до 0,001%. Мы рассмотрим здесь лишь способ определения длин волн при помощи призматического прибора. В этом случае определение длины волны состоит в сравнении данной длины волны со стандартами, т. е. с хорошо известными

длинами волн. Это сравнение может быть сделано несколькими способами.

Наиболее простым способом является графическая интерполяция по дисперсионной кривой. С помощью компаратора измеряют расстояние неизвестных линий до ближайших известных (известными линиями в нашем случае являются линии меди). Затем, пользуясь дисперсионной кривой, определяют неизвестные длины волн. Для получения достаточной точности нужно иметь в данной области спектра много известных линий сравнения, в результате измерения которых получается много точек на дисперсионной кривой. Дисперсионную кривую в этом случае строят в очень большом масштабе.

Обычно если необходимо добиться большой точности, то прибегают к математической интерполяции. При этом, если исследуемая линия находится между двумя линиями сравнения, расположенными настолько близко друг к другу, что участок дисперсионной кривой между ними можно с большой точностью считать прямой линией, то пользуются линейной интерполяцией.

Линейная интерполяция основывается на соотношении

$$\lambda = \lambda_1 + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{d_2 - d_1} (d - d_1), \quad (4)$$

где λ_1 , λ_2 и d_1 , d_2 — длины волн и отсчеты компаратора для двух линий сравнения, а λ и d — те же величины для неизвестной линии.

Если же линии сравнения расположены на таком расстоянии друг от друга, что необходимо учитывать кривизну дисперсионной кривой, то при математической интерполяции пользуются дисперсионной формулой Гартмана, имеющей вид

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{c}{d_0 - d}. \quad (5)$$

Здесь λ_0 , d_0 , c — постоянные, λ и d — длина волны и отсчет по компаратору для исследуемой линии.

Эта формула представляет кривую дисперсии призменного спектрографа с хорошим приближением. Для определения постоянных формулы Гартмана λ_0 , d_0 , c необходимо сделать на компараторе дополнительно к отсчету d для исследуемой линии еще отсчеты d для трех линий известной длины волны. Получается система трех уравнений, из которой определяют эти постоянные. Один из методов решения системы этих уравнений приведен ниже в виде численного примера:

$$\begin{aligned} \lambda_3 &= 3307,25; & d_3 &= 141,950 \\ \lambda_2 &= 2813,29; & d_2 &= 109,646; \\ \lambda_1 &= 2327,39; & d_1 &= 52,431; \\ \lambda_2 - \lambda_1 &= 485,90; & d_2 - d_1 &= 57,215; \\ \lambda_3 - \lambda_1 &= 979,86; & d_3 - d_1 &= 89,519; \\ & & d_3 - d_2 &= 32,304; \end{aligned}$$

обозначим:

$$\frac{d_2 - d_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = 0,1177506 = a; \quad \frac{d_3 - d_1}{\lambda_3 - \lambda_1} = 0,0913590 = b;$$

тогда

$$a - b = 0,0263916;$$

$$\frac{d_3 - d_2}{a - b} = \frac{c}{d_0 - d_1} = \frac{32,304}{0,0263916} = 1224,03;$$

$$\lambda_0 = \lambda_1 - \frac{c}{d_0 - d_1} = 2327,39 - 1224,03 = 1103,36;$$

$$d_0 - d_1 = a(\lambda_2 - \lambda_0) = 0,1177505(2813,29 - 1103,36) = 201,345;$$

$$c = \frac{c(d_0 - d_1)}{d_0 - d_1} = 1224,03 \cdot 201,354 = 246452,3;$$

$$d_0 = 201,345 + 52,431 = 253,776;$$

следовательно, $\lambda = \lambda_0 + \frac{c}{d_0 - d} = 1103,36 + \frac{246452,3}{253,776 - d}$.

Если отсчеты шкалы уменьшаются с увеличением длины волны на пластинке, то последнее выражение принимает вид $\lambda = \lambda_0 + \frac{c}{d_0 + d}$; схема расчета в этом случае будет несколько отличаться от приведенной.

Необходимо проверить решение подстановкой в формулу (5) данных для λ_3 . Проверка λ_3 в приведенном примере дает

$$\lambda_3 = 1103,36 + \frac{246452,3}{253,776 - 141,950} = 1103,36 + 2203,89 = 3307,25.$$

Деления и умножения, необходимые при вычислении постоянных, следует проводить до получения хотя бы одной лишней цифры по сравнению с определяемым значением λ .

При выполнении этого упражнения требуется определить длины волн линий X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 .

Найти эти линии в спектре исследуемого вещества (А1) нужно с помощью пластинки, служащей образцом.

Длина волны линии X_1 определяется с помощью линейной интерполяции по формуле (4), а длины волн линий X_2, X_3, X_4, X_5 определяются при помощи формулы Гартмана (5).

Технические данные установки. Задача поставлена со спектрографом ИСП-22; источником света служит дуга переменного тока. Штатив дуги ПС-164, генератор дуги ПС-39, трехлинзовый конденсор входит в комплект прибора ИСП-22.

ЛИТЕРАТУРА

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. С. Э. Фриш, Техника спектроскопии, изд. ЛГУ, 1936.
3. С. Л. Мандельштам, Введение в спектральный анализ, Гостехиздат, 1946.
4. Р. Соьер, Экспериментальная спектроскопия, ИЛ, 1953.
5. А. С. Ломоносова и О. Б. Фалькова, Спектральный анализ, Металлургиздат, 1958.
6. В. К. Прокофьев, Фотографические методы количественного спектрального анализа металлов и сплавов, Гостехиздат, 1951.
7. А. Н. Зайдель, В. К. Прокофьев, С. М. Райский, Таблицы спектральных линий, Физматгиз, 1962.
8. Г. Р. Гаррисон, Таблицы спектральных линий, Нью-Йорк, 1939.
9. С. К. Калинин, А. А. Явнель, А. И. Алексеева, В. Л. Мирзуванов, Л. Э. Наймарк, Атлас спектральных линий для кварцевого спектрографа, Госгеолтехиздат, 1959.
10. А. К. Русанов, Н. В. Ильясова, Атлас пламенных дуговых и искровых спектров элементов, Госгеолтехиздат, 1958.
11. J. M. Eder u, E. Valenta, Atlas typischer Spektren, Wien, 1911.

ЗАДАЧА 152

ОЗНАКОМЛЕНИЕ С РАБОТОЙ
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО СПЕКТРОСКОПА ФАБРИ — ПЕРО

В экспериментальной спектроскопии нередко встает вопрос о разрешении нескольких спектральных линий с близкими значениями длин волн. В частности, такая необходимость возникает при подробном исследовании спектра ртути. Оказывается, что спектральные линии ртути, которые в спектроскопе малой разрешающей силы представляются одиночными, на самом деле обладают так называемой *сверхтонкой структурой*. Это значит, что спектральные линии ртути представляют собой совокупность нескольких очень тесно расположенных спектральных линий различной интенсивности. Разности длин волн этих линий составляют всего лишь сотые и тысячные доли ангстрема. Мы не можем входить здесь в объяснение происхождения этой сверхтонкой структуры, связанной с изотопическим составом природной ртути и с наличием магнитного момента атомных ядер. Однако наблюдение сверхтонкой структуры, например видимой глазом зеленой линии ртути, используется для ознакомления с работой спектроскопа высокой разрешающей силы. Некоторые, весьма краткие сведения о сверхтонкой структуре, необходимые для выполнения настоящей задачи, приведены в конце вводной части настоящей задачи; дальнейшие сведения можно почерпнуть в литературе [2—5].

Применяемый в настоящей задаче прибор высокой разрешающей силы является типичным многолучевым интерференционным спектроскопом,

Интерференционный эталон Фабри — Перо. Эталон Фабри — Перо обладает высокой разрешающей силой, достаточной светосилой, пригоден для работы в видимой и ультрафиолетовой областях спектра, имеет сравнительно простое устройство.

Эталон Фабри — Перо представляет собой две хорошо отполированные стеклянные или кварцевые пластинки E_1 и E_2 (рис. 1), покрытые с одной стороны тонким слоем напаренного на них в вакууме серебра или алюминия с высоким коэффициентом отражения и малым поглощением. Поверхность пластин выдержана с точностью до одной сотой длины световой волны, а коэффициент отражения

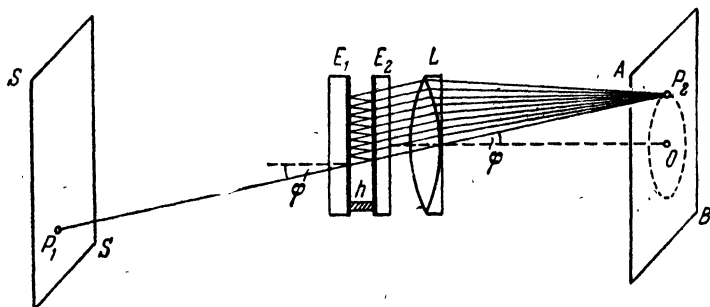


Рис. 1.

металлических покрытий превышает 90%. В некоторых случаях эталон осуществляется в виде единственной строго плоскопараллельной стеклянной или кварцевой пластинки с металлизированными указанным способом поверхностями ¹⁾.

Оптическая схема работы эталона приведена на рис. 1. Каждый световой пучок от протяженного источника света S , вошедший в эталон, испытывает в плоскопараллельном воздушном слое (или при другой конструкции эталона — в стеклянном или кварцевом плоскопараллельном слое) многократные отражения от металлизированных рабочих поверхностей эталона. Отделившиеся при каждом отражении, близкие друг к другу по интенсивности проходящие световые пучки покидают эталон, сохраняя (для каждого исходного падающего на эталон пучка) единое направление, как это показано на рисунке. Отражениями световых пучков от внешних неметаллизированных поверхностей пластин E_1 и E_2 (если эталон сделан из двух пластин) можно пренебречь. Однако для полного исключения влияния этих отражений пластины эталона делают в этом случае клинообразными, и плоскопараллельный воздушный

¹⁾ В настоящее время получают распространение эталоны с диэлектрическими отражающими покрытиями, на устройстве которых мы здесь останавливаться не можем.

слой между пластинами оказывается не параллельным внешним поверхностям пластин, отражения от которых уходят в сторону.

За пластинами эталона расположен объектив L , формирующий в своей фокальной плоскости AB интерференционную картину полос равного наклона, из световых пучков испытавших многократные отражения внутри эталона и приобретших при этом разность фаз. Эта разность фаз, как будет показано ниже, зависит от толщины воздушного (или в других конструкциях эталона — стеклянного) плоскопараллельного слоя h и угла φ между направлением падения светового лучка на эталон и нормалью к поверхности последнего.

Световые пучки располагаются симметрично вокруг оптической оси объектива, и поэтому интерференционные полосы в плоскости AB имеют вид концентрических колец. Формирование одного из таких интерференционных колец показано на рис. 1. Здесь надо иметь в виду, что в точку P_2 плоскости AB могут прийти световые пучки, вышедшие не только из точки P_1 , но и из любой другой точки источника, лишь бы эти световые пучки падали на эталон параллельно друг другу¹⁾. Следовательно, большие размеры источника света, используемого в этом опыте, не только легко обеспечивают широкий набор значений углов φ , необходимый для формирования многих интерференционных колец, но и повышает освещенность интерференционной картины. Порядок интерференционных полос убывает от центра картины к ее периферии.

Система интерференционных колец, получающаяся в фокальной плоскости объектива, приведена на рис. 2. Представленная картина соответствует наличию в спектре света, вошедшего в эталон трех тесно расположенных спектральных линий, одна из которых имеет существенно большую интенсивность, чем две другие. Для ясности система колец представлена лишь для двух порядков интерференции k и $(k - 1)$. На самом деле, нарисованные две группы, из трех интерференционных колец каждая, многократно повторяются в фокальной плоскости объектива.

Приведенные на рисунке обозначения радиусов колец и их разностей будут разъяснены ниже.

Для фотографирования интерференционной картины фотопластинка помещается в фокальную плоскость объектива L . При

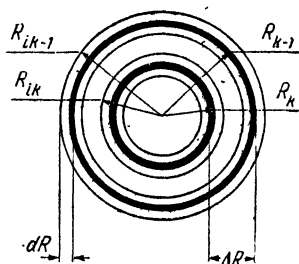


Рис. 2.

¹⁾ Во избежание недоразумений отметим, что точка P_2 отнюдь не является изображением точки P_1 , получаемым с помощью линзы L .

визуальном наблюдении интерференционную картину можно рассматривать в окуляр с небольшим увеличением, сфокусированный на ту же плоскость. Следовательно, как во всех случаях субъективного наблюдения интерференционной картины полос равного наклона, локализованной в бесконечности, и в этом случае удобно пользоваться зрительной трубой, установленной на бесконечность. Именно так осуществляются наблюдения в данной задаче.

Прежде чем переходить к количественному расчету интерференционной картины, полученной с помощью эталона, и к разъяснению ее применений для спектрального разложения сложных спектральных линий, сделаем несколько замечаний о конструкции эталона.

При использовании эталона с воздушной прослойкой для задания определенной толщины воздушного слоя между пластинками помещаются строго одинаковые по толщине инварные штабики (прокладки). На рис. 1 один из трех таких штабиков обозначен буквой h . Штабики эти вставлены в тонкую кольцевую обойму, не показанную на рисунке. Пластины E_1 и E_2 прижимаются к штабикам (прокладкам) с помощью пружин. Более или менее сильно сжимаемая пружины (что производится с помощью регулировочных винтов, действующих с внешней поверхности пластин), можно устранять небольшие отступления от параллельного расположения посеребренных поверхностей пластинок, вызванные дефектами в изготовлении инварных прокладок. Все детали эталона помещаются в металлическом корпусе, из которого выступает наружу лишь скошенная внешняя сторона задней пластины.

Если эталон представляет собой единственную плоскопараллельную стеклянную или кварцевую пластину, то, разумеется, необходимость в инварных прокладках и в юстировке эталона отпадает. Но в этом случае толщина эталона не может быть изменяема по ходу работы, а плоскопараллельность стеклянного рабочего слоя эталона целиком определяется качеством изготовления пластины.

Количественные характеристики работы эталона. Рассмотрим теперь работу эталона как прибора для спектрального разложения света.

Разность хода между любыми соседними световыми пучками, например I' и I'' (рис. 3), выходящими из плоского слоя между металлизированными поверхностями эталона, запишется следующим образом: $\Delta = 2hn \cos \varphi$, где h — толщина слоя, n — показатель преломления вещества слоя и φ — угол преломления световых пучков. (Заметим, что на рис. 1 обозначен буквой φ угол падения света на эталон, а не угол преломления. Для эталонов с воздушным слоем эти углы равны.) Для случая воздушного слоя между пластинами эталона значение n мы будем полагать дальше равным единице. В тех случаях, когда последующие результаты будут относиться

к стеклянному или кварцевому эталону, это будет специально оговорено в приводимых формулах.

Условие распространения интерференционных максимумов интенсивности света в направлениях, составляющих угол φ_k с нормалью к поверхности пластин, запишется так:

$$2h \cos \varphi_k = k\lambda, \quad (1)$$

где k — порядок интерференции, λ — длина световой волны и φ_k — угловой радиус интерференционного кольца порядка k , получающегося в фокальной плоскости объектива (рис. 1).

Угловая дисперсия эталона D_φ , определяющая приращение угла $d\varphi$ при изменении длины волны интерферирующего в эталоне света на 1 \AA , может быть найдена следующим образом:

$$D_\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda} = -\frac{k}{2h \sin \varphi}. \quad (2)$$

Эта зависимость углового радиуса колец от длины световой волны определяет возможность использования эталона для спектрального разложения света.

Учитывая малую величину угла φ (он составляет обычно около одной сотой радиана) и подставляя в (2) значение k из (1), можем записать:

$$D_\varphi = -\frac{k}{2h \sin \varphi} = -\frac{1}{\lambda \operatorname{tg} \varphi} \approx -\frac{1}{\lambda \varphi} \approx -\frac{f}{\lambda R}, \quad (3)$$

где f — фокусное расстояние объектива L (рис. 1) и R — радиус соответствующего углу φ интерференционного кольца порядка k .

В случае эталона, осуществленного в виде единственной плоскопараллельной стеклянной пластинки с показателем преломления n ,

$$D_\varphi \approx -\frac{1}{\lambda \varphi} \left(n^2 - \lambda n \frac{dn}{d\lambda} \right) \approx -\frac{f}{\lambda R} \left(n^2 - \lambda n \frac{dn}{d\lambda} \right). \quad (4)$$

Линейная дисперсия эталона D_R , определяющая приращение радиуса колец R при изменении длины волны света на 1 \AA , может быть подсчитана следующим образом:

$$D_R = \frac{dR}{d\lambda} \approx f D_\varphi = -\frac{kf}{2h \sin \varphi} \approx -\frac{kf^2}{2hR} \approx -\frac{f^2}{\lambda R}. \quad (5)$$

В случае эталона, осуществленного в виде одной плоскопараллельной стеклянной или кварцевой пластинки,

$$D_R = \frac{dR}{d\lambda} \approx -\frac{kf^2 \left(n^2 - \lambda n \frac{dn}{d\lambda} \right)}{2hR} \approx -\frac{f^2}{\lambda R} \left(n^2 - \lambda n \frac{dn}{d\lambda} \right). \quad (6)$$

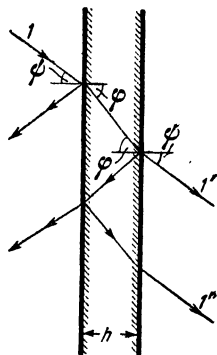


Рис. 3.

Из (5) находим

$$d\lambda = -\frac{2hR dR}{kf^2} \approx -\frac{\lambda R dR}{f^2}. \quad (7)$$

Если эталон осуществлен в виде стеклянной плоскопараллельной пластинки, то из формулы (6) получаем

$$d\lambda = -\frac{2hR dR}{kf^2 \left(n^2 - \lambda n \frac{dn}{d\lambda} \right)} \approx -\frac{\lambda R dR}{f^2 \left(n^2 - \lambda n \frac{dn}{d\lambda} \right)}. \quad (8)$$

Знак минус в последних соотношениях указывает, что увеличение длины волны соответствует уменьшению радиусов интерференционных колец. Это обстоятельство надо учитывать при расшифровке интерференционных картин.

Приведенные приближенные формулы (7) или (8) для $d\lambda$ являются важнейшими при обработке результатов настоящей задачи. Именно, малые смещения $d\lambda$ спектральных линий сверхтонкой структуры относительно несмещенной линии мы будем вычислять по измерениям R и dR . На рис. 2 отрезок $dR = R_{ik-1} - R_{k-1}$, например, обозначает разность радиусов R_{ik-1} интерференционного кольца, принадлежащего i -й компоненте тонкой структуры, и радиуса R_{k-1} интерференционного кольца основной линии с известной длиной волны в том же порядке интерференции. Именно эта величина подразумевается под dR в формулах (6) и (7), служащих для вычисления малых приращений $d\lambda$. Под R в этих формулах будем подразумевать значение R_{k-1} , если речь идет о порядке интерференции $k - 1$ ¹⁾.

Применение отмеченной на том же рисунке величины $\Delta R = R_{k-1} - R_k$, т. е. разности радиусов интерференционных колец одной и той же основной спектральной линии, в разных порядках, будет разъяснено ниже.

Область дисперсии эталона, т. е. предельная ширина спектрального интервала $\Delta\lambda$, входящего в эталон света, при котором еще возможно получение неперекрывающихся интерференционных максимумов, определяется выражением

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{k}, \quad (9)$$

где k — порядок интерференции и λ — граничное значение длины волны одного из концов этого спектрального интервала. Это то же самое выражение для области дисперсии, которое подробно обосновывается для случая дифракционной решетки (см., например, [1]). Подставляя значение $k = 2h/\lambda$ в (9), находим

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{2h}. \quad (10)$$

¹⁾ Для порядка k соответственно $dR = R_{ik} - R_k$ и $R = R_k$.

В случае эталона, осуществленного в виде одной плоскопараллельной пластинки,

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2h \left(n - \lambda n \frac{dn}{d\lambda} \right)}. \quad (11)$$

Величину области дисперсии $\Delta\lambda$ можно найти еще иным путем. Мы это сделаем для того, чтобы, имея два выражения для $\Delta\lambda$ и сопоставляя их, найти связь между толщиной эталона и радиусами интерференционных колец.

Обозначим $\Delta R = R_{k-1} - R_k$ разность радиусов двух соседних интерференционных колец ($k-1$ -го и k -го порядков для света с длиной волны λ (рис. 2). Очевидно, что эталон может дать интерференционную картину без перекрытий только для такого спектрального интервала $\Delta\lambda$, все интерференционные кольца которого в k -м порядке уложатся в пределах ΔR . Этот интервал $\Delta\lambda$ и будет областью дисперсии эталона. Если линейная дисперсия эталона $D_R = dR/d\lambda$, то соответствующее ΔR значение $\Delta\lambda$ можно вычислить из (5):

$$\Delta\lambda = \frac{d\lambda}{dR} \Delta R = -\frac{\lambda R \Delta R}{f^2}. \quad (12)$$

Приравнивая (10) и (12), находим выражение, позволяющее вычислить h по измеренным значениям R и ΔR , если известны f и λ :

$$h = -\frac{\lambda f^2}{2R \Delta R}. \quad (13)$$

В случае эталона, осуществленного в виде одной плоскопараллельной стеклянной пластинки, имеем

$$h = \frac{\lambda f^2 \left(n^2 - n \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right)}{2R \Delta R \left(n - \lambda n \frac{dn}{d\lambda} \right)}. \quad (14)$$

По формулам (13) и (14) может быть найдено значение h , если измерены значения R и ΔR (рис. 2). По этим соображениям была введена величина ΔR , не являющаяся необходимой для вычисления длин волн тонкой структуры.

Разрешающая способность эталона Фабри — Перо, как и вообще любого спектрального аппарата, определяется выражением $A = \lambda/\delta\lambda$, где $\delta\lambda$ — минимальная разность длин волн двух бесконечно узких спектральных линий, которые еще может разрешить аппарат.

Для эталона с воздушной прослойкой между пластинами расчеты приводят к следующей формуле:

$$A \approx \frac{2h\pi\sqrt{r}}{\lambda(1-r)}, \quad (15)$$

где r — коэффициент отражения света от зеркальных покрытий эталона.

В случае эталона, осуществленного в виде одной плоскопараллельной стеклянной пластинки,

$$A \approx \frac{2h}{\lambda} \frac{\left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}\right) \pi \sqrt{r\tau}}{(1 - r\tau)}, \quad (16)$$

где τ — коэффициент пропускания стеклянной пластинки.

Из последних формул видно, что разрешающая способность эталона существенным образом зависит от r и она тем выше, чем ближе значение r к единице. Необходимо также иметь в виду, что отражающие слои, нанесенные на поверхность пластин, частично также поглощают свет. Если коэффициент поглощения слоя a и коэффициент пропускания S , то $r + a + S = 1$. Малое значение S необходимо для создания большого числа интерферирующих световых пучков, незначительно убывающих по интенсивности. Это обстоятельство как раз необходимо для сужения интерференционных максимумов, которое повышает разрешающую способность всякого интерференционного или дифракционного спектроскопа.

Эталон Фабри — Перо, применяемый в данной задаче, имеет разрешающую силу, недостаточную для полного разрешения сверхтонкого строения зеленой линии ртути $\lambda = 5460,73 \text{ \AA}$. С этим эталоном невозможно наблюдать все 14 компонент спектральной линии. Кроме того, надо учитывать, что линии-спутники имеют различную интенсивность, иногда настолько малую, что это делает затруднительным их наблюдение. В данном приборе, кроме основной — наиболее яркой, хорошо видны только 4 линии.

Подготовка установки к измерениям. Используемая в настоящей задаче установка состоит из источника света, эталона Фабри — Перо и зрительной трубы.

В качестве источника света используется ртутная лампа ПРК-2. В целях предохранения глаз от действия ультрафиолетового излучения она помещена в металлический кожух, имеющий отверстие, которое может быть закрыто бесцветным стеклом или светофильтром для выделения света необходимой длины волны. Светофильтр перемещается вдоль окна в кожухе лампы, что дает возможность, отводя его в сторону, наблюдать интерференционную картину и в «белом свете» ртутной лампы.

Для включения лампы необходимо присоединить ее через реостат к сети 220 в, и если лампа не начала работать, то «поджечь» ее с помощью резонансного трансформатора Тесла. Для этого электрод работающего трансформатора подносят на несколько секунд к металлическому кожуху лампы, вызывая искровой разряд между электродом и кожухом лампы. После включения лампы нормальный режим ее горения устанавливается в течение 5—10 мин.

Для получения достаточно тонких интерференционных линий лампа должна работать при токе, не превышающем 1,5 а. Силу тока следует контролировать по амперметру, и в случае увеличения силы тока выше указанного предела ее следует снизить с помощью реостата. Увеличение тока вызывает уширение излучаемых лампой спектральных линий, это затрудняет измерения, а при большом уширении приводит к искажению интерференционной картины.

Зрительная труба для измерений должна быть сфокусирована на достаточно удаленный предмет. Положение окуляра трубы, соответствующее наводке ее на «бесконечность», отмечено на окуляре кольцевой чертой. Перемещения окуляра зрительной трубы осуществляются вращением кремальерного винта на тубусе трубы.

Крестообразные и вертикальные штрихи окулярного винтового микрометра предварительно независимо фокусируются вращением рифленого кольца окуляра.

Высота расположения трубы на штативе фиксирована, так же как и положение самого штатива на столе, так как горизонтальное и вертикальное размещение трубы не оказывает влияния на условия наблюдения интерференционной картины при незначительных переюстировках эталона. Но ориентация трубы в горизонтальной плоскости и наклон ее оси по отношению к нормали эталона очень существенны. Поэтому штатив трубы допускает вращение трубы вокруг вертикальной оси и плавное изменение ее наклона с помощью микрометрического винта, расположенного под корпусом трубы.

В случае работы с эталоном, имеющим воздушную прослойку между зеркалами, необходимо проверить правильность установки зеркальных поверхностей эталона. Это делается непосредственно по наблюдениям в трубу интерференционной картины при включенной ртутной лампе.

Если рабочие поверхности зеркал эталона установлены строго параллельно друг другу, то в правильно установленную зрительную трубу видны четкие и симметричные кольца, как при использовании светофильтра, так и в белом свете. Если же между зеркалами имеется хотя бы небольшой угол, интерференционная картина становится расплывчатой и несимметричной, кольца в различных ее частях имеют разную ширину.

Однако аналогичные дефекты интерференционной картины могут быть вызваны и неправильной ориентацией зрительной трубы. Поэтому, только убедившись в том, что изменения ориентации и наклона зрительной трубы и небольшие изменения ее фокусировки не улучшают наблюдаемую картину, можно отнести дефекты интерференционной картины на счет непараллельности зеркал. В последнем случае следует обратиться к лаборанту, который снимает с эталона защитный флексигласовый футляр, и производит юстировку прибора специальными регулировочными винтами.

Так как результаты задачи во многом зависят от правильной юстировки всей установки, то не рекомендуется производить измерения, не добившись вполне четкой, симметричной, равномерно освещенной интерференционной картины.

Эталон, осуществленный в виде единственной плоскопараллельной стеклянной пластинки, никакой юстировки не допускает, но установка зрительной трубы и в этом случае должна быть выполнена со всей тщательностью.

Измерения. Для отыскания величин $d\lambda$ (смещений компонент тонкой структуры по отношению к основной спектральной линии $\lambda = 5460,73 \text{ \AA}$) необходимо найти значения R и dR , входящих в формулы (6) или (7), в зависимости от конструкции используемого эталона¹⁾. Для отыскания величины h по формулам (12) или (13) необходимо знать еще величину ΔR . Таким образом, все измерения сводятся к измерениям радиусов интерференционных колец, зная которые определяют dR и ΔR . Фокусное расстояние объектива трубы известно: $f = 13,9 \text{ см}$.

Наблюдаемая в трубу интерференционная картина изображена в сильно увеличенном масштабе на рисунке, помещенном непосредственно около трубы на лабораторном столе. На этом рисунке горизонтальными черточками (с указанием около них номеров порядков) объединены интерференционные кольца, принадлежащие к одному порядку. По этому рисунку легко разобраться в системе интерференционных колец, видимых в зрительную трубу при использовании зеленого светофильтра перед эталоном.

Измерению подлежат радиусы колец в трех порядках интерференции. В каждом порядке интерференции измеряются, кроме радиуса основного яркого кольца, радиусы двух внешних и двух внутренних тонких колец. Рекомендуется начинать измерения с третьей (считая от центра картины) группы колец, принадлежащих к одному порядку интерференции.

Измерения радиусов колец производятся следующим образом. Вращением винта окулярного микрометра приводят вертикальную черточку (риску), видимую в его поле зрения, в касательное положение по отношению к окружности кольца, радиус которого подлежит измерению. Записывают показания окулярного микрометра при этом положении риски. Затем вращением винта микрометра при неподвижной трубе приводят риску в касательное положение по отношению к окружности того же кольца с другой его стороны и вновь записывают показания микрометра. Разность показаний микрометра в указанных двух положениях риски дает диаметр интерференционного кольца. Цена деления на

¹⁾ Здесь необходимо отметить, что как описанный в задаче способ визуальных наблюдений интерференционной картины, так и способ обработки результатов измерений являются простейшими, но отнюдь не самыми точными (см. литературу к задаче).

барабана микрометра равна 0,01 мм. При измерениях диаметра колец необходимо следить за тем, чтобы риска действительно двигалась по их диаметру, а не по одной из горизонтальных хорд. Нужное положение трубы достигается предварительно изменением наклона ее тубуса.

Таким же способом измеряются диаметры всех остальных исследуемых колец в каждом интерференционном порядке и в разных порядках. Очевидно, что не следует изменять положения зрительной трубы в течение всего процесса измерений. Не следует прибегать и к перефокусировкам зрительной трубы при визировании на разные края каждого кольца. Иногда разные края колец отчетливо фокусируются при немного различных положениях окулярного тубуса. В этих случаях, однако, надо, не прибегая к перефокусировкам трубы, несколько изменять адаптацию глаза при наблюдении различных краев кольца.

Полный набор значений диаметров колец позволяет найти нужные для расчетов $d\lambda$ и h значения R , dR и ΔR .

После того как вычислены значения искоемых величин $d\lambda$ отдельно для каждого порядка интерференции, находят их средние значения из всех использованных порядков. Значения h отыскиваются также по значениям ΔR , определенным из разностей $R_{k-1} - R_k$ для разных пар смежных порядков интерференции основной спектральной линии.

После отыскания h вычисляют также значение порядка интерференции k в центре эталона, его разрешающую способность, линейную дисперсию и область дисперсии, воспользовавшись соответствующими формулами, приведенными в тексте описания задачи. Коэффициент отражения зеркал эталона, необходимый для расчета разрешающей способности, полагают равным 0,8.

Технические данные установки. Задача поставлена с интерферометром Фабри — Перо, изготовленным в мастерских физического факультета МГУ. Большие удобства для постановки задачи представляет выпускаемый нашей промышленностью интерферометр ИТ-51-30. Для наблюдения и измерения интерференционной картины удобна зрительная труба с фокусным расстоянием около 15 см с винтовым окулярным микрометром АМ-9. Около установки на рабочем столе необходимо поместить фотографию или чертеж правильно сфокусированной интерференционной картины в большом масштабе с индикацией всех наблюдаемых и измеряемых интерференционных колец.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. С. Э. Фриш, Техника спектроскопии, Изд-во ЛГУ, 1936.
3. М. Ф. Романова, Интерференция света и ее применения, ГТТИ, 1937.
4. С. Толанский, Спектроскопия высокой разрешающей силы, ИЛ, 1955.

5. Ф. А. Королев, Спектроскопия высокой разрешающей силы, Гостехиздат, М., 1953.
6. А. Зоммерфельд, Строение атома и спектры, т. I, ИЛ, 1956.
7. Герцберг, Атомные спектры и строение атома, ИЛ, 1948.
8. Э. В. Шпольский, Атомная физика, т. I, Физматгиз, 1963.
9. Кондон и Шортли, Атомные спектры, ИЛ, 1949.
10. В. Меггерс, УФН 38, 105 (1948).

ЗАДАЧА 153

ФОТОМЕТРИРОВАНИЕ ЛИНЕЙЧАТОГО СПЕКТРА ПРИ ПОМОЩИ СТИЛОМЕТРА И СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОСТАВА СТАЛИ

Цель настоящей задачи — ознакомление с одним из современных методов визуального фотометрирования эмиссионного линейчатого спектра и с применениями подобного фотометрирования для спектрального химического анализа.

Эта задача непосредственно вводит студентов в практику одного из направлений современного спектрального анализа, получившего огромное распространение в металлургической промышленности. Но используемая методика фотометрирования выходит за рамки металлургического спектрального анализа. Именно, используемый прибор позволяет вести сравнение интенсивностей спектральных линий в видимой области всякого линейчатого спектра.

Описание приборов и подготовка их к измерениям. Используемая установка состоит, в сущности, из двух частей: источника света с его питанием и спектрофотометра — стилометра.

В условиях задачи используются, по ходу работы, два разных источника света, обслуживаемые двумя разными источниками питания.

В первой части работы используется ртутная лампа низкого давления, питаемая переменным током 220 в через специальное пусковое устройство с дросселем и конденсатором (см. описание задачи 128). Эта ртутная лампа помещается на столе на фиксированном штативе и освещает входную щель стилометра через конденсор.

Пусковое устройство лампы включается в розетку с напряжением 220 в. Пусковое устройство имеет самостоятельный выключатель лампы (на нем есть индекс СВДШ) и кнопку, служащую для замыкания цепи конденсатора для поджига лампы. Шнур от лампы включается в гнездо пускового устройства с индексами СВДШ.

Ртутная лампа используется в задаче как стабильный и интенсивный источник света с линейчатым спектром, с достаточно редкими спектральными линиями различных интенсивностей. На спектре такого типа легко ознакомиться с принципами действия стилометра как спектрофотометра и произвести измерения относи-

тельных интенсивностей спектральных линий ртути, широко используемых при многих оптических измерениях.

Во второй части задачи используется другой источник света: высокочастотная искра между анализируемым и постоянным металлическими электродами. В нашем случае применяется постоянный электрод из электролитической меди, исследуемый электрод — стальной. Штатив — держатель этих электродов, установлен на столе, на подвижных винтовых салазках и накрыт футляром с прозрачными стенками.

Питание высокочастотной искры осуществляется специальным искровым генератором ДГ-1, с заводским описанием устройства и работы которого можно познакомиться в практикуме. Отметим здесь только, что напряжение к дуговому генератору подведено с настенного распределительного щитка, включение рубильника на котором осуществляется только лаборантом.

Ознакомимся подробнее с устройством искрового штатива для электродов. В лапки штатива зажимаются исследуемые электроды. Лапки укреплены на изолирующих, обычно фарфоровых, стерженьках, вставленных в держатели муфточки, связанные непосредственно с колонкой штатива. Держатели штатива имеют винтовые подачи, позволяющие центрировать друг над другом рабочие концы электродов. Кроме того, две расположенные друг над другом рифленные головки на верхнем конце колонки штатива позволяют изменять расстояние между электродами в вертикальном направлении и регулировать тем самым длину искрового промежутка. Верхняя рифленная головка штатива подает нижний электрод; при вращении этой головки по часовой стрелке этот электрод поднимается. Нижняя головка управляет верхним электродом; при вращении этой головки по часовой стрелке верхний электрод поднимается. Положение центра этого искрового промежутка в вертикальной плоскости устанавливается по специальному выдвигному щупу, имеющемуся на колонке штатива на высоте входной щели стилометра.

Для предохранения глаз от ультрафиолетового излучения, испускаемого искрой помимо видимого спектра, а также во избежание ожога рук высокочастотным напряжением весь искровой штатив заключен в футляр со стеклянными стенками и с плексигласовой гнутой верхней крышкой. Отогнутая часть крышки дает возможность при помощи ранее упомянутых рифленных головок штатива плавно регулировать расстояние между рабочими концами электродов, т. е. длину искрового промежутка, составляющего при используемом напряжении 1,5—2 мм.

Колонка штатива установлена на винтовых салазках, приводная ручка которых, выведенная через стенку футляра, позволяет передвигать колонку как целое в горизонтальном направлении. Такие передвижения бывают нужны в двух случаях. Во-первых, при работе с искрой необходимо тщательно центрировать ее положение

перед щелью стилометра для того, чтобы обеспечить попадание в щель максимума света от используемой маломощной искры ¹⁾. Во-вторых, при работе с ртутной лампой, расположенной, как легко видеть на установке, за футляром стилометра, надо иметь возможность отодвинуть с пути света от ртутной лампы электроды для искры, затеняющие входную щель стилометра.

Искровой штатив всегда накрыт футляром, снимать который студентам категорически воспрещается.

Всякая смена электродов, их перемещение в лапках, очистка и заточка производятся только лаборантом практикума, обязательно выключаящим для этого искровой генератор до снятия футляра с искрового штатива.

Для большей безопасности работы питание генератора имеет связанную с футляром искрового штатива блокировку, размыкающую цепь питания генератора при снятии футляра со штатива.

Под напряжением допустимы только: 1) регулировка длины искрового промежутка при помощи рифленых головок колонки штатива и 2) перемещение штатива как целого при помощи установленных под штативом салазок.

Имея в виду, что студентам, работающим на стилометре, предоставляется возможность ознакомиться с его устройством по весьма подробному заводскому описанию прибора, мы не останавливаемся здесь на деталях конструкции этого прибора. Отметим здесь только самые характерные черты действия данного стилометра в качестве спектрофотометра.

Принцип всякого количественного спектрального анализа заключается, как известно, в сравнении интенсивностей спектральных линий, испускаемых анализируемыми химическими элементами. Это сравнение интенсивностей спектральных линий или, другими словами, их фотометрирование, выполняемое визуальным способом, требует особых условий. Именно, для успешного визуального сравнения интенсивностей линий необходимо: 1) чтобы линии были одинаково окрашены, т. е. принадлежали к одному участку спектра, и 2) чтобы их изображения находились геометрически близко друг к другу. Первое условие достигается выбором в спектре анализируемых элементов подходящих спектральных линий. Второе условие, если оно автоматически не выполнено при удовлетворении первого требования, может быть искусственно соблюдено за счет специальной конструкции оптической системы спектрального прибора. Конструкция оптической системы должна допускать геометрическое сближение между собой изображений различных спектральных линий анализируемых соеди-

¹⁾ О центрировке искры относительно входной щели и оси коллиматора см. ниже в описании хода экспериментальной работы со стилометром.

нений для целей их относительного фотометрирования. Следовательно, оптическая система должна допускать перемещения друг относительно друга сравниваемых участков одного и того же спектра, первоначально развернутого диспергирующей системой в порядке изменения длин волн спектральных линий. На том специальном приеме, которым в настоящем приборе осуществляется нужное взаимное перемещение сравниваемых участков спектра, мы остановимся подробнее.

Свет от дуги (рис. 1) через элементы оптической схемы 1, 2, 3, 4 и диспергирующую систему призм 5, 6, 7 достигает объектива 8 и поворотной призмы 9. Эта призма посылает обратно спектрально разложенный свет на призму 10. Но теперь свет возвращается назад, минуя 7, и проходит в иной плоскости, чем на прямом пути 7, 8, 9.

Элементом конструкции, делящим спектр своеобразным образом на две части, является призма 10, узкая полоска гипотенузной грани которой посеребрена, а остальная часть этой грани находится в оптическом контакте с призмой 11.

Спектр, полученный с помощью диспергирующей системы призм 5, 6, 7, проектируется на гипотенузную грань призмы 10. Вращением этой системы призм можно приводить на гипотенузную грань призмы различные участки спектра, причем различные, но совсем узенькие участки спектра можно размещать на узкой посеребренной полоске, нанесенной на этой грани. Свет от спектральных линий, попавших на эту полоску, распространяется через призму 13 и линзы 14 и 15. Последние проектируют изображение спектральных линий вновь на посеребренную же полоску, нанесенную на смежную грань призм 22 и 21. Изображение спектральных линий с этой полоски рассматривается через линзу 23.

Проследим теперь оптический путь света от тех спектральных линий, которые проектировались на гипотенузную грань призмы 10, но не попали на посеребренную полоску. Свет от этих линий идет через призмы 11 и 18 и изображение линий проектируется

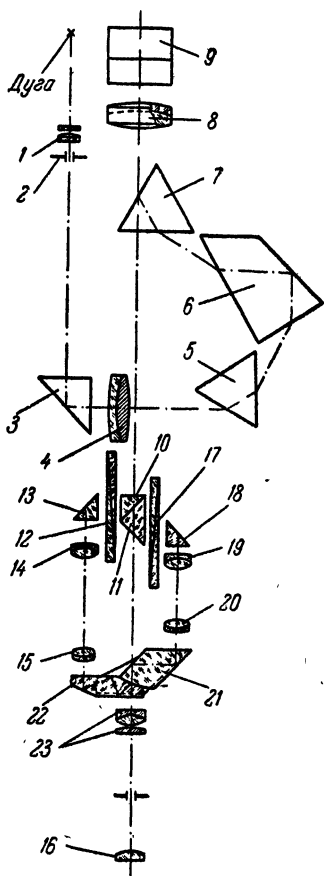


Рис. 1.

линзами 19 и 20 на посеребренную часть смежной грани призм 21, 22 и рассматривается через линзу 23. Изображение этого участка спектра будет содержать все спектральные линии, которые располагались на гипотенузной грани призмы 10, за исключением тех, которые попали на ее посеребренную полосу.

Таким образом, участки спектра, полученные через разные оптические каналы: 10, 12, 13, 14, 15, 22, 23 и 10, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, будут взаимно дополнительными. Учитывая различную ширину участков спектра, прошедших по обоим каналам, можно сказать, что первый канал будет давать изображение «выреза из спектра», а второй канал — «спектр с вырезом». Если бы оба оптических канала были расположены всегда вполне симметрично относительно гипотенузной грани призмы 10, то мы бы увидели в окуляр 23 в полном составе весь участок спектра, размещившийся на гипотенузной грани призмы 10, с тем же взаимным расположением спектральных линий, которое было там. Заметим лишь, что за счет большей высоты посеребренных полосок на гипотенузной грани призмы 10 и смежной грани призм 22, 21, по сравнению с открытыми для работы непосредственными участками призм 10, 21 и 22, высота спектральных линий в «вырезе из спектра» больше высоты спектральных линий в остальном «спектре с вырезом». Такое мелкое техническое различие в изображениях двух наблюдаемых в окуляр частей спектра удобно для их идентификации.

Но описанная оптическая система допускает и изменения взаимного расположения спектральных линий в наблюдаемом участке спектра, необходимые для сравнения интенсивностей спектральных линий. Изменения взаимного расположения спектральных линий достигаются следующим образом. Призма 18 и линза 19 могут совместно перемещаться вдоль направления оптической оси линзы 19. Это позволяет перемещать в поле зрения окуляра «спектр с вырезом» относительно неподвижного «выреза из спектра». Если в последнем установлена спектральная линия, интенсивность которой надо сравнить с интенсивностью какой-то другой линии, находящейся в «спектре с вырезом», то указанным путем (перемещением призмы 18 и линзы 19) можно сблизить эти линии, подведя нужный участок подвижного спектра к размещенной в «вырезе» неподвижной аналитической линии. Сравнение интенсивностей сближенных таким образом линий осуществляется путем выравнивания освещенностей их изображений при помощи фотометрических клиньев-ослабителей (12 и 17, рис. 1).

Таким образом, сравниваемые по интенсивности спектральные линии образуют как бы стоящие рядом два узеньких фотометрических поля фотометра. Как видно из этих пояснений, способ сравнения интенсивностей спектральных линий в стилометре воспроизводит наиболее благоприятные условия визуального фотометрирова-

ния, выполняемого всегда путем выравнивания освещенностей фотометрических полей.

Перейдем теперь к описанию управления стилометром. На рис. 2, 3 представлены схематические изображения стилометра

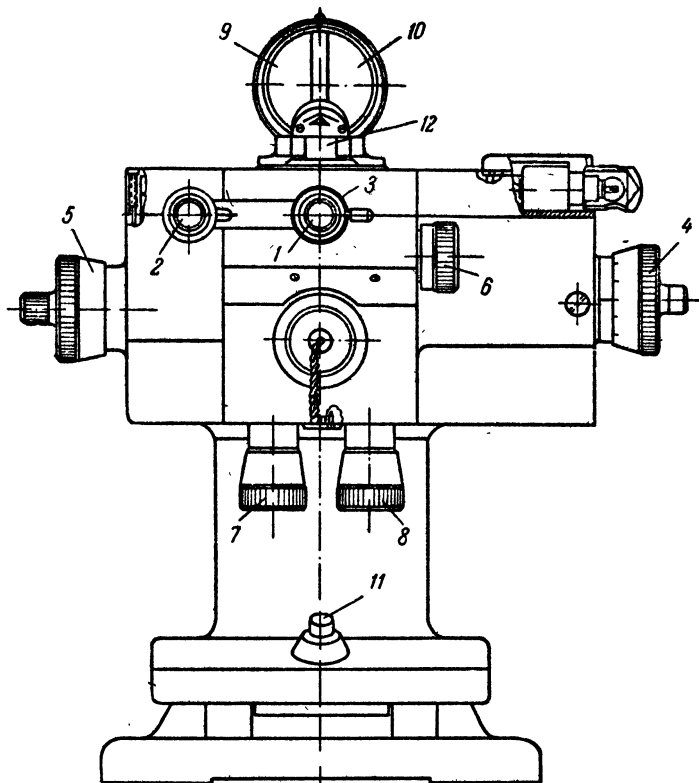


Рис. 2.

(со стороны наблюдателя). Наблюдения спектра ведутся через окуляр 1, снабженный дополнительной глазной блендой 2 для прикрывания неработающего глаза наблюдателя¹⁾. Рифленое кольцо 3 на окуляре 1 служит для фокусировки окуляра на резкую картину контуров «выреза». Вращение системы призм стилометра, позволяющее изменять наблюдаемую в поле зрения область спектра и, в частности, вводить в «вырез» нужную для измерений линию, осуществляется ручкой 4. Барабан этой ручки снабжен делениями. Распо-

¹⁾ При центрировке искрового промежутка перед коллиматором прибора для фокусировки искры между глазом и окуляром вводится дополнительная линза 16 (рис. 1), неиспользуемая при обычных измерениях и хранящаяся отдельно.

лагая градуировочным графиком этого барабана, устанавливающим соответствие между делениями барабана и длиной волны спектра, приведенной в поле зрения, легко отыскивать в спектре нужные аналитические линии. Фокусировка наблюдаемого участка спектра по глазам наблюдателя осуществляется вращением барабана 5. Сместение «спектра с вырезом» относительно неподвижной аналитической линии, установленной в «вырезе», производится вращением ручки 6 (она связана с призмой 18 и линзой 19 рис. 1). Фотометрические клинья перемещаются путем вращения головок 7 и 8. Головка 8 вводит один фотометрический клин в оптический канал

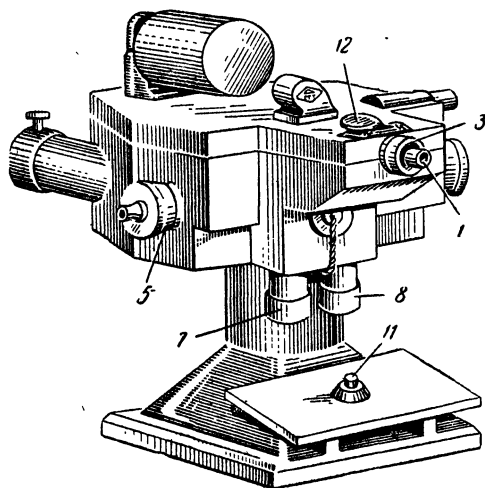


Рис. 3.

«спектра с вырезом», а головка 7 — другой клин в оптический канал «выреза». Отсчеты шкал, определяющих положения клиньев, проектируются на матовые экраны 9 и 10, установленные в специальной надстройке над корпусом стилометра. Экран 9 соответствует головке клина 7 и экран 10 — головке клина 8. Шкала, проектируемая на экран 9, условно обозначена знаком минус, шкала 10 — знаком плюс. Это создает некоторое удобство пользованием отсчетами на шкалах при дальнейших измерениях, о чем будет

сказано ниже. Для наблюдения шкал близоруким наблюдателем на корпусе стилометра, над окуляром, помещается очковое стекло (-4 диоптрии) на откидном кронштейне. На рис. 3 оно обозначено цифрой 12 и находится в откинутом положении, что соответствует условиям работы наблюдателя с нормальным зрением. Шкалы клиньев подсвечиваются особой лампочкой, установленной внутри корпуса прибора. Ее включение в момент измерений производится нажатием кнопки 11.

Передняя часть стилометра видна на рис. 3. Она содержит тубус коллиматора с входной щелью. Управление шириной щели осуществляется барабанчиком, расположенным над щелью и прикрытым специальной крышечкой. При фотометрировании спектра с редкими спектральными линиями, например спектра ртутной дуги, щель коллиматора может быть широкой. При фотометрировании спектра со множеством тесно расположенных линий, например спектров железа и меди, щель должна быть узкой. В противном

случае изображения тесно расположенных линий в этих спектрах сольются между собой и раздельное их фотометрирование станет невозможным.

Упражнение 1

Сравнение интенсивностей спектральных линий с помощью стилометра

Задача заключается в сравнении относительных интенсивностей двух пар линий спектра ртути. Именно, сравниваются интенсивности двух желтых линий 5769 и 5790 Å и двух фиолетовых линий 4358 и 4348 Å. Относительные интенсивности для каждой из этих пар линий существенно различны, и это дает широкую возможность ознакомиться с действием стилометра как спектрофотометра для линейчатого эмиссионного спектра.

Фотометрирование же линий спектра ртути основано на следующих соображениях.

Пусть выравнивание освещенностей изображений двух линий λ_1 и λ_2 имеет место при каких-то двух отсчетах α_1 и α_2 на шкалах фотометрических клиньев. Этим отсчетам соответствуют две разные толщины каждого клина d_1 и d_2 . Величины α_1 и α_2 пропорциональны толщинам d_1 и d_2 . Интенсивности самих линий I_1 и I_2 связаны с освещенностями их изображений E_1 и E_2 , ослабленными за счет введения клиньев, условием

$$E_1 = k_1 I_1 e^{-\gamma_1 d_1} \quad \text{и} \quad E_2 = k_2 I_2 e^{-\gamma_2 d_2}.$$

Здесь γ_1 — коэффициент поглощения нейтрального стекла клиньев; k_1 и k_2 — некоторые коэффициенты пропорциональности между интенсивностями линий и освещенностями их изображений. Их значения учитывают все свойства каждого канала оптической системы, кроме поглощения в клине.

Из равенства E_1 и E_2 следует

$$k_1 I_1 e^{-\gamma_1 d_1} = k_2 I_2 e^{-\gamma_2 d_2}. \quad (1)$$

Переходя от толщины клиньев d_1 и d_2 к отсчетам на их шкалах α_1 и α_2 , мы заменяем величину γ_1 величиной γ , определяющей собой коэффициент поглощения, отнесенный к одному делению шкалы. Далее имеем

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{k_2 e^{-\gamma \alpha_2}}{k_1 e^{-\gamma \alpha_1}} = \frac{k_2}{k_1} e^{-(\alpha_2 - \alpha_1) \gamma}$$

или

$$\ln \frac{I_1}{I_2} = \ln \frac{k_2}{k_1} + \gamma (\alpha_1 - \alpha_2). \quad (2)$$

Если постоянные системы k_2/k_1 и γ известны, то по отсчетам α_1 и α_2 с помощью формулы (2) можно найти отношение интенсивно-

стей I_1 и I_2 двух спектральных линий λ_1 и λ_2 . В нашем случае $k_2/k_1 = 1$ (для обоих стилометров). Значение γ указано на каждом приборе.

Порядок выполнения работы. Просят лаборанта включить рубильник на щитке. Зажигают ртутную лампу, включая ее пускатель. Если лампа не загорается сразу, нажимают несколько раз кнопку конденсатора на панели пускателя ртутной лампы. Дают лампе разгореться в течение 5—7 минут. Проверяют, не падает ли тень от установленных в искровом штативе электродов на щель стилометра. Если это имеет место, то продвигают на салазках влево (смотря от стилометра) всю колонку штатива до тех пор, пока тень от электродов не уйдет со щели стилометра, а размытое изображение ртутной лампы, даваемое конденсором, ляжет на горизонтальный диаметр торца коллиматора прибора.

Нажимают на кнопку 11 (рис. 2), включающую освещение шкал фотометрических клиньев внутри прибора, и вращением головок 7 и 8 устанавливают на шкалах минимальные возможные отсчеты (10—25), с тем чтобы при первоначальном ознакомлении с прибором получить максимальную освещенность изображений спектральных линий в поле зрения окуляра.

Устанавливают на барабане 4 (рис. 2) отсчет, соответствующий приведению в поле зрения желтых линий спектра ртути с длинами волн 5769 и 5790 Å. Необходимый отсчет находят по таблице, прилагаемой к стилометру. Фокусируют края «выреза» вращением рифленого кольца 3 (рис. 2) на окуляре. Линии спектра фокусируют вращением барабана 5. Затем приводят черный «провал» в низком длинном спектре в совпадение с высоким «вырезом» из спектра. Тогда в поле зрения окуляра будет наблюдаться полная картина исследуемого участка ртутного спектра с естественным относительным расположением спектральных линий на этом участке.

Приводят вращением барабана 5 внутрь высокого прямоугольника линию 5769 Å, разместив ее у края прямоугольника. Подводят к ней вращением барабана 6 линию 5790 Å из низкого спектра.

Сближение таким образом двух линий спектра и есть основное предварительное условие сравнения их интенсивностей посредством стилометра данной конструкции. Поэтому тщательность выполнения этой операции определяет успех дальнейших измерений.

Вращением головок 7 и 8 выравнивают освещенности изображений сравниваемых линий и записывают соответствующие отсчеты по светящимся шкалам. Повторяют те же операции и записи отсчетов несколько раз, добиваясь минимального разброса результатов. Найлучшие данные усредняют и используют их затем для отыскания соотношения интенсивностей сравниваемых линий с помощью формулы (2).

Проделяют точно такие же измерения с парой спектральных линий 4358 и 4348 Å, после чего выключают ртутную лампу. По формуле (2) находят отношение интенсивностей сравниваемых

линий. Линия 4358 Å много интенсивнее линии 4348 Å, поэтому в тот оптический канал, через который рассматривается изображение последней линии, фотометрический клин вообще не вводится, а выравнивание освещенностей изображений осуществляется исключительно за счет погашения линии 4358 Å фотометрическим клином, находящимся в используемом для ее наблюдения оптическом канале. При выравнивании освещенностей изображений спектральных линий при помощи фотометрических клиньев надо следовать общим принципам визуальной фотометрии. Именно наш глаз наиболее эффективен при сравнении между собой малых освещенностей. Глаз сравнительно плохо оценивает интенсивность ярких источников света и большие освещенности изображений. Поэтому сравнение освещенностей изображений фотометрируемых линий надо производить в таком режиме зрения, когда освещенность изображений не утомляет глаз наблюдателя, предварительно адаптированный в течение нескольких минут пребыванием в затемненной комнате. До этого уровня освещенности и должны быть доведены изображения обеих спектральных линий с помощью фотометрических клиньев — ослабителей. Разумеется, что это может быть осуществлено лишь при различном положении клиньев в оптических каналах стилометра, коль скоро интенсивности сравниваемых линий неодинаковы. Для упрощения хода измерений обычно удобно, пользуясь клином с головкой 8, довести до нужного уровня освещенности всего спектра, а затем клином с головкой 7 уравнивать освещенность аналитической линии, установленной в «вырезе», с соответствующей линией сравнения из длинного спектра, подведенной к краю «выреза».

Упражнение 2

Спектральный анализ стали

При анализе сталей на легирующие присадки работа со стилометром ведется следующим образом.

По набору образцов сталей с известным, по данным химического анализа, содержанием изучаемой присадки строится калибровочный график. При построении этой кривой на оси абсцисс откладывается разность отсчетов обоих фотометрических клиньев α (соответствующая равенству освещенностей изображений линий присадки и железа), а на оси ординат — процентное содержание присадки.

Для дальнейшего анализа состава неизвестных образцов стали отыскивается опять разность отсчетов фотометрических клиньев α , соответствующая равенству освещенностей линий присадки и железа в спектре исследуемого образца. Используя ранее построенный калибровочный график, находят по величине α процентное содержание исследуемой присадки в анализируемом образце стали. В нашем случае имеется такой калибровочный график для Сг.

С его помощью производится анализ на хром образца стали с неизвестным содержанием Cr. Для определения концентрации хрома в стали пользуются электрической искрой как источником света.

Пользуясь градуировочным графиком стилометра, вращением барабана 4 приводят в поле зрения прибора область спектра, соответствующую 5200 Å.

Включают рукоятку центрального рубильника генератора ДГ, переводя ее в левое положение с надписью «искра». При этом загорается красная лампочка на панели генератора и слышится звук искрового разряда вспомогательной искры на внутреннем разряднике генератора. Левый амперметр на панели генератора должен теперь показывать ток 0,5—0,6 а. Если искра между рабочими электродами не возникла, плавно сводят электроны, при помощи рифленых головок на оси штатива, до тех пор, пока искра не возникнет. Нормальное расстояние между электродами 1,5—2 мм. Если искра неустойчива, то несколько сближают электроды.

Ведя наблюдения в окуляр стилометра, просят кого-нибудь из присутствующих в лаборатории плавно передвигать при помощи салазок колонку штатива до тех пор, пока в окуляр не будет виден достаточно интенсивный спектр. Если при этом интенсивный спектр не получается, то просят лаборанта осуществить центрировку разрядного промежутка штатива относительно щели коллиматора прибора. Пользуясь специальной телелупой, прилагаемой к каждому стилометру, можно через окуляр стилометра видеть искру, а не спектральные линии, как обычно. Наблюдение искры через окуляр облегчает ее центрировку с помощью салазок и вращений штатива.

Подводя друг к другу линию хрома $\lambda = 5208 \text{ \AA}$ и линию железа $\lambda = 5226 \text{ \AA}$, выравнивают освещенности их изображений при помощи клиньев. Прodelьвают это несколько раз, записывая отсчеты на клиньях, усредняют результаты наблюдений. Выключают генератор искры.

Пользуясь прилагаемой к установке калибровочной кривой для определения концентрации Cr, по интенсивности его спектральных линий находят процентное содержание Cr в исследуемом образце стали.

Технические данные установки. В задаче используется стилометр СТ-7, дуговой генератор ДГ-1, ртутная лампа ПРК-2 с дроссельным пусковым устройством.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. С. Л. Мандельштам, Введение в спектральный анализ, Гостехиздат, 1946.
3. Н. С. Свентицкий, Визуальные методы эмиссионного спектрального анализа, Физматгиз, 1961.

ЗАДАЧА 154

СПЕКТРАЛЬНАЯ ФОТОМЕТРИЯ

Целью настоящей работы является ознакомление с общими принципами фотографической фотометрии и применение ее специально к целям спектроскопии.

Теория. Фотографический метод широко применяется для измерения интенсивности света. Он особенно ценен для измерения малых интенсивностей света, так как фотопластинка может интегрировать действие света по времени, тогда как все виды фото- или термоэлементов дают показания, соответствующие значениям мощности падающего на них светового потока. Основой фотографической фотометрии является тот факт, что почернение, которое появляется на освещенной, проявленной и отфиксированной пластинке, зависит, помимо ряда других факторов, также и от интенсивности действующего света.

Мера почернения определяется следующим образом. Пусть свет от некоторого вспомогательного постоянного источника падает на обработанную фотографическую пластинку. Обозначим через I интенсивность света, прошедшего через почерненную часть пластинки, а I_0 — через непочерненную часть ее; тогда за величину почернения принимают величину

$$S = \lg \frac{I_0}{I}.$$

«Почернения» пластинки измеряются с помощью микрофотометров. При выполнении упражнений этой задачи следует познакомиться с заводским описанием микрофотометра МФ-2.

Рассмотрим, как почернение зависит от интенсивности I света, действующего на пластинку. Для этого будем освещать различные участки исследуемой пластинки так, чтобы время экспозиции оставалось одним и тем же, а интенсивности менялись в определенных количественных соотношениях; достигнуть этого можно, применяя специальные ступенчатые ослабители, описание которых будет дано ниже. Если теперь обработать пластинку на микрофотометре, то мы получим значения почернения, соответствующие разным значениям интенсивности света, действовавшего на фотопластинку. Обычно связь между почернением и интенсивностью I представляется графически в виде функции

$$S = S(\lg I).$$

Подобные кривые называются «кривыми почернения». Вид одной из таких кривых представлен на рис. 1, где по оси абсцисс отложены логарифмы интенсивности $\lg I$, а по оси ординат — почернения S . Средняя часть кривой дает линейную зависимость почернения S от $\lg I$. Эта область относится к нормальной экспозиции.

Область AB относится к недодержкам, CD — к передержкам. В нормальной области зависимость почернения S от интенсивности света I , действующего на пластинку, выражается линейным соотношением $S = a + \gamma \lg I$. Величина γ называется коэффициентом контрастности.

Вид кривой почернения в сильной степени зависит от рода пластинки, способа проявления, продолжительности экспозиции, длины волны падающего света и т. д. Для каждой данной пластинки вид этой кривой должен быть определен особо.

Вопрос о том, как с помощью кривой почернения можно определять интенсивности света, вызвавшего почернения, будет разобран ниже после описания установки.

Важный вопрос об интенсивности спектральных линий или о распределении интенсивности в сплошных спектрах

решается в основном методами спектральной фотометрии. В нашем случае ознакомление с фотографической спектральной фотометрией осуществляется путем измерения относительных интенсивностей линий ртутного спектра. Очевидно, что во всех случаях спектральной фотометрии обязательно должно иметь место спектральное разложение исследуемого излучения. Поэтому всякая предназначенная для спектральной фотометрии установка должна включать в себя тот или иной спектрограф.

Описание установки. Переходим к непосредственному описанию используемой в нашем случае установки. В качестве спектрографа в данной задаче используется стеклянный спектрограф ИСП-51, позволяющий наблюдать спектр в области от 3000 до 10 000 Å. Оптическая схема спектрографа дана на рис. 2. Свет, освещающий щель C спектрографа, падает на коллиматорный объектив L_1 . Совокупность щели C и объектива L_1 представляет собой коллиматор, дающий параллельный пучок света на призмную систему. Призменная система спектрографа состоит из трех призм:

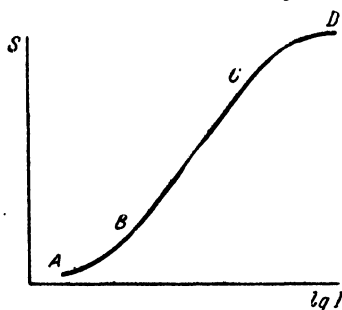


Рис. 1.

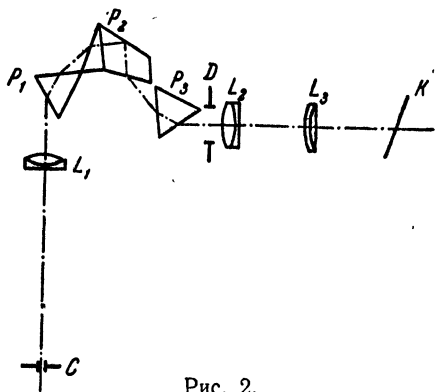


Рис. 2.

P_1 , P_2 и P_3 . Назначение призменной системы — пространственно разделять лучи разных длин волн. Наличие трех призм увеличивает угловую дисперсию прибора. Подробнее о дисперсии призменного прибора следует прочесть в описании задачи 151. После призм свет попадает на сложный камерный объектив L_2 и L_3 , который фокусирует пучок в плоскости кассеты K . Совокупность объективов L_2 и L_3 и кассеты K составляет камеру спектрографа.

Если щель спектрографа освещается светом, содержащим дискретный ряд длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, то в плоскости кассеты мы видим n линий, каждая из которых является изображением щели в соответствующей длине волны (линейчатый спектр). Если щель спектрографа освещается светом, содержащим непрерывный набор длин волн λ ($\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$), то в плоскости кассеты мы видим непрерывное распределение интенсивности (сплошной спектр).

Спектрограф отъюстирован так, что весь исследуемый спектр ртутной лампы получается одновременно на фотопластинке, вставленной в прилагаемую к спектрографу кассету. Категорически воспрещается перемещать столики с призмами и коллиматорный и камерный объективы.

Перед щелью спектрографа помещается платиновый ступенчатый ослабитель, представляющий собой тонкую стеклянную пластинку с нанесенными на ней слоями распыленной в вакууме платины. Эти слои образуют семь ступеней различной плотности, две крайние ступеньки без платины (всего девять ступенек). Ступеньки отделены друг от друга непрозрачными полосками. Пропускаемость двух крайних ступенек равна 100%. Пропускаемости остальных семи ступенек даны в таблице, приложенной к прибору. Ступенчатый ослабитель укреплен на специальной шторке, которая вставляется в пазы перед щелью спектрографа. Брать руками ступенчатый ослабитель нельзя, так как это сразу его испортит. *Вынимать и вставлять ступенчатый ослабитель категорически воспрещается.*

Ступенчатый ослабитель используется для получения кривых почернения. При работе со ступенчатым ослабителем необходимо, чтобы щель спектрографа была равномерно освещена. Это достигается при помощи специального осветителя, действие которого описано ниже.

Освещение щели спектрографа. Для освещения щели спектрографа обычно используют осветительную систему, состоящую из одной или нескольких линз (конденсоров). Выбор конденсорной системы зависит от той задачи, которую мы решаем. Так, для обнаружения слабых линий решающим условием является получение наибольшей интенсивности спектра. Для фотометрических работ основным требованием будет равномерность интенсивности спектральной линии по высоте.

Рассмотрим сначала освещение щели спектрографа источником света, имеющим конечные размеры, без конденсорных линз,

На рис. 3 отмечены три положения источника света S , соответствующие разным расстояниям от источника до щели. Положение 1 соответствует такому расстоянию между источником и щелью, при котором коллиматор полностью заполнен светом. Если источник отодвинуть дальше от щели (положение 2), то коллиматор будет заполнен светом лишь частично. Это приведет к уменьшению интенсивности спектральных линий. Если источник света поместить ближе к щели, то часть света от крайних зон источника попадет

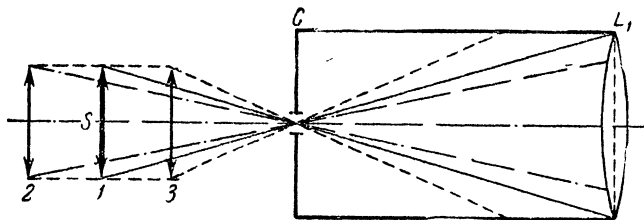


Рис. 3.

на стенки коллиматора. Интенсивность спектральных линий будет такая же, как и в случае 1, но при этом будут использоваться лишь лучи, исходящие от центральных зон источника. В реальных источниках обычно разные участки его обладают разной яркостью. Поэтому для получения равномерного освещения высокой щели источник света следует помещать достаточно далеко от спектрографа, что очень часто бывает несовместимо с требованием получения максимальной интенсивности линий.

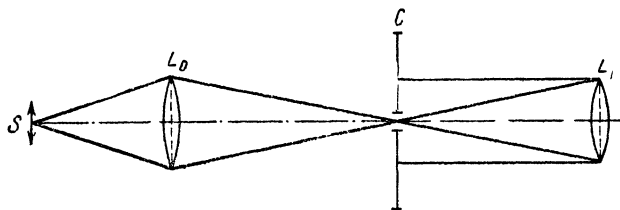


Рис. 4.

Перейдем к рассмотрению освещения щели с помощью одной конденсорной линзы. Это наиболее распространенный способ освещения щели. Наибольшая интенсивность спектральных линий в этом случае получается, когда конденсор дает изображение источника в плоскости щели (рис. 4). Светосила конденсора L_0 при этом должна быть подобрана так, чтобы телесный угол, под которым конденсор L_0 виден из щели спектрографа C , равнялся телесному углу, под которым из той же щели виден коллиматорный объектив L_1 . Этот способ не позволяет получить равномерное

освещение высоких щелей спектрографа, необходимое для фотометрических задач. Для этой цели пользуются другим расположением источника и конденсора, указанным на рис. 5. Источник S помещают на таком расстоянии от конденсорной линзы L_0 , чтобы получить слабо сходящийся пучок. В этом случае на поверхности щели получается равномерно освещенное пятно нужного размера. Очевидно, что освещение щели спектрографа по способу, указанному на рис. 5, приводит к существенно меньшим интенсивностям спектра, чем освещение по способу, указанному на рис. 4.

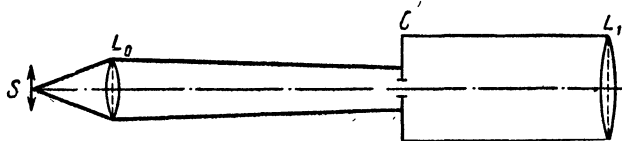


Рис. 5.

Для получения равномерного освещения высокой щели спектрографа наилучшей конденсорной системой является система трехлинзового конденсора (используемого в данной работе), изображенная на рис. 6. В этой системе первая конденсорная линза L_{01} дает изображение источника в плоскости второй конденсорной линзы L_{02} . Вторая конденсорная линза L_{02} изображает первую конденсорную линзу L_{01} в плоскости щели спектрографа C . Линза L_{01} залита светом равномерно. Поэтому в плоскости щели получается равномерно

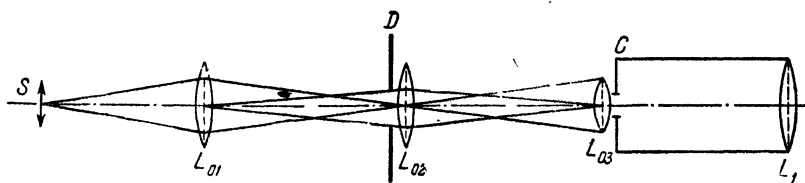


Рис. 6.

освещенный кружок. Однако одного только равномерного освещения щели еще недостаточно для получения равномерной интенсивности спектральной линии по высоте. Для этого необходимо, чтобы все лучи, прошедшие через любую точку щели, прошли дальше через весь спектрограф. Без линзы L_{03} это условие не может быть выполнено. Действительно, рассмотрим вертикальный разрез коллиматора, изображенный на рис. 7. Конденсорная линза дает одинаковую освещенность для точек 1, 2 и 3, т. е. для центральной и крайних точек щели. Но все лучи, прошедшие через точку 1, пройдут через коллиматорный объектив L_1 и дадут изображение этой точки, тогда как для точек 2 и 3 только часть лучей пройдет через

коллиматорный объектив, а часть лучей, проходящих через точки 2 и 3, попадет на стенку коллиматора. Это явление называется виньетированием щели. Оно приводит к тому, что концы спектральных линий оказываются менее интенсивными, чем центральный

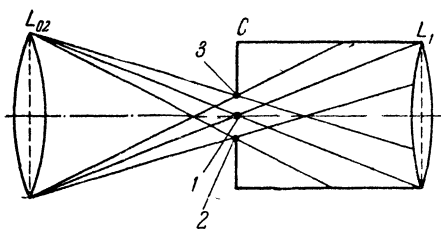


Рис. 7.

участок линии. Для устранения этого явления применяется третья антивиньетирующая линза L_{03} ¹⁾. Она помещается непосредственно перед щелью спектрографа. Действие ее ясно из рис. 8. Линза L_{03} дает изображение линзы L_{02} (а следовательно, и изображение источника света) в плоскости коллиматорного объектива L_1 (рис. 6). Перед линзой L_{02} помещается диафрагма, обозначенная на этом рисунке буквой D . Она позволяет вырезать из изображения источника нужную часть.

Положение линз L_{01} , L_{02} , L_{03} на скамье строго определенное. Линзы установлены, их положения никакому изменению не подлежат. При выполнении этой задачи приходится иметь дело с двумя источниками света. Установка нужного источника света производится работающим. Источник света следует установить так, чтобы его изображение, даваемое линзой L_{01} , попадало на центр диафрагмы D .

Определение относительных интенсивностей спектральных линий. Для определения относительных интенсивностей спектральных ли-

ний необходимо получить снимок этих линий, используя ступенчатый ослабитель. Вид ртутного спектра, снятого со ступенчатым ослабителем, дан на рис. 9 (цифрами обозначены линии синего триплета: 1 — $\lambda = 4339 \text{ \AA}$, 2 — $\lambda = 4348 \text{ \AA}$, 3 — $\lambda = 4358 \text{ \AA}$).

Каждая из линий полученного таким образом спектра может быть использована для построения кривой почернения. Для этого требуемую линию следует фотометрировать по всем ступенькам на микрофотометре (см. описание микрофотометра). Далее строят график зависимости почернения S от логарифма интенсивности ($\lg I$). За логарифм интенсивности берется логарифм пропускания клина, выраженной в процентах.

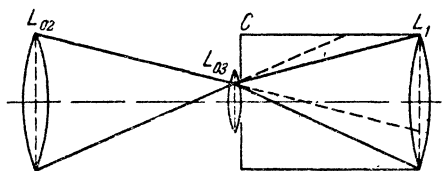


Рис. 8.

¹⁾ Антивиньетирующая линза применяется и при других способах освещения щели.

Определение относительных интенсивностей всяких спектральных линий производится двумя различными методами в зависимости от того, насколько близки по длинам волн сравниваемые линии.

1. Случай, когда сравниваемые спектральные линии настолько близки по длинам волн, что можно не учитывать изменение свойств пластинки с длиной волны (гомохроматическая фотометрия).



Рис. 9.

Исследуемые линии снимают со ступенчатым ослабителем (рис. 9). Для каждой линии измеряют почернения всех ступенек и по ним строят на одном графике кривые почернения по числу исследуемых линий, например две (рис. 10). Масштаб по оси абсцисс для всех кривых один — он задается градуировкой ослабителя. Пусть интенсивность первой линии больше интенсивности второй, т. е. $I_1 > I_2$. Это выразится в том, что характеристическая кривая для первой линии будет лежать на графике выше, чем для второй. Прямолинейные части обеих характеристических кривых при этом параллельны (рис. 10).

Для перехода от почернений к интенсивности воспользуемся основным принципом фотографической фотометрии: при одинаковом спектральном составе света и одинаковой экспозиции на одной и той же пластинке при идентичных условиях проявления равные почернения вызываются равными интенсивностями.

Проведем прямую, параллельную оси абсцисс, так, чтобы она пересекла обе характеристические кривые в прямолинейной части (прямая MN на рис. 10). Одно и то же почернение достигается на обеих линиях при разных степенях ослабления этих линий. Очевидно, что отношение интенсивностей этих двух линий будет равно обратной величине отношения пропусканий клина, приводящих к одному и тому же почернению S . Так как по оси абсцисс отложены логарифмы пропускания клина, то легко видеть, что отрезок AB , равный отрезку A_1B_1 , равен $\lg I_1/I_2$.

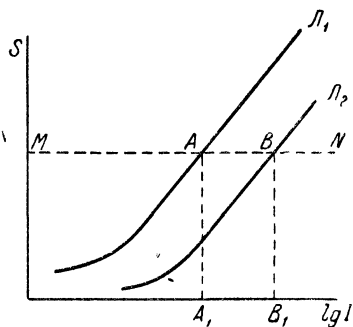


Рис. 10.

Таким образом, при наличии двух параллельных характеристических кривых для двух близких спектральных линий логарифм относительной интенсивности этих линий определяется расстоянием между двумя кривыми.

2. Случай, когда сравниваемые спектральные линии расположены в областях различной спектральной чувствительности и различного контраста фотопластинок (гетерохромное фотометрирование).

В этом случае фотографируют на одной и той же пластинке в одинаковых условиях исследуемый спектр (внизу) и спектр сравнения (вверху) некоторого стандартного источника света

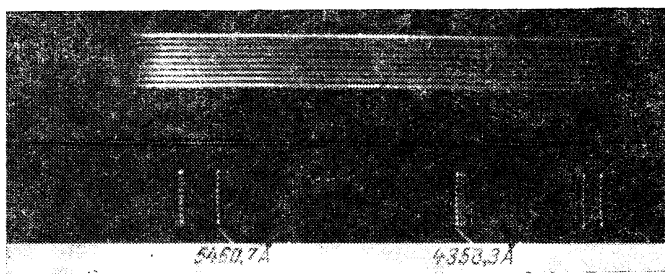


Рис. 11.

с известным распределением энергии по спектру. Фотографирование производится, разумеется, через ступенчатый ослабитель (рис. 11).

В качестве стандартного источника света в данной задаче служит вольфрамовая лампа накаливания. «Цветовая» температура ее равна 2600°C . («Цветовая» температура есть та температура, при которой черное тело дает то же распределение энергии, что и нить накала лампы).

Измерение относительных интенсивностей производится следующим образом. Определяют отношение интенсивности каждой исследуемой линии к интенсивности сплошного спектра для той же длины волны по способу, указанному в случае 1. При фотометрировании сплошного спектра интенсивность его относится к некоторому интервалу длин волн $\Delta\lambda$, уместающемуся в ширине изображения щели спектрографа Δl , и равна

$$E_{\lambda T} \frac{d\lambda}{dl} \Delta l.$$

Здесь $E_{\lambda T}$ — функция, характеризующая распределение энергии в спектре черного тела температуры T , а $d\lambda/dl$ — линейная дисперсия спектрографа.

Сравнивают кривую почернения для каждой спектральной линии с кривой почернения соответствующего участка сплошного спектра и определяют отношение

$$r_{\lambda} = \frac{I_{\lambda}}{E_{\lambda T} \frac{d\lambda}{dl} \Delta l},$$

где r_{λ} — относительная интенсивность.

Для отношения интенсивностей двух линий имеем

$$\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} = \frac{r_{\lambda_1} E_{\lambda_1 T} \left(\frac{d\lambda}{dl} \right)_1 \Delta l_1}{r_{\lambda_2} E_{\lambda_2 T} \left(\frac{d\lambda}{dl} \right)_2 \Delta l_2}. \quad (1)$$

Отношение $E_{\lambda_1 T}/E_{\lambda_2 T}$ берут из таблицы, имеющейся в практике. Значения $d\lambda/dl$ для исследуемых линий берутся из графика линейной дисперсии спектрографа, приложенного к спектрографу, $\Delta l_1/\Delta l_2$ равно отношению ширин изображения щели спектрографа в нужных длинах волн. Эти ширины измеряются на компараторе.

Упражнение 1

Определение отношения интенсивностей линий

$$\lambda_1 = 4339 \text{ \AA} \text{ и } \lambda_2 = 4348 \text{ \AA}$$

Линии λ_1 и λ_2 (рис. 9) достаточно близки по длинам волн, так что чувствительность и контрастность фотопластинки для обеих этих линий имеют одно и то же значение. Отношение интенсивности этих двух линий определяется по первому методу. Для этого снимают спектр ртутной лампы через ступенчатый ослабитель при разных экспозициях, добываясь того, чтобы почернения обеих линий лежали в нормальной области почернения.

Экспозиции указаны в табличке, приложенной к спектрографу. После проявления и фиксирования пластинку показывают преподавателю. Если среди набора полученных снимков можно выбрать снимок с нормальным почернением для обеих исследуемых линий, то пластинку тщательно промывают и высушивают вентилятором. Промывать пластинку следует в холодной проточной воде 15—20 мин. Если все экспозиции снимков оказались неудачными, то снимок следует повторить с другими экспозициями. В этом случае выбор экспозиций следует сделать совместно с преподавателем.

Совершенно сухую пластинку обрабатывают на микрофотометре (фотометрирование этой пластинки, а также пластинки, полученной при выполнении упражнения 2, следует производить на следующем занятии). После фотометрирования строят характеристические кривые и по ним определяют отношение интенсивностей.

Примечания: 1. Снимки спектров можно делать при положениях кассеты 4, 8, 12, 16 и 20 (величина диафрагмы и экспозиция указаны в конце описания).

2. Для удобства фотометрирования спектр ртутной лампы желательнее снимать с широкой щелью. Ширину щели следует установить такую, чтобы две желтые линии спектра ртути 5769,6 и 5790,7 Å были разделены небольшим промежутком. Это соответствует ширине щели 0,2 мм.

3. Роль затвора в установке играет специальная затворная шторка, расположенная в конце кассетной части.

Упражнение 2

Определение отношения интенсивностей линий

$$\lambda_1 = 5460,7 \text{ \AA} \text{ и } \lambda_2 = 4358,3 \text{ \AA}$$

Линии λ_1 и λ_2 (рис. 11) расположены в областях различной пропускания спектрографа и разной чувствительности фотопластинки, поэтому определение отношений их интенсивностей производится по методу 2. Для этого на пластинке снимают спектр ртутной лампы при следующих трех положениях кассеты: 4, 12 и 20. При положениях кассеты 8, 16 и 24 снимают сплошной спектр лампы, накаливания. Экспозиция, а также значение диафрагмы D для всех снимков указаны в специальной табличке.

Пластинку проявляют и фиксируют, а затем показывают преподавателю. Если среди трех снимков ртутного спектра и среди трех снимков сплошного спектра можно выбрать по одному снимку с нормальным почернением для указанных длин волн, то пластинка промывается и сушится. Если экспозиции оказались неподходящими, то снимки нужно повторить с другими экспозициями. Определять новые экспозиции следует совместно с преподавателем. В результате выполнения этого упражнения на одной и той же пластинке должны получиться как ртутный спектр нормального почернения, так и спектр лампы накаливания также нормального почернения. Эти два спектра в дальнейшем обрабатывают на микрофотометре. После фотометрирования строят две пары характеристических кривых для двух длин волн (как это описано в случае 2) и по ним определяют r_{λ_1} и r_{λ_2} .

Измеряя ширину двух исследуемых линий ртути на пластинке с помощью компаратора (см. описание компаратора), определяют отношение $\Delta I_1/\Delta I_2$. Значение $E_{\lambda T}$ берут из таблицы распределения энергии в спектре черного тела температуры $T = 2600^\circ$. Значения $\Delta I/\Delta \lambda$ берут из графика, приложенного к спектрографу. Имея все эти данные, определяют отношение интенсивностей I_1/I_2 , пользуясь формулой (1).

Приложение

Обработка результатов в случае, когда кривые почернения для разных длин волн параллельны для каждого спектра, а кривые почернения для спектра ртути и участка сплошного спектра с той же длиной волны не параллельны между собой.

В этом случае сплошной спектр стандартного источника используется для определения «чувствительности аппаратуры» (т. е. произведение чувствительности фотопластинки на пропускательность спектрографа) в функции длины волны. Обработка производится следующим образом:

а) сравнивают почернения двух линий ртути и находят по способу 1 их отношение p . Очевидно, что

$$p = \frac{I_1 L_1}{I_2 L_2},$$

где I_1 — интенсивность ртутной линии длины волны λ_1 ; I_2 — то же для длины волны λ_2 , L_1 — чувствительность аппаратуры для длины волны λ_1 , L_2 — то же для длины волны λ_2 ;

б) сравнивают почернение двух участков сплошного спектра, относящихся к тем же длинам волн λ_1 и λ_2 , и находят отношение p_1 . Очевидно, что

$$p_1 = \frac{I'_1 L_1}{I'_2 L_2},$$

где I'_1 и I'_2 — интенсивности соответствующих участков сплошного спектра.

Для стандартного источника

$$\frac{I'_1}{I'_2} = \frac{E_{\lambda_1} \tau \left(\frac{d\lambda}{dl} \right)_1 \Delta l_1}{E_{\lambda_2} \tau \left(\frac{d\lambda}{dl} \right)_2 \Delta l_2},$$

где $E_{\lambda} \tau$, $d\lambda/dl$ и Δl имеют те же значения, что и в предыдущем способе обработки;

в) находят

$$\frac{I_1}{I_2} = p \frac{L_2}{L_1} = \frac{p}{p_1} \frac{I'_1}{I'_2} = \frac{p}{p_1} \frac{E_{\lambda_1} \tau \left(\frac{d\lambda}{dl} \right)_1 \Delta l_1}{E_{\lambda_2} \tau \left(\frac{d\lambda}{dl} \right)_2 \Delta l_2},$$

т. е. окончательно имеем:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{p}{p_1} \frac{E_{\lambda_1} \tau \left(\frac{d\lambda}{dl} \right)_1 \Delta l_1}{E_{\lambda_2} \tau \left(\frac{d\lambda}{dl} \right)_2 \Delta l_2}.$$

Практические указания. Студенты, работающие на задаче 154, должны иметь в виду следующие указания:

1. Фотопластинка заряжается в фотокабине при полной темноте, кладется в кассету эмульсией вниз на нижние пазы кассеты. Зарядив пластинку, следует проверить, плотно ли закрыта крышка и шторка.

2. Во время фокусировки источника света относительно щели спектрографа нельзя изменять положение конденсоров на оптической скамье. Источник света следует установить так, чтобы его изображение, даваемое линзой L_1 , попадало на центр диафрагмы D линзы L_2 .

3. Перед съемкой необходимо проверить:

1) положение микрометрического винта щели спектрографа, ширина щели должна быть равной 0,2 мм;

2) положение диафрагмы перед линзой L_2 ;

3) юстировочные данные спектрографа ¹⁾;

4) проверить крепление бокового винта при передвижении кассеты по шкале;

5) осторожно выдвигать шторку кассеты до нанесенной вертикальной черты.

Фотопластинка проявляется в фотокабине при полной темноте: время проявления — 4 мин., время фиксирования — 8—10 мин.

В процессе проявления и фиксирования фотопластинка должна лежать в кювете эмульсией вверх и полностью покрываться раствором. Между проявлением и закреплением фотопластинку необходимо тщательно промывать в холодной воде. По окончании закрепления фотопластинку промывают под проточной холодной водой 5—10 мин. и сушат у вентилятора.

Технические данные установки. Задача поставлена со спектрографом ИСП-51 и микрофотометром МФ-2. Источник линейчатого спектра — ртутная лампа. Источник сплошного спектра — лампа накаливания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. С. Э. Фриш, Техника спектроскопии, Изд. ЛГУ, 1936.

3. С. Л. Мандельштам, Введение в спектральный анализ, Гостехиздат, 1946.

4. В. К. Прокофьев, Фотографические методы количественного спектрального анализа металлов и сплавов, Гостехиздат, 1951.

5. Л. С. Ломоносова, О. Б. Фалькова, Спектральный анализ, Металлургиздат, 1958.

6. Орнштейн — Молль — Бургер, Фотографическая фотометрия, УФН 13, 920 (1933).

¹⁾ Юстировочные данные спектрографа даются в табличке, приложенной к прибору.

ЗАДАЧА 155

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ РАСТВОРОВ
С ПОМОЩЬЮ ФОТОМЕТРА

Введение. Цель работы — получение спектров поглощения растворов красок, исследование влияния растворителя и концентрации растворенного вещества на спектр поглощения раствора.

Непосредственно измеряемой величиной является пропускная способность раствора D как функция длины волны, равная

$$D = \frac{I}{I_0},$$

где I_0 — интенсивность света, падающего на раствор, I — интенсивность света, прошедшего через раствор. Пропускаемость раствора D связана с коэффициентом поглощения K_λ и толщиной поглощающего слоя L соотношением

$$D = \frac{I}{I_0} = e^{-K_\lambda L}. \quad (1)$$

Если молекулы поглотителя не взаимодействуют между собой и с молекулами растворителя, то коэффициент поглощения линейно связан с концентрацией поглотителя C

$$K'_\lambda = x_\lambda C, \quad (2)$$

где x_λ — коэффициент пропорциональности, зависящий от λ .

Формулу (1) в настоящее время обычно пишут в виде

$$\frac{I}{I_0} = 10^{-K'_\lambda L},$$

где K'_λ связано с K_λ соотношением $K'_\lambda = K_\lambda \lg e = 0,43 K_\lambda$; величина K'_λ называется *коэффициентом экстинкции*, а величина

$$E = \lg \frac{I_0}{I} = K'_\lambda L$$

— *экстинкцией* раствора.

Экстинкцией называется ослабление света, вызванное как поглощением, так и рассеянием света в веществе.

Описание прибора. В данной работе измерения выполняются с помощью специального фотометра. Оптические схемы фотометра и осветителя к нему изображены на рис. 1, где 1 — осветительные зеркала, 2 — столик для кювет с растворами, 3 — диафрагмы с изменяемым отверстием, 4 — конденсоры, 5 — стеклянные ромбы, изменяющие направление лучей, 6 — бипризма, 7 — сменный фильтр, 8 — окуляр, сфокусированный на грань бипризмы, 9 — лампа с прямой нитью, 10 — матовые стекла.

Два пучка света, выходящих из осветителя, отражаясь от зеркала, проходят через регулируемые диафрагмы и объединяются

с помощью двух оптических систем в бипризме. Наблюдатель видит в окуляр два поля с резкой границей раздела (грань бипризмы); левое поле освещено световым пучком, прошедшим через правое окно фотометра, а правое — пучком, прошедшим через левое окно. Изменяя величину отверстия каждой диафрагмы, т. е. сечение соответствующего пучка, можно изменять яркость каждого поля.

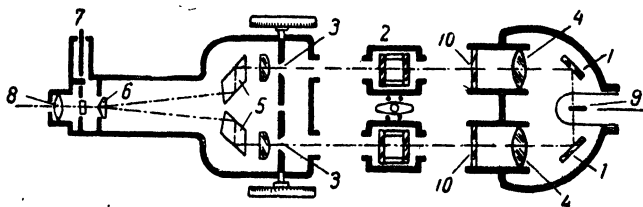


Рис. 1.

Это позволяет производить фотометрическое сравнение интенсивностей обоих световых пучков. Если один из пучков имеет меньшую интенсивность, чем второй, например за счет поглощения в стоящей на его пути среде, то, изменяя отверстия диафрагмы на пути второго пучка, можно уравнивать яркости обоих полей и по величине изменения отверстия диафрагмы определить относительную интенсивность обоих световых пучков. Сменные фильтры, помещенные перед окуляром, позволяют производить эти измерения в различных спектральных участках.

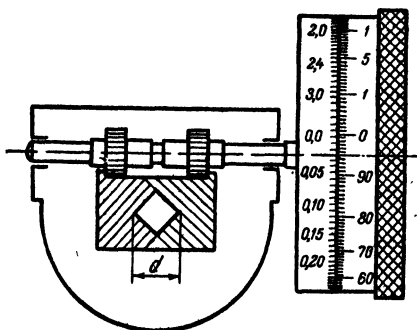


Рис. 2.

меняется от 0 до заданной величины S_0 . На шкале барабана нанесены в процентах отношения S/S_0 , т. е. отношение площади отверстия, действующего при данной установке, к заданному отверстию диафрагмы. Полное открытие диафрагмы осуществляется за один поворот барабана; диафрагма полностью открыта, когда ее две половины не накладываются друг на друга, а лишь соприкасаются, образуя квадратное отверстие. Интенсивность света, проходящего через диафрагму, пропорциональна площади отверстия: $I \sim d^2$. Величина d линейно связана с углом

поворота барабана α , следовательно, $I \sim \alpha^2$. Шкала барабана градуирована от 0 до 100, так что цифры (черная шкала) непосредственно пропорциональны интенсивности проходящего света. Рядом с черной шкалой расположена красная шкала, деления которой a_E связаны с делениями черной шкалы a_D соотношением

$$a_E = \lg \frac{100}{a_D} = 2 - \lg a_D.$$

Таким образом, если, например, при измерениях поглощения поглощающий раствор помещен в одном пучке, диафрагма которого стоит на делении 100, и поворотом второго барабана уравнены яркости обоих полей, то отсчет по черной шкале этого барабана a_D даст непосредственно пропускание раствора, выраженную в процентах

$$a_D = \frac{I}{I_0} \cdot 100 = D\%.$$

Отсчет по красной шкале дает непосредственно экстинкцию раствора

$$a_E = 2 - \lg a_D = \lg \frac{I_0}{I} = E; \quad \lg \frac{1}{D} = E.$$

Для получения спектральной кривой пропускания или экстинкции используются так называемые *S*- или *M*-фильтры, укрепленные в револьверной диафрагме. Область пропускания этих фильтров сравнительно узка; для различных фильтров полуширина области пропускания лежит между 20 и 40 мкм. Таким образом, при исследовании растворов со сравнительно широкими и плавными полосами поглощения можно относить измеряемую величину к эффективной длине волны фильтра, которая указывается на оправе фильтра цифрами, следующими за буквой *S* (или *M*). Так, например, фильтр *S*-72 имеет эффективную длину волны $\lambda = 720$ мкм, фильтр *S*-66 — длину волны $\lambda = 660$ мкм и т. д. (см. таблицу для *S*-фильтров).

Светофильтры	λ , мкм	Светофильтры	λ , мкм
S-75	750	S-53	530
S-72	720	S-50	500
S-66	660	S-47	470
S-61	610	S-42	420
S-57	570		

Установка прибора. Для получения достаточно точных измерений необходимо обеспечить одинаковую начальную яркость обоих полей. Для этой цели необходима тщательная установка прибора,

которая осуществляется следующим образом. Включают с помощью понижающего трансформатора лампу осветителя. Сняв фотометр со штатива, направляют световые пучки от осветителя на лист бумаги, расположенный вертикально на расстоянии около 1 м от осветителя. Перемещая патрубку с конденсаторами (рис. 3), получают два резких

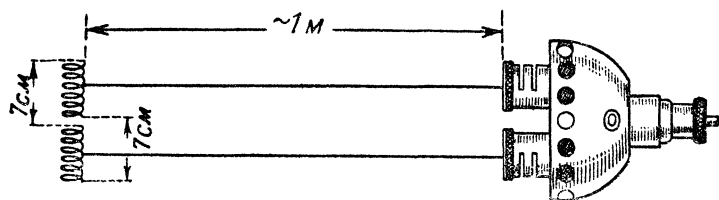


Рис. 3.

изображения нити лампы. Перемещая лампу, сближают или раздвигают оба изображения до получения расстояния в 7 см между правыми и левыми краями обоих изображений.

Ставят на штатив фотометр и, введя фильтр S-57, перемещением конденсаторов осветителя получают в обоих полях резкие изображения нити лампы, расположенные так, как это показано на рис. 4.

Вставляют в окна осветителя матовые стекла, следя за совпадением их номеров. Тщательно фокусируют окуляром границу раздела обоих полей. Установив один из барабанов диафрагм на деление 100, поворотом второго барабана уравнивают яркость обоих полей и делают 5—10 измерений. Если среднее значение отсчета равно 100 ± 2 , то установка прибора выполнена правильно. Если отклонение больше, то слегка перемещают один из конденсаторов и опять производят фотометрирование и т. д. до получения одинаковой яркости обоих полей при одинаковой установке диафрагмы.

При фотометрировании хорошим критерием равенства яркости фотометрических полей является исчезновение границы раздела полей.

Во время фотометрирования глаз наблюдателя должен быть прижат к наглазнику окуляра и по возможности всегда принимать при измерениях одно и то же положение. Лицам, носящим очки, при фотометрировании необходимо их снимать. В лабораторной

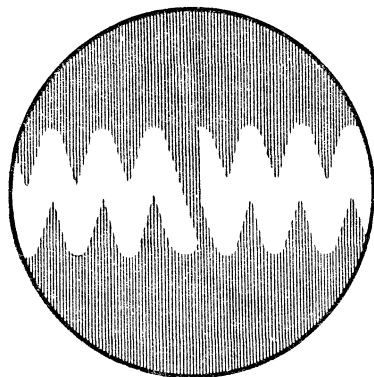


Рис. 4.

практике часто применяется такой же тип фотометра, но с несколько измененной конструкцией (рис. 5). Фотометрическая головка 1, осветитель 2 и столик 3 могут перемещаться вдоль вертикальных стоек. Пучки света из осветителя падают на зеркало 4 и направляются им на столик 3 с исследуемыми растворами, налитыми в специальные кюветы с плоскопараллельными стеклянными стенками. Для измерения цветных объектов к фотометру прилагается набор из одиннадцати светофильтров. Из них восемь светофильтров (№ 1—8) делят видимую область спектра на примерно равные участки. В специальной таблице приводятся их эффективные длины волн. Три последних светофильтра (№ 9, 10 и 11) обладают более широкой полосой пропускания. Они делят видимую область спектра на три части: красную, зеленую, синюю. Одно окошко в револьверной диафрагме оставлено свободным для измерений в белом свете.

Порядок установки осветителя следующий: осветитель закрепляют на основании штатива фотометра так, чтобы световые пучки падали на зеркало. Затем, перемещая патрон с лампой в кожухе осветителя, а также слегка вращая зеркало фотометра, находят изображение нити в поле зрения фотометра. Ввиду большой яркости нити, рассматривать ее изображение следует сквозь светофильтр (лучше всего через фильтр № 5). Закрепив патрон, небольшим вращением всего осветителя добиваются симметричного расположения

нити лампы по отношению к линии раздела поля зрения. Затем снова закрепляют осветитель. Перемещением конденсоров 5 добиваются четкого изображения нити в обеих половинах поля зрения. При правильной установке осветителя нить в поле зрения должна иметь вид, изображенный на рис. 4. К осветителю прилагаются две пары светофильтров. Одна пара из молочного стекла и одна пара из матового стекла. Светофильтры создают равномерную освещенность полей сравнения. Светофильтры из молочного стекла сильно ослабляют световые пучки и ими надлежит пользоваться только при работе в белом свете. Вторая пара светофильтров (из матового стекла) пропускает значительно больше света и предназначается для работы с цветными светофильтрами.

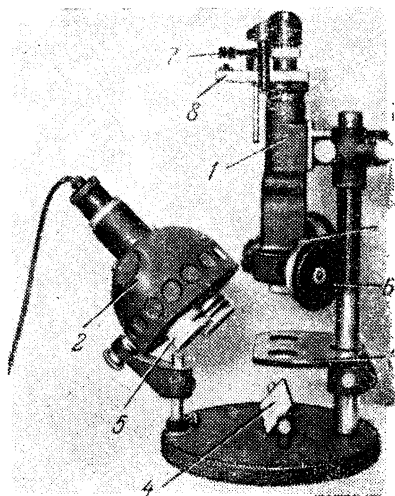


Рис. 5.

Упражнение 1

Получение кривых поглощения растворов красок и исследование влияния толщины слоя

Кювету, наполненную исследуемым раствором, помещают на столик. Во втором пучке для компенсации потерь на отражение ставят вторую кювету, наполненную дистиллированной водой (или растворителем).

С помощью откидной лупы 7 у окуляра (рис. 5) получают резкое изображение квадратного выреза диафрагмы и проверяют полное и равномерное заполнение действующих отверстий кювет светом. Устанавливают барабан 6 диафрагмы в световом плече, где стоит кювета с раствором, на деление 100. Введя в поле зрения первый фильтр 8, производят вращением второго барабана уравнивание яркости обоих полей, как описано выше.

Необходимо сделать последовательно несколько измерений и из них взять среднее.

При отсчете одновременно отсчитываются значения a_D и значения a_E . Производят эти измерения последовательно, вводя в поле зрения все фильтры. Если яркость полей при работе со светлыми фильтрами очень велика, полезно установить барабан плеча с раствором не на $a_D = 100$, а на $a_D = 50$, введя соответствующие поправки в отсчет по второму барабану.

Окончив измерения, меняют местами кюветы с раствором и растворителем и повторяют измерения. Из обеих серий измерений для каждого значения берется среднее.

Результаты измерений наносят на два графика, откладывая эффективную длину волны фильтров по оси абсцисс, а по оси ординат — величины D и E .

В настоящем упражнении изучаются следующие вещества: 1) водный раствор метилвиолета, 2) водный раствор фуксина (оба раствора исследуются при толщине слоя в 10 мм), 3) раствор хлорофилла в спирте, этот раствор исследуется при двух толщинах слоя (1 мм и 10 мм).

Упражнение 2

Исследование влияния концентрации на коэффициент экстинкции

Эти измерения производятся как для веществ, для которых выполняется закон (2), так и веществ, для которых этот закон нарушается. Для каждого вещества измеряется, как описано выше, экстинкция для двух концентраций.

Для каждого вещества результаты измерений обеих концентраций наносятся на один график, причем вместо E по оси ординат откладывается $\lg E$. Критерием выполнимости закона (2) является

параллельность сдвига кривых $\lg E = f(\lambda)$ для разных концентраций. Измерения выполняются для двух растворов медного купороса и двух растворов роданистого кобальта. Толщина слоя 10 мм.

Упражнение 3

Исследование влияния растворителя на спектр поглощения

Описанным выше методом получают кривые экстинкции для растворов одного и того же вещества в различных растворителях и сравнивают кривые между собой. Исследуются растворы иода в четыреххлористом углероде, а затем в спирте. Толщина слоя 10 мм.

Фотометр второго типа применяется также для определения коэффициента отражения, например для измерения степени белизны и блеска ткани, бумаги, кожи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. Ф. Вейгерт, Оптические методы в химии, Госхимтехиздат, 1933.
3. Р. Вуд, Физическая оптика, ОНТИ, 1936.
4. А. Г. Бартнев, Оптические контрольно-измерительные приборы, ОНТИ, 1937.

ЗАДАЧА 156

ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО СПЕКТРОФОТОМЕТРА

В задаче предлагается построить графики зависимости пропускания светофильтра от длины волны и зависимости коэффициента поглощения от длины волны.

Описание прибора. Спектрофотометр позволяет сравнивать интенсивности света двух источников, точнее — освещенность двух его щелей в различных частях спектра. Этот прибор часто применяется также при определении ослабления света, например от поглощения, для различных длин волн. Кроме того, спектрофотометром пользуются для измерения степени поляризации света; им можно также производить измерения распределения энергии по спектру, откуда, как известно, можно в некоторых случаях определить температуру источника света.

Спектрофотометр, внешний вид которого изображен на рис. 1, состоит из неподвижной коллиматорной трубы K с двойной щелью S_1 и зрительной трубы B , вращающейся вокруг горизонтальной оси d . Вращение это производится при помощи винта M с отсчетным барабаном. Между коллиматором и зрительной трубой в кожухе T помещается призма, осуществляющая спектральное разложение. На окулярную часть трубы надевается съемный николю G (см.

задачу 142), угол поворота которого отсчитывается по лимбу при помощи лупы L .

Прибор укреплен на массивной подставке, к которой при помощи винтов r и t может привинчиваться осветительное приспособление,

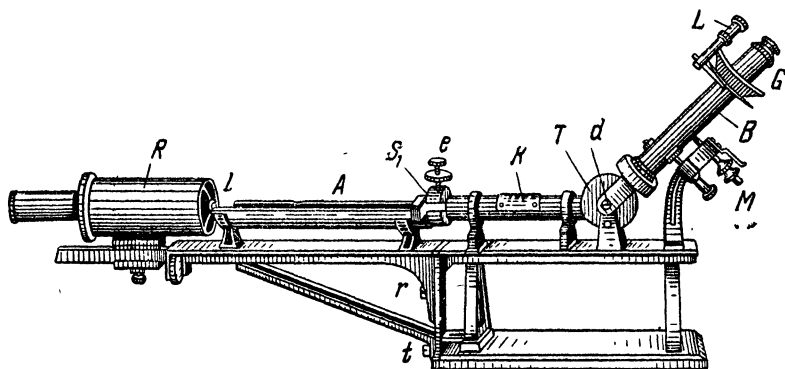


Рис. 1.

состоящее из собственно осветителя R и двух желобов A , в которые помещаются трубки с исследуемыми жидкостями.

В некоторых случаях, например, если приходится сравнивать два источника света, пользоваться осветителем нельзя. Тогда щели

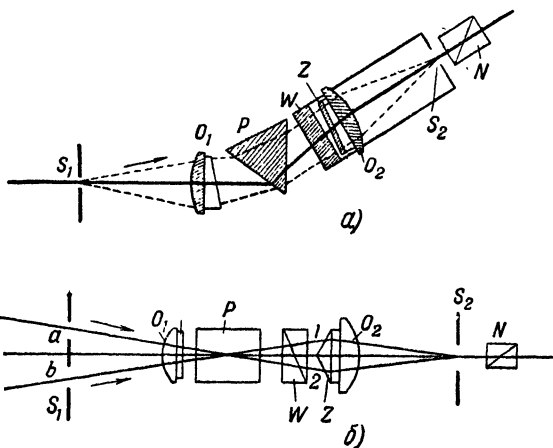


Рис. 2.

спектрофотометра освещают сбоку при помощи небольших призм полного внутреннего отражения, которые бывают помещены около щелей коллиматора на особых рычажках. Эти призмы, каждую порознь, можно отводить в стороны и закрывать ими щель.

Рассматриваемый спектрофотометр принадлежит к типу поляризационных приборов; внутреннее устройство его изображено на рис. 2 а и б, где даны схемы его вертикального и горизонтального сечений. Горизонтальная щель S_1 , состоящая из двух щелей a и b (точнее — одна и та же щель, перегородженная посередине), образует с объективом O_1 коллиматор. Призма P дает спектральное разложение, а линза O_2 фокусирует получающиеся два спектра в плоскости второй щели S_2 .

В таком виде прибор представлял бы собой просто спектроскоп, поставленный набор. Однако, кроме этих частей, имеются еще поляризационная призма W , дающая симметричный выход поляризованных лучей (призма Волластона), и бипризма Z . В результате действия поляризационной призмы каждое из изображений спектров a и b (рис. 3) разделяется на два: одно — поляризованное вертикально (a_v и b_v), другое — горизонтально (a_g и b_g). Получаются, таким образом, четыре спектра. Бипризма Z отклоняет правой своей частью все спектры влево, левой частью — вправо, так что в результате образуется восемь спектров, по четыре от каждой щели a и b , но часть из них друг на друга налагается, так что получается всего пять отдельных спектров, из которых три средние — двойные¹⁾.

Щель S_2 установлена так, что в глаз попадает только средний спектр, состоящий из спектра a_g (горизонтально поляризованного) от щели a , отклоненного левой частью бипризмы, и спектра b_v (вертикально поляризованного) от щели b , отклоненного правой частью бипризмы. Поместив глаз вблизи щели S_2 , мы увидим, таким образом, поле зрения, окрашенное в определенный спектральный цвет. Какой участок спектра попадает в поле зрения, зависит от наклона трубы B . Правая половина поля зрения освещена от щели a , и колебания электрического вектора в ней совершаются вертикально, левая освещена от щели b , и колебания электрического вектора в ней совершаются горизонтально; при этом глаз наш фокусируется на ребро бипризмы, которое и служит границей раздела поля зрения.

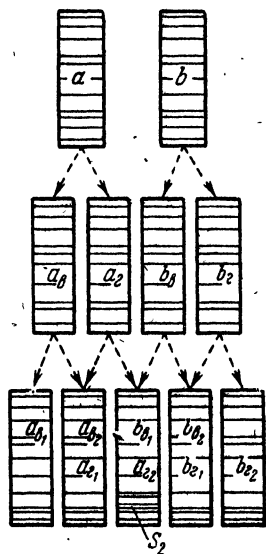


Рис. 3.

¹⁾ Эти двойные спектры совпадают лишь в некоторой плоскости вблизи щели S_2 , но так как лучи, им соответствующие, идут под некоторым углом друг к другу, то в дальнейшем они разделяются, и мы видим одну половину поля зрения, освещенную одним спектром, другую — другим.

Если перед щелью S_2 поставить николю N (рис. 2) так, чтобы направление плоскости колебаний света, пропускаемого им, составляло угол α с вертикальным направлением, то амплитуда световых колебаний правой части поля зрения будет $Oa \cdot \cos \alpha$, а левой части поля зрения $Ob \cdot \sin \alpha$ (рис. 4).

Установим николю так, чтобы яркость обеих половин поля зрения была одинакова, тогда

$$Oa \cos \alpha = Ob \sin \alpha,$$

и для отношения интенсивностей освещения щелей a и b будем иметь

$$\frac{I_a}{I_b} = \left(\frac{Oa}{Ob}\right)^2 = \operatorname{tg}^2 \alpha, \quad (1)$$

так как для естественного света отношение интенсивности пропорционально отношению квадратов любых компонент амплитуды.

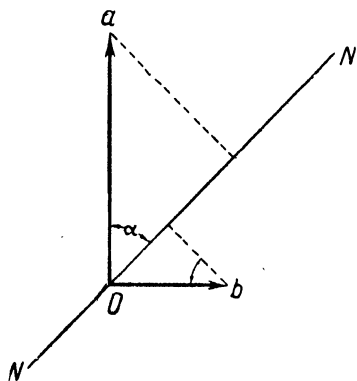


Рис. 4.

Труба B (рис. 1) может при помощи микрометрического винта M перемещаться вдоль всего спектра. Таким образом, измерение можно сделать во всех частях спектра.

Проверка установки прибора. При правильной установке спектрофотометра должны быть выполнены следующие условия:

1. Если закрыть правую щель — левая половина поля зрения должна становиться совершенно темной (при любом положении николя), и, наоборот, если закрыть левую щель — должна стать темной правая половина поля зрения.

2. На линии раздела полей не должно быть заметно никакой черной или светлой полосы. Наличие полосы может зависеть от неправильного (косого) освещения щелей; полоса при правильном освещении исчезает. Однако этот недостаток может быть вызван также неправильным положением поляризационной призмы или бипризмы.

3. При перемещении микрометрического винта M , позволяющего переходить в различные области спектра, при освещении обеих щелей одним и тем же источником света обе части поля зрения должны быть окрашены одинаково. Разницу в оттенках цветов особенно легко заметить на границе желтой и зеленой частей спектра.

Ту же проверку можно сделать иначе: осветить щель S_1 источником света с линейчатым спектром (ртутная лампа) и рассматривать полученные спектры с помощью окуляра, тогда линии в спектрах, получающихся от щелей a и b , должны совпадать друг с другом или перекрещиваться в центральной части.

4. При освещении обеих щелей одним и тем же источником света отношение яркости должно быть одинаковым по всей длине спектра, иначе говоря, положение николя при равенстве освещения полей должно оставаться тем же самым при переходе из одной спектральной области в другую. Изменение отсчета не должно превышать $3-4^\circ$.

Если же этого не получается, то приходится передвигать поляризационную призму или бипризму. *Такую фундаментальную установку прибора начинающие ни в коем случае не должны делать сами.*

Упражнение 1

Градуирование прибора

Прежде всего необходимо проградуировать прибор, т. е. привести в соответствие деления микрометрического винта (рис. 1 и 2), перемещающего трубу B , с длиной волны света, попадающего в щель S_2 ¹). В качестве источника света употребляется ртутная лампа (см. задачу 128). Осветитель снимается, и лампа приставляется вплотную к щели S_1 . Ширина щели S_1 , изменяющаяся при помощи винта e , не должна быть велика, примерно $0,2-0,3$ мм; ширина щели S_2 , регулируемая вращением особого кольца в окулярной части зрительной трубы, выбирается такой, чтобы она была немногим больше ширины видимых спектральных линий.

Сняв николь, помещают на его место окуляр, имеющийся при приборе, и, вращая микрометрический винт, передвигают трубу B вдоль спектра. Отмечают положения барабана винта, при которых спектральные линии оказываются в центре щели S_2 . Находя затем длины волн этих линий по таблицам, строят по точкам градуировочную кривую, откладывая по оси ординат длины волн, а по оси абсцисс — соответствующие им деления барабана.

В случае трудности отождествления всех видимых спектральных линий с длинами волн, указанными в таблицах, строят сначала кривую по наиболее ярким линиям, отождествление которых не встречает трудностей, и затем эту кривую уточняют по остальным линиям. Отождествление можно еще облегчить, пользуясь спектроскопом прямого зрения, снабженным шкалой длин волн. Шкалу следует установить по характерной зеленой линии ртути.

Упражнение 2

Измерение поглощения фильтров

Щель спектрофотометра должна быть освещена при помощи малого осветителя. Последний состоит из диафрагмы d (рис. 5) с прямоугольным отверстием, закрытым матовым стеклом, и большой

¹) При наличии готовой градуировочной кривой, приложенной к прибору, упражнение 1 не выполняют.

плоско-выпуклой линзы L , к плоской стороне которой приклеены две одинаковые малые, плоско-выпуклые линзы l_1, l_2 . Белый свет от электрической дуги или от обычной лампы мощностью в 200—300 *вт* освещает матовую пластинку, которая, таким образом, становится источником рассеянного света. От нее лучи света падают на систему линз L, l_1, l_2 , пройдя которую, распространяются дальше двумя отдельными пучками, оси которых параллельны, и фокусируются на щелях коллиматора.

Исследуемый фильтр ставят так, чтобы лучи, освещающие щель a , проходили через него, а лучи, освещающие щель b , падали на нее непосредственно. Вращением николя добиваются того, чтобы освещенность обеих половин поля зрения была одинакова; линия раздела при этом совершенно не видна.

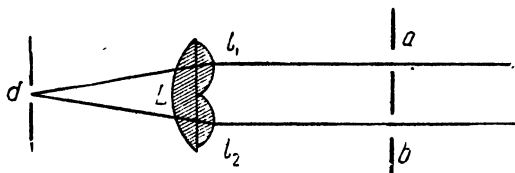


Рис. 5.

Легко видеть, что существуют четыре положения николя, при которых достигается равенство яркости освещения обеих половин поля зрения. Эти положения соответствуют углам: α , $180^\circ + \alpha$, $180^\circ - \alpha$, $360^\circ - \alpha$. При каждом наблюдении следует делать отсчеты во всех этих положениях, чтобы исключить ошибку, происходящую от того, что нуль лимба может быть смещен относительно плоскости поляризации николя, а также ошибку вследствие возможного эксцентриситета лимба. В каждом квадранте лимба надо сделать 2—5 отсчетов в зависимости от яркости освещения и взять из них среднее.

Обозначив интенсивность освещения щелей через I_a и I_b , получим отношение $I_a/I_b = \operatorname{tg}^2 \alpha$ (см. формулу (1)).

Убрав исследуемый фильтр и не меняя освещения щелей, аналогичным образом находят угол α_a ; тогда $I_a/I_b = \operatorname{tg}^2 \alpha_a$.

Отсюда легко вычислить отношение интенсивности света, прошедшего через исследуемый фильтр (I_a), к интенсивности света, падающего на него (I_{a_0}):

$$D = \frac{I_a}{I_{a_0}}.$$

Эта величина D называется *пропускаемостью* фильтра:

$$D = \frac{I_a}{I_{a_0}} = \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha}{\operatorname{tg}^2 \alpha_0}. \quad (2)$$

Сделав измерения по всему спектру, получим пропускательность D в зависимости от длины волны.

Число точек для разных длин волн должно быть достаточно велико (в среднем через каждые 10 мкм). В тех областях спектра, где поглощение резко изменяется, точки приходится брать гуще; там, где поглощение почти не изменяется, их можно брать на большем расстоянии друг от друга. Что касается угла α_0 , то его достаточно определить для четырех или пяти длин волн, так как эта величина почти не меняется.

При точных измерениях нужно сделать две серии наблюдений: поставив фильтр 1) перед щелью a и 2) перед щелью b . В последнем случае, ввиду того, что щели как бы поменялись местами, вычислять D нужно по формуле

$$D = \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha_0}{\operatorname{tg}^2 \alpha}.$$

При измерении поглощения нужно обращать внимание на ширину щелей S_1 и S_2 . При работе с веществами, поглощение которых резко меняется в каком-нибудь участке длин волн, ширина щели должна быть малой (0,1 мм); иначе в этих участках две половины поля зрения будут окрашены различно, и результаты измерений будут неточными. Вообще, при точных измерениях ширина щелей S_1 и S_2 не должна быть более 0,2 мм . Широкими щелями S_1 и S_2 можно пользоваться только в случае крайней необходимости (малая интенсивность) и при условии что интенсивность света в исследуемом спектре меняется достаточно плавно.

Чтобы определить величину ошибки измерения, сначала прологарифмируем, а затем продифференцируем равенства (2); получим

$$\frac{dD}{D} = \frac{4d\alpha}{\sin 2\alpha}.$$

Допуская, что ошибка в определении угла α равна $0,5^\circ$, получим из этой формулы, что ошибка в определении D при $\alpha = 45^\circ$ наименьшая и составляет около 0,04, или 4%. При угле α , близком к 0° или 90° , влияние ошибки при определении α на результат становится очень большим.

Упражнение 3

Измерение коэффициентов поглощения растворов

При прохождении монохроматического света через поглощающую среду интенсивность его ослабевает по закону

$$I = I_0 e^{-\beta x}. \quad (3)$$

Коэффициент поглощения β для каждого вещества, вообще говоря, зависит от длины волны λ падающего света; кривые, изображающие

зависимость β от λ , называются *кривыми поглощения*; ими характеризуются поглощающие свойства различных сред.

Для случая растворов коэффициент β , вообще говоря, зависит от концентрации их; для большинства растворов в определенных пределах изменения концентрации C коэффициент β пропорционален C . Эта зависимость дает возможность количественного определения концентрации с помощью спектрофотометра.

Измерения. Исследуемый раствор наливают в плоскопараллельный сосуд и ставят его перед одной из щелей спектрофотометра.

Так как осуществить это при помощи малого осветителя затруднительно ввиду сравнительной близости обоих световых пучков, то в этом случае приходится пользоваться большим осветителем.

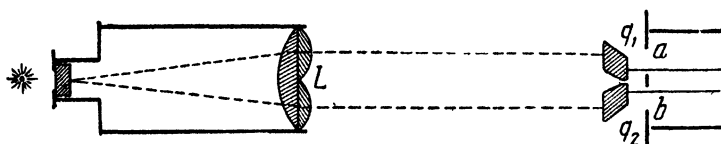


Рис. 6.

Конструкция его отличается лишь большим размером линз и наличием двух двойных призм q_1q_2 , полного внутреннего отражения (рис. 6), при помощи которых свет обоих пучков падает на щель коллиматора.

Производя измерение аналогично упражнению 2, получают величины

$$\frac{I_a}{I_b} = \operatorname{tg}^2 \alpha$$

для разных длин волн по всему спектру.

При этом нужно обратить внимание на то, что потеря света при прохождении его через сосуд вызывается не только поглощением в растворе, но и другими причинами, в основном — отражением от граней сосуда. Чтобы исключить эту ошибку, нужно сделать измерения с тем же сосудом на том же месте, но наполненным чистым растворителем (который считаем не поглощающим свет). В этом случае получим величину

$$\frac{I'_a}{I'_b} = \operatorname{tg}^2 \alpha'.$$

Так как потери на отражение в обоих случаях одинаковы, то величина $I_a : I'_a$ дает отношение интенсивностей прошедшего через сосуд и падающего на него света; на основании уравнения (3) оно равно $e^{-\beta x}$, где β — коэффициент поглощения, а x — толщина поглощающего слоя. Следовательно

$$e^{-\beta x} = \frac{I_a}{I'_a} = \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha}{\operatorname{tg}^2 \alpha'}.$$

Отсюда, логарифмируя, получим для коэффициента поглощения:

$$\beta = \frac{2}{x} (\ln \operatorname{tg} \alpha' - \ln \operatorname{tg} \alpha) = \frac{4,61}{x} (\ln \operatorname{tg} \alpha' - \ln \operatorname{tg} \alpha).$$

Результаты измерений изображают графически, построив зависимость коэффициента поглощения β от длины волны.

При изучении поглощения света жидкостями часто пользуются плоскопараллельным сосудом с дополнительным стеклянным вкладышем. В стеклянный сосуд шириной, например, 11 мм опускается на дно стеклянный кубик толщиной 10 мм. Когда налита жидкость, то в той части сосуда, где опущен кубик, слой поглощающей жидкости будет 1 мм, в другой половине — 11 мм, т. е. разность толщин составляет 10 мм. Сосуд ставят перед щелями спектрофотометра таким образом, чтобы в одну щель свет проходил через кубик, в другую же — прямо, через раствор. Обработка измерений ведется по тем же формулам, причем входящую в формулу толщину слоя нужно взять равной толщине кубика, т. е. 10 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. Курс физики, под редакцией Н. Д. Папалекси, т. II, Гостехиздат, 1947.
3. Р. Вуд, Физическая оптика, ОНТИ, 1936.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

4. Ф. Вейгер, Оптические методы в химии, Госхимтехиздат, 1933.

ЗАДАЧА 157

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСИИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ «МЕТОДОМ КРЮКОВ» РОЖДЕСТВЕНСКОГО

Цель настоящей работы: 1) наблюдение явления дисперсии и поглощения света в линейчатом спектре, 2) ознакомление с работой интерферометра Рождественского и с методом скрещенных дисперсий, 3) изучение «метода крюков» Рождественского, 4) количественное определение дисперсии паров Na вблизи их линий поглощения.

Теория. Дисперсией показателя преломления n называется зависимость его от длины волны света $n = f(\lambda)$. Нормальной дисперсией называется увеличение показателя преломления с уменьшением длины волны, т. е. $dn/d\lambda < 0$, аномальной дисперсией — уменьшение показателя преломления при уменьшении длины волны, т. е. $dn/d\lambda > 0$.

Дисперсия показателя преломления всегда связана с поглощением света. Если в каком-либо веществе наблюдается дисперсия, то, следовательно, это вещество обладает линиями или полосами поглощения. И наоборот, если имеются линии или полосы

поглощения света, то обязательно наблюдается дисперсия показателя преломления. Вне полосы поглощения как со стороны более длинных, так и со стороны более коротких волн дисперсия имеет нормальный характер; внутри полосы поглощения дисперсия имеет аномальный характер. Если имеется несколько полос поглощения, то общая картина дисперсии складывается из ряда областей аномальной дисперсии внутри каждой полосы поглощения и областей нормальной дисперсии между полосами поглощения. Величина дисперсии сильно возрастает при приближении к полосе поглощения. Исследование аномальной дисперсии всегда затруднено тем, что приходится работать вблизи полос поглощения.

Связь дисперсии и поглощения легче всего обнаружить в газах, где взаимодействием отдельных молекул между собой можно пренебречь, т. е. можно наблюдать действие электромагнитной волны на простейшую и достаточно изолированную систему электрических зарядов. В данной работе, так же как и в работах Рождественского, исследуется дисперсия паров Na.

Зельмайер связал показатель преломления вещества для данной частоты света ω ($\omega = 2\pi c/\lambda$) с собственными частотами колебаний молекул вещества и с рядом других характеристик молекул. Мы рассмотрим классическую электронную теорию дисперсии.

Для начала ограничимся наиболее простым случаем, когда вещество обладает одной линией поглощения. Будем считать, что атом состоит из одного «оптического» электрона и остатка. В этом приближении атом эквивалентен некоторому осциллятору с собственной частотой ω_0 . Под действием внешнего поля E электрон смещается на некоторое расстояние ξ . Уравнение движения электрона будет иметь вид [1]

$$\ddot{\xi} + \gamma \dot{\xi} + \omega_0^2 \xi = \frac{e}{m} E. \quad (1)$$

Здесь γ — коэффициент затухания, e — заряд электрона, m — масса электрона, E — поле световой волны частоты ω , т. е. $E = E_0 e^{i\omega t}$. Дипольный момент атома $p = e\xi$ и, следовательно, для него мы получим уравнение

$$\ddot{p} + \gamma \dot{p} + \omega_0^2 p = \frac{e^2}{m} E_0 e^{i\omega t}. \quad (2)$$

Это уравнение вынужденных колебаний. Его решение имеет вид

$$p = \frac{e^2/m}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega} E_0 e^{i\omega t}. \quad (3)$$

Диэлектрическая постоянная вещества $\epsilon = 1 + 4\pi\alpha N$, где коэффициент $\alpha = \frac{e^2/m}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega}$ — поляризуемость атома, а N — число атомов в единице объема. Таким образом

$$\epsilon = 1 + \frac{4\pi N e^2/m}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega}. \quad (4)$$

Мы видим, что ϵ — комплексная величина, следовательно, показатель преломления $\sqrt{\epsilon}$ также является комплексной величиной. Обозначим $\sqrt{\epsilon} = n - i\kappa$. Комплексный показатель преломления означает, что при распространении плоской волны в данной среде меняется не только фаза, но и амплитуда. Другими словами, для плоской волны, распространяющейся вдоль оси x , будем иметь

$$E = Ae^{-\frac{\omega}{c} \kappa x} e^{i\omega \left(t - \frac{n}{c} x\right)} \quad (c \text{ — скорость света в вакууме}).$$

Таким образом, действительная часть комплексного показателя преломления n определяет изменение фазы, а мнимая часть κ определяет изменение амплитуды. В газе второй член в выражении (4) много меньше первого, поэтому можно положить

$$\sqrt{\epsilon} = n - i\kappa \approx 1 + \frac{2\pi Ne^2/m}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (5)$$

откуда следует, что

$$n = 1 + \frac{2\pi e^2}{m} N \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}, \quad \kappa = \frac{2\pi e^2}{m} N \frac{\gamma\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}. \quad (6)$$

Иследуем полученное решение. Рассмотрим следующие случаи:

1. При $\omega \ll \omega_0$ имеем $n = 1 + \frac{2\pi e^2}{m\omega_0^2} N$; $\kappa \rightarrow 0$.
2. При $\omega \gg \omega_0$ имеем $n = 1 - \frac{2\pi e^2}{m} N \frac{1}{\omega^2 + \gamma^2}$; $\kappa \rightarrow 0$.
3. При $|\omega - \omega_0| \ll \omega_0$ обозначим $\omega - \omega_0 = \nu$, $\omega + \omega_0 \approx 2\omega_0 \approx \approx 2\omega$, тогда

$$n = 1 - \frac{\nu A}{\nu^2 + \left(\frac{\gamma}{2}\right)^2}; \quad \kappa = \frac{A \frac{\gamma}{2}}{\nu^2 + \left(\frac{\gamma}{2}\right)^2}, \quad \text{где } A = \frac{\pi e^2 N}{m\omega_0}.$$

Зависимость n и κ от ω представлена на рис. 1. Участок MN соответствует области аномальной дисперсии.

Легко обобщить полученные результаты на случай, когда вещество обладает несколькими линиями поглощения. В общем случае эти линии поглощения могут быть вызваны не только колебаниями электронов в атоме, но и колебаниями ионов в молекуле (инфракрасные полосы поглощения).

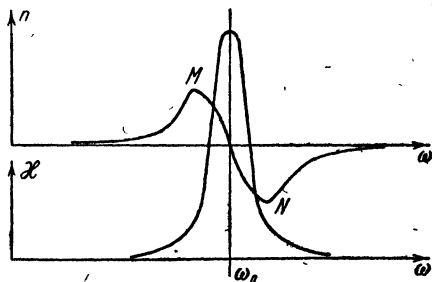


Рис. 1.

Метод исследования дисперсии показателя преломления. Для исследования дисперсии показателя преломления можно воспользоваться просто спектрографом, в котором призма сделана из

исследуемого вещества. Действительно, отклонение призмой луча данной длины волны определяется углом призмы, углом падения света на призму и, что наиболее существенно, показателем преломления призмы. Следовательно, по отклонению луча данной длины волны можно установить показатель преломления вещества, из которого сделана призма. Однако использование одного спектрографа для исследования зависимости показателя преломления от длины волны неудобно, так как в получающейся при этом картине спектрального разложения света как аргумент λ , так и функция $n(\lambda)$ откладываются вдоль одной и той же прямой — вдоль линии дисперсии спектрографа.

Значительно более удобным является способ скрещенных приборов (скрещенных дисперсий). Впервые этот способ был предложен и осуществлен А. Кундтом. В приборе Кундта свет проходил последовательно через две призмы, преломляющие ребра которых устанавливались взаимно перпендикулярно. Одна из призм была сделана из вещества с известным показателем преломления. Она растягивала спектр вдоль горизонтальной оси (вдоль оси x) так, что разным точкам этой оси соответствовали разные длины волн. Другая призма была сделана из исследуемого вещества. Отклонение света этой призмой происходило в вертикальном направлении (вдоль оси y). В результате действия обеих призм, линии дисперсии которых взаимно перпендикулярны, и получался наклонный спектр, причем координата y данного спектра определялась показателем преломления исследуемого вещества, а координата x — длиной волны света, т. е. аргумент λ и функция $n(\lambda)$ откладывались вдоль разных осей.

Впоследствии метод скрещенных приборов был усовершенствован. В частности, Д. С. Рождественский при исследовании аномальной дисперсии в парах Na скрещивал интерферометр и решетку.

В данной задаче применяется установка, аналогичная установке Рождественского, только вместо дифракционной решетки используется призмный спектрограф. Свет проходит сначала через интерферометр Рождественского, затем через спектрограф¹⁾.

Схема установки дана на рис. 2. Источником света S служит лампа ГСВД-120, дающая сплошной спектр. Конденсорная линза L_1 дает изображение источника света на щели D_1 , с помощью которой можно выделить наиболее яркую часть источника. Щель D_1 находится в фокусе объектива L_2 . После объектива L_2 параллельные

¹⁾ Действие интерферометра Рождественского аналогично действию интерферометра Жамена. При выполнении этой задачи необходимо ознакомиться с описанием задачи 134, где подробно описывается интерферометр Жамена.

пучки света от разных точек щели попадают в интерферометр, состоящий из двух полупрозрачных зеркал P_1 и P_4 и двух непрозрачных зеркал P_2 и P_3 . В интерферометре каждый луч делится на два луча, один из которых проходит через трубу, заполненную парами Na (пучок I), а другой через такую же трубу, но без паров Na (пучок II). После интерферометра эти лучи сводятся вместе. Получающаяся интерференционная картина состоит из горизонтальных полос, которые отображаются объективом L_3 на вертикальной щели спектрографа Sp . Более подробно оптическую схему интерферометра следует изучить по специальному описанию прибора. В приборе предусмотрена возможность введения компенсаторов в пучок I и в пучок II (на рис. 2 эти компенсаторы обозначены буквой К).

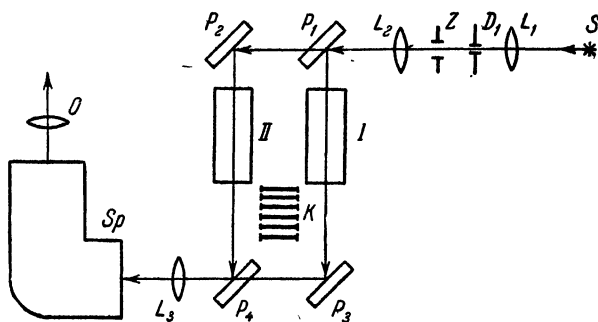


Рис. 2.

Прибор отъюстирован так, что в отсутствие паров Na и без компенсаторов нулевая полоса, т. е. полоса, для которой разность хода двух интерферирующих лучей равна нулю, проходит через середину щели. Это единственная ахроматическая полоса и ее легко отличить от всех других по отсутствию окраски. Выше и ниже ее располагаются полосы ± 1 -го, ± 2 -го и т. д. порядков. Расстояние между полосами зависит от длины волны. Чем меньше длина волны, тем интерференционные полосы чаще. Рассмотрим для примера полосу $+1$ -го порядка, расположенную выше нулевой полосы. Эта полоса уже не будет ахроматичной. Все длины волн, присутствующие в источнике света, растянутся в этой полосе по вертикали так, что нижний конец ее будет фиолетовым, а верхний — красным. Аналогичная картина получится для всех интерференционных полос, расположенных ниже нулевой полосы. Все полосы, расположенные выше нулевой полосы, будут иметь обратное расположение спектра, т. е. верхний конец каждой полосы будет фиолетовым, а нижний — красным. Вертикальное расположение спектра, получаемого в каждой интерференционной

полосе, означает, что линия дисперсии интерферометра вертикальна (вдоль оси y).

После интерферометра свет проходит через спектрограф, щель и преломляющие ребра призм которого вертикальны. Линия дисперсии спектрографа горизонтальна, т. е. спектр растягивается в горизонтальном направлении (вдоль оси x).

В результате действия обоих приборов в плоскости кассеты спектрографа получаются искривленные светлые и темные полосы. Цвет светлых полос меняется от красного до фиолетового. Соответствующая картина приведена на рис. 3, где 0 — нулевая полоса, 1 — полосы первого порядка, 2 — полосы второго порядка. Эта картина либо наблюдается в окуляр O , либо фотографируется на фотопластинку. Для удобства фотографирования между объективом L_2 и щелью D_1 устанавливается затвор Z (рис. 2).

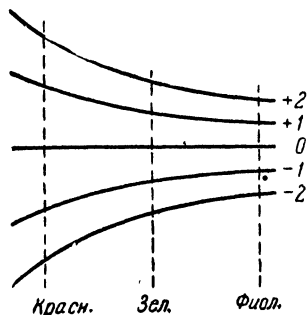


Рис. 3.

Если на щель спектрографа попадают интерференционные полосы низких порядков, то наклон светлых и темных полос, наблюдаемых в окуляр O , будет небольшой. Если же на щель спектрографа попадают полосы высоких порядков (т. е. нулевая полоса находится либо ниже щели, либо выше ее), то наклон наблюдаемых полос сильно увеличивается. Величина наклона опреде-

ляется отношением дисперсий интерферометра и спектрографа¹⁾.

Рассмотрим сначала картину, которая получается, когда пары N отсутствуют и компенсаторы не введены. Пусть нулевая полоса проходит через середину щели. Ось y направим вдоль щели спектрографа, а начало координат поместим в середине щели. Тогда для нулевой полосы координата y_0 не зависит от λ и равна 0, т. е. $y_0(\lambda) = 0$. Для полосы k -го порядка координата y_k зависит от λ . В фокальной плоскости камеры спектрографа, в картине, которая наблюдается в окуляр O , координата k -й полосы $y_k^{\text{сп}}(\lambda)$ будет пропорциональна $y_k(\lambda)$. Коэффициент пропорциональности равен увеличению спектрографа. Изменив масштаб для $y_k^{\text{сп}}$, мы можем считать $y_k^{\text{сп}} = y_k$ и в дальнейшем индекс «сп» опустить.

Пусть Δ — разность хода двух лучей в интерферометре. Дисперсия интерферометра такова, что координату y в хорошем приближении можно считать пропорциональной разности хода двух лучей, т. е. $y = b\Delta$, где b — коэффициент пропорциональности, величина которого зависит от юстировки прибора, но при данной

¹⁾ Дисперсия интерферометра пропорциональна порядку интерференции k .

юстировке постоянна¹⁾. Поэтому координата k -й полосы будет

$$y_k(\lambda) = b\Delta_k(\lambda) = bk\lambda. \quad (7)$$

Если на пути одного из лучей поместить пластинку с показателем преломления n и толщиной d , то будет введена дополнительная разность хода $\Delta' = \pm[n(\lambda) - 1]d$. Знак перед скобкой зависит от того, на пути какого луча (I или II) будет помещена пластинка. Внесение такой пластинки переместит нулевую полосу вверх или вниз в зависимости от знака Δ' . Картина, которая получится после введения дополнительной разности хода Δ' , показана на рис. 4, *a*. На рисунке приводится вид полос, когда большая дополнительная разность хода введена в пучок I . Нулевая полоса настолько опустилась вниз, что не попадает на щель, и мы наблюдаем только полосы, для которых k — большое положительное число. На рис. 4, *b* изображен противоположный случай, когда та же дополнительная разность хода введена в пучок II . В этом случае нулевая полоса находится много выше щели, и мы наблюдаем лишь полосы, для которых k — большое отрицательное число. Если вносимая дополнительная разность хода невелика, то нулевая полоса останется в пределах щели. Ее координата будет

$$y'_0 = b\Delta' = \pm b[n(\lambda) - 1]d. \quad (8)$$

В спектрографе эта полоса вычертит в некотором масштабе кривую дисперсии n^2). Вместе с перемещением нулевой полосы переместятся и все полосы. Координата k -й полосы определится соотношением

$$y'_k(\lambda) = b(\Delta_k + \Delta') = b[k\lambda \pm (n - 1)d]. \quad (9)$$

Наклон полосы определяется производной

$$\frac{dy'_k}{dx} = \frac{dy'_k}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dx} = b \left(k \pm \frac{dn}{d\lambda} d \right) \frac{d\lambda}{dx}. \quad (10)$$

В данной задаче в пучок I помещается вакуумная печь длиной L с парами Na. Картина интерференционных полос приведена на

¹⁾ Это приближение тем лучше, чем меньше интервал длин волн рассматривается в задаче.

²⁾ Постоянный член bd может быть учтен, если известен показатель преломления для какой-нибудь длины волны.

рис. 5. Наклон полос будет определяться выражением

$$\frac{dy_k}{dx} = b \left(k \pm \frac{dn}{d\lambda} L \right) \frac{d\lambda}{dx},$$

здесь n — показатель преломления паров Na.

Таким образом скрещение дисперсий, даваемых интерферометром и спектрографом, позволяет наблюдать характерный ход дисперсии вблизи линии поглощения. Загибы интерференционных полос отчетливо демонстрируют резкие изменения показателя преломления вблизи линии поглощения¹⁾.

Как указано выше, ординаты участков интерференционных полос, смещенных из нулевого положения, пропорциональны значениям показателя преломления n . Поэтому искривление интерференционных полос может быть в принципе использовано для количественного изучения хода дисперсии вблизи линии поглощения. Однако прямые измерения изгибов интерференционных полос не могут быть точными. В самом деле, достаточно сложно измерять и ординату круто изменяющейся функции и определять (в длинах волн) абсциссы тех точек интерференционных

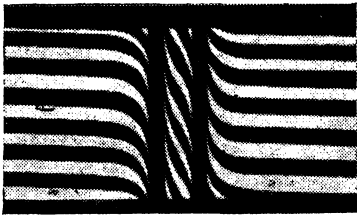


Рис. 5.

полос, для которых найдены ординаты. Наконец, круто загнутые вблизи линии поглощения интерференционные полосы сливаются между собой, что сильно затрудняет измерения.

Поэтому в настоящее время прямые наблюдения интерференционной картины в двух скрещенных приборах сохраняют за собой все значение поучительной демонстрации важного физического явления, но не служат для точных измерений.

«Метод крюков» Рождественского. Рождественский усовершенствовал метод скрещенных приборов, дополнив его еще особым компенсационным приемом. Известно, что при измерениях в самых различных областях физики компенсационные методы оказываются, как правило, весьма эффективными. Так оказалось и в данной оптической задаче. Огромная заслуга Рождественского заключалась в том, что он нашел возможным указать метод компенсационных измерений в таком сложном явлении, наблюдаемом при помощи тонкой оптической аппаратуры.

¹⁾ Загибы интерференционных полос вблизи линий поглощения не следует смешивать с «крюками» Рождественского, о которых речь будет идти ниже. Загибы интерференционных полос есть результат хода явления. «Крюки» Рождественского, как мы увидим ниже, есть результат применения специального метода измерений дисперсии.

Перейдем теперь непосредственно к описанию «метода крюков» Рождественского. Отметим, что это название было дано методу самим автором.

Введем одновременно в пучок *I* пары Na, а в пучок *II* — стеклянную пластинку. В этом случае аналогично (9) мы будем иметь

$$y_k(\lambda) = b[k\lambda + (n-1)L - (n_{ст} - 1)d],$$

Здесь $k = k_{ст} - |k_{Na}|$.

Наклон полос интерференции определится соотношением

$$\frac{dy_k}{dx} = b \left[k + \frac{dn}{d\lambda} L - \frac{dn_{ст}}{d\lambda} d \right] \frac{d\lambda}{dx}. \quad (11)$$

Здесь n — показатель преломления паров Na, L — длина печи с парами Na, $n_{ст}$ — показатель преломления стеклянной пластинки, а d — ее толщина.

В узкой области спектра около линий поглощения паров Na $\frac{dn_{ст}}{d\lambda} \ll \frac{dn}{d\lambda}$ и последним членом можно пренебречь. Далее, k определяет порядок интерференции. Но так как от аномальной дисперсии паров полосы перемещаются на десятки полос, а от введения стеклянной пластинки — на тысячи, то $(k_{Na}) \ll (k_{ст})$; k практически определяется только стеклянной пластинкой, т. е.

$$k = \frac{(n_{ст} - 1)d}{\lambda}.$$

Вдали от полосы поглощения $k \gg \frac{dn}{d\lambda} L$ и наклон полос определяется стеклянной пластинкой. Вблизи полосы поглощения $\frac{dn}{d\lambda} L \gg k$ и наклон определяются парами Na. Для некоторой длины волны

$$k = \frac{dn}{d\lambda} L,$$

т. е.

$$\frac{dn}{d\lambda} L = - \frac{n_{ст} - 1}{\lambda} d. \quad (12)$$

В этой точке касательная к полосе интерференции будет горизонтальна. Картина примет вид, указанный на рис. 6. Из рисунка отчетливо видно, что максимумы и минимумы имеют вид крюков и мы, по примеру Рождественского, будем называть их дальше «крюками». Если изменить толщину d , то равенство будет выполнено для другой длины волны λ , т. е. «крюки» сместятся. Так, меняя d , можно получить зависимость

$$\frac{dn}{d\lambda} = f(\lambda).$$

Не представляет труда определить абсциссу, т. е. длину волны, соответствующую каждому «крюку». Задача прямых измерений n

вблизи линий поглощения заменена задачей измерения L , d и $n_{ст}$ для стекла, не имеющего никаких линий поглощения в исследуемом участке спектра. Правда, теперь мы не находим сразу значения показателя преломления n для паров Na, а лишь значение $dn/d\lambda$. Определение n требует еще знания n_0 в какой-то точке спектра и интегрирования значений $dn/d\lambda$ дальше по спектру. Однако возможность точных измерений $dn/d\lambda$ полностью окупает эту дополнительную работу. Единственное нужное значение n_0 может быть легко измерено достаточно далеко от линии поглощения.

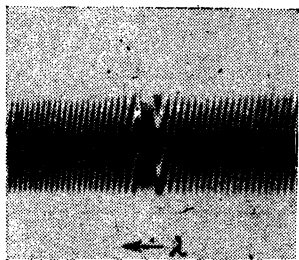


Рис. 6.

Определение дисперсии паров атомов Na. В настоящей задаче мы ограничиваемся отысканием только значений $dn/d\lambda$, т. е. дисперсии показателя преломления паров Na.

Для получения паров Na служит печь со стеклянными окошками, помещаемая в пучок I. В печи имеется металлический Na, который испаряется при температуре $T \approx 400^\circ \text{C}$. Для того чтобы предотвратить реакцию окисления паров Na, перед нагревом печи ее следует откачать до давления $\sim 10^{-2}$ мм рт. ст. Это делается с помощью форвакуумного насоса. Чтобы не вводить дополнительной разницы хода, получающейся при откачке печи I, в пучок II помещается аналогичная трубка II, имеющая ту же длину, что и печь I. Печь I и трубка II откачиваются одновременно до одного и того же давления, контролируемого термомпарным вакуумметром. После того как давление упадет до 10^{-2} мм рт. ст., включают печь I и поднимают температуру до температуры испарения Na. Регулируя с помощью автотрансформатора ток в обмотке печи; добиваются нужного давления паров Na (около 0,5 мм рт. ст.). При нагреве печи все время наблюдают за интерференционной картиной. Интерференционные полосы начинают искривляться одновременно с появлением полос поглощения. Когда линии поглощения станут отчетливо видны, вводят различные компенсаторы и наблюдают «крюки».

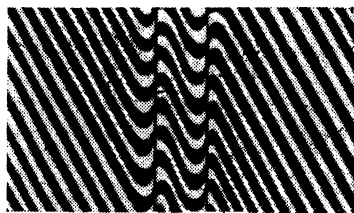


Рис. 7.

Так как пары Na имеют две близкие полосы поглощения, то при введении стеклянной пластинки толщиной d условие (12) будет выполнено для четырех длин волн λ^I , λ^{II} , λ^{III} и λ^{IV} , т. е. будут наблюдаться четыре «крюка». Два «крюка» расположены вне ин-

тервала длин волн между линиями поглощения Na (внешние «крюки»), два других — внутри этого интервала (внутренние «крюки»). Такая картина, изображенная на рис. 7, получается лишь при большой дисперсии спектрального прибора, скрещенного с интерферометром¹⁾. В нашей задаче спектральным прибором является призменный спектрограф с малой дисперсией. Поэтому мы не видим внутренних «крюков» и можем определить лишь положение внешних «крюков» (см. рис. 6).

В задаче требуется найти зависимость дисперсии показателя преломления паров Na от длины волны света, т. е. зависимость $dn/d\lambda$ от λ . Для этого нужно получить снимки «крюков» при различных толщинах стеклянной пластинки, вводимой во второе плечо интерферометра Рождественского. Пластинки сделаны из стекла, показатель преломления которого $n_{ст}$ зависит от длины волны света λ следующим образом:

$$n_{ст} = 1,498 + \frac{79,604}{\lambda - 1,545}, \quad (13)$$

где λ — длина волны в Å.

Используя формулы (12) и (13), мы легко можем определить значение $dn/d\lambda$, соответствующее тем длинам волн, для которых выполнено условие (12).

Далее следует определить значения длин волн, соответствующих наружным «крюкам» λ^I и λ^{IV} . Это делается следующим образом.

Расстояние между наружными «крюками» измеряется на компараторе. Дисперсия спектрографа в этой области равна 25 Å/мм . Используя это значение дисперсии, получают разность длин волн, соответствующих наружным «крюкам» в ангстремах ($\lambda^{IV} - \lambda^I$). Эта разность складывается из трех величин: 1) разности длин волн первой линии поглощения и первого «крюка» $\lambda_1 - \lambda^I$, 2) разности длин волн четвертого «крюка» и второй линии поглощения $\lambda^{IV} - \lambda_2$ и 3) разности длин волн между двумя линиями поглощения $\lambda_2 - \lambda_1$

$$\lambda^{IV} - \lambda^I = (\lambda^{IV} - \lambda_2) + (\lambda_2 - \lambda_1) + (\lambda_1 - \lambda^I).$$

Малая дисперсия спектрографа не позволяет производить измерение разности $\lambda^{IV} - \lambda^I$ с большой точностью. Учитывая это обстоятельство, можно считать, что $\lambda^{IV} - \lambda_2 \approx \lambda_1 - \lambda^I$ ²⁾. Поэтому $\lambda^I \approx \lambda_1 - [(\lambda^{IV} - \lambda^I) - (\lambda_2 - \lambda_1)]/2$. Аналогично можно вычислить λ^{IV} . Разность длин волн линий поглощения Na равна $\lambda_2 - \lambda_1 = 6 \text{ Å}$.

Результаты работы оформляют в виде графика, где по оси абсцисс откладываются длины волн в ангстремах, а по оси ординат — значение $(-dn/d\lambda)$ в см^{-1} .

1) Рис. 7 взят из книги Рождественского (см. [2]).

2) Это равенство является неточным в силу того, что обе линии поглощения имеют разную интенсивность.

Практические указания при выполнении задачи. Включение и выключение установки производится только в присутствии преподавателя или лаборанта. Включение и выключение установки производят в следующем порядке:

1) Включают насос. Приблизительно через 10—15 мин. поворачивают кран, соединяющий насос с вакуумной печью.

2) Включают вакуумметр и ждут, пока его показания не поднимутся до 5—6 *мм*, что соответствует давлению $3 \cdot 10^{-2}$ *мм рт. ст.*

3) Включают воду, которая охлаждает шлифы и вмазанные в них окна печи. Струя воды, вытекающая из установки, должна быть толщиной 5—6 *мм*. Вода должна течь спокойно, без пузырей.

4) Включают печь. Устанавливают ток нагрева печи 3—3,2 *а*.

5) Через 15—20 мин. после включения печи снова поворотом крана отключают систему от насоса, но самый насос оставляют работать.

6) Включают лампу ГСВД, дающую непрерывный спектр в видимой области. Для этого провода лампы соединяют с сетью постоянного тока напряжением 110 в. При помощи реостатов устанавливают ток через лампу 3,5 *а*.

7) Наблюдают в окуляр, расположенный на выходе спектрографа, за интерференционной картиной, получаемой при введении различных компенсационных пластин (необходимые комбинации компенсационных пластин приведены на установке). Одновременно следят за появлением линий поглощения паров Na в сплошном спектре лампы.

8) После того, как показания на вакуумметре станут 0,1—0,2 *мм* и линии поглощения вместе с «крюками» станут отчетливо видны в окуляр, снова визуально наблюдают изменение интерференционной картины при различных положениях компенсаторов.

9) Производят фотографирование наблюдаемой интерференционной картины.

Время экспозиции каждого спектра — 20 сек. Чтобы не наложить спектр на спектр, кассету следует передвигать через два деления, нанесенные на рамку кассетной части спектрографа. Используются пластинки «панхром», которые обрабатываются в полной темноте: время проявления — 4 мин., время фиксирования — 5—10 мин. Убедившись, что съемка прошла успешно, выключение установки производят в следующем порядке:

1) Выключают ток в обмотке печи.

2) Выключают насос и впускают в него воздух. Печь с парами натрия остается при этом под вакуумом. Водяное охлаждение продолжает работать в течение 40 мин.

По мере понижения давления паров Na в печи линии поглощения и «крюки» пропадают. Следует проследить за исчезновением «крюков». После исчезновения линий поглощения выключить лампу.

Технические данные установки. Задача поставлена с интерферометром Рождественского и спектрографом ИСП-51, с камерой $f = 800$ мм. Источником света служит лампа ГСВД. Вакуум в трубках I и II создается форвакуумным насосом РВН-20.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. Д. С. Рождественский, Аномальная дисперсия, Изд. АН СССР, 1950.
3. А. Зоммерфельд, Оптика, ИЛ, 1954.
4. М. В. Волькенштейн, Молекулярная оптика, Гостехиздат, 1951.

ЗАДАЧА 158

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ЗЕЕМАНА

Настоящая задача посвящена изучению расщепления спектральных линий в магнитном поле (эффект Зеемана), ознакомлению с работой интерференционного спектрографа — пластинки Льюмера — Герке и определению отношения заряда электрона к его массе (e/m) оптическим методом.

Исследование проводится на спектральной линии кадмия $\lambda = 6438,47$ Å, дающей нормальный эффект Зеемана. Эта линия, лежащая в красной области спектра, очень узка, и ее компоненты сверхтонкой структуры расположены очень тесно. Она является так называемой нормалью первого рода, т. е. ее длина волны была непосредственно сравнена Майкельсоном с длиной эталонного метра. Такое сравнение оказалось возможным потому, что излучение этой линии обладает очень высокой степенью монохроматичности и допускает поэтому получение интерференции, соответствующей огромной разности хода до миллиона длин волн и более.

Теория нормального эффекта Зеемана, построенная на основе классических электронных представлений, подробно излагается в любом курсе оптики, и ознакомление с ней предполагается безусловно необходимым для выполнения настоящей работы (см., например, [1]). Наблюдение в нашем случае ведется перпендикулярно направлению магнитного поля, что, как известно, соответствует расщеплению спектральной линии на три компоненты. Величина расщепления линейно зависит от напряженности магнитного поля H и определяется выражением

$$\Delta\omega = \pm \frac{1}{2} \frac{e}{m} H,$$

где ω — циклическая частота спектральной линии.

Переходим непосредственно к описанию экспериментальной установки, на которой выполняется предлагаемая работа.

Описание установки. Схема установки показана на рис. 1. Источником света в нашем случае является газоразрядная кадмиевая лампа. Питание лампы производится от сети переменного тока напряжением 120 в через реостат, ограничивающий ток через лампу. В рабочем режиме сила тока должна равняться 1,25 а. Поджиг лампы осуществляется с помощью высокочастотной искры. Обращаем внимание на то обстоятельство, что для разгорания лампы

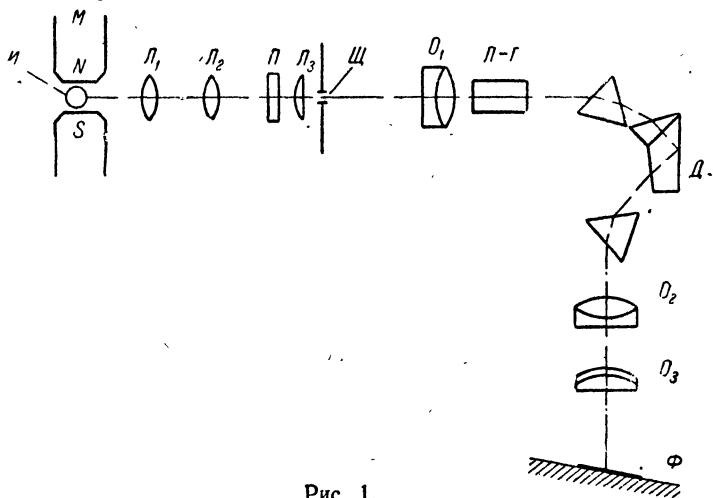


Рис. 1.

необходимо 7—10 мин.; установление нормального режима можно контролировать по появлению характерного и интенсивного зелено-голубого свечения.

Лампа И располагается между полюсами сильного электромагнита М. Напряженность магнитного поля может изменяться от 0 до ~ 7500 э с помощью реостатов, регулирующих ток, протекающий через обмотки электромагнита (максимальная величина тока не должна превышать 5 а). Ток через электромагнит необходимо включать и выключать при полностью введенных реостатах. В противном случае экстраток размыкания может вызвать пробой обмоток магнита. Ввиду технических трудностей, связанных с измерением напряженности магнитного поля во время работы (необходимость вынимать кадмиевую лампу для определения напряженности поля), к работе прилагается градуировочный график, выражающий зависимость напряженности магнитного поля от силы тока, протекающего через обмотки электромагнита. Свет от источника И концентрируется с помощью трехлинзового конденсора (Л₁, Л₂, Л₃) на входную щель Щ спектрального прибора.

Для проведения поляризационных измерений перед щелью спектрального прибора расположен поляроид P , который может свободно вращаться вокруг оптической оси системы.

Ввиду малости эффекта, исследуемого в настоящей работе, спектральным прибором является прибор высокой разрешающей силы и большой дисперсии — пластинка Льюмера — Герке (см. [1]). Как известно, в случае пластинки Льюмера — Герке наблюдаемые интерференционные спектры соответствуют огромной разности хода, т. е. являются спектрами высокого порядка (в нашем случае $m \approx \approx 30\,000$). Ввиду этого предельная ширина спектрального интервала $\Delta\lambda$, при которой еще возможно получение неперекрывающихся максимумов, соответствующих разным длинам волн, очень мала. Этот интервал носит название дисперсионной области интерференционного спектроскопа, и его величина определяется выражением

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{m},$$

где λ — длина волны исследуемого участка спектра. Таким образом, из изложенного выше вытекает необходимость дополнительной монохроматизации исследуемого излучения. В нашем случае используется принцип скрещенных спектральных приборов, а именно пластинки Льюмера — Герке ($L - G$) и трехпризменного стеклянного спектрографа (D, O_1, O_2, O_3). Термин «скрещенные приборы» означает, что направления их дисперсий взаимно перпендикулярны, причём функция спектрографа заключается в раздвигании спектральных линий различных длин волн по горизонтальному направлению и устранению таким образом возможного перекрытия интерференционных максимумов, соответствующих различным спектральным линиям. Обращаем внимание на то обстоятельство, что при работе по методу скрещенных приборов месторасположение интерференционного спектроскопа несущественно. Он может находиться или после коллиматорного объектива O_1 спектрографа, или после диспергирующей (призменной) части D , или, наконец, после касетной плоскости спектрографа (в последнем случае необходим дополнительный объектив, посылающий приблизительно параллельный пучок света на интерференционный спектроскоп). В нашем случае пластинка Льюмера — Герке расположена между коллиматорным объективом спектрографа и призмами (рис. 1). Ввиду большой чувствительности пластинки Льюмера — Герке к колебаниям окружающей температуры, вызывающим смещение спектра во время экспозиции и его искажение, пластинка помещена в специальный кожух, защищающий ее от вредных температурных воздействий. (С внешним видом пластинки можно ознакомиться по образцу, прилагаемому к работе.) В касетной плоскости спектрографа получается весь видимый спектр с высоким разрешением в направлении дисперсии пластинки Льюмера — Герке. Преимуществом

описанной установки является возможность наблюдения эффекта Зеемана и на других линиях кадмиевого спектра. Однако эти линии обладают аномальным эффектом, теоретическое объяснение которого требует привлечения квантовомеханических представлений. Ввиду

того, что эти вопросы выходят за рамки общего курса физики, все измерения проводятся только на линии $6438,47 \text{ \AA}$. Необходимо отметить, что в осуществленной установке пластинки наблюдаются интерференционные максимумы, расположенные только по одну сторону от центра интерференционной картины (рис. 2). Такая установка связана с тем обстоятельством, что пластинка Люммера — Герке обладает весьма большой угловой дисперсией и для получения достаточного количества интерференционных максимумов, расположенных по разные стороны от центра интерференционной картины, требуется, чтобы входная щель спектрографа была очень высокой. При такой высоте щели камерный объектив спектрографа вносит существенные искажения в наблюдаемую картину. Кроме того, большая центральная часть интерферограммы, где нет интерференционных максимумов, вообще не используется.

Рис. 2. Интерференционные спектры при скрещенных дисперсиях пластинки Люммера — Герке и спектрографа:

а) спектры в отсутствие магнитного поля; б) расщепление спектральной линии при наложении магнитного поля.

Приводим основные характеристики пластинки, рассчитанные для длины волны $6438,47 \text{ \AA}$: дисперсионная область — $0,265 \text{ \AA}$, угловая дисперсия — $10^{-2} \text{ рад/}\text{\AA}$, разрешающая способность — $2 \cdot 10^5$.

Упражнение 1

Качественное исследование влияния магнитного поля на структуру спектральной линии и состояния поляризации компонент структуры

Заряжают две кассеты фотопластинками, которые следует получить у лаборанта практикума. С помощью лаборанта зажигается кадмиевая лампа. После установления нормального режима ее горения визуально, при помощи лупы, наблюдается вид интерференционного спектра в отсутствие магнитного поля.

Включается ток через обмотки электромагнита. Постепенно увеличивая ток, наблюдают изменения, происходящие со спектральной линией. При напряженности магнитного поля $\sim 4000 \text{ э}$ уста-

навливают перед щелью спектрографа поляроид, на оправе которого указано направление колебаний электрического вектора в световой волне, пропущенной через поляроид. Вращая поляроид, определяют состояния поляризации центральной и двух боковых компонент.

После проведения визуальных наблюдений вставляют кассету с фотопластинкой Φ в кассетную часть спектрографа и производят на ней четыре снимка в следующей последовательности:

1. В отсутствие магнитного поля (без поляроида).
2. При наложении магнитного поля ~ 4000 эрстед (без поляроида).
3. При наложении того же поля с поляроидом, расположенным так, что он пропускает только центральную компоненту спектральной линии (π -компоненту).
4. При наложении поля с поляроидом, расположенным так, что оказываются пропущенными только боковые компоненты (σ -компоненты).

Времена экспозиции, положения кассеты, соответствующие разным снимкам, и режим обработки фотопластинки указаны в таблице, прилагаемой к установке. В настоящей работе используются панхроматические фотопластинки. Поэтому заряжать кассету и проявлять фотопластинку необходимо в полной темноте. После фиксирования фотопластинка должна быть тщательно промыта в холодной проточной воде и высушена. Полученная пластинка прилагается к отчету о работе.

Упражнение 2

Исследование зависимости величины расщепления спектральных линий от напряженности магнитного поля и определение отношения заряда электрона к его массе

С помощью поляроида выделяются только σ -компоненты исследуемой спектральной линии. На фотопластинку снимают последовательно спектр без наложения магнитного поля и при наложении поля, соответствующего току через обмотки электромагнита 1, 2, 3, 4 и 5 а . Экспозиции и положения кассеты указаны в таблице, прилагаемой к установке. Обработка фотопластинки аналогична описанной в упражнении 1.

После того, как пластинка высушена, приступают к определению величины расщепления, соответствующего различной напряженности магнитного поля.

Обработка результатов производится следующим образом. На компараторе определяют положения компонент линии в разных порядках интерференции (см. задачу 151). Необходимо промерять по 5 порядков для каждой спектрограммы.

Метод расчета односторонних максимумов основан на том, что с достаточно высокой степенью точности можно принять, что

максимумы пластинки Льюмера — Герке обладают параболической дисперсией, т. е. расстояние между максимумами изменяется по параболическому закону (см. [2], гл. 12). Вывод расчетной формулы довольно сложен, и мы приводим здесь только окончательный результат. Пусть $A_1, B_1; A_2, B_2; A_3, B_3$ и т. д. — отсчеты на компараторе для компонент в последовательных порядках. Введем обозначения:

$$\begin{aligned} A_2 - A_1 &= \Delta_{1A}, & B_3 - B_2 &= \Delta_{2B}, \\ A_3 - A_2 &= \Delta_{2A}, & B_1 - A_1 &= \Delta_1, \\ B_2 - B_1 &= \Delta_{1B}, & B_2 - A_2 &= \Delta_2. \end{aligned}$$

Тогда расстояние между компонентами A и B в долях дисперсионной области пластинки Льюмера — Герке определится следующим выражением:

$$dn_{AB} = \frac{\frac{1}{\Delta_{1A}} + \frac{1}{\Delta_{1B}}}{\frac{1}{\Delta_1} + \frac{1}{\Delta_2}} = \frac{\frac{1}{\Delta_{2A}} + \frac{1}{\Delta_{2B}}}{\frac{1}{\Delta_2} + \frac{1}{\Delta_3}} = \dots$$

Для удобства вычислений предлагаем свести результаты измерений в следующую таблицу (одновременно приводим пример расчета):

A_i	6,70	7,50	8,20	8,83	9,40
B_i	6,99	7,75	2,42	3,02	3,58
Δ_i	0,29	0,25	0,22	0,19	0,18
Δ_{iA}	0,80	0,70	0,63	0,57	
Δ_{iB}	0,76	0,67	0,60	0,56	

Внутри каждого треугольника расположены данные, необходимые для вычисления одного значения расщепления:

$$\begin{aligned} dn_{AB_1} &= \frac{\frac{1}{0,80} + \frac{1}{0,76}}{\frac{1}{0,29} + \frac{1}{0,25}} = 0,34, & dn_{AB_2} &= \frac{\frac{1}{0,63} + \frac{1}{0,60}}{\frac{1}{0,22} + \frac{1}{0,19}} = 0,33, \\ dn_{AB_3} &= \frac{\frac{1}{0,70} + \frac{1}{0,67}}{\frac{1}{0,25} + \frac{1}{0,22}} = 0,34, & dn_{AB_4} &= \frac{\frac{1}{0,57} + \frac{1}{0,56}}{\frac{1}{0,19} + \frac{1}{0,18}} = 0,33, \\ & & dn_{AB_{cp}} &= 0,335. \end{aligned}$$

Напоминаем, что вычисленная величина расщепления выражена в долях дисперсионной области. Поэтому для определения расщепления в ангстремах необходимо умножить $dn_{AB,CP}$ на величину дисперсионной области $\Delta\lambda$, которая в нашем случае равна $0,265 \text{ \AA}$. Таким образом, получим $\delta\lambda = dn_{AB,CP} \cdot \Delta\lambda = 0,335 \cdot 0,265 = 0,089 \text{ \AA}$. По результатам вычислений необходимо построить график, выражающий зависимость величины расщепления от напряженности магнитного поля. Напряженность магнитного поля определяется из графика зависимости напряженности поля от силы тока, протекающего через обмотки магнита. График прилагается к установке.

Надо иметь в виду, что величины вычисленных расщеплений соответствуют расстояниям между двумя крайними компонентами (σ -компонентами). Поэтому полученные результаты для $\delta\lambda$ необходимо разделить на 2, чтобы получить разность длин волн между смещенной и несмещенной компонентами. График зависимости расщепления от напряженности поля строится в координатах $\delta'\lambda$; H , где $\delta'\lambda = \delta\lambda/2$. После того, как вычислены значения $\delta'\lambda$, можно найти отношение e/m по формуле

$$\delta'\lambda = \frac{\lambda^2}{4\pi c} \frac{e}{m} H,$$

где c — скорость света. Расчеты надо произвести для всех четырех значений H и взять среднее из полученных результатов.

Упражнение 3

Определение практической разрешающей силы пластинки Льюмера — Герке

Приведенное выше значение разрешающей силы пластинки Льюмера — Герке вычислено в предположении строгой монохроматичности спектральной линии (линия обладает нулевой шириной) и отсутствия всяких дефектов в изготовлении спектрального прибора. Определенная таким образом разрешающая сила носит название *теоретической разрешающей силы* и может несколько отличаться от истинной или *практической разрешающей силы* для линий, обладающих конечной шириной. Для красной линии кадмия, ввиду ее узости, это отличие невелико.

Для определения практической разрешающей силы поступают следующим образом. С помощью поляроида выделяются только σ -компоненты исследуемой спектральной линии. Медленно увеличивают ток через обмотки электромагнита и с помощью лупы наблюдают за поведением спектральной линии. Фиксируют момент, когда линия становится видимой как дублет (двойная линия), и отмечают значение силы тока через обмотки магнита, соответствующее этой напряженности магнитного поля. С помощью градуировочного

графика, прилагаемого к работе, определяют напряженность магнитного поля, при которой обе компоненты видны раздельно. По графику, полученному в упражнении 2 и выражающему зависимость величины расщепления от напряженности магнитного поля, определяют минимальное наблюдаемое расщепление. Напомним, что на этом графике отложена величина расщепления, соответствующая расстоянию от несмещенной компоненты до смещенной. Поэтому значение, взятое из графика, надо умножить на 2.

Величина, определенная описанным выше способом, является пределом разрешения пластинки Люммера — Герке, применяемой в настоящей задаче для исследуемой спектральной линии. Как известно, для получения разрешающей силы надо разделить длину волны изучаемой спектральной линии на предел разрешения.

Технические данные установки. Источником света в настоящей задаче является спектральная кадмиевая лампа типа ДКДС-20, изготовленная на Московском электроламповом заводе. Лампа работает в сети переменного тока напряжением 120 в, ток через лампу 1,25 а.

В задаче применяется электромагнит системы Акулова, выпускаемый большими сериями в экспериментальных мастерских МГУ. В качестве спектрального прибора используется стеклянная пластинка Люммера — Герке, изготовленная в Государственном оптическом институте (интерферометр ИТ-19), в сочетании со спектрографом ИСП-51. Фокусное расстояние камерного объектива спектрографа 270 мм. Пластинка снабжена приспособлениями для ее монтажа в спектрографе ИСП-51. Описанная установка без всяких изменений может применяться для исследования эффекта Зеемана и на других спектральных линиях. В частности, в условиях специального оптического практикума она может быть использована для изучения аномального эффекта в тех случаях, когда разрешающая способность установки достаточна для разделения весьма тесно расположенных компонент аномального эффекта.

Сообщаем некоторые сведения о наиболее интенсивных линиях кадмия, расположенных в видимой области спектра:

1. Линия $6438,47\text{Å}$ ($5p^1P_1 - 5d^1D_2$) синглетная и в магнитном поле дает нормальный триплет.

2. Линия $5085,82\text{Å}$ ($5p^3P_2 - 6s^3S_1$) расщепляется в магнитном поле на 9 зеемановских компонент. Фактор Ланде для уровня 3P_2 равен $3/2$, для уровня 3S_1 равен 2. Ввиду обилия компонент, наблюдение эффекта Зеемана на этой линии с помощью описанной установки невозможно.

3. Линия $4799,91\text{Å}$ ($5p^3P_1 - 6s^3S_1$) дает 6 зеемановских компонент, две из которых являются л-компонентами, остальные σ -компонентами. Постоянная Ланде для уровня 3P_1 равна $3/2$. Отчетливо наблюдаются л-компоненты; σ -компонент наблюдается только две, так как они попарно расположены весьма близко друг к другу и не могут быть разрешены с помощью применяемой пластинки Люммера — Герке.

4. Линия $4678,149\text{Å}$ ($5p^3P_0 - 6s^3S_1$) обнаруживает в магнитном поле только три компоненты, что связано с отсутствием вырождения уровня 3P_0 . Расщепление в этом случае в 2 раза больше нормального и хорошо наблюдается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. С. Толанский, Спектроскопия высокой разрешающей силы, ИЛ, 1955.

ЗАДАЧА 159

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОВ ВНЕШНЕГО
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Явление внешнего фотоэлектрического эффекта было впервые изучено в Московском университете профессором физико-математического факультета А. Г. Столетовым в 1888 г. В закономерностях этого явления отчетливо проявляются квантовые свойства света. В настоящее время явление фотоэффекта находит широкое техническое применение.

Задача посвящена изучению основных закономерностей явления:

1) исследованию зависимости фототока от освещенности фотокатода, 2) исследованию зависимости силы фототока от величины приложенного к фотоэлементу напряжения, 3) установлению красной границы фотоэффекта и определению работы выхода электронов с поверхности фотокатода.

Описание экспериментальной установки, используемой в упражнениях 1 и 2. Для проведения намеченных исследований в задаче используется вакуумный фотоэлемент с сурьяно-цезиевым катодом. Этот фотоэлемент представляет собой стеклянный откачанный сферический баллон, в центре которого расположен анод фотоэлемента (рис. 1). На одну половину внутренней поверхности баллона нанесен тонкий слой сурьмы, а затем тонкий слой цезия путем последовательной конденсации паров этих металлов в вакууме. Образующееся соединение сурьмы и цезия Cs_3Sb служит фотокатодом фотоэлемента. Красная граница фотоэффекта для этого катода находится в видимой части спектра, что часто бывает важно в практическом отношении. Электрические выводы от катода и анода впаяны в нижнюю часть баллона фотоэлемента и смонтированы в его цоколь. Фотоэлемент такого устройства, специально для его осмотра, помещен в особый ящик со стеклянной крышкой, находящийся в практикуме на рабочем столе, рядом с описываемой измерительной установкой.

Работает фотоэлемент следующим образом. Исследуемый световой поток направляется на фотокатод. Электроны, вырываемые светом с освещаемого фотокатода, летят на анод, ускоряемые электрическим полем, создаваемым за счет наложения на фотоэлемент напряжения от внешнего источника электродвижущей силы. Сила тока через фотоэлемент зависит от светового потока.

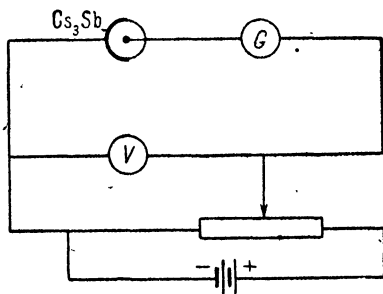


Рис. 1.

Принципиальная схема включения в электрическую цепь вакуумного фотоэлемента приведена на рис. 1. Практически в этой схеме батарея теперь почти всегда заменяется выпрямителем переменного тока. В нашей установке используется схема включения фотоэлемента, приведенная на рис. 2. Эта схема допускает изменение напряжения, подаваемого на фотоэлемент, и измерения фототока.

Токоизмерительным прибором служит магнитоэлектрический микроамперметр со световым указателем. Отклонение указателя на все 100 делений шкалы прибора соответствует току $1 \cdot 10^{-6}$ а.

Далее, в ходе снятия характеристик фотоэлемента (см. ниже описания упражнений 1 и 2) приходится изменять напряжение на

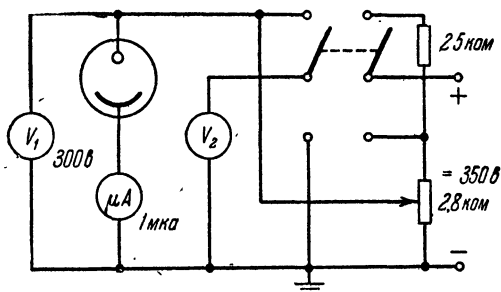


Рис. 2.

фотоэлементе в широких пределах. Так как не существует вольтметров, которые бы позволяли без переключений добавочных сопротивлений с одинаковой точностью измерять и малые (от 0 до 30 в) и большие (до 300 в) напряжения, то для выполнения всей задачи целесообразно использовать два различных вольтметра, включаемых в схему по мере надобности. Соответственно этому условию необходимо подавать в схему и различные напряжения, всякий раз соответствующие диапазону допустимых напряжений для включенного в данный момент вольтметра.

Как видно из приведенной схемы, эти требования удовлетворяются введенным в схему двухполюсным перекидным рубильником и дополнительным постоянным сопротивлением в 25 ком, включаемым последовательно с регулируемым проволочным делителем напряжения 2,8 ком. При верхнем положении рубильника на проволочный реостат подано от выпрямителя пониженное напряжение и соответственно к катоду фотоэлемента присоединен низковольтный вольтметр. При нижнем положении перекидного рубильника на проволочный реостат подано с выпрямителя полное напряжение, а низковольтный вольтметр отключен и замкнут для предохранения его от высоких напряжений. Высоковольтный вольтметр,

разумеется, остается всегда включенным параллельно фотоэлементу, но при подаче на последний низких напряжений он практически не пригоден для измерений. Как и в схеме на рис. 1, в нашей установке вольтметры включены между движком реостата и минусом источника высокого напряжения. Такое включение оказывается возможным потому, что на сопротивлении микроамперметра (10^5 ом) падает при максимальном токе через фотоэлемент 10^{-6} а не более 0,1 в, что составляет менее 1% измеряемого напряжения. Поэтому с точностью, вполне достаточной для наших целей, показания вольтметров соответствуют напряжению на фотоэлементе.

Питание всей электрической схемы осуществляется от выпрямителя, включенного в сеть через феррорезонансный стабилизатор напряжения. *Наличие высокого постоянного напряжения на выходных клеммах выпрямителя исключает возможность каких-либо переключений или проверок контактов в схеме при включенном выпрямителе.* При всех недоразумениях в этом случае надлежит немедленно выключать выпрямитель и обращаться за разъяснениями к дежурному лаборанту.

Фотоэлемент, применяемый в первых двух упражнениях, помещен в специальный светозащитный кожух, установленный на рейтере оптической скамьи. Кожух этот имеет короткий тубус, через который может проходить свет на фотоэлемент. Доступ света через этот тубус может закрываться шторкой, приводимой в движение вращением головки кожуха фотоэлемента. На этой головке обозначено, при каком ее положении шторка открыта и при каком — закрыта.

Перед фотоэлементом, на рейтере, может быть установлена светозащитная труба, предохраняющая фотоэлемент от попадания на него света, рассеянного в комнате. Но тем не менее все измерения с фотоэлементом и подача на него напряжения допустимы только в затемненной комнате.

На третьем рейтере той же оптической скамьи установлена маленькая лампочка накаливания (13 в, 15 вт), питаемая от понижающего трансформатора, включенного в феррорезонансный стабилизатор напряжения. В цепи лампочки имеется амперметр и реостаты для регулирования и измерения тока в лампочке. Эта лампочка служит источником света, с которым выполняются первые два упражнения задачи. Линейные размеры спирали лампочки малы, по сравнению даже с минимальным расстоянием лампочки до фотоэлемента (длиной светозащитной трубы). Поэтому лампочка может рассматриваться как точечный источник света.

Вдоль оптической скамьи расположена метровая линейка, позволяющая измерять все необходимые расстояния между расположенными на скамье приборами. Перед началом работы необходимо убедиться в том, что фотоэлемент, светозащитная труба и лампочка расположены на одном уровне.

Упражнение 1

Изучение зависимости силы фототока от освещенности фотокатода

Сущность этого упражнения заключается в том, чтобы изменять по определенному закону освещенность фотокатода и вести параллельно измерения силы фототока.

После общего ознакомления с установкой студенты просят дежурного лаборанта включить в сеть феррорезонансный стабилизатор напряжения и установленные на столе вспомогательные розетки. Включают в эти розетки вилки шланговых проводов, идущих от осветительных лампочек и от микроамперметра со световым указателем. Убеждаются в нулевом отсчете на микроамперметре. При невыполнении этих условий обращаются за указаниями к дежурному лаборанту. Включают лампочку, установленную на рейтере оптической скамьи, и путем регулировки ее реостатов устанавливают в ней ток около $0,9$ а. Помещают лампочку на расстоянии 40 см от фотоэлемента. Вращением головки кожуха фотоэлемента закрывают шторкой доступ света на фотоэлемент. Устанавливают перекидной рубильник в нижнее положение и включают выпрямитель.

С помощью проволочного реостата, делителя напряжения, подают на фотоэлемент напряжение около 150 в, с тем чтобы заведомо обеспечить его работу в режиме тока насыщения. Убеждаются в том, что в этих условиях, при закрытой шторке фотоэлемента, темновой ток через микроамперметр не превышает $1—2$ делений шкалы этого прибора.

Медленным вращением головки кожуха фотоэлемента открывают его шторку, наблюдая за показаниями микроамперметра. Если отклонения светового указателя этого прибора не выходят за пределы его шкалы, то установка готова к измерениям. В случае, если открывание шторки фотоэлемента приводит к резким выбросам показаний микроамперметра, выясняют и устраняют причину излишней засветки фотоэлемента: перекал сверх рекомендованного режима рабочей лампочки на оптической скамье, посторонний свет в комнате. При нормальных условиях фототок при рекомендованном режиме должен измеряться отклонением светового указателя микроамперметра почти на всю шкалу этого прибора. Перекрывая рукой или бумагой доступ света от лампочки на фотоэлемент, убеждаются, что фототок вызван светом лампочки. После установления постоянного режима работы всех приборов записывают показания микроамперметра, напряжение на фотоэлементе и положение лампочки на оптической скамье, а также ток через лампочку, который в ходе этого упражнения должен поддерживаться строго постоянным. Удаляя по этапам, каждый раз на 5 см, лампочку от фотоэлемента до конца оптической скамьи, записывают показания микроамперметра для каждого положения лампочки. Затем повторяют те же измерения,

возвращая лампочку теми же этапами в ее первоначальное положение.

Закрыв шторкой доступ света на фотоэлемент, убеждаются в том, что сохранилось допустимое значение темнового тока в цепи фотоэлемента.

Усредненные результаты проделанных измерений обрабатываются следующим образом.

Принимая лампочку за точечный источник света, можно считать, что освещенность фотокатода изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния лампочки от фотоэлемента. Пусть E_1 — освещенность фотокатода при максимальном удалении лампочки от фотоэлемента, тогда освещенность фотокатода при каком-то n -м положении лампочки будет равна $E_n = E_1 R_1^2 / R_n^2$, где R_1 — максимальное расстояние фотоэлемента от лампочки, а R_n — расстояние от n -го положения лампочки.

Откладывая по оси абсцисс прямоугольной системы координат величины, пропорциональные R_1^2 / R_n^2 , а по оси ординат — величины фототоков, соответствующие значениям R_1^2 / R_n^2 , и соединяя непрерывной линией полученные таким образом точки, получаем графически зависимость силы фототока от относительной освещенности фотокатода. Можно иллюстрировать полученные результаты и построением графика в логарифмическом масштабе, откладывая по оси ординат логарифмы силы фототока, а по оси абсцисс — $2 \lg R$.

Упражнение 2

Получение вольтамперной характеристики вакуумного фотоэлемента

Зависимость силы фототока в фотоэлементе от величины наложенного на него напряжения (при неизменной освещенности фотокатода) называется вольтамперной характеристикой фотоэлемента.

Упражнение выполняется с той же схемой расположения приборов, указанной на рис. 2. Сначала вновь контролируется нормальная работа фотоэлемента (отсутствие рассеянного в комнате света и т. д.).

Помещая лампочку последовательно на расстояниях 35, 45 и 60 см от фотоэлемента, проделывают для каждого положения лампочки следующие измерения.

При помощи перекидного рубильника переходят к режиму работы с пониженным напряжением на фотоэлементе и к измерениям этого напряжения низковольтным вольтметром. Устанавливают нулевое напряжение на фотоэлементе.

Открыв шторку фотоэлемента и поддерживая режим горения лампочки неизменным, изменяют постепенно, по этапам, величину поданного на фотоэлемент напряжения. Записывают показания микроамперметра для каждого значения установленного напряжения.

Напряжение на фотоэлементе повышают таким образом вплоть до получения ярко выраженного эффекта насыщения фототока; при дальнейшем увеличении напряжения фототок не увеличивается.

Получив ток насыщения, понижают по этапам напряжение на фотоэлементе и повторяют те же измерения, которые были выполнены в процессе повышения напряжения. Подобные измерения продельывают для всех трех указанных выше расстояний лампочки от фотоэлемента.

Изменять напряжение на фотоэлементе при снятии описанным образом его вольтамперных характеристик следует, очевидно, тем меньшими этапами, чем круче идет подъем зависимости силы фототока от величины поданного на фотоэлемент напряжения. Режим горения лампочки в настоящем упражнении поддерживается таким же, как и в первом упражнении.

Результаты измерений представляют в виде графиков, изображающих зависимость фототока от величины наложенного на фотоэлемент напряжения. При построении графика используются результаты, полученные при повышении напряжения на фотоэлементе, а также результаты, полученные при его понижении.

Упражнение 3

Определение красной границы фотоэффекта и работы выхода электронов

Целью этого упражнения является установление той длины волны света, освещающего данный фотокатод, при которой прекращается эмиссия с него электронов.

Экспериментальная установка. Для того чтобы иметь возможность изменять длину волны света, освещающего фотоэлемент, служит монохроматор. Принципиальная схема призмного монохроматора, используемого в настоящей задаче, приведена на рис. 3. На входную щель монохроматора падает через соответствующие конденсоры белый свет от лампочки накаливания. Призма монохроматора осуществляет его спектральное разложение. Из выходной щели монохроматора выходит лишь некоторый узкий спектральный интервал первоначального сплошного спектра лампочки накаливания. Вращением призмы монохроматора, установленной на столике в центре прибора, можно направлять в его выходную щель разные участки спектра. Помещая фотоэлемент за выходной щелью прибора, можно освещать фотокатод пучком света, близким к монохроматическому.

Ввиду того, что интенсивность монохроматического света, выпускаемого монохроматором, мала по сравнению со светом, входящим в монохроматор, правильная юстировка осветительной системы монохроматора приобретает особое значение во всех случаях его использования.

Входная щель монохроматора освещается светом 12-вольтовой лампочки мощностью 35 *вт* с длинной прямой спиралью. Лампочка расположена на оптической скамье в особом кожухе на рейтере. Питание лампочки осуществляется от феррорезонансного стабилизатора напряжения через понижающий трансформатор.

Осветительная система монохроматора в практикуме, как правило, уже установлена и студентам не приходится производить все описанные выше операции с самого начала. Обычно бывает достаточно для получения в приборе максимума света лишь немного отрегулировать положение конденсора перед щелью при помощи его поперечных салазок, приводя яркий блик света на центр входной щели прибора. Однако ясное представление о юстировке осветительной системы монохроматора (а в сущности и спектрографа)

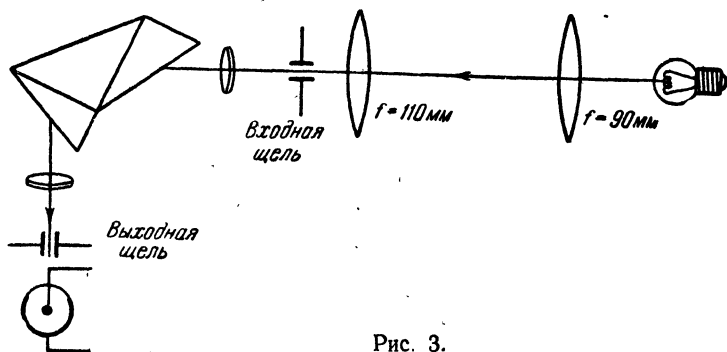


Рис. 3.

студентам обязательно надо иметь (см. указания в конце задачи). Ширина щелей монохроматора установлены равными 0,8 *мм*, что обеспечивает выход из монохроматора (в спектральной области, близкой к красной границе исследуемого фотоэлемента) светового пучка, монохроматичность которого достаточна для целей, расследуемых в этом упражнении.

Барaban, вращающий столик с призмой, дающей спектральное разложение, прокалиброван в градусах. Пересчет градусных делений на барабане в длины волн делается по прилагаемому к задаче графику калибровки барабана.

У выходной щели монохроматора, в кожухе (идентичном с тем, который применяется в первых двух упражнениях) на рейтере, помещается фотоэлемент, красная граница фотокатода которого подлежит определению. Однако малый световой поток, выходящий из щели монохроматора, приводит к необходимости работать с фотоэлементом в данном случае совсем иначе, чем в первых двух упражнениях. Прямое измерение фототока с помощью микроамперметра становится здесь уже невозможным. На выход фотоэлемента должен быть включен усилитель с электронной лампой. Более того, в этом

случае применяется и фотоэлемент другой конструкции, хотя с тем же сурьмяно-цезиевым катодом, как и в предшествующем случае. Опишем сначала особенности применяемого фотоэлемента.

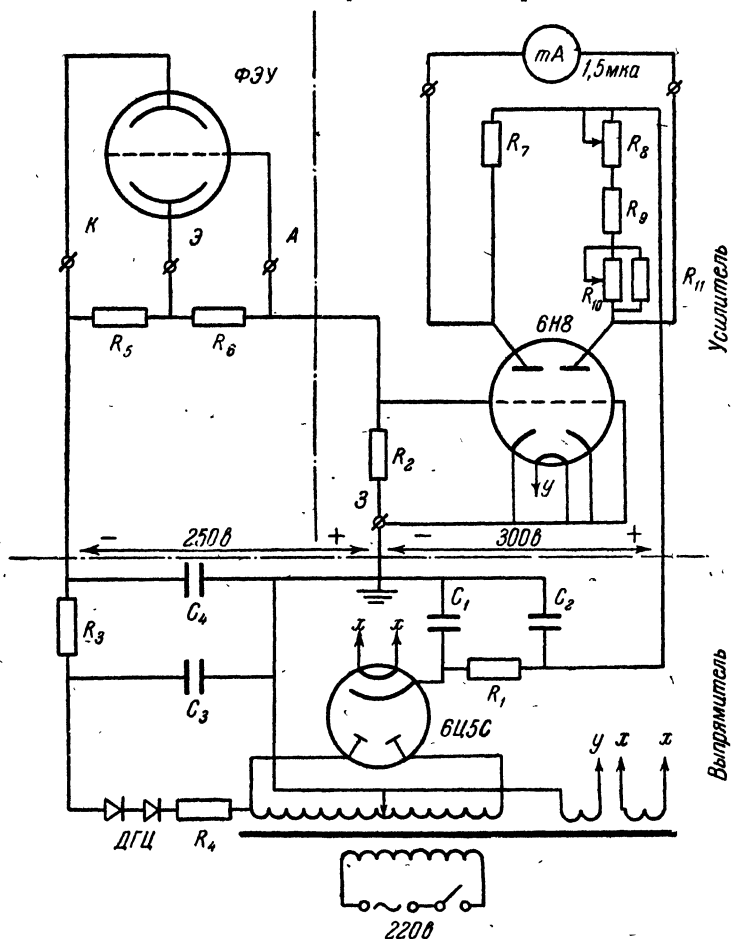


Рис. 4. Схема включения фотодинатрона с усилителем:

$R_1 = 3 \text{ ком}$, $R_2 = 10 \text{ Мом}$, $R_3 = 12,5 \text{ ком}$, $R_4 = 500 \text{ ом}$, $R_5, R_6 = 100 \text{ ком}$,
 $R_7 = 8,2 \text{ ком}$, $R_8 = 1 \text{ ком}$, $R_9 = 8,2 \text{ ком}$, $R_{10} = 5 \text{ ком}$, $R_{11} = 6,8 \text{ ком}$, $C_1 =$
 $= 30 \text{ мкф}$, $C_2 = 30 \text{ мкф}$, $C_3 = 0,1 \text{ мкф}$, $C_4 = 0,1 \text{ мкф}$.

Здесь применяется так называемый фотодинатрон — фотоэлемент с внутренним усилением первичного фототока за счет вторичной эмиссии электронов с дополнительного (третьего) электрода фотоэлемента — эмиттера.

Схема устройства и включения фотодинатрона в схему усилителя изображена на рис. 4. Кроме того, экземпляр фотодинатрона поме-

щен вместе с фотоэлементом в ящике со стеклянной крышкой специально для осмотра на столе около монохроматора. Работает фотодинатрон следующим образом. Световой поток освещает фотокатод, с которого и происходит эмиссия фотоэлектронов, так же как и в обычном вакуумном фотоэлементе. Вырванные световым потоком с поверхности фотокатода электроны движутся под действием ускоряющего поля к аноду, но большая часть их проходит через сетчатый анод и достигает эмиттера, преодолевая встречное поле между анодом и эмиттером. Разность потенциалов между анодом и эмиттером меньше разности потенциалов между катодом и анодом. Падающие на эмиттер электроны выбивают с его поверхности вторичные электроны. Эти электроны малой энергии ускоряются полем, направленным от эмиттера к аноду, и собираются анодом. Если коэффициент вторичной эмиссии электронов ¹⁾ с эмиттера больше единицы, то сила тока в цепи анода будет больше первичного фототока с катода, вызванного непосредственно действием освещения. В этом и заключается сущность использования явления вторичной эмиссии электронов для усиления фототоков. На этом принципе основана работа современных электронных фотоумножителей (см. описание задачи 160). В благоприятных условиях этим путем можно получить усиление первичного фототока в 7—8 раз, на одном каскаде усиления простейшего фотодинатрона. В многокаскадных фотоумножителях коэффициент усиления достигает миллиона.

Для нас в данном случае существенно, что применяемый принцип усиления фототока никак не затрагивает вопроса об изучаемой нами красной границе фотоэффекта на катоде. Ее положение в спектре определяется исключительно свойствами самого фотокатода.

Но усиление, даваемое самим фотодинатроном, все же недостаточно при работе с монохроматором. Поэтому ток с анода фотодинатрона еще раз усиливается при помощи балансного усилителя на двойном триоде, изображенного на том же рис. 4.

Принцип действия этого усилителя состоит в следующем. При отсутствии внешних напряжений на сетках двойного триода потенциалы его анодов оказываются одинаковыми и через миллиамперметр, включенный между анодами ламп, тока нет. Если же на одну из сеток подать извне некоторое напряжение, то в результате изменения силы анодного тока изменится и потенциал соответствующего анода и через миллиамперметр потечет ток, пропорциональный приложенному к сетке напряжению. Напряжение на сетке изменится в результате того, что фототок проходит через сеточное сопротивление одного из триодов. Большое значение этого сопротивления (10^7 ом) обеспечивает существенные изменения напряжения на сетке при слабых фототоках.

¹⁾ Коэффициентом вторичной эмиссии электронов называют отношение числа эмитированных электронов к числу падающих на эмиттер.

Выпрямитель для питания фотодинатрона и усилителя смонтирован на одном закрытом шасси вместе с усилителем. На переднюю стенку этого шасси выведены ручки управления потенциометрами R_8 и R_{10} и клеммы проводов для соединения всего блока с фотодинатроном, стоящим на рейтере у выходной щели выпрямителя.

Правила пользования усилителем вытекают из принципа его работы. После включения питания усилителя, в отсутствие исследуемого тока через сеточное сопротивление усилителя (в нашем случае с затемненным фотодинатроном), потенциометрами R_8 и R_{10} (один из которых служит для грубой, а другой для тонкой регулировки) приводят стрелку миллиамперметра на нуль. Этим добиваются того, чтобы оба триода работали в одинаковом режиме. После чего подают на вход усилителя исследуемый фототок.

Надо иметь в виду, что на фотодинатрон подается значительное постоянное напряжение (около 300 в), поэтому любые переключения проводов в схеме категорически воспрещаются при включенном питании. Со всеми недоразумениями надо обращаться к дежурному лаборанту.

Измерения и их обработка. Закрывают доступ света на фотодинатрон и включают лампу на скамье монохроматора и усилитель, с тем, чтобы в нем установился после прогрева стационарный режим.

Устанавливают на барабане монохроматора отсчет 2350° , соответствующий длине волны 5700 \AA . Эта длина волны отвечает максимальной чувствительности применяемого фотокатода. При помощи второго (ближайшего к монохроматору) конденсора приводят световой блик от лампы на щель монохроматора. Прогревают усилитель в течение 5—10 минут, а затем с помощью обозначенных на его панели ручек потенциометров приводят к нулю показания измерительного прибора, включенного на выход усилителя, и убеждаются в достигнутой уже стабильности нулевого отсчета. Если этот отсчет недостаточно стабилен, то продолжают прогрев усилителя.

Открывают доступ света на катод фотодинатрона и наблюдают отклонения стрелки на измерительном приборе усилителя. При нормальной работе всей системы стрелка должна отклоняться на всю шкалу прибора. При забросе стрелки прибора за пределы шкалы несколько прикрывают одну из щелей монохроматора. Затем, медленно вращая барабан монохроматора, ведут наблюдения за показаниями прибора усилителя. Барабан вращают в сторону, соответствующую увеличению длины волны света, выходящего из щели монохроматора. Переходу к более длинным волнам отвечает рост отсчетов на барабане. Вращением барабана монохроматора добиваются уменьшения тока на выходе усилителя в 10—12 раз, отыскивая длину волны, отвечающую наиболее резкому уменьшению тока, в зависимости от изменения отсчетов на барабане монохроматора.

Найденный таким путем участок спектра и будет отвечать красной границе фотоэффекта для данного фотокатода.

Отыскание красной границы следует провести несколько раз, возвращаясь предварительно всякий раз вновь к отсчету 2350° на барабане монохроматора и убеждаясь в том, что вся установка работает нормально. Усреднив найденные для красной границы отсчеты на монохроматоре, находят, пользуясь калибровочным графиком прибора, значение длины волны, соответствующее красной границе.

Для определения работы выхода электронов из значения красной границы надо сделать следующий расчет. Для красной границы спектра справедливо равенство $h\nu = A$, т. е. энергия фотона $h\nu$ равна работе выхода A . Здесь h — постоянная Планка, ν — частота падающего света. Переходя от частоты к длине волны, имеем

$$h \frac{c}{\lambda} = A,$$

где c — скорость света. Как известно, работу выхода принято выражать в электронвольтах. Для того чтобы получить искомую величину, в нашем случае для катода фотоэлемента, остается сделать следующий расчет:

$$A = eV = \frac{hc}{\lambda} \frac{10^{12}}{1,59} \text{ эв},$$

где e — заряд электрона. Переходный множитель введен для пересчета эргов в электронвольты ($1 \text{ эв} = 1,59 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$).

Указания по юстировке осветительной системы монохроматора. Правильная установка лампочки и конденсорных линз на оптической оси коллиматора монохроматора осуществляется следующим образом. Открывают регулятор доступа света в монохроматор. Этот регулятор (затвор) расположен в трубе монохроматора непосредственно за входной щелью. Ручка, приводящая его в движение, расположена на нижней стороне трубы коллиматора, около входной щели. На ручке есть надписи, указывающие на то, в каком положении находится затвор.

Предельно открыв входную и выходную щели монохроматора (вращением головок винтов, управляющих щелями, по часовой стрелке), ставят осветительную лампочку на расстоянии приблизительно 60 см от плоскости входной щели и затягивают зажимной винт ее рейтера на скамье. Поместив глаз вплотную к выходной щели монохроматора, перемещают лампочку в вертикальном направлении и вращают ее на подставке (для осуществления этого вращения в дне кожуха лампочки имеется специальная прорезь, через которую проходит фиксирующий положение лампочки винт) до тех пор, пока спираль накала лампочки не станет видна в центре поля зрения, видимого через выходную щель прибора.

Затем ставят на скамью первый конденсор (фокусное расстояние 90 мм) на расстоянии 50 см от плоскости входной щели и регулируют его положение в плоскости, перпендикулярной к оси коллиматора, до тех пор, пока глаз наблюдателя, помещенный у выходной щели прибора, не увидит яркое светлое пятно в центре грани призмы монохроматора. Входная щель коллиматора должна при этом, разумеется, находиться в центре яркого светового пятна, создаваемого на ней конденсором.

Второй конденсор (фокусное расстояние 110 мм) располагается на расстоянии 12 см от входной щели прибора, и его положение в плоскости, перпендикулярной к оси коллиматора, регулируется до тех пор, пока глаз, помещенный

у выходной щели монохроматора, не увидит грань его призмы, залитой ослепительно ярким светом ¹⁾). Разумеется, входная щель прибора должна при этом находиться в центре яркого светового пятна (несколько размытого изображения спирали лампы), даваемого на ней конденсорной системой.

После выполнения указанных операций сужают входную и выходную щели прибора (вращением головки винтов, управляющих щелями, против часовой стрелки) до 0,8 мм.

Ширина щелей отсчитывается по барабанам, установленным на винтах, регулирующих ширину щелей. Деления на головках барабанов даны в сотых миллиметра. Закрывать щели следует весьма осторожно, не доводя края щелей до соприкосновения, при котором они портятся. Не следует считать, что истинное значение нулевого отсчета на барабане щели должно быть обязательно найдено экспериментально, по моменту полного закрытия щели. Нанесенные на барабан деления гарантируют точность нулевого отсчета до 0,01 мм.

Технические данные установки. В первом и втором упражнениях используются обычный вакуумный сурьмяно-цезиевый фотоэлемент, микроамперметр М-91 на 1 мка и вольтметры МВА-47. Выпрямитель и прочие детали установки допускают широкий произвол выбора. В третьем упражнении используется монохроматор марки УМ-2 и фотодинактрон ФЭУ-2, выпускаемый нашей промышленностью. Все данные об используемом усилителе и о питании фотодинактрона приведены в спецификации к схеме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. Курс физики, под редакцией Н. Д. Папалекси, т. II, Гостехиздат, 1948.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

3. М. В. Лукьянов, Фотоэлементы и их применение, Из-во АН СССР, 1946.
4. П. Герлих, Фотоэлементы, Гостехиздат, 1948.
5. Методы экспериментальной электроники. Сборник, ИЛ, 1949.
6. А. С. Топорец, Монохроматоры, Гостехиздат, 1955.

ЗАДАЧА 160

ИЗУЧЕНИЕ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ С ВНУТРЕННИМ УСИЛЕНИЕМ ФОТОТОКА ПРИ ПОМОЩИ ВТОРИЧНОЙ ЭМИССИИ ЭЛЕКТРОНОВ (ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ УМНОЖИТЕЛИ) ²⁾

Использование фотоэлементов в лабораторной и технической практике часто затрудняется малым значением фототока. Чувствительность фотокатодов составляет обычно лишь несколько десятков,

¹⁾ Цвет светового блика на призме будет определяться поворотом призмы прибора.

²⁾ Эту задачу рекомендуется выполнять после задачи 159, посвященной ознакомлению с основными законами внешнего фотоэффекта.

в лучших случаях несколько тысяч микроампер. на люмен. Поэтому при практически осуществимых размерах фотокатодов и создаваемых на них освещенностях оказывается, что ток в фотоэлементах, в благоприятных условиях, достигает величины порядка 10^{-6} — 10^{-7} а, т. е. может быть измерен лишь чувствительным прибором. Особенно трудные условия для измерения фототока создаются в современной количественной спектроскопии, в которой измерение интенсивности спектральных линий производится фотоэлементами, располагаемыми на выходе спектрографа, там, где фокусируется спектр. Отсюда возникает проблема у с и л е н и я фототока.

Эта проблема для вакуумных фотоэлементов разрешалась двумя путями ¹⁾. Первый путь — это усиление фототока при помощи электрических усилительных схем с электронными лампами в качестве основного усиливающего элемента схемы. На этом пути достигнуты в настоящее время большие успехи и он широко используется, хотя и не лишен ряда недостатков ²⁾. Недостатки эти заключаются в неизбежных искажениях, вносимых усилителем в измеряемые фототоки, и в значительной сложности самих усилителей постоянного тока, от которых требуется большой коэффициент усиления. Поэтому поиски решения проблемы усиления слабых фототоков пошли еще и по другому пути. Ознакомлению с физическими явлениями, лежащими в его основе, и посвящена настоящая задача.

На этом втором пути в основу усиления фототока положено явление вторичной эмиссии электронов. Явление это, как известно (см. указанную ниже литературу и описание задачи 80), заключается в том, что электроны достаточной энергии, падая на поверхность металла, не только сами отражаются от этой поверхности, но вызывают также и эмиссию новых электронов с той же поверхности. Число этих в т о р и ч н ы х электронов может в несколько раз превышать число падающих на поверхность первичных электронов. В результате оказывается, что электронный ток у с и л и в а е т с я после того, как первичный пучок электронов бомбардировал поставленное на его пути препятствие.

Если характеризовать этот эффект при помощи коэффициента вторичной эмиссии электронов α , равного отношению числа всех покидающих бомбардируемую поверхность электронов к числу падающих на нее первичных электронов, то этот коэффициент оказывается больше единицы.

¹⁾ Мы не касаемся вопроса о газовом усилении в газонаполненных фотоэлементах. Хотя в них коэффициент усиления может достигать 10—20, но процесс такого усиления не может быть многократно повторяем и чувствительность газонаполненных фотоэлементов в конечном счете много ниже чувствительности и электронных умножителей и вакуумных фотоэлементов, работающих с усилителями. К тому же газонаполненные фотоэлементы обладают инерцией.

²⁾ Простейшее применение усилительной схемы к фотоэлементу дано в упражнении 3 задачи 159.

Таким образом, явление вторичной эмиссии электронов, или, как его иначе называют, динатронный эффект, в тех случаях, когда $\alpha > 1$, может быть использовано для усиления электронного тока ¹⁾.

Рассмотрим устройство и работу простейшего фотоумножителя (фотодинатрона) с однокаскадным усилением фототока за счет вторичной эмиссии.

Фотодинатрон и принципиальная схема его включения изображены на рис. 1. Устройство его аналогично устройству вакуумного фотоэлемента (см. описание задачи 159). Светочувствительный, например сурьмяно-цезиевый, слой, играющий роль первичного

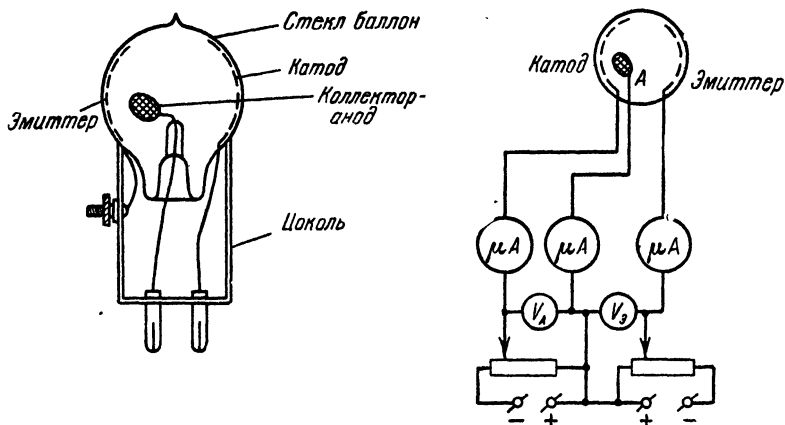


Рис. 1.

фото катода, нанесен на внутренней поверхности стеклянного вакуумного баллончика и присоединен к отрицательному полюсу источника постоянного напряжения. На противоположной, также внутренней стороне баллончика нанесен такой же сурьмяно-цезиевый слой. Он является вторым электродом фотоэлемента и носит название *эмиттера*. Между катодом и эмиттером расположен третий цилиндрический сквозной или, в других конструкциях, сетчатый электрод, называемый анодом или коллектором фотоэлемента. Из схемы включения видно, что потенциал анода выше потенциала эмиттера.

С устройством фотодинатрона конструкции П. В. Тимофеева можно познакомиться и непосредственно по образцу, хранящемуся при задаче в ящике со стеклянной крышкой.

В первом упражнении задачи используется фотодинатрон, тождественный по конструкции с находящимся в ящике, но он помещен в металлический кожух, имеющий лишь малое отверстие для доступа света на фотокатод, и осмотр этого фотодинатрона невозможен.

¹⁾ О роли динатронного эффекта в радиолампах см. описание задачи 80.

Работает фотодинактрон следующим образом. Выбитые световым потоком с поверхности фотокатода электроны движутся под действием ускоряющего поля к аноду, но большая часть их проходит сквозь имеющиеся в нем отверстия и достигает эмиттера, преодолевая встречное поле между анодом и эмиттером. Разность потенциалов между эмиттером и анодом меньше разности потенциалов между катодом и анодом. Попадающие на эмиттер электроны выбивают с поверхности эмиттера вторичные электроны. Эти электроны малой энергии ускоряются полем, направленным от эмиттера к аноду (коллектору), и собираются анодом. Если коэффициент вторичной эмиссии больше единицы, то сила тока в цепи анода будет больше силы первичного тока с катода, вызванного непосредственным действием освещения. В этом и заключается сущность использования явления вторичной эмиссии электронов для усиления фототока.

В благоприятных условиях этим путем можно получить усиление первичного фототока в 7—8 раз на одном каскаде усиления простейшего фотодинактрона.

Значение коэффициента усиления $Z = \frac{I_a}{I_k}$ (I_a — ток с анода и I_k — ток с катода) зависит от свойств эмиттера и от величины и распределения между электродами напряжений, приложенных к фотодинактрону.

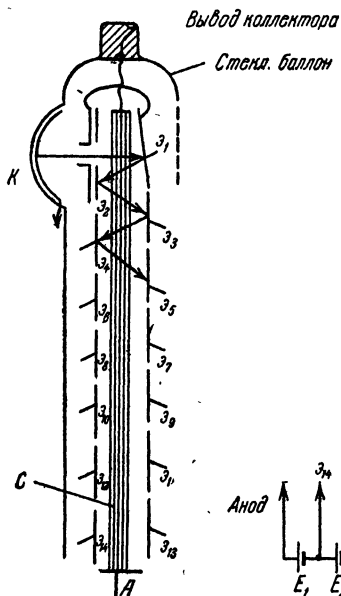
Первое упражнение настоящей задачи посвящено снятию вольт-амперных характеристик фотодинактрона и определению его коэффициента усиления Z . Заметим, что введение в фотоэлемент третьего электрода не только позволяет усиливать фототок, но и вообще расширяет возможную область применений фотоэлемента.

При наличии трех электродов фотоэлемент может быть использован для усиления переменных токов. Переменное, подлежащее усилению, напряжение может подаваться между эмиттером и анодом (коллектором). Подобный фотоэлемент может быть использован и для генерирования электрических колебаний. В настоящей задаче эти применения не рассматриваются, однако возможность их осуществления легко понять из вида тех вольт-амперных характеристик, которые получаются в первом упражнении.

Чувствительность фотодинактрона 600 $\mu\text{ка}/\text{лм}$. Рабочее напряжение 200—250 в, из них на эмиттере 140—150 в. Максимум спектральной чувствительности около 4500 Å . Максимальный допустимый ток в анодной цепи 1 ма .

Указание о допустимом максимальном значении общего тока с фотодинактрона имеет большое значение, так как превышение этого значения тока ведет к порче эмиттера. Поэтому освещенность фотокатода в условиях задачи строго ограничена и не должна быть превышена. Разъяснение того, какими причинами определяется максимальное значение тока в динактроне, дано ниже, при формулировке того же условия для многокаскадного фотоумножителя.

Применение явления вторичной эмиссии электронов к усилению фототоков было впервые разработано в СССР П. В. Тимофеевым и Л. А. Кубецким. Особенно много было сделано ими для построения многокаскадного усилителя фототоков этим методом. Задача была разрешена П. В. Тимофеевым и Л. А. Кубецким разными путями. В дальнейшем мы останавливаемся подробно на методе Тимофеева, так как в упраж-



нениях задачи используются приборы конструкции Тимофеева.

Перейдем к рассмотрению многокаскадного усиления фототока на основе вторичной эмиссии электронов.

Принципиальная схема четырнадцатикаскадного фотоэлектронного умножителя конструкции П. В. Тимофеева приведена на рис. 2. Здесь K — фотокатод, на который падает свет, $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_{14}$ —

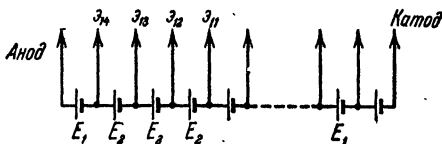


Рис. 2.

вторичные эмиттеры электронов, A — анод (коллектор), C — соединенная с ним сетка. Зигзагообразная линия со стрелками, начинающаяся на фотокатоде и ведущая к аноду, указывает путь нарастающего от эмиттера к эмиттеру потока электронов.

Принципиальная схема включения трубки Тимофеева изображена на рис. 2. Для упрощения схемы все эмиттеры вытянуты в одну линию. Из этой схемы видно, что между каждой парой электродов действует поле, ускоряющее электроны на пути от предшествующего эмиттера к последующему. Разности потенциалов между всеми парами соседних эмиттеров одинаковы (около 100 в). О том, как практически осуществляется подача напряжений на эмиттеры, будет сказано при описании установки с многокаскадным электронным умножителем.

Усиление фототока в умножителе происходит следующим образом. Первичные фотоэлектроны с фотокатода увлекаются полем на первый эмиттер, где происходит вторичная эмиссия электронов.

С эмиттера уходит в α раз больше электронов, чем на него падает, все эти электроны увлекаются полем дальше на второй эмиттер, где вновь имеет место вторичная эмиссия с коэффициентом α . Следовательно, со второго эмиттера уходит на третий уже в α^2 раз больше электронов, чем было выбито светом с фотокатода. Тот же процесс нарастания тока повторяется на всех эмиттерах. В результате при n эмиттерах первичный фототок усиливается в α^n раз.

Приведенное описание конструкции и процесса работы многокаскадного фотоумножителя схематизировано. Дело в том, что управление электронным потоком в шестнадцатиелектронной трубке является далеко не простой задачей. Трудно добиться такого поля в трубке, чтобы все электроны, вышедшие с одного эмиттера, целиком без рассеяния попадали на следующий. Поэтому расчеты формы и расположения в трубке электродов составляют большую и сложную задачу, решение которой тщательно проверяется на опытных конструкциях. Надо при этом иметь в виду, что форма эмиттеров должна оставаться настолько простой, чтобы допускать нанесение на них слоев, обеспечивающих высокий коэффициент вторичной эмиссии.

Чисто электростатическое управление электронными токами в умножителе осуществлено в трубке Тимофеева. В трубке Кубецкого применяется метод магнитной фокусировки потока электронов с одного эмиттера на другой. Для этого трубка помещается в поле специального постоянного магнита.

Используемая в задаче трубка Тимофеева заключена в охранный металлический кожух с небольшим отверстием для освещения фотокатода. Для ознакомления с конструкцией точно такая же трубка, но со снятым стеклянным баллоном имеется в практикуме в отдельном ящике со стеклянной крышкой.

Обратимся теперь к количественным характеристикам работы современного многокаскадного фотоумножителя, например конструкции Тимофеева.

На умножитель накладывается рабочее напряжение около 1000 в. Оно при помощи делителя равномерно распределяется между всеми электродами умножителя. Чувствительность фотокатода составляет около 30 *мкА/лм*. Максимум спектральной чувствительности лежит вблизи 4300 Å. Неизбежный в фотоумножителях темновой ток (ток при неосвещенном фотокатоде) имеет значение порядка 10^{-10} а. Коэффициент усиления около 10^6 . Это значит, что внутри самого фотоумножителя получается миллионное усиление первичного фототока. Чувствительность современных фотоумножителей достигает многих амперов на люмен. Максимально допустимый рабочий ток умножителя 0,1 *ма* (есть умножители, допускающие токи до 1 *ма*).

По поводу значения силы рабочего тока надо сделать следующее разъяснение.

Хотя коэффициент вторичной эмиссии электронов и может иметь значение 10, но пучок вторичных электронов вовсе не уносит с эмиттера целиком всю энергию бомбардирующего эмиттер электронного пучка. Как показывает опыт, в лучшем случае только 10% энергии бомбардирующих эмиттер электронов переходит в энергию

вторичных электронов, вся же остальная энергия идет на нагревание эмиттера. Между тем рабочая поверхность эмиттеров портится уже при температуре в несколько десятков градусов. Из-за этого и приходится строго ограничивать рабочий ток в электронном умножителе, а также ток в фотодинатроне.

Следует помнить, что на катоды фотоэлектронных умножителей, находящиеся под напряжением, нельзя направлять сильных световых потоков. При освещении катода включенного умножителя дневным светом умножитель портится.

Поэтому многокаскадный умножитель и фотодинатрон; используемые в задаче, всегда закрыты металлическим кожухом. Отверстия в этих кожухах защищены от попадания в них естественного или искусственного освещения. Фотокатод при работе может освещаться только специально установленными для этой цели лампочками.

Описание установки с фотодинатроном. Фотодинатрон установлен в защитном кожухе на подставке, расположенной на оптической скамье. Перед входным кожухом тубуса, также на оптической скамье, установлена светозащитная трубка, защищающая вход в кожух фотодинатрона от случайного рассеянного света. Далее, на передвижной подставке на оптической скамье помещается маленькая лампочка накаливания, снабженная регулятором тока в виде реостата, или ЛАТР.

Фотодинатрон установлен на панели, снабженной клеммами, соединенными с гнездами панели. Каждая клемма обозначена буквой, соответствующей присоединенному к ней электроду. Панель закрыта металлическим кожухом с коротким входным тубусом. Внутри кожуха имеется светозащитная шторка, приводимая в действие вращением рифленной головки кожуха. На этой головке имеются две стрелки и около них надписи «откр» и «закр». При повороте рифленной головки кожуха до легкого упора в сторону первой стрелки доступ света на фотодинатрон полностью открыт. Обратный поворот головки кожуха приводит к полному прекращению доступа света на фотодинатрон.

Снимать кожух с работающего фотодинатрона воспрещается.

Электрическая схема, обслуживающая фотодинатрон и полностью соответствующая рис. 1, целиком смонтирована и расположена вдоль оптической скамьи. Весь монтаж схемы, начиная со второго делителя напряжения, выполнен коаксиальным кабелем, броня которого заземлена. Все включенные в схему приборы снабжены надписями, указывающими, в какую цепь включен каждый прибор.

Токоизмерительными приборами во всех трех цепях фотодинатрона служат микроамперметры со световыми указателями. Два микроамперметра, на один микроампер каждый, включенные в цепи катода и анода, одинаковы. Третий прибор, включенный в цепь

эмиттера, представляет собой нулевой гальванометр. Это связано с тем, что ток на эмиттер меняет не только свою величину, но и направление, в зависимости от наложенного на эмиттер напряжения.

Используемый нулевой гальванометр имеет малое затухание и надо выждать успокоения его указателя после каждого изменения силы тока в цепи эмиттера. Обращаем внимание и на то, что цена деления шкалы этого прибора иная, чем у первых двух микроамперметров, это надо учитывать при совместной обработке показаний всех трех микроамперметров. За нулевые отсчеты всех приборов надо брать их показания, когда свет на фотоэлемент не попадает.

Упражнение 1

Изучение зависимости токов в фотодинатроне от освещенности его фотокатода

Упражнение имеет целью измерение силы токов в цепи катода, в цепи анода и в цепи эмиттера, как функции освещенности фотокатода при неизменных значениях напряжений на аноде и на эмиттере фотодинатрона.

1. Измерение силы анодного тока в зависимости от освещенности фотокатода и иллюстрирующий его график дают сведения о работе фотодинатрона в целом как прибора для измерения светового потока.

2. Результаты измерения тока с эмиттера надо представить в функции значений тока с катода. В таком случае они будут характеризовать зависимость числа электронов вторичной эмиссии от числа первичных электронов, падающих на эмиттер.

Процесс выполнения описанных в настоящем упражнении измерений и способ их обработки аналогичны заданиям, описанным в упражнении 1 задачи 159.

3. Устанавливают движки обоих делителей напряжения на минимум снимаемого с них напряжения. Закрывают шторку затвора фотоэлемента, придвигают вплотную к тубусу его кожуха светозащитную трубу. Помещают осветительную лампочку на дальний от фотоэлемента конец оптической скамьи. Включают освещение всех микроамперметров. Получив разрешение преподавателя, включают выпрямитель. Устанавливают при помощи делителей напряжения 250 в на аноде и 110 в на эмиттере (нормальные эксплуатационные значения напряжений для фотодинатрона данной конструкции).

5. Медленно открывают шторку фотоэлемента и убеждаются в том, что токи в цепях, обязанные своим происхождением рассеянному в комнате свету, не превышают 1—2 делений на шкалах микроамперметров (при закрытой шторке фотоэлемента микроамперметры могут показывать также малые токи: темновой ток в фотодинатроне и токи утечек в изоляциях).

6. Включают осветительную лампочку, установленную на оптической скамье (регулятор ее накала фиксирован). Приближая по этапам, через 5—10 сантиметров, осветительную лампочку к отверстию защитной трубы фотодинатрона, записывают положения лампочки и показания всех трех микроамперметров. Напряжение на аноде и эмиттере поддерживают постоянным.

Удаляют осветительную лампочку от фотоэлемента прежними этапами и повторяют вышеуказанные измерения.

Производят 2—3 серии подобных измерений и усредняют их результаты. Рассчитывают освещенность фотокатода, выраженную в произвольных единицах, пользуясь следующими соображениями.

Принимая лампочку за точечный источник света, можно считать, что освещенность фотокатода изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния лампочки от фотоэлемента. Пусть E_1 — освещенность фотокатода при максимальном удалении от него лампочки; тогда освещенность E_n фотокатода при каком-то n -м положении лампочки, отнесенная к значению E_1 , будет равна

$$\frac{E_n}{E_1} = \frac{R_1^2}{R_n^2},$$

где R_1 — максимальное расстояние лампочки от фотокатода, R_n — его значение при n -м положении лампочки.

Для определения значений величины R_n надо иметь в виду, что при положении подставки фотодинатрона на четвертом делении шкалы скамьи катод фотодинатрона находится в плоскости нулевого деления шкалы. Нить же лампочки вынесена назад по отношению к указателю на ее держателе на 40 мм.

По окончании этих расчетов строят графики зависимости силы тока в цепи катода, в цепи анода и в цепи эмиттера от освещенности фотокатода.

Упражнение 2

Изучение зависимости токов в фотодинатроне от величины анодного напряжения

Зависимость катодного тока от анодного напряжения представляет собой вольтамперную характеристику вакуумного фотоэлемента. В тех случаях, в которых характеристика снимается в данной задаче — большие анодные напряжения, — измерение катодного тока наглядно демонстрирует существование тока насыщения для фотоэффекта.

Исследование тока эмиттера интересно тем, что направление тока меняет свой знак, проходя черед нуль. Направление тока определяется соотношением напряжений на аноде и эмиттере.

Для этого измерения подставка лампочки располагается на 50-м делении шкалы. На эмиттере устанавливают и поддерживают

постоянными последовательно напряжения 40, 60, 80, 100, 110 в. Анодное напряжение изменяется всякий раз в пределах от 220 до 40 в. Его изменения производятся через 15—10 в в зависимости от крутизны изучаемого участка характеристики.

Результаты измерений всех токов представляются в виде графиков, изображающих их зависимость от анодного напряжения, для каждого значения напряжения на эмиттере. Из полученных результатов определяется максимальный коэффициент усиления для каждого значения напряжения на эмиттере.

Упражнение 3

Изучение зависимости токов в фотодинатроне от напряжения на эмиттере

В этом упражнении можно найти оптимальный режим работы фотодинатрона при фиксированном значении анодного напряжения. Осветительная лампочка остается в положении, рекомендованном в предшествующем упражнении. Устанавливают последовательно и поддерживают постоянными в ходе измерений следующие значения анодного напряжения: 180, 200, 220, 250 в.

Для каждого значения анодного напряжения изменяют напряжение на эмиттере в пределах от 40 до 160 в через 5—10 в. Результаты измерений представляют в виде графиков токов в фотодинатроне в зависимости от напряжения на эмиттере для каждого фиксированного значения анодного напряжения. Находят максимальные значения коэффициента усиления для каждого исследованного случая.

Упражнение 4

Осциллографическое исследование световых импульсов и наблюдение дробового эффекта фотоэлектронной эмиссии

Регистрация слабых световых импульсов представляет одну из важнейших современных задач техники конструирования и применения фотоэлектронных умножителей. Эта задача является центральной, например, при использовании фотоэлектронных умножителей в так называемых сцинтилляционных счетчиках — приборах, используемых в современной ядерной физике. В сцинтилляционном счетчике фотоэлектронный умножитель должен усилить и дать возможность зарегистрировать слабую и короткую световую вспышку, вызванную в специальном люминофоре ядерной частицей или квантом коротковолнового излучения.

Исследование протекания во времени световой вспышки осуществляется следующим образом. Свет вспышки направляется на фотокатод электронного умножителя. Фототок, усиленный вторичной эмиссией с каскадов умножителя, проходит через нагрузочное

сопротивление, включенное в анодную цепь ФЭУ. Импульс тока, проходящий через это сопротивление, создает импульс напряжения, и таким образом импульс света преобразуется в электрический импульс. Импульс напряжения уже может быть подан на вход электронного осциллографа. При помощи осциллографа импульс разворачивается во времени. Соответствующая блок-схема приведена на рис. 3. Решающим для успеха работы этой схемы является способность фотоэлектронного умножителя усиливать первичный фототок, создающий в результате такого усиления значительный

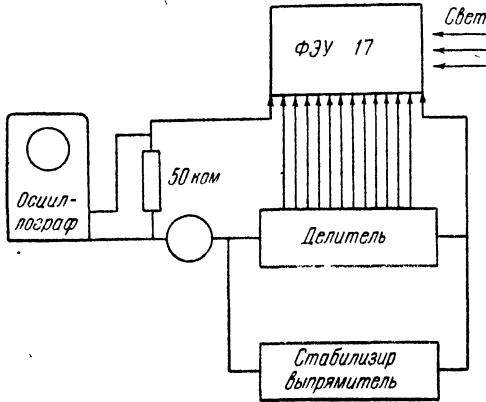


Рис. 3.

импульс напряжения на нагрузочном сопротивлении. Так, например, при амплитуде усиленного фототока ~ 10 мка и при нагрузочном сопротивлении ~ 100 ком амплитуда импульса напряжения будет порядка 1 в.

Темновой ток современных фотоумножителей порядка 10^{-10} а.

Цель настоящего упражнения — ознакомление с принципом исследования световых импульсов при помощи фотоэлектронного умножителя. В качестве

характерных и разнообразных примеров световых импульсов в данной задаче использованы три случая получения световых импульсов.

В одном случае исследуется форма световых импульсов, излучаемых лампой накаливания, питаемой переменным током с частотой 50 гц. При этой частоте тока наш глаз не замечает мерцаний лампы, вызванных колебаниями ее температуры сто раз в секунду. Однако на осциллографе эта картина периодических колебаний светоотдачи лампы хорошо видна.

Во втором случае объектом наблюдения служат световые импульсы, излучаемые неоновой лампой тлеющего разряда.

Наконец, в третьем случае объектом наблюдения являются статистически распределенные и во времени и по амплитуде световые вспышки, вызванные бомбардировкой α -частицами люминофора. Как известно, при бомбардировке α -частицами сернистого цинка, активированного медью, возникают кратковременные световые вспышки — сцинтилляции.

В настоящем упражнении можно на экране осциллографа отчетливо наблюдать статистические флуктуации процесса высвечивания

фосфора $ZnSCu$, возбуждаемого α -частицами, излучаемыми при распаде радия (или радиотория).

В названии настоящего упражнения сказано, что в ходе выполнения можно провести наблюдение дробового эффекта (так называемого шрот-эффекта) фотоэлектронной эмиссии.

Мы не можем останавливаться здесь на описании этого статистического флуктуационного явления, имеющего место при всех видах электронной эмиссии, и рекомендуем обратиться для ознакомления с теорией и экспериментальным исследованием дробового эффекта к литературе, указанной в конце данной задачи.

Если \bar{n}_0 есть среднее число электронов, вылетающих с фотокатода в единицу времени, а n — число электронов, вылетевших с фотокатода за некоторый промежуток времени Δt , то флуктуационное отклонение Δn от среднего значения будет $\Delta n = n - \bar{n}_0 \Delta t$. Как показывается в статистической физике, при отсутствии корреляции между флуктуациями (см. литературу по статистической физике) $(\Delta n)^2 = \bar{n}_0 \Delta t$, где $(\Delta n)^2$ есть среднее значение квадрата Δn за большой по сравнению с Δt промежуток времени¹⁾. Умножая обе части последнего равенства на квадрат заряда электрона e^2 и деля на Δt^2 , получаем $\frac{e^2 (\Delta n)^2}{(\Delta t)^2} = e \bar{n}_0 \cdot \frac{e}{\Delta t}$. Учитывая, что по определению сила тока есть количество электричества, протекающее через сечение проводника (в данном случае через поверхность фотокатода) в единицу времени, можем записать

$$(\overline{\Delta I})^2 = I \frac{e}{\Delta t},$$

где $(\overline{\Delta I})^2$ есть средний квадрат отклонения силы фотоэмиссионного тока от его среднего значения I .

Из последнего соотношения ясно видна зависимость $(\overline{\Delta I})^2$ и от средней силы тока фотоэмиссии, и от интервала времени Δt , для которого подсчитывается величина флуктуации фототока.

Очевидно, что величина флуктуаций растет как \sqrt{I} и что она равна нулю при $I = 0$.

Существование дробового эффекта и общий характер его зависимости от эмиссионного тока можно видеть в используемой схеме. В самом деле, любые изменения фототока в электронном множителе, в том числе и флуктуационные его изменения, сказываются на величине падения напряжения на нагрузочном сопротивлении, включенном в цепь ФЭУ. Выясним, какой случай световых импульсов наиболее благоприятен для их наблюдений. Наиболее благоприятный случай наблюдения дробового эффекта представляют световые вспышки неоновой лампы. Дело в том, что эта лампа в течение некоторой доли каждого полупериода питающего ее переменного тока гаснет полностью, а затем дает значительное нарастание силы света. В момент погасания лампы, когда нет света

¹⁾ Зависимость $(\overline{\Delta n})^2 = \bar{n}$ имеет место также для флуктуаций числа молекул в выделенном объеме газа, числа частиц в коллоидной суспензии, числа распадающихся атомных ядер при естественном радиоактивном превращении и т. д.

и нет фототока, дробовой эффект на фотокатоде ФЭУ должен уменьшаться до нуля согласно приведенной выше формуле. Наоборот, при нарастании силы света и фототока должен усиливаться и дробовой эффект. Наблюдая импульсы света неоновой лампы, можно видеть четкий «пунктир» световых вспышек на экране осциллографа и нарастающую вместе с ординатой импульса «лохматость» осциллограммы, связанную с нарастанием дробового эффекта при нарастании фототока с катода умножителя.

Описание установки. Применяемая в настоящем упражнении установка воспроизводит блок-схему, приведенную на рис. 3. Фотоэлектронный умножитель заключен в цилиндрический металлический кожух, установленный на закрытом шасси, содержащем панель ФЭУ и нагрузочное сопротивление. К этому шасси подведены бронированные шланги питания ФЭУ ¹⁾. От нагрузочного сопротивления идет коаксиальный кабель на вход осциллографа. Для включения в анодную цепь ФЭУ токоизмерительного прибора на шасси резервирована особая фишка.

Питающий ФЭУ высоковольтный выпрямитель и соединенный с ним делитель напряжения стационарно установлены и соединены между собой. Выполняя работу, надо иметь в виду, что питание умножителя осуществляется выпрямленным напряжением около 1000 в, представляющим серьезную опасность для работающего при небрежном отношении к делу.

Какие бы то ни было переключения или вскрытия шасси в электрической схеме настоящей задачи студентам категорически воспрещаются.

Студенты имеют право приступать к работе только с разрешения преподавателя или лаборанта.

При обнаружении любых неисправностей в действии установки работа немедленно прекращается и о неисправности сообщается преподавателю или лаборанту. Работа возобновляется только с их разрешения.

Освещение фотокатода радиоактивным фосфором или другими источниками света осуществляется следующим образом. Непосредственно перед ФЭУ расположена на особом штативе осветительная приставка, содержащая две лампы: неоновую 1 и лампу накаливания 2. Радиоактивный фосфор смонтирован непосредственно в кожухе умножителя, *вскрывать который студентам категорически воспрещается*. Расположение всех деталей установки видно на рис. 4, на котором приведена горизонтальная проекция ФЭУ и осветительной приставки. Рисунок показывает контуры кожуха, разрез ФЭУ и шторку с фосфором 4. Эта шторка укреплена на вращающейся по часовой стрелке крышке кожуха. Вращением крышки

¹⁾ Полная экранировка фотоэлектронных умножителей совершенно необходима.

кожуха шторка может быть либо поставлена перед фотокатодом, либо отведена на тыловую сторону ФЭУ. Для вращения крышки со шторкой надо взяться рукой за рифленный край бронзовой крышки кожуха и поворачивать крышку без нажима по часовой стрелке. На крышке есть надписи, указывающие положение шторки. Та надпись, которая обращена к работающему за столом на установке экспериментатору, указывает положение шторки и фосфора в данный момент. Очевидно, что когда перед фотокатодом установлен фосфор, то никакой другой свет попасть на фотокатод уже не может. Это следует иметь в виду при работе с лампами, помещенными в осветительную приставку.

Осветительная приставка, изображенная на том же рис. 4, имеет два тубуса, в которые вставлены патроны неоновой лампы 1 и лампы накаливания 2. Центральная часть осветительной приставки представляет собой светорассеивающую камеру 3. Свет от ламп, включаемых по-

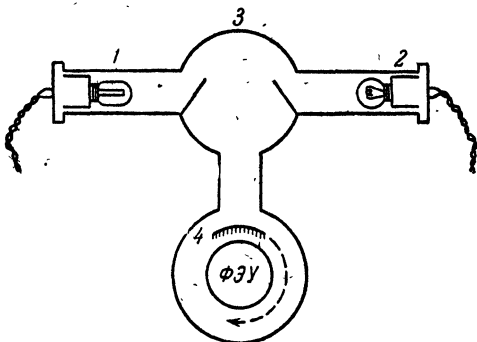


Рис. 4.

очередно, рассеивается в камере и поступает из нее на фотокатод электронного умножителя, если шторка с фосфором отведена к тыльной стороне трубки ФЭУ.

Питание ламп осветительной приставки осуществляется согласно схеме, изображенной на рис. 5. На схему подается переменное напряжение 220 в. Перекидной двухполюсный рубильник включает либо понижающий трансформатор, питающий через реостат и миллиамперметр лампочку накаливания, либо неоновую лампу, включаемую через рубильник и большое сопротивление 24 ком в цепь переменного тока. В цепи неоновой лампы есть разветвление: ток частично идет через сопротивление 400 ом, частично — через измерительный купроксный выпрямитель и микроамперметр постоянного тока. Такое разветвление сделано потому, что необходимо для наблюдения периодического режима работы неоновой лампы питать ее переменным током, а токоизмерительные приборы переменного тока на малые токи изготавливаются крайне редко. Токоизмерительные приборы в цепях обеих ламп установлены потому, что лампы помещаются в осветительной приставке к ФЭУ и свет ламп в комнате невидим. Между тем надо иметь возможность знать, работают ли эти лампы, о чем можно судить по показаниям токоизмерительных приборов.

Наблюдения работы фотоумножителя. 1. Проверяют, включены ли тумблеры выпрямителя и осциллографа и рубильники ламп.

Знакомятся, согласно описанию и рисункам к нему, со всей установкой. Обращаются к преподавателю или лаборанту за разрешением начинать работу.

2. Устанавливают, согласно надписи на крышках кожуха ФЭУ (см. выше), шторку с фосфором против фотокатода. Включают выпрямитель. После его прогрева на экране осциллографа должна появиться характерная, быстро меняющаяся во времени свою конфигурацию кривая развертки во времени статистического процесса

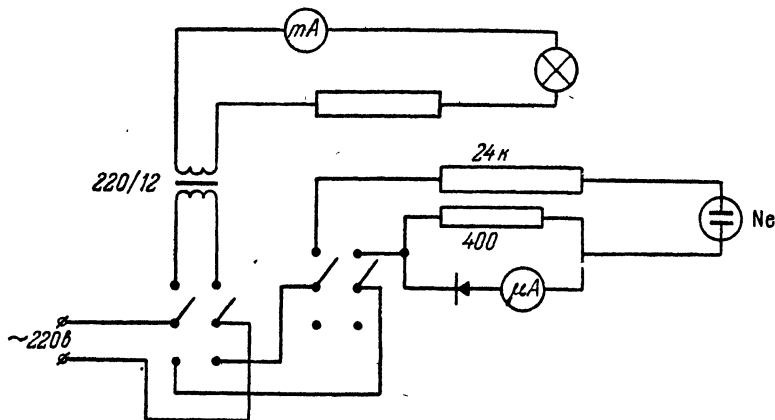


Рис. 5.

свечения фосфора, возбуждаемого α -частицами. Амплитуда колебаний луча осциллографа при рекомендованном усилении по вертикали должна составить 15—20 мм.

Последнее служит доказательством того, что на ФЭУ не попадает посторонний свет, кроме света фосфора. Если указанное условие не соблюдено, то немедленно выключают выпрямитель и просят лаборанта устранить засветку ФЭУ.

Регулируют работу осциллографа до наилучшей видимости картины на его экране. Зарисовывают картину с экрана осциллографа ¹⁾.

Плавным и без нажима вращением по часовой стрелке крышки кожуха фотоэлектронного умножителя отводят фосфор от фотокатода и ставят его в соответствии с надписью на крышке «фотокатод открыт». Вращение крышки надо осуществлять, наблюдая за экра-

¹⁾ Заметим, что если в цепи ФЭУ имеется токоизмерительный прибор, то он может позволить измерить среднее значение фототока в умножителе, создаваемого фосфором. Сила фототока достигает в этом случае значения порядка 1 мкА. Измерение среднего тока от такого практически неизменного во времени источника света, каким является возбуждаемый радиоактивным препаратом фосфор, служит наилучшим способом контроля чувствительности работы фотоэлектронных умножителей.

ном осциллографа. Если окажется, что при повороте крышки кривая развертки на осциллографе дает резкий выброс, то это значит, что из осветительной приставки на фотокатод попадает посторонний свет, перегружающий ФЭУ¹⁾. В таком случае обратным вращением крышки немедленно вводят шторку с фосфором на прежнее место, выключают выпрямитель и обращаются к помощи лаборанта для ликвидации засветки. Если вся система работает нормально, то после отведения фосфора на экране осциллографа должна остаться горизонтальная прямая, слегка искажаемая малыми всплесками помех и шумов.

Включают при помощи двух настольных рубильников неоновую лампу. Добиваются получения на экране осциллографа кривой развертки во времени свечения неоновой лампы.

Регулируют до наилучшей видимости картину на экране осциллографа, наблюдают форму световых импульсов и явление дробового эффекта. Зарисовывают наблюдаемую картину.

Переходят к наблюдениям с лампой накаливания. Регулировка осциллографа остается такой же, как и с неоновой лампой, так как обе лампы питаются от сети переменного тока. Отключают одним настольным рубильником неоновую лампу и, перекидывая другой рубильник, включают через понижающий трансформатор лампу накаливания в осветительной приставке к ФЭУ. Пользуясь осциллографом, так же как это делалось раньше при работе с фосфором и неоновой лампой, наблюдают и зарисовывают картину свечения лампы накаливания, питаемой переменным током.

Отчет о проделанном упражнении включает схему включения фотоумножителя и других приборов преобразования световых импульсов в электрические и зарисовку наблюдавшихся картин световых импульсов.

Технические данные установки. В первых трех упражнениях используется фотодинаatron ФЭУ-2, в четвертом упражнении — фотоумножитель ФЭУ-17. В цепь фотодинатрона включены микроамперметры марки М-91 и (в цепи эмиттера) нулевой микроамперметр М-91/1. Вольтметры применены обычные астатические. Установка питается от выпрямителей с электронной стабилизацией. Мощность выпрямителей определяется исключительно сопротивлением используемых делителей напряжения в обеих схемах. Наблюдения световых импульсов проводятся с осциллографом ЭО-4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. О. Чечик, С. М. Файнштейн, Т. М. Лифшиц, Электронные умножители, Гостехиздат, 1957.
2. Методы экспериментальной электроники. Сборник, ИЛ, 1949.
3. Н. Риль, Люминесценция, Гостехиздат, 1946.
4. Н. А. Капцов, Электроника, Гостехиздат, 1953.
5. М. А. Леонтович, Статистическая физика, Гостехиздат, 1944.

¹⁾ Напоминаем, что во время операции поворота крышки и отведения фосфора от фотокатода лампы в осветительной приставке еще не включены.

ЗАДАЧА 161

**ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОГО ПИРОМЕТРА С ИСЧЕЗАЮЩЕЙ НИТЬЮ**

Для измерения высоких температур широко применяются оптические методы, основанные на использовании теплового излучения нагретых тел. Приборы, служащие для определения температуры на основе измерений теплового излучения, носят название оптических пирометров, а область экспериментальной физики, разрабатывающая принципы измерения температуры оптическими методами, носит название оптической пирометрии (см. [1]).

Основные цели настоящей задачи: 1) изучение работы оптического пирометра и измерение с его помощью температуры нагретого тела (спирали лампы накаливания при разных значениях подводимой к ней мощности), 2) отыскание зависимости от температуры интегрального лучеиспускания вольфрама, 3) наблюдение за изменениями оптического спектра твердого тела при изменении его температуры.

Принцип измерения яркостной температуры. Тепловое излучение нагретых тел может различными способами использоваться для измерения их температуры. В настоящей задаче применяется только один из этих способов, имеющий наибольшее техническое распространение.

В основу данного метода положено сравнение яркости нагретого тела с яркостью абсолютно черного тела в том же спектральном интервале (определение понятия яркости см. [1]).

Пусть имеется черное тело, нагретое до некоторой температуры, и пусть на его фоне расположена нить накала специальной пирометрической лампы, и мы рассматриваем нить и тело через светофильтр, выделяющий из спектров обоих объектов излучение определенной длины волны (обычно это бывает излучение с длиной волны 6600 \AA). Регулируя ток накала в нити лампы, мы можем добиться того, что нить перестанет быть видимой, исчезнет на фоне раскаленного черного тела ¹⁾. Найдем значение тока накала нити при этих условиях. Выполним эти операции для нескольких значений температуры черного тела, измеренной при помощи термометра сопротивления, термомпары и т. п. Таким путем устанавливается определенное соответствие между значениями температуры черного тела и токами накала нити в момент, когда она исчезает на фоне черного тела. Это будет значить, что мы прокалибруем в шкале температур яркость нити в зависимости от тока накала. После этого можно уже применять нить лампы, в свою очередь, в качестве термометра. В самом деле, пусть нам надо измерить

¹⁾ Это будет иметь место, когда яркости черного тела и нити для используемой длины световой волны сравняются.

температуру какого-то нагретого тела. Поместим прокалиброванную нить на фоне этого тела и, изменяя в ней ток накала, добьемся исчезновения нити на фоне этого тела. Допустим, что это происходит при каком-то токе. Тогда, пользуясь калибровочным графиком, мы можем найти соответствующую использованному току I температуру черного тела, при которой нить раньше исчезала на фоне этого тела. Если то тело, температуру которого мы определяем, излучает как черное тело, то ясно, что его искомая температура уже нами найдена. Если же оно излучает иначе, чем черное тело, то найденное указанным путем значение температуры будет нуждаться в некоторой поправке.

В самом деле, мы нашли значение температуры тела, при которой его яркость для определенной длины волны равна яркости черного тела для той же длины волны. Поскольку это тело излучает во всем спектре не как черное тело, то мы и не будем иметь оснований считать найденную таким способом температуру тела его истинной температурой. Мы найдем лишь так называемую яркостную температуру тела. Яркостная температура тела будет всегда ниже его истинной термодинамической температуры. Это связано с тем, что любое тело излучает меньше, чем абсолютно черное тело при той же температуре. Следовательно, произвольное тело, имеющее в данный момент одинаковую яркость (для определенной длины волны) с некоторым черным телом, имеет наверняка термодинамическую температуру выше температуры черного тела, т. е. выше той яркостной температуры, которая определяется с помощью нити пирометра, прокалиброванной по излучению абсолютно черного тела.

Различие между яркостной и термодинамической температурой может быть значительным. Так, например, для вольфрама вблизи температуры 1000°C яркостная температура на 44° ниже термодинамической, а при 3000°C — уже на 327° . Связь между яркостной температурой и термодинамической температурой тела устанавливается соотношением

$$\ln \varepsilon_{\lambda, T} = \frac{C_1}{\lambda} \left(\frac{1}{T_{\text{терм}}} - \frac{1}{T_{\text{ярк}}} \right). \quad (1)$$

Величина $\varepsilon_{\lambda, T}$, зависящая от длины волны и температуры, имеет свое значение для каждого материала и определяется предварительно в ходе особого опыта. Нужное нам в дальнейшем значение $\varepsilon_{\lambda, T}$ для вольфрама равно 0,4 при $\lambda = 6600 \text{ \AA}$.

Величина C_1 связана с универсальными постоянными Планка, Больцмана и скоростью света: $C_1 = hc/k = 1,438 \text{ см} \cdot \text{град}$; λ — длина световой волны (в нашем случае $6600 \cdot 10^{-8} \text{ см}$); $T_{\text{терм}}$ — термодинамическая температура тела, $T_{\text{ярк}}$ — яркостная температура тела, непосредственно измеренная пирометром с исчезающей нитью,

Учитывая, что значение $T_{\text{ярк}}$ близко к значению $T_{\text{терм}}$, мы можем переписать формулу так:

$$\Delta T = - \frac{\lambda T^2 \ln \varepsilon_{\lambda, T}}{C_1}, \quad (2)$$

где ΔT означает всегда положительную поправку к измеренной с помощью пирометра яркостной температуре $T_{\text{ярк}}$. Значение

$$T_{\text{терм}} = T_{\text{ярк}} + \Delta T. \quad (3)$$

Устройство пирометра с исчезающей нитью. Практически измерения температуры тел путем сравнения их яркости с яркостью

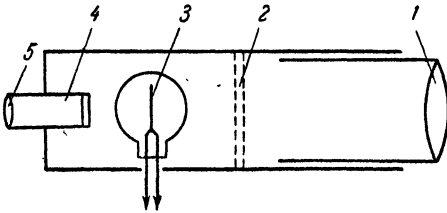


Рис. 1.

прокалиброванной по черному телу нити осуществляется при помощи специальных приборов — пирометров. На рис. 1 представлена схема пирометра, аналогичного по своей конструкции устройству лабораторной зрительной трубы. Объектив пирометра 1 проектирует изображение исследуемого тела в плоскость рас-

положения нити накала пирометрической лампы 3. Сечение лампы в плоскости, перпендикулярной к плоскости нашего чертежа, представлено еще раз на рис. 2. На этом рисунке ясно видна проводочная петля, образованная внутри лампы ее нитью накала. Нить накала лампы и даваемое объективом изображение исследуемого объекта рассматриваются наблюдателем через окуляр 5. В этом же окуляре расположен тот красный светофильтр 4, о котором уже неоднократно упоминалось выше.

Красный светофильтр всегда необходим при измерениях, но он может выводиться из поля зрения окуляра при наводке трубы пирометра на объект измерений для удобства фокусировки объекта в белом свете. Введение и выведение этого светофильтра в поле зрения окуляра осуществляется вращением рифленого кольца на окуляре пирометра.

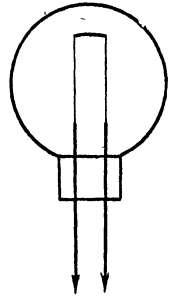


Рис. 2.

Кроме красного светофильтра, в пирометре имеется еще один красноватый ослабляющий светофильтр, лишь по мере надобности вводимый в ход лучей между объективом пирометра и нитью его лампы. Этот светофильтр 2 показан в трубе пирометра пунктиром. Он предназначен для предварительного ослабления яркости исследуемых тел в тех случаях, когда их температура превышает 1400°C . До более высоких температур нагревать нить пирометрической лампы нежелательно, так как она начинает расплываться, изменять свое сечение и затемнять стенки баллона лампы. При наличии же

светофильтра 2, ослабляющего яркость нагретого тела, пирометр этого типа может применяться до 2000°C . Разумеется, применение пирометра с этим дополнительным светофильтром требует калибровки его нити по черному телу в новых условиях.

Наш пирометр используется без ослабляющего светофильтра в интервале температур $700\text{—}1400^{\circ}\text{C}$ и работает с фильтром в интервале температур $1200\text{—}2000^{\circ}\text{C}$ ¹⁾. Включение и выключение ослабляющего фильтра осуществляется поворотом кольца, установленного на тубусе трубы пирометра. Устанавливая это кольцо на отметке 1400° или 2000° , можно подготовить пирометр к работе в том или ином температурном диапазоне.

Шкала миллиамперметра, включенного в цепь накала лампы, прокалибрована непосредственно в градусах Цельсия.

На циферблате миллиамперметра имеются две таких градусных шкалы для диапазонов температуры от 700 до 1400°C и от 1200 до 2000°C , соответствующих работе пирометра с ослабляющим фильтром и без фильтра (миллиамперметр имеет и обычную шкалу в миллиамперах, но она нами не используется). Нить накала пирометрической лампы подключена к специальному небольшому аккумулятору, заменять который другими источниками тока совершенно недопустимо. Ток накала нити регулируется реостатом, смонтированным непосредственно в стойку пирометра, под его трубой. Изменение сопротивления реостата в процессе измерений осуществляется вращением рифленого кольца, расположенного также под трубой пирометра.

Объектом измерений в нашем случае служит спираль лампы накаливания автомобильного типа. Температура спирали этой лампы измеряется при разных значениях проходящего через нее тока и, следовательно, при разных значениях подводимой к ней мощности. Лампа питается от понижающего трансформатора, дающего на выходе 4 в при включении его в цепь переменного тока с напряжением 220 в . Имеющаяся на крышке трансформатора регулирующая ручка всегда устанавливается в положение «ярче». Ток накала в исследуемой лампе регулируется двумя реостатами в 10 и 20 ом , включенными параллельно друг другу. Первый реостат служит для грубого управления током накала, второй — для более тонкой регулировки того же тока. Кроме того, в цепь накала лампы включен еще амперметр и параллельно нити включен вольтметр. Эта комбинация приборов позволяет измерять электрическую мощность, выделяющуюся в спирали исследуемой лампы.

При рассмотрении монтажной схемы питания исследуемой лампы обратит внимание, что понижающий трансформатор обслуживает еще одну осветительную маленькую лампочку. О назначении ее будет сказано ниже.

¹⁾ Указанные диапазоны измерения температур нарочно сделаны перекрывающимися.

Спектроскоп прямого зрения и изменение спектра тела по мере его нагревания. Температурные измерения, которые можно производить с пирометром, дополнены в нашей установке еще специальными наблюдениями за спектром излучения нагретого тела в зависимости от его температуры. Для этой цели в установку введен еще спектроскоп прямого зрения.

Схема спектроскопа прямого зрения приведена на рис. 3. Спектроскоп состоит из двух оптических труб, I и II. Основной

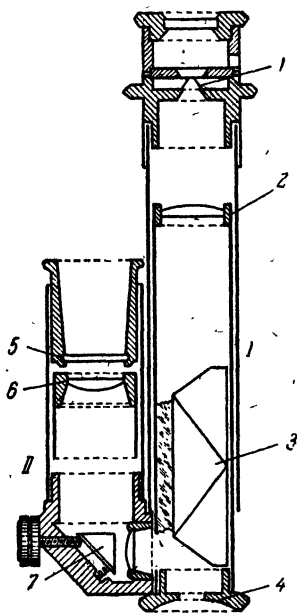


Рис. 3.

является труба I, содержащая входную щель спектроскопа 1, линзу 2 и призму прямого зрения 3 для спектрального разложения света, проходящего в спектроскоп через щель (см. [1]). Спектр прошедшего света получается в плоскости 4. Вторая труба II имеет вспомогательное значение. Она служит для проектирования изображения шкалы длин волн в плоскость изображения спектра. Шкала 5 освещается от вспомогательного источника света. Изображение шкалы, полученное при помощи линзы 6, через поворотную призму 7 и после отражения от задней грани призмы прямого зрения проектируется в плоскость 4, где локализован и полученный спектр.

В нашем случае назначение спектроскопа заключается в последовательном наблюдении спектра теплового излучения спирали исследуемой лампы. При изменениях температуры твердого тела спектр его теплового излучения существенно изменяется: происходит не только

возрастание интегрального лучеиспускания, но и перераспределение энергии по спектру источника. Существенно хотя бы качественно проследить за этими изменениями спектра, тем более что в других пирометрах именно распределение энергии в спектре излучения положено в основу измерения температуры. Простейшей качественной характеристикой этих изменений может служить наблюдение за положением видимой границы спектра со стороны коротких волн (синяя граница спектра) при различных температурах. Положение видимой синей границы спектра определяется по шкале длин волн спектроскопа.

Подготовка установки к измерениям. После общего осмотра установки поворачивают в крайнее левое положение кольцо движка реостата пирометра (оно расположено под трубой пирометра),

закрывают рубильник в цепи накала нити пирометра. Наблюдая в окуляр нить пирометра, постепенно вращают по часовой стрелке кольцо упомянутого реостата до тех пор, пока петля нити пирометрической лампы не будет накалена до красного каления. Продольным перемещением окуляра прибора фокусируют нить по глазам наблюдателя. Затем, на время подготовки к измерениям остальных частей установки, размыкают рубильником цепь накала нити, не изменяя положения кольца реостата.

Вводят полностью в цепь исследуемой лампочки сопротивление обоих реостатов 10 и 20 *ом*. Включают в розетку с напряжением 220 *в* провод от трансформатора этой лампочки. При этом загорается также вспомогательная лампочка, служащая для подсветки шкалы спектроскопа. Добиваются хорошей видимости шкалы спектроскопа, регулируя освещение вспомогательной трубы II этого прибора. Затем начинают постепенно уменьшать сопротивление реостата на 10 *ом*, наблюдая одновременно за накалом спирали исследуемой лампочки. Когда она накалится до красного каления, наводят на нее пирометр и перемещением его объектива (вместе с передним тубусом трубы) фокусируют спираль лампочки, пока она не будет резко видна в окуляр трубы пирометра. При наводке пирометра на объект наблюдения оба светофильтра (в окуляре и в тубусе трубы) удобно выключать.

После этого вновь включают накал пирометрической лампочки и проверяют, совпадают ли условия хорошей видимости нити пирометрической лампочки и спирали исследуемой лампочки. Небольшими перемещениями объектива и окуляра вокруг ранее найденных их положений можно добиться нужного условия. Следует иметь в виду, что пирометр может быть сфокусирован только на объекты, расположенные не ближе 0,8 *м* от его корпуса. На установке, в практикуме, это условие, разумеется, соблюдено.

Измерения. Вводят в трубу пирометра оба светофильтра, затем, пользуясь реостатами в цепи накала исследуемой лампочки, устанавливают поочередно значения силы тока накала, рекомендованные в таблице, помещенной на установке. Одновременно с измерениями значения силы тока надо измерять с точностью до 0,1 *в* также и падение напряжения на спирали лампы. Отсчеты значений силы тока и напряжения надо производить через 1—2 минуты после перемещения движков реостатов, когда режим в цепи исследуемой лампы вполне установится.

Для каждого установленного значения силы тока производят измерения пирометром температуры спирали исследуемой лампы. Для этого регулируют накал нити пирометрической лампы до тех пор, пока изображение нити не исчезнет на фоне спирали исследуемой лампы. При этом условия отсчитывают по миллиамперметру пирометра значение температуры нити пирометрической лампы с точностью до 10°.

Надо и в этом случае иметь в виду, что нить лампы пирометра обладает тепловой инерцией и регулировка ее накала должна быть медленной.

Каждое измерение температуры необходимо производить не менее трех раз, изменяя накал нити пирометра и вновь отыскивая условие исчезновения нити.

Параллельно с измерениями температуры спирали исследуемой лампочки надо вести наблюдения и за ее спектром с помощью спектроскопа. Для каждого значения измеренной температуры надо записать положение синей границы спектра по шкале длин волн спектроскопа.

Обработка результатов измерений. 1. С помощью формулы (3) находят термодинамические температуры нити по измеренным значениям ее яркостной температуры. Необходимо помнить, что на шкале пирометра температура указана в градусах Цельсия, а в формулу (3) входит абсолютная температура нити.

2. Вычисляют с точностью до $0,1 \text{ вт}$ мощность, подводимую к спирали исследуемой лампочки для каждого значения термодинамической температуры этой спирали.

3. Строят график зависимости расходуемой в лампе мощности от термодинамической температуры нити лампы.

4. Строят график зависимости длины волны видимой синей границы спектра от термодинамической температуры.

5. Зависимость интегральной лучеиспускательной способности вольфрама от его термодинамической температуры находят следующим образом. Как показывает опыт и термодинамическая теория излучения, развитая для абсолютно черного тела, должно иметь место следующее соотношение:

$$E_{\text{ч.т.}} = \sigma T^4, \quad (4)$$

где σ — постоянная Стефана — Больцмана.

Для нечерного тела значение E можно записать так:

$$E = BT^n. \quad (5)$$

При этом величины B и n оказываются различными для разных температурных интервалов. Но, конечно, BT^n всегда меньше σT^4 . Приведенные измерения позволяют найти значение n в изученном интервале температур. Это можно сделать следующим путем. При высокой температуре подводимая к исследуемой спирали лампы мощность W почти полностью расходуется на излучение, т. е.

$$W \approx E. \quad (6)$$

Поэтому из (5) и (6) имеем: $\lg W = \lg B + n \lg T_{\text{терм}}$. Построив графически найденную на опыте зависимость $\lg T_{\text{терм}}$ от $\lg W$, можно найти n как тангенс угла наклона полученного графика к оси абсцисс.

Технические данные установки. Задача может быть поставлена с оптическим пирометром ОППИР-09. Применяется спектроскоп прямого зрения. Параметры приборов, входящих в электрическую схему установки, определяются свойствами исследуемого объекта. Желательно применение приборов, дающих непосредственно эффективные значения силы тока и напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Л а н д с б е р г, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. Г. Р и б о, Оптическая пирометрия, ГТТИ, 1934.
3. «Методы измерения температуры», сб., ч. 2, ИЛ, 1954.

З А Д А Ч А 162

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Предлагаемый в задаче метод определений коэффициента диффузии D основан на явлении, наблюдаемом при прохождении монохроматического параллельного пучка света через жидкую среду с непрерывно меняющимся по высоте показателем преломления.

Метод и теория. Если в плоскопараллельный сосуд налита жидкость 1 с показателем преломления n_1 , а над ней более легкая жидкость 2 с показателем преломления n_2 , то граница между жидкостями, резкая в начальный момент, с течением времени будет размываться вследствие диффузии. В соответствии с этим будет изменяться и закон, по которому показатель преломления n меняется с высотой x от значения n_1 внизу до значения n_2 вверху. Как будет показано ниже, слой вещества с переменным показателем преломления будет отклонять нормально падающие на него параллельные лучи под разными углами.

Наибольшее отклонение испытывают лучи, проходящие в том месте, где градиент показателя преломления dn/dx максимален. Наоборот, в тех местах (наверху и внизу), где $dn/dx \approx 0$, лучи пройдут практически без отклонения (рис. 1).

В процессе диффузии будет изменяться максимальный градиент показателя преломления, а следовательно, и угол отклонения луча (угол γ). Измерение γ для известных моментов времени позволяет определить коэффициент диффузии.

Рассмотрим искривление и отклонение луча при его прохождении через слой с переменным показателем преломления. Пусть A и A' — две весьма близкие точки волновой поверхности

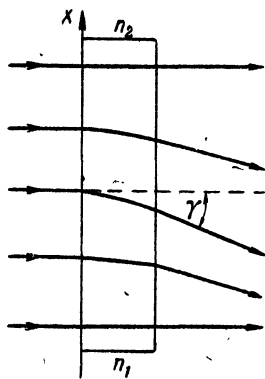


Рис. 1.

падающей нормально плоской волны (рис. 2). Для нахождения волновой поверхности спустя время Δt следует провести огибающую элементарных сферических волн. Так как скорость света в точке A есть c/n , а в точке A' — уже $c/(n + \Delta n)$, то спустя время Δt радиус элементарной волны, расходящейся из A , будет $AB = c\Delta t/n$, а расходящейся из A' будет $A'B' = c\Delta t/(n + \Delta n)$. Из подобия треугольников A_0AB и $A_0A'B'$ следует, что

$$A_0A' = \Delta x \frac{A'B'}{AB - A'B'} = n \frac{\Delta x}{\Delta n}.$$

Легко видеть, что предел A_0A' при $\Delta x \rightarrow 0$ есть радиус кривизны луча в точке A' ; таким образом,

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} A_0A' = R(x) = \frac{n}{\partial n / \partial x}.$$

Если толщина слоя δ достаточно мала, то угол α , на который отклоняется луч при прохождении слоя (рис. 3), можно считать равным δ/R . Обозначая через β угол отклонения луча после его преломления при выходе в воздух и заменяя (ввиду малости α и β) синусы самими углами, мы можем написать:

$$\beta = n\alpha = \frac{n\delta}{R} = \delta \frac{\partial n}{\partial x}.$$

Следовательно, максимальное значение β , обозначенное выше (рис. 1) через γ , действительно соответствует наибольшему значению dn/dx :

$$\gamma = \beta_{\max} = \delta \left(\frac{\partial n}{\partial x} \right)_{\max}. \quad (1)$$

Для выяснения того, как изменяется $(dn/dx)_{\max}$ со временем, рассмотрим задачу о диффузии в интересующем нас случае.

Количество вещества ΔM , протекшее через площадку Δs за промежуток времени Δt , определяется, как известно, соотношением

$$\Delta M = -D \frac{\partial c}{\partial x} \Delta s \Delta t, \quad (2)$$

где D — коэффициент диффузии, а c — концентрация. Знак минус показывает, что диффузионный поток направлен в сторону убывания концентрации. Этим уравнением удобно пользоваться в случае, если мы имеем

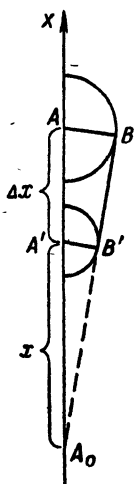


Рис. 2.

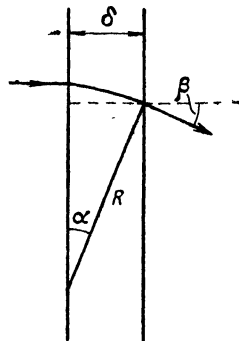


Рис. 3.

дело со стационарным (постоянным во времени) процессом, но если распределение концентрации $\partial c/\partial x$ меняется в течение времени, процесс диффузии описывается другим дифференциальным уравнением, которое легко получить из уравнения (2).

Выделим элемент объема $\Delta v = \Delta s \Delta x$, ограниченный двумя площадками Δs_1 и Δs_2 , равными и параллельными друг другу; расстояние между площадками Δx (рис. 4), ось X перпендикулярна к поверхности равной концентрации. Согласно уравнению (2) через площадку Δs_1 в объем Δv продиффундирует количество вещества

$$\Delta M_1 = -D \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)_x \Delta s \Delta t^1),$$

а через площадку Δs_2 из объема уйдет количество вещества

$$\Delta M_2 = -D \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)_{x+\Delta x} \Delta s \Delta t.$$

Так как концентрация c убывает с ростом x , то количество вещества в объеме Δv изменится на величину, равную

$$\begin{aligned} \Delta M &= |\Delta M_1| - |\Delta M_2| = D \left[\left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)_{x+\Delta x} - \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)_x \right] \Delta s \Delta t = \\ &= D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \Delta x \Delta s \Delta t, \end{aligned}$$

или

$$\Delta c = \frac{\Delta M}{\Delta v} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \Delta t.$$

Отсюда получим уравнение, определяющее скорость изменения концентрации $\partial c/\partial t$:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Для достаточно разбавленных растворов можно принять (как и для разреженных газов), что показатель преломления линейно зависит от концентрации и удовлетворяет, следовательно, тому же дифференциальному уравнению

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}. \quad (4)$$

Начальные условия задачи при $t = 0$ дают:

$$\begin{aligned} n &= n_1 \quad \text{при } x < 0; \\ n &= n_2 \quad \text{при } x > 0. \end{aligned} \quad (5)$$

¹⁾ Коэффициент диффузии можно считать не зависящим от концентрации.

Решение будем искать в виде

$$n = f(z), \quad \text{где } z = \frac{x}{\sqrt{t}}; \quad (6)$$

при $t = 0$

$$z = \begin{cases} -\infty & (x < 0), \\ +\infty & (x > 0). \end{cases}$$

Подставляя решение (6) в (4) и учитывая, что

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} &= f'(z) \left(-\frac{x}{2t^{3/2}} \right) = -\frac{z}{2t} f'(z), \\ \frac{\partial n}{\partial x} &= \frac{1}{\sqrt{t}} f'(z) \quad \text{и} \quad \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} = \frac{1}{t} f''(z), \end{aligned}$$

получаем обыкновенное дифференциальное уравнение вида

$$Df''(z) = -\frac{z}{2} f'(z) \quad (7)$$

при начальных условиях

$$f(-\infty) = n_1, \quad f(\infty) = n_2. \quad (5')$$

Пройнтегрируем уравнение (7):

$$\begin{aligned} \frac{f''(z)}{f'(z)} &= \frac{d \ln f'(z)}{dz} = -\frac{z}{2D}, \\ \ln f'(z) &= -\frac{z^2}{4D} + \ln C, \quad f'(z) = Ce^{-\frac{z^2}{4D}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Интегрируя далее уравнение (8) от $-\infty$ до z , находим:

$$f(z) - f(-\infty) = \bar{C} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{z^2}{4D}} dz. \quad (9)$$

Сделав в интеграле замену переменных $\frac{z}{2\sqrt{D}} = \xi$ и учитывая (5'), получаем:

$$f(z) = \bar{C} \int_{-\infty}^{\frac{z}{2\sqrt{D}}} e^{-\xi^2} d\xi + n_1, \quad \text{где } \bar{C} = 2\sqrt{DC}. \quad (10)$$

Определим \bar{C} из условия (5'). Переходя в (10) к пределу при $z \rightarrow \infty$ и учитывая (5'), будем иметь:

$$n_2 = \bar{C} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\xi^2} d\xi + n_1, \quad \text{или} \quad n_2 = \bar{C} \sqrt{\pi} + n_1,$$

откуда

$$\bar{C} = \frac{n_2 - n_1}{\sqrt{\pi}}.$$

Возвращаясь к старым переменным, получаем формулу

$$n(x, t) = \frac{n_2 - n_1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} e^{-\xi^2} d\xi + n_1. \quad (11)$$

Из (11) следует, что

$$\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{n_2 - n_1}{2\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}.$$

Это выражение максимально при $x = 0$, так что

$$\left(\frac{\partial n}{\partial x}\right)_{\max} = \frac{n_2 - n_1}{2\sqrt{\pi Dt}}.$$

Это выражение максимально при $x = 0$, так что и согласно (1)

$$\gamma = \delta \frac{n_2 - n_1}{2\sqrt{\pi Dt}}. \quad (12)$$

Полученная формула не может служить для вычисления D , так как в нее входит t — время, протекшее от начала диффузии, а в условиях опыта начальный момент не известен с достаточной точностью. Но если измерить значения γ по крайней мере для двух произвольных моментов времени, то это уже позволит определить коэффициент диффузии.

Пусть $\gamma = \gamma'$ при $t = t'$ и $\gamma = \gamma''$ при $t = t''$. Отсюда легко получить формулу, содержащую только промежуток времени $t'' - t'$, а именно:

$$D = \frac{\delta^2 (n_2 - n_1)^2}{4\pi (t'' - t')} \left(\frac{1}{\gamma'^2} - \frac{1}{\gamma''^2} \right). \quad (13)$$

Это окончательное выражение должно, таким образом, сохранять постоянную величину для любой пары значений t .

Описание установки. Установка схематически изображена на рис. 5: Параллельный световой пучок, даваемый коллиматором K , падает на плоскопараллельный сосуд T . Свет, прошедший через сосуд, попадает в оптическую трубу R , установленную на бесконечность. Вследствие преломления в диффузионном сосуде в поле зрения трубы видна картина, изображенная на рис. 6. Непрерывный ряд изображений коллиматорной щели заполняет весь промежуток от изображения, даваемого неотклоненными лучами ($\beta = 0$), до изображения, даваемого наиболее отклоненными лучами ($\beta = \gamma$). Таким образом, поле зрения, соответствующее углам β от 0 до γ , освещено, а вне этих пределов освещения нет.

Для устранения окраски на границе $\beta = \gamma$ применяется светофильтр F (рис. 5). Окраска получается вследствие дисперсии света при преломлении в сосуде T .

Труба R с винтовым окулярным микрометром O может вращаться вокруг горизонтальной оси. Труба R устанавливается на бесконечность, а щель коллиматора передвигается до тех пор, пока ее изображение, видимое в фокальной плоскости трубы R , не сделается вполне резким, после чего щель сужается и устанавливается на

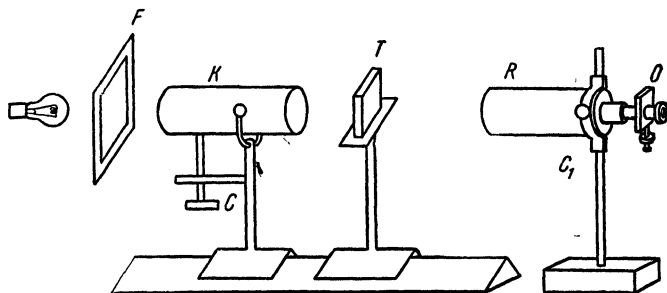


Рис. 5.

перекрестии нитей окуляра. Труба и коллиматор должны быть установлены горизонтально с помощью винтов C и C_1 (не виден на рисунке) так, чтобы их оптические оси совпали.

Сосуд T до половины наполняется дистиллированной водой (показатель преломления $n_2 = 1,333$). При помощи пипетки с длинным оттянутым кончиком (которую следует опустить до дна) по каплям сосуд дополняется 20%-ным раствором NaCl (показатель преломления $n_1 = 1,364$) с таким расчетом, чтобы линия раздела жидкостей пришлась на уровень оптической оси системы.

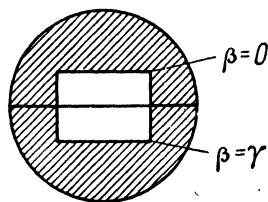


Рис. 6.

Пипетку следует вынимать медленно, чтобы жидкости не перемешались.

Измерения. Вращением микрометрического винта окуляра крест последовательно наводится на неотклоненное изображение щели (граница $\beta = 0$) и на наиболее отклоненное (граница $\beta = \gamma$). По разности обоих отсчетов положения трубы определяется угол γ . Промеры угла γ производятся примерно через каждые 10—15 минут. Так как изменение γ с течением времени замедляется, то и промежутки между промерами следует делать соответственно больше ¹⁾.

¹⁾ Верхняя граница фактически также может несколько смещаться, так как в процессе диффузии возникает градиент концентрации и в областях, достаточно далеких от границы раздела жидкостей. Очевидно, однако, что отсчеты во всех случаях нужно производить от неотклоненного изображения щели.

Для вычисления D по формуле (13) достаточно двух пар значений t' , γ' и t'' , γ'' . Однако для увеличения точности производят большое число измерений (в течение 1,5—2 часов). Чтобы устранить при расчете D систематическую ошибку, надо комбинировать между собой различные γ' и γ'' , а не относить разные γ'' к одному и тому же γ' . Кроме того, для уменьшения относительной ошибки следует брать для расчета не слишком близкие значения γ' .

Необходимо иметь в виду, что в формуле (13) углы γ выражены в радианах, а время t —в секундах. Переводной множитель целесообразно включить в постоянный коэффициент формулы (13) и вычислять каждый раз только множитель

$$\frac{1}{t'' - t'} \left(\frac{1}{\gamma''^2} - \frac{1}{\gamma'^2} \right).$$

Взяв затем среднее из всех этих величин и умножив его на постоянный коэффициент, получим искомое значение коэффициента диффузии D .

Технические данные установки. В качестве коллиматора и наблюдательной трубы в задаче могут быть использованы зрительные трубы марки ОТ-1. Растворы помещаются в плоскопараллельные кюветы из зеркального стекла.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева, Курс общей физики, т. I, Физматгиз, 1962.
2. А. Б. Млодзеевский, Молекулярная физика, Гостехиздат, 1941.
3. Е. А. Штрауф, Молекулярная физика, Гостехиздат, 1949.
4. И. К. Кикоин и А. К. Кикоин, Молекулярная физика, Физматгиз, 1963.

ЗАДАЧА 163

ДИФРАКЦИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ НА МОНОКРИСТАЛЛЕ

Введение. Самым общим случаем дифракции является дифракция в среде с трехмерным распределением неоднородностей. Таковую картину мы имеем в случае дифракции рентгеновских лучей в кристаллах. Так как величины межплоскостных расстояний в кристаллах того же порядка, что и длины волн рентгеновского излучения, то кристаллы являются естественными дифракционными решетками для рентгеновских лучей. Зная строение кристалла (закономерность расположения в нем атомов), можно рассчитать дифракционную картину и решать таким образом чисто оптические задачи (определение длины волны излучения, естественной ширины спектральной линии и т. д.). Наоборот, по полученной дифракционной картине можно определить строение, атомную структуру кристалла. Целью настоящей работы является ознакомление со способами получения и расчета лауэграммы.

Положение дифракционных максимумов на рентгенограмме, как известно, определяется уравнениями Лауэ:

$$\left. \begin{aligned} a(\cos \alpha - \cos \alpha_0) &= H\lambda, \\ b(\cos \beta - \cos \beta_0) &= K\lambda, \\ c(\cos \gamma - \cos \gamma_0) &= L\lambda, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где a , b , c — периоды решетки по осям координат, $\cos \alpha$, $\cos \beta$, $\cos \gamma$ и $\cos \alpha_0$, $\cos \beta_0$, $\cos \gamma_0$ — направляющие косинусы дифрагированного и падающего лучей соответственно, λ — длина волны рентгеновского излучения, а H , K , L — индексы интерференции.

Рассмотрение дифракционных максимумов как селективных отражений под углами, при которых разность хода между лучами, отраженными от двух соседних параллельных кристаллографических плоскостей, равна целому числу длин волн, приводит к уравнению Брэгга — Вульфа

$$n\lambda = 2d \sin \vartheta, \quad (2)$$

где ϑ — угол скольжения, а d — величина межплоскостного расстояния.

Положение любой кристаллографической плоскости может быть определено тремя отрезками A , B , C , отсекаемыми этой плоскостью на осях координат. Так как трансляции по разным осям могут быть разными, то отрезки измеряются в долях единиц a , b , c . Все семейство таких параллельных плоскостей характеризуется, очевидно, отрезками A , B , C , измеренными в осевых единицах, т. е. отношениями A/a , B/b , C/c . В кристаллографии принято для определения плоскости брать не сами отношения A/a , B/b и C/c , а величины, обратные им, называемые миллеровскими индексами. Миллеровские индексы обозначают буквами h , k , l и их принято заключать в круглые скобки и писать без запятых.

Зная систему, к которой принадлежит кристалл, и величины основных трансляций a , b , c , можно вычислить расстояние любой заданной плоскости (hkl) от соседней параллельной плоскости. Это расстояние, обозначаемое буквой d , называется межплоскостным расстоянием и входит в состав основной формулы рентгеноструктурного анализа. В простейшем случае кубической решетки связь между d , a и h , k , l выражается следующим равенством:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2}. \quad (3)$$

Спектр рентгеновского излучения, так же как и видимого света, может быть сплошным и линейчатым. Рентгеновское излучение, характеризующееся сплошным спектром, часто, по аналогии с видимым светом, называют белым, а излучение с линейчатым спектром называют характеристическим, так как он определяется материалом

анода рентгеновской трубки. Минимальная длина волны рентгеновских лучей в сплошном спектре определяется величиной приложенного к полюсам рентгеновской трубки напряжения,

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV} = \frac{12,395}{V} \text{ \AA}, \quad (4)$$

где h — постоянная Планка, c — скорость света, e — заряд электрона, V — напряжение в киловольтах.

Максимум интенсивности на спектральной кривой соответствует длинам волн, примерно в 1,5 раза большим, чем минимальная

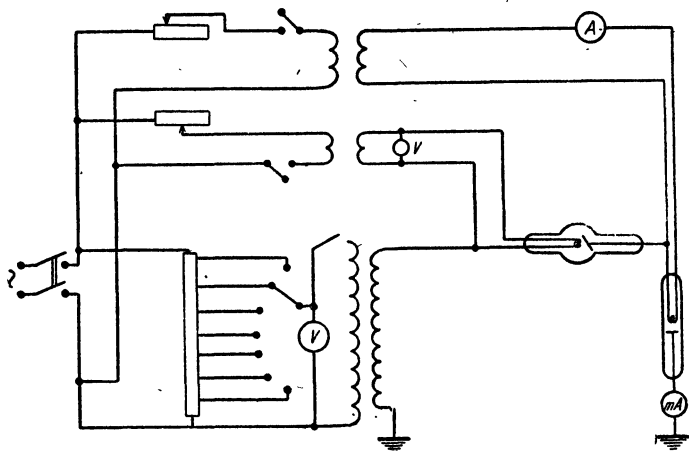


Рис. 1.

длина волны. Граница непрерывного спектра со стороны длинных волн в основном определяется величиной поглощения в веществе, из которого сделаны окошки рентгеновской трубки.

Характеристический спектр появляется только, если напряжение на рентгеновской трубке больше определенного критического значения. Величина критического напряжения определяется материалом анода. Трубки с медным и железным анодом в аппарате УРС-70 обычно работают на напряжениях, превышающих в 3—4 раза V критическое. Трубки с вольфрамовым анодом обычно используются для получения белого рентгеновского спектра.

Рентгеновский аппарат. Все современные рентгеновские высоковольтные аппараты — это трансформаторные установки, преобразующие переменный ток напряжением в 120—220 в в ток высокого напряжения (обычно постоянный ток).

Основными частями рентгеновского аппарата, помимо рентгеновской трубки и выпрямителя (кенотрона), являются высоковольтный трансформатор, трансформаторы накала трубки и

кентрона, автотрансформатор. Промышленностью выпускается значительное число различных типов рентгеновских аппаратов. Они различаются назначением и конструкцией. Одним из наиболее распространенных для работ по рентгеноструктурному анализу является аппарат типа УРС-70.

Принципиальная схема такого типа аппарата приведена на рис. 1. Фотография пульта управления аппарата УРС-70 дана на рис. 2. Регулировочные устройства для управления работой аппарата и измерительные приборы смонтированы в пульте управления. В пульте управления нет ни одной точки, находящейся под высоким напряжением. Все участки аппарата, находящиеся под высоким напряжением, — высоковольтный трансформатор, кентрон, катод трубки (анод трубки в УРС-70 заземлен) — находятся внутри оперативного стола и при нормальной работе аппарата недоступны для работающих. Таким образом, аппарат УРС-70 является электрически безопасным.

Последовательность включения аппарата УРС-70.

1. Включается сетевой щиток, подающий городское напряжение на аппарат.

2. Включается водяное охлаждающее устройство.

3. Включается рубильник 1.

4. Переключатель 7 вольтметра устанавливается на контроль сети.

5. При помощи корректора сети 2 регулируется напряжение. Полагается устанавливать 220 в.

6. Переключатель 7 вольтметра устанавливается на контроль напряжения на первичной обмотке высоковольтного трансформатора.

7. С помощью автотрансформатора вращением ручки 3 регулируется

напряжение, подаваемое на первичную обмотку высоковольтного трансформатора. Сначала подается не более 50 в.

8. Выключателем 4 включается напряжение на первичную обмотку высоковольтного трансформатора и, следовательно, подается высокое напряжение на трубку.

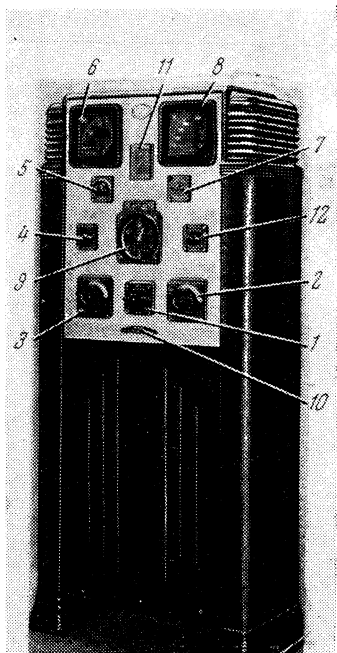


Рис. 2. Пульт управления аппарата УРС-70:

1—9 пояснены в тексте, 10 — тумблер для перевода включения высоковольтного трансформатора с пульта на оперативный стол, 11 — градуировочный график, используется для определения падения напряжения на трубке, 12 — токоограничитель, включается только при работе с разборными трубками

9. Наблюдая за показаниями миллиамперметра 6, регулируют ток через трубку, меняя ток накала трубки, что осуществляется вращением движка 5 реостата, находящегося в первичной цепи трансформатора накала трубки. (Режим работы каждой трубки дается в паспорте трубки.)

10. Вращением ручки 3 устанавливается рабочий режим на высоковольтном трансформаторе (режим смотреть в паспорте).

Рентгеновская установка УРС-70 снабжена блокировкой, не позволяющей включать высокое напряжение в случае, если недостаточен напор воды для охлаждения трубки или если открыта или не плотно закрыта дверца оперативного стола. При выключателе 4, повернутом в положение включения, аппарат в указанных случаях подает звуковой сигнал.

Счетчик 9 позволяет определять истинное время работы трубки. Этот счетчик имеет своей основой синхронный мотор типа СД-2, который включается одновременно с включением высоковольтного трансформатора и таким образом, измеряет время работы трубки, а не астрономическое время.

Выключается УРС-70 в порядке, обратном включению.

Экспериментальная часть. На рис. 3 схематически показано взаимное расположение первичного пучка рентгеновских лучей, кристалла и фотографической пленки при съемке лауэграммы. Пучок рентгеновских лучей, выходящий из трубки, проходит через коллиматор *A* и попадает на кристалл *K*. По другую сторону кристалла на некотором расстоянии от него помещается кассета *B* с фотопленкой, плоскость которой перпендикулярна к первичному пучку рентгеновских лучей. Металлический экран *Э*, в который вставляется коллиматор, защищает кристалл и фотопленку от излишнего облучения рентгеновскими лучами. Кристалл укрепляется в специальном держателе, позволяющем устанавливать его желаемым образом относительно падающего пучка лучей.

Лауэграмма отображает симметрию кристалла в том направлении, вдоль которого направлен первичный пучок рентгеновских лучей. Например, если кристалл кубической системы установить так, чтобы направление падающего пучка совпадало с осью 4-го

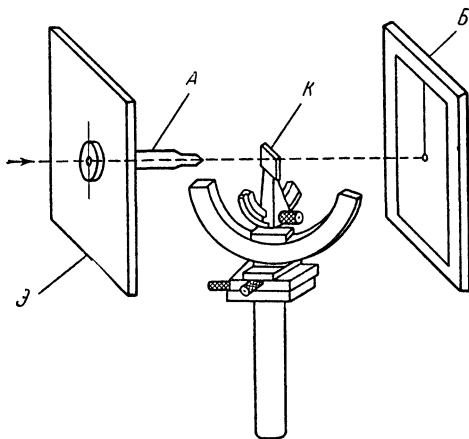


Рис. 3.

порядка, то полученная на снимке дифракционная картина обнаружит эту симметрию, т. е. каждое пятно снимка может быть совмещено с аналогичным четыре раза поворотами на 90° вокруг нормали к плоскости снимка, проходящей через центральное пятно (след прошедшего через кристалл первичного пучка).

Для получения лауэграммы существует много различных конструкций рентгеновских камер. В данной задаче применяется камера РКСО, снабженная гониометрической головкой.

Специальный держатель кристалла — гониометрическая головка предназначена для точной центрировки и юстировки¹⁾ кристалла. Винты, которые служат для центрировки, сообщают образцу поступательное перемещение в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Повороты по дугам гониометрической головки дают возможность осуществлять угловую установку кристалла. Гониометрическая головка съемная. Ее можно или свинтить с оси, или вынуть из камеры вместе с осью, для чего предварительно надо ослабить закрепляющий ее винт.

Кассета камеры РКСО приспособлена для снимков на фотопленку размером 10×12 см. Расстояние кассеты от кристалла строго фиксировано и равно 40 мм. Это расстояние необходимо знать для расчетов снимков. Перпендикулярность кассеты направлению пучка рентгеновских лучей обеспечивается при сборке камеры. На кассете со стороны, обращенной к лучам, перпендикулярно к оси головки туго натянута тонкая проволока. Получающееся наряду с интенсивными дифрагированными пучками слабое рассеянное излучение вызывает общее незначительное почернение (вуалирование) пленки. Проволока поглощает это излучение, благодаря чему на снимке получается светлая тень. Параллельно этой тени выбирается одна из осей внешней координатной системы, относительно которой рассчитывается направление осей кристалла. Чтобы определить на снимке верх и низ, правую и левую стороны, на кассету (в центре ее) наклеивается тонкая фигурная пластинка свинца, которая также дает тень на снимке. Одновременно эта пластинка служит для ослабления первичного пучка в месте встречи его с пленкой.

Камера в целом собрана таким образом, что правильность взаимного расположения отдельных ее частей обеспечивается с большой точностью, поэтому разрешается повертывать только те винты, которые служат для установки кристалла. Все винты, имеющие головки со шлицами для отвертки, предназначены для сборки и юстировки камеры, поэтому повертывать их запрещается.

Центрировка и юстировка кристалла. В данной задаче в качестве образца применяется кристалл каменной соли, поэтому установка кристаллов сравнительно проста. Известно, что кри-

¹⁾ Юстировкой кристалла называется точная угловая установка кристалла относительно оси гониометрической головки.

сталлы каменной соли откалываются по плоскостям куба и имеют форму прямоугольных параллелепипедов. Таким образом, ребра кристаллов являются осями 4-го порядка, а грани — плоскостями типа $\{100\}$ ¹⁾. Зная направление осей 4-го порядка, можно легко рассчитать все другие кристаллографические направления и, следовательно, установить кристалл в любой заданной ориентировке. Для нашей задачи удобно иметь кристалл в виде длинного параллелепипеда размером примерно $1 \times 1 \times 7$ мм. Такой кристалл прикрепляется воском или пластилином к столику гониометрической головки так, чтобы длинное ребро было примерно параллельно оси гониометрической головки, а грани кристалла параллельны плоскостям дуг гониометрической головки. Для дальнейшей работы удобно начальное положение дуг головки устанавливать так, чтобы их плоскости были взаимно-перпендикулярны, причем плоскость верхней дуги была бы перпендикулярна к оси коллиматора камеры.

Рентгенографируемый участок кристалла должен быть установлен на расстоянии ~ 5 мм от плоскости столика, так как тогда этот участок будет находиться в центре кривизны дуговых салазок гониометрической головки. Приклеенный к столику кристалл центрируется так, чтобы он находился против отверстия диафрагмы. Уточнить центрировку можно, наблюдая через коллиматор перемещения кристалла и добиваясь, чтобы при любом повороте кристалл оставался в центре поля зрения. Далее, пользуясь дугами гониометрической головки, устанавливают длинные ребра кристалла параллельно оси вращения головки. Более точная установка возможна с помощью зрительной трубы, которая имеет в окуляре шкалу и может ввинчиваться в камеру РКСО вместо коллиматора.

Кристалл устанавливают так, чтобы все три координатные оси кристалла (оси 4-го порядка) были параллельны внешним координатным осям: направлению первичного пучка рентгеновских лучей, оси поворотов гониометрической головки и оси, которая параллельна натянутой на кассете проволоке. Точность установки кристалла легко может быть проверена рентгенографически. При выбранной установке кристалла плоскость, перпендикулярная к оси гониометрической головки, является также плоскостью симметрии ²⁾, поэтому верхняя и нижняя части лауэграммы должны быть симметричны. Выбрав на снимке две симметричные точки L_1 и L_2 , расположенные возможно ближе к вертикали и подальше от

¹⁾ Семейство кристаллографически эквивалентных плоскостей обозначается индексами типичной плоскости, заключенными в фигурные скобки. Так, например, все семейство плоскостей, образующих гранку куба: (100), (010), (001), ($\bar{1}00$), (0 $\bar{1}0$), (00 $\bar{1}$), обозначается $\{100\}$. Заметим, что при написании индексов Миллера знак «—» ставится над числом.

²⁾ Все координатные плоскости кристалла каменной соли являются плоскостями симметрии.

центра снимка O , измеряем расстояния OL_1 и OL_2 (рис. 4). По расстояниям OL_1 и OL_2 и расстоянию от кристалла до пленки D легко определить угол наклона кристалла ε :

$$\frac{OL_1}{D} = \operatorname{tg} 2\vartheta_1, \quad \frac{OL_2}{D} = \operatorname{tg} 2\vartheta_2, \quad \varepsilon = \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{2}. \quad (5)$$

При точном расположении кристалла, соответствующем выбранной установке, вертикальная плоскость, совпадающая с направлением первичного пучка, также является плоскостью симметрии.

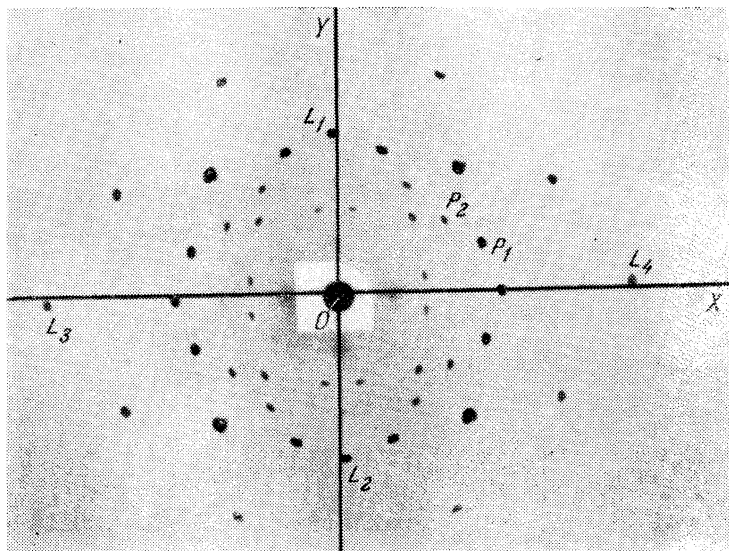


Рис. 4.

При этом правая и левая половины снимка должны быть симметричны. Ошибку установки можно определять аналогично описанному выше, но нужно выбирать пятна L_3 , L_4 , расположенные близ горизонтальной линии, проходящей через след первичного пучка. Определив углы деюстировки кристалла, необходимо с помощью поворотов по дугам гониометрической головки (для исправления «вертикальной» деюстировки) и поворотов всей гониометрической головки вокруг ее оси (для исправления «горизонтальной» деюстировки) уточнить установку кристалла. Деюстировку менее $10'$ можно не выправлять.

Расчет рентгенограмм. Определение индексов интерференций. Рассмотрим кубический кристалл: оси a , b , c равны и взаимно-перпендикулярны. Пусть кристалл установлен так, что направления внешних координатных осей X , Y , Z совпа-

дают с направлениями осей a , b , c кристалла. Пусть первичный пучок рентгеновских лучей направлен вдоль одной из координатных осей, скажем, вдоль оси Z . Другая ось (X) пусть совпадает с осью гониометрической головки. Тогда третья ось (Y) будет параллельна проволоке, натянутой на кассете. Проведем на фотопленке оси X' и Y' параллельно осям X и Y кристалла. Расстояние от центра кристалла (начало координат) до фотопленки обозначим буквой D .

Любое интерференционное пятно P рентгенограммы может быть задано тремя координатами X_1 , Y_1 , D , а направление интерференционного луча проще всего задать косинусами углов α , β , γ , которые он образует с осями координат:

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{X_1}{KP}; & \cos \beta &= \frac{Y_1}{KP}; \\ \cos \gamma &= \frac{D}{KP}. \end{aligned}$$

Из рис. 5 видно, что $(KP)^2 = X_1^2 + Y_1^2 + D^2$.

Преобразуем уравнения (1) для нашего случая. Благодаря выбранной ориентировке первичного пучка имеем: $\cos \alpha_0 = 0$; $\cos \beta_0 = 0$; $\cos \gamma_0 = 1$. Таким образом, уравнения (1) примут вид

$$\left. \begin{aligned} a \cos \alpha &= H\lambda, \\ a \cos \beta &= K\lambda, \\ a(\cos \gamma - 1) &= L\lambda, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

откуда $H : K : L = \cos \alpha : \cos \beta : (\cos \gamma - 1)$ или

$$H : K : L = \frac{X_1}{KP} : \frac{Y_1}{KP} : \left(\frac{D}{KP} - 1 \right) = X_1 : Y_1 : (D - KP). \quad (7)$$

Покажем, что, рассматривая дифракцию рентгеновских лучей как селективное отражение, получим индексы отражающих плоскостей hkl совпадающими, с точностью до порядка отражения n , с полученными выше индексами интерференций.

Рассмотрим снова рис. 5. Пусть теперь начало координат лежит в точке пересечения первичного пучка с фотопленкой, в точке O . Тогда плоскость P' , отражением от которой образовано лауэвское

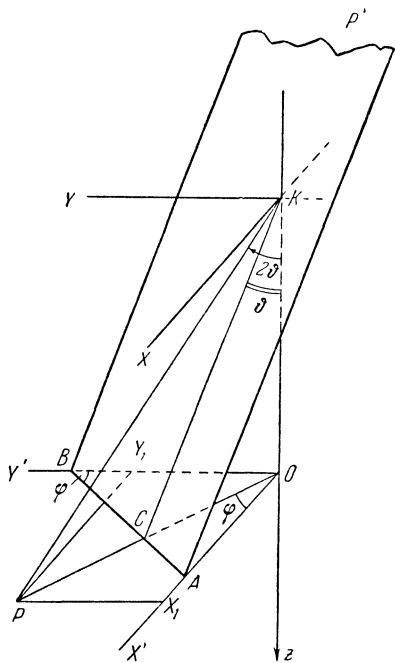


Рис. 5.

пятно P , отсечет по осям отрезки OA , OB и $OK = D$. По определению понятия индексов плоскости имеем:

$$h:k:l = \frac{1}{OA} : \frac{1}{OB} : \frac{1}{OK}. \quad (8)$$

Из прямоугольных треугольников OKP и OKC получим:

$$\operatorname{tg} 2\vartheta = \frac{OP}{OK} = \frac{OP}{D} \text{ и } OC = D \operatorname{tg} \vartheta.$$

Линии AB и OP взаимно-перпендикулярны, так как луч падающий, отраженный и нормаль к отражающей плоскости лежат в одной плоскости $KOSP$. Поэтому углы AOC и OBC равны.

Обозначив эти углы буквой φ , напишем:

$$OA = \frac{OC}{\cos \varphi}; \quad OB = \frac{OC}{\sin \varphi}.$$

Уравнения (8) преобразуются к следующему виду:

$$h:k:l = \frac{1}{OC/\cos \varphi} : \frac{1}{OC/\sin \varphi} : \frac{1}{OC/\operatorname{tg} \vartheta} = \cos \varphi : \sin \varphi : \overline{\operatorname{tg} \vartheta}.$$

Заменив $\operatorname{tg} \vartheta$ через синус и косинус двойного угла, получаем:

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{1 - \cos 2\vartheta}{\sin 2\vartheta} = \frac{1 - D/KP}{OP/KP} = \frac{KP - D}{\sqrt{X_1^2 + Y_1^2}},$$

из треугольников OPX_1 и OPY_1 получаем:

$$\cos \varphi = \frac{X_1}{\sqrt{X_1^2 + Y_1^2}}, \quad \sin \varphi = \frac{Y_1}{\sqrt{X_1^2 + Y_1^2}},$$

и окончательно

$$h:k:l = \frac{X_1}{\sqrt{X_1^2 + Y_1^2}} : \frac{Y_1}{\sqrt{X_1^2 + Y_1^2}} : \frac{-KP + D}{\sqrt{X_1^2 + Y_1^2}} = X_1 : Y_1 : (-KP + D). \quad (9)$$

Сопоставление выражений (9) и (7) показывает, что индексы интерференций и индексы отражающей плоскости совпадают.

Приведем в качестве примера подсчет индексов пятен P_1 и P_2 рентгенограммы, приведенной на рис. 4.

Лауэграмма, приведенная на этом рисунке, получена при расстоянии от кристалла до пластинки $D = 30,0$ мм.

Координаты пятна P_1 : $X'_1 = 20,5$ мм; $Y'_1 = 6,8$ мм; координаты пятна P_2 : $X'_2 = 15,3$ мм, $Y'_2 = 10,0$ мм. Результаты подсчетов сведены в таблицу. В этой же таблице указаны полученные значения индексов. Точность измерения такова, что все расчеты можно проводить на логарифмической линейке.

№ пятна	X'	Y'	$(KP)^2$	KP	$KP - D$	hkl
P_1	20,5	6,8	1370	37,0	7,0	311
P_2	15,3	10,0	1230	35,1	5,1	321

Определение длин волн, участвующих в отражении. Спектральный состав белого излучения определяется напряжением, на котором работала трубка при съемке рентгенограммы. Минимальная длина волны вычисляется из соотношения (4). Граница спектра со стороны длинных волн определяется поглощением в стекле трубки. При употреблении трубок с окошками из специального стекла (гетан) или бериллия, пропускающих мягкое рентгеновское излучение, практически граница спектра проходит где-то близ $2,5 \text{ кХ}^1$). Обычное стекло пропускает лучи с длинами волн не больше $0,8 - 1 \text{ кХ}$. Лауэвское пятно на снимке может получиться вследствие наличия нескольких интерференций с кратными индексами: HKL , $2H$ $2K$ $2L$ и т. д. Эти интерференции возникают при разных длинах волн. Если известна величина a и интервал длин волн, легко определить длины волн, участвующих в создании данного пятна лауэграммы, из условия

$$a_i \cos \alpha_i = H\lambda \quad \text{или} \quad n\lambda = 2d \sin \varphi.$$

При выполнении работы необходимо:

1. Ознакомиться с камерой для съемки лауэграмм.
2. Выколоть кристалл каменной соли размером $1 \times 1 \times 7 \text{ мм}$ и установить его в камере так, чтобы направления ребер кристалла совпадали с осью гониометрической головки и направлением первичного пучка.
3. Получить три рентгенограммы: в исходном положении, затем повернув головку вокруг ее оси на 45 и на 90° .
Определить на каждой из трех рентгенограмм элементы симметрии, соответствующие данному направлению съемки.
4. Получить при определенном напряжении лауэграмму в положении, когда ось 4-го порядка совпадает с направлением первичного пучка рентгеновских лучей, и определить индексы интерференций нескольких пятен одной четверти снимка, индексы отражающих плоскостей, соответствующих этим интерференциям, и длины волн, участвующих в образовании пятен, индексы которых определялись.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. Г. С. Жданов и Я. С. Уманский, Рентгенография металлов, ч. I, Металлургиздат, 1941.

¹⁾ $1 \text{ кХ} = 1,002 \text{ \AA}$.

ЗАДАЧА 164

ДИФРАКЦИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ В ПОЛИКРИСТАЛЛАХ

Целью настоящей задачи является получение и расчет рентгеновской дифракционной картины от поликристаллического образца. Общие сведения о рентгеновских спектрах, о дифракции рентгеновских лучей в кристаллах и о применяемом рентгеновском аппарате см. в описании предыдущей задачи и рекомендованной литературе.

Поликристаллическое вещество представляет собой конгломерат большого числа отдельных беспорядочно ориентированных мелких кристалликов. В природе кристаллические вещества встречаются в большинстве случаев именно в виде поликристаллов.

В данной работе будет изучаться поликристаллический образец из кристаллов кубической системы. По полученной рентгенограмме (дебаеграмме) должен быть рассчитан размер элементарной ячейки, определены индексы плоскостей, давших отражения, и вычислено число атомов, приходящихся на элементарную ячейку.

Получение дебаеграммы. Пусть на поликристалл падает пучок строго монохроматического излучения с длиной волны λ . В случае, если в облучаемом объеме поликристалла находится достаточно большое число беспорядочно расположенных кристаллитов, то среди них обязательно найдется некоторое количество ориентированных таким образом, что некоторая плоскость, скажем плоскость с индексами $h_1 k_1 l_1$ и межплоскостным расстоянием d_1 , окажется в отражающем положении, т. е. составит с падающим лучом угол θ_1 , удовлетворяющий уравнению Брэгга — Вульфа: $n\lambda = 2d_1 \sin \theta_1$. От остальных кристалликов облучаемого объема, ориентированных неблагоприятным (для данной длины волны λ) образом, отражений от плоскости $h_1 k_1 l_1$ не получится. Однако часть из этих кристалликов окажется ориентированной так, что какая-то другая группа плоскостей с индексами $h_2 k_2 l_2$ и межплоскостным расстоянием d_2 будет для данной длины волны λ находиться в отражающем положении. Еще какая-то часть кристалликов будет расположена так, что отражения дадут плоскости с индексами $h_3 k_3 l_3$, и т. д. В результате облучения какого-либо поликристалла монохроматическим рентгеновским светом получим ряд характерных дискретных дифракционных максимумов. Дифракционные лучи, полученные от одинаковых плоскостей hkl различных кристалликов, будут располагаться по поверхности конуса, у которого угол при вершине будет равен 4θ , а осью будет направление падающего пучка лучей (рис. 1). При достаточно большом числе кристалликов в облучаемом объеме и полностью хаотическом их распределении дифракционные лучи покроют всю коническую поверхность без промежутков. Если перпендикулярно к оси такой конической поверхности поместить фотопластинку, то на ней после проявления появится сплошное

темное кольцо — след пересечения дифракционного конуса с плоскостью пластинки.

Число и положение концентрических колец, получаемых на рентгенограмме поликристалла, зависит от строения кристаллической решетки исследуемого поликристалла и от применяемого

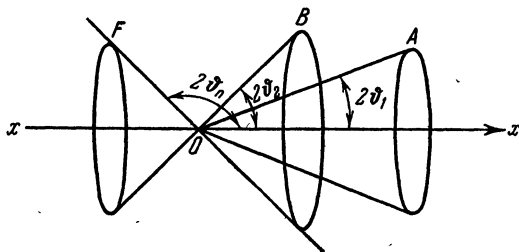


Рис. 1.

излучения. Обычно рентгенограммы поликристаллов снимаются на пленку, расположенную по цилиндрической поверхности, ось которой перпендикулярна к падающему на образец пучку рентгеновских лучей (рис. 2). Тогда на рентгенограмме видны расположенные симметрично относительно следа первичного пучка дуги — линии пересечения цилиндра фотопленки и дифракционного конуса.

Рентгенограммы с поликристаллов снимают на характеристическом излучении K -серии, содержащем небольшое число спектральных линий. Достаточно интенсивны и практически наблюдаются всего три линии: $K\alpha_1$, $K\alpha_2$ и $K\beta$. Чтобы получить на снимке линии, соответствующие только одному значению λ , и таким образом упростить расчет, излучение $K\beta$ можно отфильтровать, поставив перед диафрагмой камеры селективно поглощающий фильтр. Длины волн $K\alpha_1$ и $K\alpha_2$ очень близки и при углах $\vartheta < \sim 60^\circ$ отражения их сливаются в одну линию. Поэтому

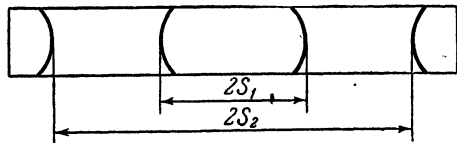
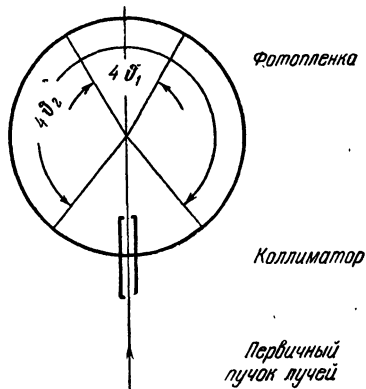


Рис. 2

присутствие двух линий дублета K практически не усложняет расчет снимка.

Экспериментальная часть. Для получения рентгенограмм поликристаллов существует много различных типов камер. В данной задаче применяется камера РКД. Образец цилиндрической формы прикрепляется воском, пластилином и т. п. к съемному сделанному из мягкого железа столику приблизительно перпендикулярно к его плоскости. Затем столик прикладывается к магниту, укрепленному на конце вращающейся оси камеры. Столик с образцом можно перемещать по пластинке магнита специальным винтом. Образец центрируют, наблюдая его вращение через лупу, надетую на коллиматор. Образец отцентрирован, когда при вращении он кажется неподвижным¹⁾.

После того как образец отцентрирован, камера заряжается пленкой и ставится к трубке. Затем путь лучей между окошком трубки и коллиматором тщательно экранируется цилиндром из свинцовой фольги, после чего включается рентгеновский аппарат и проверяется, не сбилась ли установка камеры на лучи во время центрировки образца и зарядки.

Расчет рентгенограммы. На рентгенограмме поликристалла, снятой на цилиндрическую пленку, ось которой совпадает с осью образца и перпендикулярна к первичному пучку рентгеновских лучей, могут быть зарегистрированы дифракционные максимумы в широком интервале углов ϑ . Интервал углов ϑ регистрируемых отражений для камеры РКД — от 4 до 84°. Следы пересечения дифракционных конусов с цилиндрической поверхностью пленки будут представлять собой попарно симметричные дуги, расстояния между которыми $2S$ пропорциональны соответствующим углам отражений (рис. 2). Дуга $2S$ связана с измеренным в радианах углом при вершине дифракционного конуса 4ϑ следующим соотношением:

$$2S = 4R\vartheta, \quad (1)$$

где R — радиус цилиндра, по которому изогнута пленка. Отсюда угол отражения ϑ , выраженный в градусах, определяется формулой

$$\vartheta = 57,3 \frac{S}{2R}. \quad (2)$$

В камере РКД диаметр цилиндрической поверхности, по которой ложится фотопленка, равен 57,3 мм, поэтому число градусов угла

¹⁾ Быстрой центрировки образца можно добиться, применяя следующий прием: поворотом оси со столиком выводят образец на самое высокое его положение, после этого винтом опускают образец к центру. Далее поднимают винт, толкающий столик с образцом, поворачивают ось с образцом и снова смещают образец к центру. Обычно нескольких смещений достаточно для центрировки образца. Биения образца примерно на $1/4$ его диаметра мало мешают, и устранять их не обязательно.

равно числу миллиметров в половине расстояния между симметричными линиями рентгенограммы, т. е. числу миллиметров в S . Межплоскостное расстояние d , индексы плоскости (hkl) и основной период решетки a связаны между собой соотношением (3) (задача 163). Подставляя его в уравнение Брэгга — Вульфа, получим:

$$\sin^2 \vartheta = \frac{\lambda^2}{4a^2} (h^2 + k^2 + l^2). \quad (3)$$

При расчете снимка для каждой линии рентгенограммы находим: $2S_n$, ϑ_n , $\sin^2 \vartheta_n$. Формула (3) показывает, что для кубического кристалла значения $\sin^2 \vartheta$ пропорциональны $h^2 + k^2 + l^2$.

Индексы плоскостей всегда целые и в большинстве случаев небольшие числа. Вычислив ряд значений для $\sin^2 \vartheta$ и зная, что все эти величины имеют общий множитель $\lambda^2/4a^2$, подбираем величину этого общего множителя, и следовательно, находим приближенно значения $(h^2 + k^2 + l^2)$ для каждой линии. Зная величины сумм квадратов индексов, легко определяем и сами индексы плоскостей, отражением от которых образованы линии рентгенограмм. Для простой кубической решетки возможны любые значения индексов; для объемноцентрированной кубической решетки наблюдаются отражения только от тех плоскостей, для которых сумма индексов четная; для гранецентрированной кубической решетки наблюдаются отражения только от тех плоскостей, для которых все три индекса четные или все три нечетные. Таким образом, для простой кубической решетки значения $(h^2 + k^2 + l^2)$ представляют ряд 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9 и т. д., для объемноцентрированной 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 и т. д., для гранецентрированной 3, 4, 8, 11, 12, 16, 19, 20 и т. д. Далее, найдя индексы, определяем для каждой линии величину a , пользуясь соотношением (3). Чем больше угол ϑ , тем точнее определяется период решетки a . Анализ наблюдаемых экспериментально индексов (hkl) позволяет решить, к какому типу (примитивная, гране- или объемноцентрированная) принадлежит решетка исследуемого вещества.

Вместо вышеописанного метода индцирования рентгенограммы можно воспользоваться весьма простым графическим методом. Перепишем формулу (3) в виде

$$\sin \vartheta = \frac{\lambda}{2a} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}. \quad (4)$$

Построим семейство прямых (рис. 3) $\sin \vartheta = f(\lambda/a)$. По оси абсцисс будем откладывать $\frac{\lambda}{a}$, по оси ординат $\sin \vartheta$. Очевидно, для любых индексов функция $\sin \vartheta = f(\lambda/a)$ будет выражаться прямой, проходящей через начало координат. Для расчета рентгенограмм наносят на полоску бумаги экспериментально найденные значения $\sin \vartheta$, взятые в масштабе графика. Наложив такую

линейку на график, как это показано на рис. 3, и передвигая ее так, чтобы нуль линейки совпадал с нулевой линией графика ($\sin \vartheta = 0$), находим на графике вертикальный разрез, при котором все экспериментальные значения $\sin \vartheta$ совпадают с прямыми графика ¹⁾. При этом сразу определяются суммы квадратов индексов линий и величина λ/a . Так как индексы могут иметь только целочисленные значения, то некоторая неточность совпадения экспериментальных

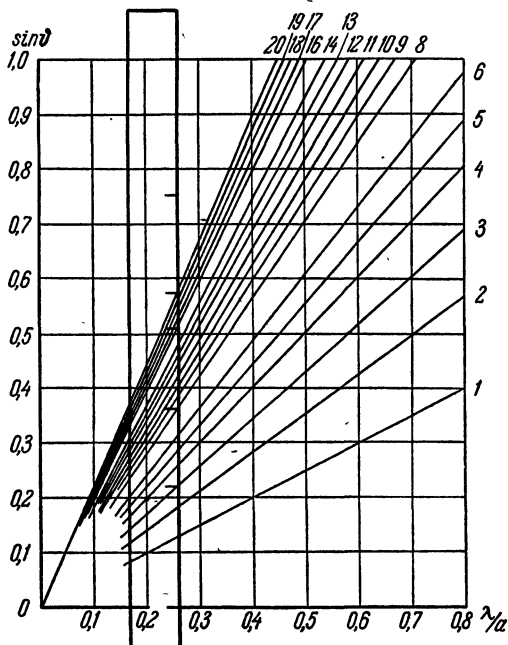


Рис. 3.

значений с линиями на графике не скажется на правильности определения индексов. Значения же периода a следует брать не из полученной величины λ/a , а вычислять по формулам независимо для каждой рассматриваемой линии, используя для этого найденные по графику значения индексов hkl .

Определив период a , вычисляем объем элементарной ячейки $v = a^3$. Зная объем элементарной ячейки и плотность исследуемого вещества, легко определить число атомов в ячейке. Плотность вещества — это масса вещества в единице объема, следовательно, это отношение массы вещества, содержащегося в объеме элементарной ячейки, к объему ячейки. Масса вещества в элементарной

¹⁾ Очевидно, что линии $K\alpha$ излучения дадут один разрез, а линии $K\beta$ — другой.

ячейке — это произведение числа атомов N в элементарной ячейке на атомный (молекулярный) вес M и на массу атома водорода m_H , следовательно, плотность ρ может быть выражена следующим образом:

$$\rho = \frac{NMm_H}{v}. \quad (5)$$

Из соотношения (5) получаем:

$$N = \frac{\rho v}{Mm_H} = 0,607 \frac{\rho v}{M} \cdot 10^{24}. \quad (6)$$

Порядок работы.

1. Получить рентгенограмму какого-либо поликристалла кубической системы.

2. Проиндицировать полученную рентгенограмму, определить основной период решетки, тип ячейки (примитивная, гранецентрированная или объемноцентрированная) и объем элементарной ячейки.

3. Зная (по таблицам) плотность вещества, определить число атомов в элементарной ячейке.

4. Сравнить число атомов в элементарной ячейке, полученное в пункте 3 задания, с числом атомов, полученным по определению типа ячейки (пункт 2 задания).

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. Г. С. Жданов и Я. С. Уманский, Рентгенография металлов, ч. I, Металлургиздат, 1941.

3. Н. Н. Качанов и Л. И. Миркин, Рентгеноструктурный анализ, Машгиз, 1960.

ЗАДАЧА 165

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА НА МАЛОЙ БАЗЕ

Метод измерений. Измерение скорости света в настоящей задаче производится фазометрическим методом. Применяется специальный источник света, интенсивность которого изменяется по гармоническому закону с частотой ν_1 :

$$I(t) = I_0 \sin 2\pi\nu_1 t + I_{00}. \quad (1)$$

В результате от источника света на фоне постоянной составляющей I_{00} распространяется волна интенсивности света

$$I(x, t) = I_0 \sin 2\pi\nu_1 \left(t - \frac{x}{c} \right). \quad (2)$$

Эта искусственно созданная волна интенсивности света, которую, разумеется, не следует путать со световой волной, направляется к системе зеркал и отражается от них к приемнику света (фотоумножителю) (рис. 1): Если свет при этом прошел путь L , то колебание его интенсивности, пришедшее к приемнику, запишется так:

$$I(t) = I_0 \sin 2\pi\nu_1 \left(t - \frac{L}{c} \right). \quad (3)$$

Разность фаз $\Delta\varphi$ между колебаниями (1) и (3):

$$\Delta\varphi = 2\pi\nu_1 \frac{L}{c}. \quad (4)$$

Если расстояние L и частота изменения интенсивности источника света ν_1 определены, то измерение разности фаз $\Delta\varphi$ позволяет вычислить значение скорости света из формулы (4).

Так как используется свет, интенсивность которого периодически изменяется, то, подобно методу Физо, фазометрический метод позволяет определить значение групповой скорости света.

Из формулы (4) видно, что для получения заметной и измеримой разности фаз $\Delta\varphi$ на базе 1—3 м необходимо использовать возможно большую частоту изменения интенсивности света ν_1 .

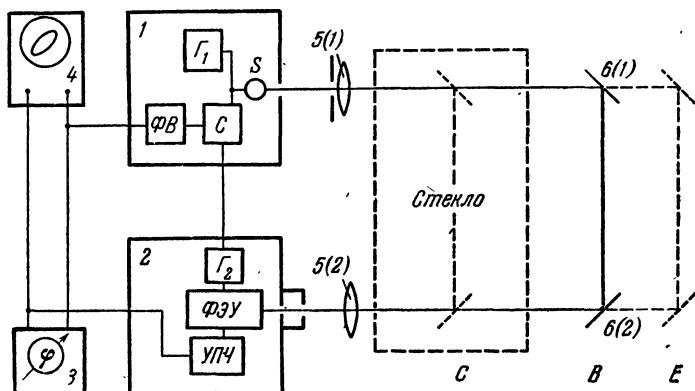


Рис. 1.

Установка. Основные части установки и их связь показаны на рис. 1 и 2. Сюда входят блок источника света 1, блок приемника света 2, фазометр 3, осциллограф 4, линзы 5, снабженные диафрагмами, зеркала 6, установленные на оптической скамье 7, и устройство для введения вещества в пучок света 8.

Блок источника света. В качестве источника модулированного света (S) используется специальная газоразрядная

лампа, применяющаяся в фототелеграфии. На ее анод, кроме постоянного напряжения, подается переменное напряжение от радиочастотного генератора Γ_1 , что и обеспечивает изменение интенсивности света лампы с частотой $\nu_1 = 16,502 \text{ Мгц}$. Для измерения разности фаз $\Delta\phi$ электрические колебания генератора Γ_1 преобразуются в колебания значительно более низкой «промежуточной» частоты $\nu_n = 7 \text{ кГц}^1$). Преобразование осуществляется

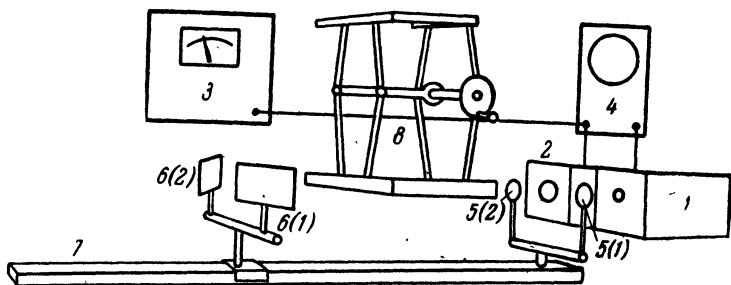


Рис. 2.

в смесителе при помощи напряжения с частотой $\nu_2 = \nu_1 - \nu_n = 16,495 \text{ Мгц}$, поступающего от генератора Γ_2 , расположенного в блоке приемника света²). Напряжение промежуточной частоты усиливается в усилителе промежуточной частоты (УПЧ) и поступает в фазовращатель (ФВ). Из фазовращателя выходное напряжение блока источника света поступает на фазометр 3 и осциллограф 4.

Блок приемника света. В блоке приемника света использован фотоумножитель (ФЭУ) с устройством и принципом действия которого необходимо ознакомиться по описанию задачи 159. Фотоумножитель преобразует колебания интенсивности света, попадающего на его фотокатод, в переменный фототок. Кроме того, непосредственно в фотоумножителе производится преобразование колебаний фототока частоты ν_1 в колебания промежуточной частоты ν_n . Для этого на третий диод фотоумножителя подается напряжение от генератора Γ_2 с частотой ν_2 . Составляющая фототока промежуточной частоты, усиленная в одиннадцати каскадах фотоумножителя, выделяется на контуре, включенном в цепь анода фотоумножителя и настроенном на частоту ν_n . После усиления в УПЧ выходное напряжение блока приемника поступает на фазометр и осциллограф (радиосхемы блоков см. рис. 4 — рис. 6).

¹) Это дает возможность применить для фазовых измерений низкочастотный электронный фазометр промышленного типа (ФЭ-1).

²) Частоты генераторов Γ_1 и Γ_2 стабилизированы кварцами.

Фазометр. Для измерения разности фаз между выходными напряжениями блоков источника и приемника света служит фазометр Ф2-1 (рис. 3). О порядке работы с ним см. ниже.

Осциллограф. Электронный осциллограф (СИ-1) служит для наблюдения формы выходных сигналов промежуточной частоты блока источника света и блока приемника света, а также для качественной оценки методом эллипса зависимости сдвига фаз от оптической длины пути, проходимого светом. (С устройством и работой электронного осциллографа необходимо ознакомиться по описанию задачи 109).

Оптическая часть установки. Дуга фототелеграфной лампы *S* (рис. 1) представляет собой практически точечный

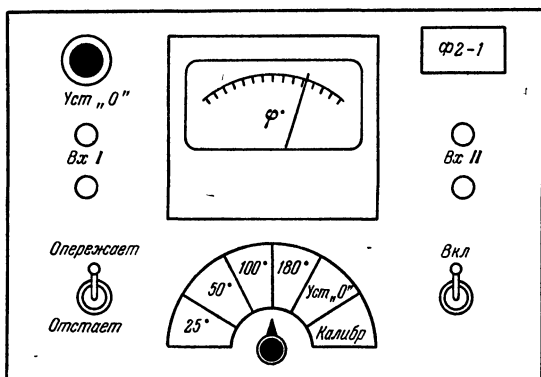


Рис. 3

источник света, который располагается в фокусе линзы 5 (1). Параллельный пучок света направляется линзой 5 (1) к зеркалам, расположенным под углом 45° к нему, и от них на линзу 5 (2), в фокусе которой расположен катод фотоумножителя.

Зеркала закреплены в специальных держателях и установлены на рейтере, свободно перемещающемся по оптической скамье. В результате имеется возможность изменять расстояние, проходимое светом, без существенного нарушения юстировки зеркал. Оптическая скамья снабжена шкалой для отсчета положения рейтера.

Для измерения скорости света в веществе необходимо, чтобы это вещество было удобно вводить и выводить из световых пучков. Для этого в установке имеется специальное подъемное устройство, в нижней части которого в качестве исследуемого вещества подвешена стеклянная плита 8 (рис. 2). При помощи горизонтального винта, снабженного штурвалом, стеклянная плита может опускаться в световой пучок и подниматься из него.

Фотоумножитель помещен в специальный экран, защищающий его от действия постороннего света и электромагнитных полей.

В передней части этого экрана расположен тубус, в центре которого имеется маленькое отверстие. Через это отверстие на фотокатод умножителя поступает модулированный свет, отраженный от зеркал и собранный линзой 5 (2). Тубус предохраняет фотокатод фотоумножителя от постороннего бокового света, и поэтому помещение можно не затемнять.

Преобразование сигналов в схеме установки. Для проведения измерений необходимо иметь четкое представление о преобразовании фаз электрических колебаний в различных частях установки.

Колебания генератора Γ_1 модулируют источник света и одновременно после преобразования их смесителем в колебания промежуточной частоты попадают на фазометр. Фаза этого сигнала и служит для сравнения с ней фазы сигнала промежуточной частоты блока приемника света, которая изменяется с изменением длины оптического пути.

Более подробно это можно представить так:

1. Колебания интенсивности света с фазой $\omega_1 t + \varphi_{01} - \omega_1 L_1/c$ ($\omega_1 L_1/c$ — фаза, вносимая за счет прохождения пучка света между блоком источника и блоком приемника света) и электрические колебания от генератора Γ_2 с фазой $\omega_2 t + \varphi_{02}$ поступают на ФЭУ. На выходе блока приемника света выделяется сигнал с фазой

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{п}} &= (\omega_1 - \omega_2) t + (\varphi_{01} - \varphi_{02}) - \frac{\omega_1 L_1}{c} + \varphi_{\text{рпн}} = \\ &= \omega_{\text{п}} t + (\varphi_{01} - \varphi_{02}) + \varphi_{\text{рпн}} - \frac{\omega_1 L_1}{c}, \end{aligned}$$

который идет на фазометр; $\varphi_{\text{рпн}}$ — сдвиг фазы, вносимый радиотехническими устройствами блока приемника.

2. Сигналы от генераторов Γ_1 и Γ_2 с фазами $\omega_1 t + \varphi_{01}$ и $\omega_2 t + \varphi_{02}$ поступают на смеситель. После смесителя выделяется сигнал частоты $\omega_{\text{п}} = (\omega_1 - \omega_2)$, который будет иметь фазу $\omega_{\text{п}} t + (\varphi_{01} - \varphi_{02})$. С выхода блока источника света этот сигнал, получивший дополнительную фазу $\varphi_{\text{рпн}}$, вносимую радиотехническими устройствами блока источника света $\Phi_{\text{и}} = \omega_{\text{п}} t + (\varphi_{01} - \varphi_{02}) + \varphi_{\text{рпн}}$, поступает на фазометр¹⁾. Фазометр измеряет разность фаз сигналов блока источника и блока приемника света:

$$\Delta\varphi_1 = \Phi_{\text{и}} - \Phi_{\text{п}} = \frac{\omega_1 L_1}{c} + (\varphi_{\text{рпн}} - \varphi_{\text{рпн}}). \quad (5)$$

Для того чтобы исключить второй член этого выражения, обязательный изменению фаз сигналов в радиотехнических устройствах, необходимо произвести второе измерение разности фаз при другом расстоянии L_2 :

$$\Delta\varphi_2 = \frac{\omega_1 L_2}{c} + (\varphi_{\text{рпн}} - \varphi_{\text{рпн}}). \quad (6)$$

¹⁾ Сдвиг фаз $\varphi_{\text{рпн}}$ может регулироваться фазовращателем ФВ.

Вычитая (6) из (5), получим выражение

$$\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = \frac{\omega_1}{c} (L_1 - L_2), \quad (7)$$

в котором разность отсчетов фазометра обязана только изменению расстояния $(L_1 - L_2)$, проходимого световым пучком.

Подготовка установки к измерениям. Перед включением установки необходимо убедиться в том, что тумблер высокого напряжения выключен, переключатель рода работы на фазометре находится в положении «калибр», а тумблер «опережает — отстает» — в положении «опережает» (рис. 3).

1. Включить установку. При этом должна зажечься газоразрядная лампа. В течение первых 30 мин. после включения, пока происходит прогрев радиоаппаратуры, следует подготовить к измерениям оптическую часть установки.

2. Поставить рейтер с зеркалами 6 в дальнейшее положение на скамье относительно источника света. Перемещая линзу 5 (1), и используя для визуального контроля лист белой бумаги, направить пучок света на середину зеркала 6 (1), которое нужно повернуть на угол 45° к направлению света и добиться того, чтобы отраженный от него пучок попал в середину зеркала 6 (2). Затем повернуть зеркало 6 (2) так, чтобы свет, отраженный от него, попал в середину линзы 5 (2). Проводить эти операции удобнее при пучке света, слегка ограниченной диафрагмой линзы 5 (1). Еще раз уточнить положение линзы 5 (2), добиваясь максимальной освещенности линзы 5 (2).

Передвигая рейтер с зеркалами, убедиться в том, что при любом положении рейтера на скамье пучок света попадает на центр линзы 5 (2). Этого следует добиться при помощи регулировочных винтов, расположенных сзади зеркал. Затем, перемещая линзу 5 (2), ввести пучок света в отверстие тубуса, через которое он попадает на фотокатод ФЭУ.

3. Для окончательной юстировки оптической части с помощью фотоумножителя необходимо предварительно наладить всю радиотехническую часть установки.

Сначала необходимо убедиться в том, что элементы радиосхемы блока источника света функционируют нормально. Проще всего это проверить по наличию сигнала промежуточной частоты на его выходе. Для этого коаксиальный кабель сигнала промежуточной частоты ν_n блока источника света включить на вход усилителя вертикального отклонения осциллографа. Переключатели осциллографа поставить в положения: развертка «непрерывная», синхронизация «внутренняя». Получить неподвижное изображение нескольких периодов колебаний промежуточной частоты на экране осциллографа.

4. Далее необходимо проверить работу блока приемника света и одновременно выяснить, модулируется ли свет газоразрядной

лампы. Это следует проверить по наличию сигнала промежуточной частоты на выходе блока приемника света, включив теперь на вход усилителя вертикального отклонения осциллографа кабель сигнала промежуточной частоты этого блока. При этом коаксиальный кабель промежуточной частоты блока источника света переключить на вход усилителя горизонтального отклонения, используя его для синхронизации развертки осциллографа. Переключатель синхронизации поставить в положение «внешняя».

С помощью диафрагмы, расположенной на одной подставке с линзой 5 (1), ограничить световой пучок до минимума. Включить тумблер высокого напряжения, наблюдая за показаниями микроамперметра, включенного в цепь анода ФЭУ. Увеличивая интенсивность пучка света при помощи диафрагмы, установить анодный ток ФЭУ 40—60 мка. На осциллографе при этом должны наблюдаться колебания промежуточной частоты блока приемника света. Этим завершается проверка радиосхемы установки.

5. Показания микроамперметра, измеряющего ток анода ФЭУ, следует использовать для окончательной юстировки оптической схемы. Для измерения разностей фаз удобнее, чтобы величина сигнала не менялась при переходе от одного положения оптических элементов к другому. Меняя положение рейтера с зеркалами на скамье, наблюдают за показаниями микроамперметра.

Регулировкой положения линзы 5 (1) и наклона зеркал 6 (1) и 6 (2) достигают возможно меньших изменений показаний микроамперметра при перемещении рейтера с зеркалами вдоль скамьи. На этом юстировку оптической части можно считать законченной.

6. Визуальный контроль разности фаз между сигналами блоков источника и приемника света производится при помощи осциллографа в следующем порядке. Поставить переключатель рода работы осциллографа в положение «усилитель». Выходные кабели блоков подключить к осциллографу, как в п. 4. При этом на экране осциллографа должно получиться изображение эллипса, являющегося результатом сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний с неодинаковыми фазами. При перемещении рейтера с зеркалами вдоль оптической скамьи должно наблюдаться изменение формы эллипса, происходящее за счет изменения фазы сигнала блока приемника света.

Кроме этого, не меняя положения зеркал, форму эллипса можно изменить при помощи фазовращателя ФВ. Это также дает возможность выбрать наиболее удобный для измерений начальный сдвиг фаз между сигналами.

7. Для измерений разности фаз необходимо подготовить к работе электронный фазометр Ф2-1 (рис. 3). На его входы подаются сигналы промежуточной частоты блока источника света и блока приемника света. Перед измерениями необходимо произвести калибровку и установку нуля фазометра. Для калибровки переключатель рода

работы поставить в положение «калибр» и потенциометром «калибр» стрелку измерительного прибора установить на отметку 180° нижней шкалы. Затем произвести установку нуля, поставив переключатель рода работы в положение «уст. нуля» и вращая ручку «уст. нуля». Для измерений разностей фаз переключатель рода работы перевести сначала в положение 180° . Если при этом стрелка отклонится влево от нуля, тумблер «опережает — отстает» необходимо переключить в положение «отстает». При этом стрелка прибора отклонится вправо, в положение, соответствующее разности фаз между сигналами блока источника света и блока приемника света.

Перемещая рейтер с зеркалами по скамье, наблюдать изменение показаний фазометра. Если при этом интервал изменений разностей фаз между сигналами выходит за пределы шкалы, то необходимо при помощи фазовращателя изменить начальный сдвиг фаз или переключить пределы измерения ф. На этом подготовку фазометра к измерениям можно считать законченной.

Упражнение 1

Измерение скорости света в воздухе

Рейтер с зеркалами перемещается из одного крайнего положения на скамье в другое, и через каждые 5—10 см записываются отсчеты положения рейтера на скамье l_i и соответствующее каждому из положений показание фазометра $\Delta\varphi_i$. Из формулы (7) следует, что эта зависимость $\Delta\varphi_i$ от l_i должна быть линейной.

На миллиметровой бумаге в системе координат $\Delta\varphi_i$ и l_i наносятся полученные экспериментальные результаты. По полученным точкам проводится прямая линия и определяется отношение $(\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1)/(l_2 - l_1) = \Delta\varphi/\Delta l$.

Учитывая, что в используемой установке смещение рейтера на Δl приводит к изменению оптического пути на $2 \Delta l$, из формулы (7) для скорости света получим выражение

$$c = \frac{4\pi\nu_1\Delta l}{\Delta\varphi}. \quad (7')$$

При проведении измерений необходимо строго следить, чтобы ток фотоумножителя не выходил за пределы 40—60 мка.

Проведенные таким методом измерения позволяют прежде всего убедиться в том, что сдвиг фаз является линейной функцией расстояния от источника до приемника света и, следовательно, обязан распространению между ними волны интенсивности модулированного света. По (7') рассчитывается скорость света c .

После проведения вышеуказанных измерений температурный режим радиосхемы достаточно стабилизируется, и имеет смысл сделать измерение скорости света в воздухе при возможно большем

расстоянии между двумя последовательными положениями зеркал. Для этого выбирают два положения зеркал, отличающиеся на $\Delta l = 250$ см, и пользуются шкалой фазометра 0—100°.

Методы измерения скорости света v в веществе и его показателя преломления n

Для измерения скорости света в веществе используется то обстоятельство, что при введении в световой пучок прозрачного вещества происходит изменение сдвига фазы волны интенсивности света, определяемое значением показателя преломления вещества и длиной пути, проходимого в нем светом. При этом можно использовать следующие методы:

- а) измерение фазометром изменения сдвига фаз при введении вещества в пучок света;
- б) компенсация изменения сдвига фаз, происшедшего после выведения вещества из пучка, соответствующим перемещением зеркал;
- в) исключение той части пути, проходимого светом, которая была заполнена веществом.

В качестве вещества, в котором производят измерения в данной установке, берется стеклянная плита, через отполированные торцы которой пропускаются пучки света. Длина пучка света в стекле определяется расстоянием между полированными торцами плиты $l = 400$ мм¹).

На рис. 1 показана оптическая схема с введенным веществом (стеклянной плитой). Свет от источника света до приемника проходит путь l_0 в воздухе со скоростью c и путь $2l$ в веществе со скоростью v . При этом изменение фазы сигнала по пути от источника к приемнику можно записать в виде

$$\Delta\varphi_{\text{с вещ}} = \omega \left(\frac{l_0}{c} + \frac{2l}{v} \right), \quad (8)$$

где $\omega l_0/c$ — изменение фазы сигнала в воздухе и $2\omega l/v$ — изменение фазы сигнала в веществе.

Если теперь убрать испытуемое вещество, то разность фаз будет иметь вид

$$\Delta\varphi_{\text{без вещ}} = \omega \left(\frac{l_0}{c} + \frac{2l}{c} \right). \quad (9)$$

Здесь $2\omega l/c$ — изменение фазы сигнала в воздухе на пути, который был занят веществом.

Вычитая (9) из (8), найдем изменение сдвига фазы сигнала с веществом относительно сдвига фазы без вещества

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{с вещ}} - \Delta\varphi_{\text{без вещ}} = 2\omega l \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{c} \right). \quad (10)$$

¹) Это расстояние определено на специальном приборе с точностью 0,5 мм.

Формула (10) лежит в основе первого метода (а) непосредственного измерения $\Delta\varphi$ при введении вещества. Из полученного выражения определяем v :

$$v = \frac{2\omega l}{c\Delta\varphi + 2\omega l}, \quad (11)$$

и показатель преломления

$$n = \frac{c}{v} = 1 + \frac{c\Delta\varphi}{2\omega l}. \quad (11a)$$

Во втором способе (б) после выведения вещества производится компенсация происшедшего изменения сдвига фаз перемещением зеркал из положения B в положение E на такое расстояние Δl_0 , при котором сдвиг фазы без вещества окажется равным сдвигу фазы в присутствии вещества:

$$\Delta\varphi_{\text{с вещ}} = \Delta\varphi_{\text{без вещ}} = \omega \left(\frac{l_0}{c} + \frac{2l}{c} + \frac{2\Delta l_0}{c} \right). \quad (12)$$

Подставляя сюда значения $\Delta\varphi_{\text{с вещ}}$ (8), получим

$$\frac{l}{v} = \frac{l + \Delta l_0}{c},$$

откуда

$$v = c \frac{l}{l + \Delta l_0} \quad \text{и} \quad n = \frac{c}{v} = \frac{l + \Delta l_0}{l}, \quad (13)$$

Можно использовать и третий метод (в). Для этого сразу после выведения вещества из пучка света перемещением зеркал из положения B в положение C точно на расстояние l исключается путь, проходимый светом в веществе. При этом фаза сигнала изменится на $2\omega l/v$ и будет иметь вид

$$\Delta\varphi_{\text{без пути в вещ}} = \omega \left(\frac{l_0}{c} \right). \quad (14)$$

Вычитая из (8) (14), получим $\Delta\varphi = \omega \left(\frac{2l}{v} \right)$, откуда

$$v = \frac{2\omega l}{\Delta\varphi}, \quad (15)$$

где $\Delta\varphi$ — разность показаний фазометра, и

$$n = \frac{c}{v} = \frac{c\Delta\varphi}{2\omega l}. \quad (16)$$

Упражнение 2

Измерение v и n

Для выполнения измерений по первому методу необходимо:

1. Установить зеркала на скамье в положение B так, чтобы можно было ввести в промежуток между рейтером с зеркалами и

линзами стеклянную плиту. В этом положении рейтер с зеркалами остается на все время выполнения упражнения.

2. Вращая подъемный винт, ввести стеклянную плиту в пучки света. Ток ФЭУ при этом резко упадет, и для того чтобы проводить измерения, нужно увеличить интенсивность пучка, открыв полностью диафрагму. Замечая показания микроамперметра (в этом случае ток ФЭУ порядка 20 мка), отсчитывают сдвиг фаз $\Delta\varphi_i$ с веш по фазометру.

3. Прежде чем вывести после измерения сдвига фаз стеклянную плиту из пучков света, необходимо прикрыть диафрагму для предохранения фотоумножителя от перегрузки. Вращая винт подъемного устройства, поднять стеклянную плиту. С помощью диафрагмы установить ток ФЭУ таким же, каким он был при прохождении света через стеклянную плиту. Произвести с помощью фазометра измерение сдвига фаз $\Delta\varphi_{\text{без веш}}$. Измерения повторить не менее пяти раз и по полученным данным произвести вычисления скорости света v и показателя преломления n по формулам (11).

Упражнение 3

Измерение n и v по способу компенсации

Для выполнения упражнения необходимо сначала провести измерение сдвига фаз $\Delta\varphi_{\text{с веш}}$, как указано в упражнении 2, отсчитав положение рейтера с зеркалами по шкале скамьи. После этого поднять стекло и, передвигая рейтер с зеркалами, найти такое положение зеркал E , при котором отклонение стрелки фазометра будет таким же, каким оно было при введенной в пучки света стеклянной плите ($\Delta\varphi'_{\text{без веш}} = \Delta\varphi_{\text{с веш}}$). Отсчитав теперь по шкале положение рейтера на скамье, определить, на какое расстояние Δl_0 были передвинуты зеркала. Рассчитать по формулам (13) значения v и n .

Упражнение 4

Измерение v и n по способу исключения пути, проходимого светом в веществе

Для выполнения упражнения сначала необходимо провести измерение сдвига фаз $\Delta\varphi_{\text{с веш}}$, как указано в упражнении 2, отсчитав положение рейтера с зеркалами по шкале скамьи.

После этого поднять стеклянную плиту, передвинуть рейтер с зеркалами в сторону источника света по оптической скамье в положение C на расстояние, равное длине плиты $l = 400$ мм. Этим исключается путь $2l$, проходимый светом в стекле.

Произвести измерение сдвига фаз $\Delta\varphi_{\text{без пути в веш}}$, строго следя за тем, чтобы ток ФЭУ был таким же, как и при отсчете сдвига фаз $\Delta\varphi_{\text{с веш}}$. По полученным данным определить изменение сдвига фаз

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{с веш}} - \Delta\varphi_{\text{без пути в веш}}$$

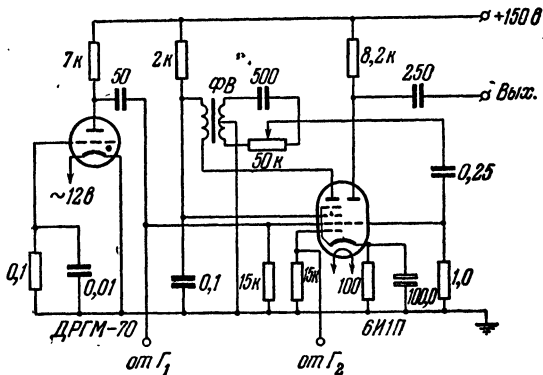


Рис. 4

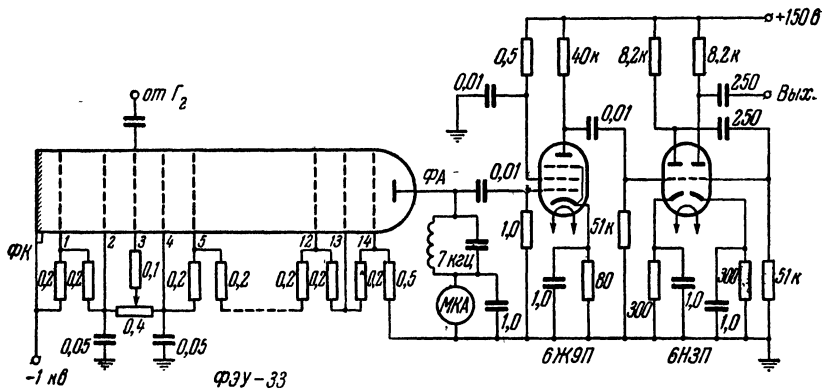


Рис. 5.

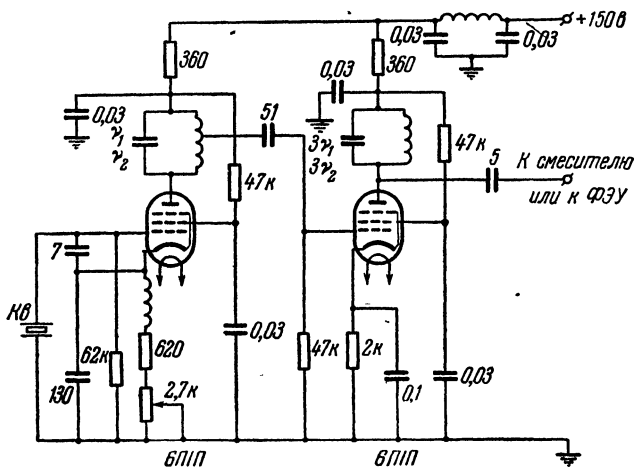


Рис. 6.

и вычислить по формулам (15) и (16) скорость света v и показатель преломления n .

Технические данные установки. Все радиотехнические узлы установки, кроме фазометра Ф2-1 и осциллографа СИ-1, сделаны на физическом факультете МГУ по схемам, имеющимся в тексте настоящего описания (рис. 4, 5, 6).

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Л а н д с б е р г, Оптика, Гостехиздат, 1957.

З А Д А Ч А 166.

ОЗНАКОМЛЕНИЕ С РАБОТОЙ ГАЗОВОГО ЛАЗЕРА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ И НЕКОТОРЫЕ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

При выполнении настоящей задачи студентам предоставляется возможность ознакомиться с устройством и работой газового лазера непрерывного действия и с основными свойствами его излучения. Отметим особые свойства излучения лазера: 1) монохроматичность (когерентность во времени) мощного излучения, 2) пространственная когерентность светового потока, 3) острая угловая направленность (коллимация) излучаемого лазером светового пучка.

Ясно, что в описании задачи нет возможности изложить общие принципы работы лазеров. Этим вопросам теперь посвящена обширная литература. Список наиболее доступных статей и книг о лазерах приведен в конце описания. Как минимум, перед выполнением задачи должна быть прочитана статья А. Шавлова [3]. Фотокопии этой статьи имеются и в библиотеке и у дежурного лаборанта. С другой стороны, очевидно, что исследование свойств излучения лазера и его возможных применений требует использования определенных методов экспериментальной оптики, поэтому настоящая задача должна быть одной из заключительных задач практикума.

Приводим здесь лишь основные данные, относящиеся к работе гелиево-неонового лазера непрерывного действия, установленного в практикуме. Устройство этого лазера достаточно типично для конструкций ряда газовых лазеров.

Основным элементом данного лазера является разрядная трубка 1 (рис. 1). Трубка имеет накаливаемый катод 2 и анод 3. В трубке находится смесь гелия и неона. Парциальное давление гелия 1 мм рт. ст. и неона $0,1 \text{ мм рт. ст.}$

При накаленном катоде трубки и поданном между ее электродами высоком напряжении в наполняющих трубку газах может поддерживаться светящийся электрический разряд. Во время разряда падение анодного напряжения на трубке составляет около $1,5 \text{ кв}$, при токе через трубку — до 30 ма .

Веществом, дающим нужное видимое излучение разряда, является неон. Но необходимое для этого возбуждение атомов неона осуществляется через посредство атомов гелия. Именно, в электрическом разряде ударами электронов непосредственно возбуждаются

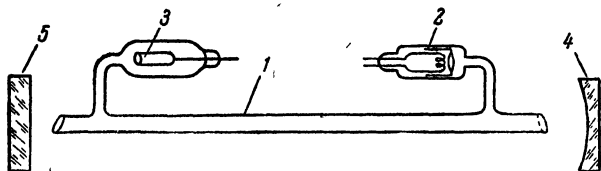


Рис. 1.

атомы гелия. Затем возбужденные атомы гелия, сталкиваясь с атомами неона, сообщают последним энергию, необходимую для перевода их, в свою очередь, в возбужденное состояние. Схематическая картина некоторых энергетических уровней атомов гелия и неона представлена на рис. 2, снабженном стрелками, иллюстрирующими совершающиеся в разрядной трубке процессы.

Таким образом, в трубке создается так называемая активная среда, состоящая из атомов неона, обладающих инвертированной заселенностью энергетических уровней электронов (см. литературу).

Спонтанное излучение отдельных возбужденных атомов неона приводит к распространению в активной среде фотонов, соответствующих электронным переходам в атомах неона с уровней $3S$ на уровни $2P$. В применяемом в задаче лазере используется один из этих электронных переходов: $3S_2 - 2P_4$.

Под действием электромагнитного поля распространяющихся в разряде фотонов (сначала спонтанно

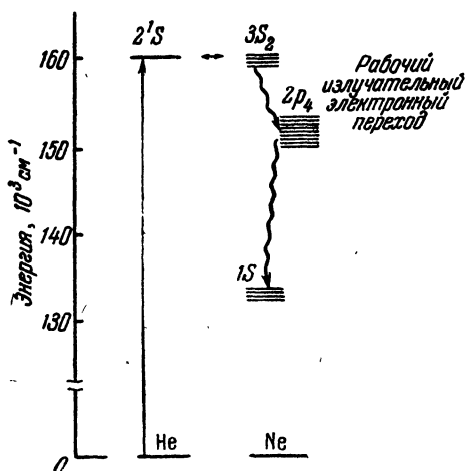


Рис. 2

излученных возбужденными атомами неона) дальше происходит индуцированное когерентное излучение других возбужденных атомов неона, т. е. активной среды, заполняющей разрядную трубку лазера. Массовое нарастание этого процесса обеспечивается тем, что разрядная трубка помещена в зеркальный резонатор (рис. 3). Многократное прохождение излучения вдоль оси разрядной трубки

приводит к формированию мощного потока индуцированного направленного (коллимированного) когерентного излучения лазера.

Режим генерации в лазере направленного когерентного излучения отнюдь не следует смешивать с ненаправленным свечением растянутого положительного газового столба разрядной трубки, которое может иметь место и в трубке без резонатора (например, в светящейся рекламной трубке), и в трубке, помещенной в резонатор, если лазер не приведен в режим генерации.

Режим генерации может быть достигнут в том случае, если потери энергии световой волной при каждом ее отражении от зеркал резонатора меньше, чем усиление волны в результате индуцированного излучения при прохождении вдоль трубки через активную среду. Окончательный стационарный режим генерации определяется мощностью процесса возбуждения атомов активной среды.

Разрядная трубка замкнута с торцов плоскопараллельными стеклянными пластинками (окнами), расположенными под брюстеровским углом к оси трубки. Поэтому излучение неона, поляризованное в плоскости падения на окна, проходит через эти окна без потерь на отражение. Это обстоятельство обеспечивает эффективность действия внешнего зеркального резонатора, качество которого определяется высоким значением коэффициента отражения и отсутствием поглощения света его зеркалами. С другой стороны, использование стеклянных окон, расположенных под брюстеровским углом к оси трубки, приводит к линейной поляризации излучения лазера.

Остановимся теперь кратко на описании зеркального резонатора лазера. Зеркальный резонатор состоит из двух зеркал с многослойными диэлектрическими покрытиями. Эти зеркала обладают высокими коэффициентами отражения (98—99%) и очень малым поглощением энергии света, проходящего сквозь зеркало. Коэффициент пропускания света одним зеркалом около 0,1%, а другим около 2%. Высокое значение коэффициентов отражения зеркал реализовано специально для излучения той длины волны, на которую рассчитана работа данного лазера.

Указанные значения коэффициента прозрачности зеркал (в особенности второго зеркала) достаточны для выхода из лазера мощного потока излучения, без заметного снижения качества зеркального резонатора, в котором осуществляется система стоячих световых волн с высокой плотностью энергии излучения. О важнейшей роли резонатора для повышения плотности излучения в разрядной трубке и для выделения определенного типа колебаний

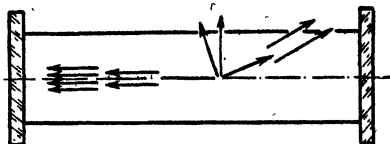


Рис. 3.

электромагнитного поля в активной среде, необходимого для монохроматизации света лазера, см. рекомендованную литературу.

Одно из зеркал резонатора вогнутое сферическое, причем центр кривизны зеркала лежит на поверхности второго, плоского зеркала. Положение и ориентация зеркал юстируются специальными микрометрическими винтами, поворачивающими оправы зеркал. Юстировка зеркал, как ясно из сказанного выше, должна обеспечить направленность индуцированного светового излучения вдоль оси разрядной трубки. Высокая плотность энергии излучения в стоячих световых волнах внутри хорошо съюстированного резонатора обеспечивает мощность индуцированного излучения, пропорциональную плотности энергии поля.

И действительно, зеркальный резонатор, в который помещена разрядная трубка лазера, обеспечивает исключительную направленность индуцированного излучения лазера или, другими словами, обеспечивает естественную коллимацию светового пучка, выходящего через окна разрядной трубки и зеркала резонатора. Минимальная угловая ширина лазерного светового пучка определяется дифракцией, связанной с ограничением поперечного сечения пучка, т. е. связана исключительно с волновыми свойствами света. Это важнейшее обстоятельство отличает лазерный источник света от обычных источников. Коллимация световых пучков обычных источников света достигается применением коллиматоров — специальных приборов с малым входным отверстием, расположенным в фокусе объектива. Такой метод коллимации света ведет к колоссальным потерям его интенсивности.

Помимо непосредственно используемого в задаче лазера, второй лазер, достаточно типичной для газовых лазеров конструкции, расположен в лаборатории под прозрачным колпаком. Соответствующие надписи, помещенные вблизи деталей этого прибора, позволяют ознакомиться с его устройством. Этот демонстрационный лазер может быть включен на короткое время *дежурным лаборантом практикума*.

Включение газового лазера с накаливаемым катодом осуществляется в три этапа.

1. Включение сетевого тумблера выпрямителя обеспечивает одновременно включение накала катода разрядной трубки и накала кенотронов высоковольтного выпрямителя блока питания установки.

2. Через несколько минут после включения накалов и прогрева катодов на разрядную трубку может подаваться высокое напряжение. Преждевременное включение высокого напряжения вызвало бы бомбардировку катода положительными ионами газа и привело бы к его быстрому разрушению. Объемный отрицательный заряд, образовавшийся из эмиттированных накаленным катодом электронов, защищает катод от ионной бомбардировки.

3. Для начального поджига разряда в трубке используется высокочастотный высоковольтный трансформатор Тесла, напряжение от которого подается на специальный внешний электрод, надетый на трубку. Кратковременное нажатие пусковой кнопки трансформатора Тесла обеспечивает импульс высокочастотного напряжения, нужный для поджига разряда после нагрева катода разрядной трубки и подачи на нее постоянного высокого напряжения.

Обращаем особое внимание на то, что после включения лазера, во все время работы с ним, надо помнить, что *попадание в глаза прямого лазерного излучения опасно для зрения*. Поэтому при работе с лазером его свет наблюдается исключительно после отражения на экране с рассеивающей поверхностью или через нейтральный светофильтр, ослабляющий интенсивность света примерно в 10^4 раз. Работы, выполняемые со светофильтром, составляют содержание упражнений 5—7.

Кроме того, при работе с лазером необходимо соблюдать обычные предосторожности, вытекающие из использования в системе его питания высокого постоянного напряжения. Все включения установки и ее выключения производятся только дежурным лаборантом практикума.

При наблюдении работы демонстрационного лазера, помещенного в прозрачный колпак, весьма поучительно ознакомиться с ролью зеркального резонатора в работе лазера. Наличие светящегося газового разряда в трубке лазера, как уже было указано, еще необязательно соответствует процессу генерации направленного излучения. Если у генерирующего лазера специальным прозрачным экраном, управляемым сквозь колпак, прикрыть одно из зеркал резонатора лазера, тем самым понизив добротность зеркального резонатора, то светящийся разряд в трубке будет продолжаться, но световой луч интенсивного направленного излучения лазера погаснет на выходе из обоих зеркал лазера.

Весьма существенным обстоятельством для понимания различия между генерацией лазером монохроматического направленного излучения и беспорядочным свечением газового разряда служит спектральное разложение свечения газоразрядной трубки. Наблюдение спектра разряда может быть осуществлено с помощью небольшого спектроскопа, который установлен около демонстрационного лазера.

Именно, если через прозрачный колпак демонстрационного лазера наблюдать в спектроскоп беспорядочное свечение газоразрядной трубки через ее боковую поверхность, то можно увидеть множество спектральных линий неона, начиная с синих и кончая красными. Этот спектральный состав неколлимированного света лазера остается неизменным независимо от того, генерирует лазер или нет. Но в спектре направленного излучения, т. е. в спектре

излучения, выходящего через зеркала лазера, фактически представлена лишь одна, но очень интенсивная красная спектральная линия, на генерацию которой настроен данный лазер.

Различие спектрального состава излучений, выходящих с торца лазера и через боковую поверхность его трубки, заметно и невооруженным глазом по окраске этих двух излучений. Одно из них (боковое) имеет розоватую окраску, а другое (торцовое) — красную.

В том, что спектр направленного излучения состоит из единственной спектральной линии, можно было бы убедиться и здесь, вдвигая в световой пучок лазера дифракционную решетку и наблюдая получившийся спектр. Но опыт с дифракционной решеткой представляет собой тему первого упражнения настоящей задачи. Поэтому при общем ознакомлении с работой демонстрационного лазера достаточно ознакомиться со спектральным составом бокового неколлимированного свечения разрядной трубки.

Линейную поляризацию света, излучаемого лазером с Брюстеровской ориентацией выходных окон разрядной трубки, можно наблюдать, пропуская излучение демонстрационного лазера через поляроид, установленный вне лазера. Вращением этого поляроида вокруг оси светового пучка можно добиться практически полного погашения вышедшего из лазера светового пучка, что служит очевидным доказательством линейной поляризации излучения лазера данной конструкции.

Описание установки. Установка, на которой выполняются все упражнения настоящей задачи, схематически представлена на рис. 4.

Все детали установки расположены на оптической скамье. Заключенный в металлическую трубу газовый лазер 1 установлен по уровню, строго горизонтально, на неподвижных опорах двух закрепленных на оптической скамье рейтеров. *Всякое перемещение лазера как во включенном, так и в выключенном состоянии студентам категорически воспрещается.*

Вблизи одного из выходных окон лазера находится на неподвижном рейтере микроскопический объектив 2 с надетым на него специальным круговым экраном 3, используемым в 4-м упражнении, в описании которого разъясняется назначение этого экрана и объектива. Объектив и экран установлены на подъемной колонке рейтера. Опустив зажимной винт 4 на колонке рейтера и пользуясь кремальберным механизмом 5, можно поднимать и опускать объектив вместе с экраном, вводя объектив в лазерный пучок или опуская его вместе с экраном ниже уровня светового пучка, выходящего из лазера. Положение рейтера, несущего объектив с экраном на оптической скамье, не изменяется.

Далее, на оптической скамье помещается еще один неподвижный рейтер, несущий горизонтальный столик 6. На этот столик в ходе выполнения задачи поочередно помещаются разные детали, ди-

фракция света на которых изучается в различных упражнениях задачи. Подставки нужных деталей надеваются на два вертикальных винта, имеющихся на поверхности столика. Затем подставка очередной детали, установленной на столик, притягивается к нему гайками. Для центрировки применяемых деталей по отношению к световому потоку из лазера столик снабжен микрометрической винтовой подачей 15 в направлении, перпендикулярном к световому пучку.

Следом за первым столиком на скамье располагается второй столик 7, установленный в неподвижном рейтере. На этот столик при выполнении упражнений 5—7 помещается подставка с окуляром и со светофильтром. Эта подставка ставится на столик,

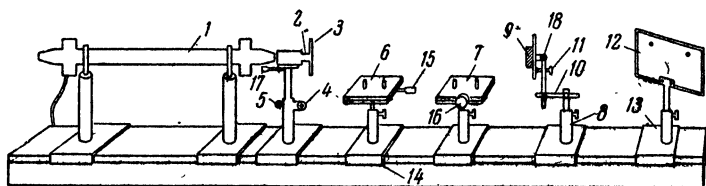


Рис. 4.

надевается на вертикальные винты столика и притягивается к поверхности столика гайками. Подробности устройства окуляра описаны в тексте упражнения 4 задачи.

Столик 7 для зрительной трубы снабжен микрометрической подачей 16 в направлении, перпендикулярном к оси оптической скамьи и к направлению светового пучка лазера. Микрометрический винт имеет отсчетный барабан, позволяющий измерять поперечные перемещения окуляра с точностью до 0,01 мм.

На отдельном неподвижном рейтере 8 на скамье помещается в специальном держателе плоскопараллельный стеклянный диск 9 в металлической оправе. Этот диск используется в упражнении 4. Поворот кронштейна 10 в колонке рейтера 8 позволяет по мере надобности вводить стеклянный диск в световой пучок или выводить его из светового пучка лазера, когда диск не используется. Кроме того, держатель диска позволяет вращением вокруг горизонтальной оси 18 изменять наклон стеклянного диска к горизонту с помощью специального упорного винта 11, расположенного на тыловой стороне держателя диска. Таким образом, две возможности вращения диска вокруг вертикальной и горизонтальной осей позволяют устанавливать его строго перпендикулярно к световому пучку лазера.

Последней деталью установки является поворачивающийся экран со шкалой 12 на рейтере 13, на котором наблюдаются

дифракционные картины от разных объектов. Специальное устройство позволяет поворачивать экран под разными углами к падающим на него световым пучком. Этот прием так называемой косо́й проекции очень удобен для значительного растягивания дифракционных картин в поперечном направлении, что дает возможность без микроскопа или лупы рассматривать на экране различные подробности дифракционных явлений.

Если предполагается вести на экране *12* лишь качественные наблюдения дифракционных картин, то к нему двумя винтами притягивается металлическая пластинка, покрытая белой бумагой без шкалы.

Упражнение 1

Приближенное измерение длины волны излучения лазера с помощью дифракционной решетки

Направленность и пространственная когерентность излучения лазера позволяют применять лазерный световой пучок в ряде измерений без предварительной его коллимации.

Эта особенность лазерного излучения используется, в частности, в опытах с дифракционной решеткой, проводимых в настоящем упражнении.

Для подготовки установки к измерениям, отпустив зажимной винт *4*, микроскопический объектив *2* с надетым на него круговым экраном *3* (рис. 4) опускают вниз с помощью кремальберного механизма *5* колонки рейтера настолько, чтобы верхний край экрана не загоразивал окна лазера.

На столик *6* рейтера *14* помещают подставку с дифракционной решеткой. Решетка обращена к экрану *12* той стороной, на оправе которой имеется надпись о числе штрихов на миллиметр длины у данной решетки.

Подставка решетки надевается на вертикальные винты столика и притягивается к столику гайками.

Кронштейн *10*, несущий стеклянный диск *9*, поворачивается на 90° по отношению к оптической скамье с тем, чтобы вывести стеклянный диск и его оправу из светового пучка лазера.

Прямоугольный экран *12* располагается нормально к оси лазера (рис. 4). Значительное расстояние L между решеткой и экраном обеспечивает возможность наблюдения дифракции в параллельных лучах.

Расстояние $L = l \pm \Delta l_1 \pm \Delta l_2$ между плоскостью дифракционной решетки и плоскостью экрана определяется следующим образом. Основной отрезок l этого расстояния, т. е. длина участка оптической скамьи между рейтером *14*, несущим столик с решеткой, и рейтером *13*, несущим экран, отсчитывается по шкале оптической скамьи. Отрезок Δl_1 между плоскостью решетки и отсчетной пластинкой с риской на корпусе несущего ее рейтера *14* указан на

отдельной надписи, помещенной на установке. Там же указано расстояние Δl_2 между плоскостью экрана 12 и отсчетной пластинкой с риской на рейтере 13, несущем этот экран.

После того как все детали установки помещены на соответствующие места, дежурный лаборант включает лазер.

При включенном лазере необходимо установить дифракционную решетку перпендикулярно к оси светового пучка, выходящего из лазера. Для этого путем вращения столика б, несущего решетку, приводят световой блик, отраженный назад к лазеру от плоскости решетки, точно на середину выходного окна лазера, т. е. добиваются совпадения выходящего из лазера светового пучка с его отражением от плоскости решетки.

После этого переходят к наблюдению и измерениям дифракционной картины на экране. Ввиду монохроматичности излучения лазера на экране можно наблюдать множество неперекрывающихся дифракционных спектров различных положительных и отрицательных порядков. Эти спектры образуют на экране целый ряд красных полосок, так как в спектре направленного излучения данного лазера имеется только одна спектральная линия в красном конце видимого спектра. Для упрощения оптической схемы опыта за дифракционной решеткой не помещен объектив для фокусировки дифракционных спектров, поэтому спектры монохроматического излучения лазера представлены в виде широких полосок, повторяющих сечение первичного светового пучка, падающего на решетку. Геометрическая ширина этих полосок, конечно, ни в какой мере не характеризует частотную ширину монохроматических спектральных линий лазерного излучения.

При наблюдении последовательности дифракционных спектров следует обратить внимание на зависимость их относительной интенсивности от порядка спектра. Интенсивность спектров не монотонно убывает с повышением порядка спектра, но следует характерной осциллирующей убывающей функции, определяемой распределением интенсивности монохроматического света, дифрагировавшего на отдельной щели решетки.

Рассматривая детали дифракционной картины на экране, можно сделать следующее наблюдение. Между яркими главными дифракционными максимумами различных порядков на экране видна еще система слабых эквидистантных дифракционных максимумов. Эти максимумы, принципиально, присущи всякой дифракционной картине, полученной с помощью дифракционной решетки. Но когда первичным световым пучком освещено большое число штрихов на всей площади решетки, то в результате интерференции многих световых пучков интенсивность вторичных дифракционных максимумов практически равна нулю и они ненаблюдаемы. В условиях задачи сечение лазерного светового пучка, используемого без коллиматора, перекрывает сравнительно небольшое число штрихов

решетки, и поэтому вторичные дифракционные максимумы имеют заметную интенсивность.

Прежде чем приступить к измерениям положений спектров на экране при помощи имеющейся на нем шкалы, необходимо установить экран строго перпендикулярно к оси первичного светового пучка лазера.

Для этого, вращая экран вокруг вертикальной оси, надо получить симметричное расположение дифракционных спектров положительных и отрицательных порядков относительно спектра нулевого порядка, который выделяется из числа других спектров своей яркостью. Надо сделать так, чтобы измеренные по шкале экрана расстояния спектров одинаковых высоких порядков (например, ± 7) до спектра нулевого порядка были друг другу равны.

При этом положении экрана ориентация его фиксируется зажимным винтом, расположенным на лимбе у края экрана.

Под расстоянием между дифракционными спектрами и спектром нулевого порядка надо понимать расстояние между серединами наблюдаемых спектров—полосок.

После выполненной описанным способом установки дифракционной решетки и экрана приступают к измерениям.

Измерение заключается в многократных определениях с помощью шкалы, имеющейся на экране, расстояний Δx_m между дифракционными максимумами, соответственно: ± 1 -го, ± 2 -го; ± 3 -го, ± 4 -го и т. д. порядков, вплоть до наиболее далеких укладываемых на шкале экрана спектров разных порядков.

Очевидно, что $\frac{\Delta x_m}{2L} = \text{tg } \varphi_m$, где L — расстояние от плоскости дифракционной решетки до плоскости экрана и φ_m — угол дифракции спектра порядка m . В эту формулу подставляют поочередно среднее значение измерений Δx_m для спектра каждого порядка.

Далее, пользуясь соотношением $d \sin \varphi = \pm m\lambda$, где d — период дифракционной решетки, находят из каждого измерения значение длины волны λ излучения лазера. После этого вычисляют среднее значение λ из всех измерений и находят пределы погрешности проделанных измерений длины волны излучения лазера. Значение найденной величины λ используется в расчетах, сопровождающих выполнение последующих упражнений задач.

Упражнение 2

Пространственная когерентность излучения лазера и интерференционный опыт Юнга с двумя щелями

Описанный во всех курсах оптики классический интерференционный опыт Юнга заключается в наблюдении интерференционной картины двух световых пучков, получившихся в результате разделения исходного светового пучка на две части с помощью двух

параллельных щелей, прорезанных в непрозрачном экране (рис. 5). Для успеха опыта Юнга, выполняемого с обычным источником света, необходимо применение узкой предварительной щели, обеспечивающей пространственную когерентность светового пучка, достигающего экрана с двумя щелями.

Пространственная когерентность излучения лазера позволяет осуществлять опыт Юнга при непосредственном освещении обеих щелей полным сечением лазерного светового пучка.

При этом щели в непрозрачном экране могут быть удалены друг от друга вплоть до краев сечения лазерного светового пучка на плоскости непрозрачного экрана, поскольку во всем своем сечении световой пучок пространственно когерентен.

В настоящем упражнении воспроизводится подобный опыт с лазером, впервые осуществленный в 1961 г. Этот опыт доказал пространственную когерентность излучения лазера. Фотографии результатов этого важного опыта уже много раз воспроизводились в научной литературе.

При выполнении данного опыта расположение приборов на установке остается тем же, что и в первом упражнении, но дифракционная решетка заменяется непрозрачным экраном с прорезанными в нем узкими щелями.

Непрозрачный экран представляет собой стеклянную пластинку, покрытую слоем металлического алюминия, т. е. зеркало, на поверхности которого тонким резцом прорезаны щели. Пластинка смонтирована на такой же подставке, как и дифракционная решетка, и подставка пластинки надевается на вертикальные винты столика и притягивается к его поверхности гайками. Вращая столик рейтера вместе с подставкой пластинки, направляют отраженный от нее световой пучок назад в центр выходного окна лазера, чем обеспечивается перпендикулярность плоскости зеркала со щелями к падающему на него лазерному пучку.

В нашем случае на поверхности алюминиевого зеркала прорезаны не две одинаковые щели, нужные для опыта Юнга, но три одинаковые щели, причем одна из щелей значительно удалена от двух первых. Это сделано для того, чтобы иметь возможность сравнивать явления, происходящие при прохождении света через одну щель и через две щели.

После установки плоскости зеркала перпендикулярно к световому пучку с помощью микрометрического винта 15 (рис. 4) перемещают столик с зеркалом перпендикулярно к световому пучку лазера так, чтобы он осветил сначала только отдельную щель, прорезанную на поверхности зеркала. В таком случае на экране видна характерная дифракционная картина от отдельной щели. В центре

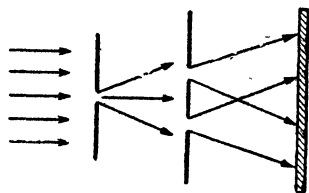


Рис. 5.

этой картины выделяется своей интенсивностью широкий дифракционный максимум нулевого порядка. Дифракционные максимумы более высоких порядков менее интенсивны.

Затем, перемещая столик тем же микрометрическим винтом, вводят в лазерный световой пучок то место зеркала, в котором прорезаны две щели. При этой последовательности действий становится сразу очевидным, что именно нового вносит в картину на экране интерференционный эффект двух световых пучков. Область расположения на экране дифракционных максимумов всех порядков теперь изрезывается целой системой светлых и темных интерференционных полос. Эффект особенно заметен на ярком дифракционном максимуме нулевого порядка. Эта система интерференционных полос представляет собой искомое явление. Наблюдаемый эффект служит убедительным доказательством пространственной когерентности лазерного излучения.

Разумеется, интерференционные полосы появятся и на фоне дифракционных максимумов ± 1 -го, ± 2 -го и других порядков, но эти дифракционные максимумы, как уже сказано, слабее по интенсивности, интерференционная картина на их фоне недостаточно наглядна.

Надо отметить, что в данном опыте расстояние между двумя щелями на экране выбрано меньше возможного предельного его значения, т. е. меньше полной ширины сечения лазерного светового пучка. Это сделано потому, что по мере увеличения расстояния между щелями уменьшается расстояние между интерференционными полосами на экране и они становятся недоступными для наблюдений невооруженным глазом.

Измерения, выполняемые в данном упражнении, имеют целью определение ширины прорезанных на зеркале щелей и расстояния между ними. Ширина отдельной щели на зеркале может быть найдена из условий, связывающих углы френгоферовой дифракции на щели с ее шириной. Именно, углы дифракции φ_{\min} , соответствующие минимумам интенсивности света, связаны с шириной отдельной щели b условием $b \sin \varphi_{\min} = \pm m\lambda$, где $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4$ и т. д.

Углы дифракции, соответствующие максимумам интенсивности φ_{\max} , начиная с максимума ± 1 -го порядка, определяются соответственно из условий: $b \sin \varphi_{1\max} = 1,43 \lambda$; $b \sin \varphi_{2\max} = \pm 2,46 \lambda$; $b \sin \varphi_{3\max} = \pm 3,47 \lambda$; $b \sin \varphi_{4\max} = \pm 4,47 \lambda$ и т. д. Измерив с помощью шкалы на экране линейные удвоенные симметричные смещения Δx_i минимумов и максимумов света от середины максимума нулевого порядка, можно находить последовательно значения $\operatorname{tg} \varphi_i = \overline{\Delta x_i} / 2L$ так же, как это делалось в предшествующем упражнении, и, подставляя значения $\sin \varphi_i$ в приведенные выше формулы, можно вычислить значение ширины щели b . Черта над $\overline{\Delta x_i}$ означает усреднение величины Δx_i по числу измерений.

Определение расстояния d между серединами двух щелей делается по интерференционной картине, расположенной в пределах дифракционного максимума нулевого порядка. Проще всего воспользоваться для этого условием, связывающим углы φ_{\min} , соответствующие темным полосам интерференционной картины, с величинами λ и d . Именно, $d \sin \varphi_{\min} = (m + 1/2) \lambda$, где $m = 0, \pm 1, \pm 2$ и т. д. Ввиду расположения наблюдаемых интерференционных полос в пределах лишь дифракционного максимума нулевого порядка можно положить $\sin \varphi \approx \varphi$.

Тогда, если обозначить $\overline{\Delta x_i}$ среднее расстояние между темными интерференционными полосами на экране, можно записать: $d \cdot \varphi = d \frac{\Delta x_i}{L} = \lambda$ или $d = \frac{L}{\Delta x_i} \lambda$. Найдя из опыта значения $\overline{\Delta x_i}$ и L , вычисляют расстояние между щелями d .

Упражнение 3

Фраунгоферова дифракция лазерного излучения на мелких круглых частицах

Монохроматический хорошо коллимированный и пространственно когерентный световой пучок, излучаемый лазером, дает возможность непосредственно наблюдать дифракцию света на круглых частицах.

Для того чтобы углы дифракции на мелких частицах были значительны, размер частиц должен быть малым. Однако если поместить в световой пучок одну малую частицу, то даваемую ею на удаленном экране дифракционную картину наблюдать будет трудно: картина будет проектироваться на светлый фон, созданный не испытавшей дифракции частью светового пучка.

Для получения хорошо видимой дифракционной картины можно поместить на пути светового пучка множество хаотически расположенных одинаковых частиц. В самом деле, поскольку исследуется фраунгоферова дифракция, любая отдельная частица, независимо от ее положения в плоскости поперечного сечения светового пучка, даст одинаковое угловое распределение дифрагированного света.

При одновременном присутствии в сечении светового пучка многих частиц угловое распределение дифрагированного света, создаваемое каждой частицей в отдельности, не нарушится, если нет систематического интерференционного эффекта между световыми пучками, дифрагировавшими на разных частицах. Если в плоскости поперечного сечения светового пучка частицы расположены совершенно хаотически, то в силу равной вероятности всех значений фаз дифрагированных по каждому направлению волн, складываться будут интенсивности световых пучков, дифрагировавших на разных частицах. Дифракционная картина от N частиц

усилится по интенсивности в N раз по сравнению с дифракционной картиной от отдельной частицы, но не изменит своей структуры. Это обстоятельство используется в настоящем упражнении.

На столик 6 (рис. 4) помещается подставка, на которой закреплена вертикальная стеклянная пластинка, покрытая частицами ликоподия (споры растения плауна), представляющими собой шарики одинакового малого размера. С внешней стороны ликоподий защищен второй стеклянной пластинкой.

Подставка стойки надевается на вертикальные винты столика и притягивается к столику гайками. Положение экрана на оптической скамье остается тем же, что и в первых двух упражнениях. На экране можно наблюдать систему концентрических темных и светлых дифракционных колец, окружающих светлый круг. Поскольку в настоящей установке после частиц, вызвавших дифракцию света, не установлен объектив и используется непосредственно удаленный экран, дифракционные кольца получаются широкими.

Угловые радиусы α темных колец подчиняются условиям:

$$\sin \alpha_1 = 0,61 \frac{\lambda}{r}, \quad \sin \alpha_3 = 1,11 \frac{\lambda}{r}, \quad \sin \alpha_5 = 1,62 \frac{\lambda}{r},$$

где r — радиус частицы, вызвавшей дифракцию света длины волны λ . Угловые радиусы α светлых колец подчиняются условиям:

$$\sin \alpha_2 = 0,82 \frac{\lambda}{r}, \quad \sin \alpha_4 = 1,34 \frac{\lambda}{r}.$$

Во избежание недоразумения с индексами при α отметим, что дифракционные кольца пронумерованы, начиная с первого темного кольца, окружающего центральный светлый круг.

Для определения радиуса частиц находят из опыта значения углов α . Очевидно, что $\operatorname{tg} \alpha \approx D/2L$, где D — линейный диаметр соответствующего дифракционного кольца на экране и L — расстояние от стеклянной пластинки с частицами ликоподия до экрана.

Начерченные на экране, кроме шкал, окружности удобно использовать для измерения диаметров D дифракционных колец. Для измерения диаметров дифракционных колец можно пользоваться вертикальной и горизонтальной шкалами экрана, если дифракционные кольца концентричны с окружностями, нанесенными на экране.

Если дифракционные кольца не концентричны с окружностями, начерченными на экране, то центрируют положение экрана 12 на рейтере 13. Центрировка экрана в вертикальном направлении осуществляется вращениями рифленной гайки на винтовой подаче колонки рейтера. Центрировка по горизонтали в поперечном к скамье направлении осуществляется с помощью винтовых салазок, расположенных под поворотным устройством экрана (на рис. 4 салазки и гайка не показаны).

Упражнение 4

Наблюдение интерференционных полос равного наклона и определение порядка интерференции

Высокая степень монохроматичности излучения лазера позволяет с его помощью осуществить наблюдение интерференционных полос равного наклона при большой разности хода и определить соответствующий им порядок интерференции.

Как и всегда, для наблюдения картины интерференционных полос равного наклона используется световой пучок с большой угловой апертурой, освещающий плоскопараллельный слой прозрачного вещества. Принципиальная схема опыта показана на рис. 6. Микроскопический объектив 2 (см. рис. 6 и 4) собирает параллельный световой пучок лазера в своем фокусе F . Расходящийся из F световой конус достигает плоскопараллельного стеклянного диска 9. Отраженные от передней и задней поверхностей диска световые пучки дают интерференционную картину концентрических колец на экране 3 (рис. 6 и 4). Интерференционное условие минимума отраженного света для угла падения i запишется

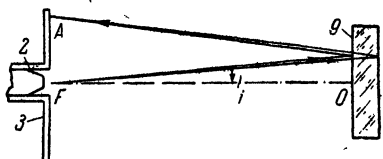


Рис. 6.

$$2d\mu \cos r = m\lambda, \quad (1)$$

где d — толщина пластины, μ — показатель преломления стекла, а m — искомый порядок интерференции. Угол падения i света на пластинку связан с углом преломления r света внутри пластины условием $\frac{\sin i}{\sin r} = \mu$ или, учитывая малость углов i и r в условиях опыта, соотношением $i/r \approx \mu$.

Обращаем внимание на то, что интерференционная картина полос равного наклона, локализованная вообще в бесконечности, наблюдается в данном случае непосредственно на удаленном экране, а не в фокальной плоскости некоторого наблюдательного объектива. На опыте можно измерить радиусы $R_m = FA$ нескольких интерференционных колец на экране 3 и расстояние $L = OF$ от плоскости экрана, проходящей через фокус объектива F , до поверхности стеклянного диска 9 (рис. 6). Тогда

$$\operatorname{tg} i_m \approx i_m \approx \frac{R}{2L}. \quad (2)$$

и, зная μ , можно найти значения r_m . После этого, применив формулу (1) к нескольким измерениям, можно, исключив d , вычислить m_{\max} , т. е. максимальный порядок интерференции в условиях

задачи. О том, как это фактически делается, подробнее сказано в описании способа обработки результатов измерений.

Подготовка установки к измерениям. Микроскопический объектив 2 (рис. 4) с помощью кремальберного винта 5 поднимается вверх при опущенном зажимном винте 4. Объектив тщательно центрируется по высоте против выходного окна лазера. Горизонтальная центрировка объектива осуществляется с помощью поперечной микрометрической подачи 17 объектива 2.

Столик 6 освобождается от подставки со стеклом, покрытым ликоподием.

Кронштейн 10 с держателем стеклянного диска ориентируется вдоль оптической скамьи, так чтобы плоскость стеклянного диска расположилась перпендикулярно к лазерному световому пучку. Кроме того, нужная ориентация диска достигается вращением держателя диска вокруг горизонтальной оси 18 с помощью упорного винта 11. После этого просят лаборанта включить лазер, если он был временно выключен.

Если диск ориентирован правильно, то на экране 3 (рис. 4) должна быть видна система концентрических светлых и темных интерференционных колец — полос равного наклона. Центр этой картины должен совпадать с оптической осью объектива 2, на тубус которого надет круглый экран 3. О правильном расположении интерференционных колец можно судить по совпадению одного из них с контурами одной из окружностей, начерченных на поверхности экрана. Если после включения лазера на экране не получилось сразу центрированной интерференционной картины, то ее постепенно улучшают вращением кронштейна 10 и упорного винта 11 (рис. 4).

Измерения. Измерениям подлежат радиусы темных интерференционных колец R и расстояние L от плоскости экрана 3 (фокальной плоскости объектива микроскопа) до поверхности стеклянной пластины 9 (рис. 6 и 4).

Прежде всего следует перенумеровать в журнале измерений номерами $k_x = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$ темные интерференционные кольца, подлежащие измерениям. Нулевой номер приписывается, например, первому видимому на экране темному интерференционному кольцу вблизи отверстия в экране. Следующие номера идут в возрастающей последовательности, в порядке увеличения радиусов темных колец. Правильная нумерация колец имеет решающее значение при последующей обработке результатов.

На опыте измеряются не радиусы колец, но их диаметры с помощью двух перпендикулярных шкал, нанесенных на поверхности экрана. Из среднего значения длин двух диаметров находят среднее значение радиусов темных интерференционных колец R_k .

Затем находят расстояние $L = l \pm \Delta l_1 \pm \Delta l_2$ от плоскости экрана до наружной поверхности стеклянного диска. Величины l ,

$\Delta l_1, \Delta l_2$ имеют тот же смысл, но, разумеется, иные численные значения, чем в предшествующих упражнениях.

Обработка результатов измерений. Прежде всего, пользуясь значениями R и L , находят по формуле (2) значение углов i для всех промеренных колец.

Дальнейшая обработка результатов производится на основании следующих соображений. Учитывая малые значения углов i и r , имеем

$$2d\mu \cos r \approx 2d\mu \left(1 - \frac{r^2}{2}\right) = m\lambda,$$

откуда, принимая во внимание, что $m_{\max} = 2d\mu/\lambda$, находим

$$r_m^2 = \frac{2(m_{\max} - m)}{m_{\max}}$$

или

$$i_m^2 = \frac{2\mu^2(m_{\max} - m)}{m_{\max}} = \frac{2\mu^2 k}{m_{\max}}, \quad (3)$$

где $k = m_{\max} - m$. Надо заметить, что величина $2d\mu/\lambda$ не обязательно будет целым числом, или, другими словами, в центре интерференционной картины, где $r = 0$, не обязательно будет темное пятно. Однако при больших значениях m в условиях данной задачи мы пренебрегаем дробной долей числа m .

Из (3) видно, что i_m^2 должно быть линейной функцией k . Однако мы не знаем истинного значения k .

В самом деле, центральная часть кольцевой интерференционной картины не видна, так как в центре экрана сделано отверстие для объектива и неизвестно, сколько интерференционных колец в нем укладывается. Поэтому мы можем вести счет интерференционных колец только с первого видимого кольца или с какого-то другого видимого кольца. Припишем номер 0 произвольному видимому на экране кольцу и начнем счет от него, в порядке увеличения радиусов колец. Пусть какое-то кольцо имеет условный номер k_x , тогда как для этого кольца истинное значение $k = k_0 + k_x$, где k_0 — число неучтенных темных интерференционных колец между центром интерференционной картины и условным нулевым кольцом. Тогда выражение (3) переписется так:

$$i_m^2 = \frac{2\mu^2 k_0}{m_{\max}} + \frac{2\mu^2 k_x}{m_{\max}} \quad (4)$$

и i_m^2 оказывается линейной функцией k_x . График зависимости i_m^2 от k_x будет выглядеть, как показано на рис. 7. Из этого графика ясно, как можно найти значение k_0 . Именно, экстраполируя до оси абсцисс прямую, заданную уравнением (4), мы можем утверждать, что k_0 будет численно равно длине отрезка OA , выраженной в

масштабе единиц, принятых для изображения чисел k , на оси абсцисс. Далее тот же график поясняет, что производная от i_m^2 , взятая по k_x , дает возможность найти m_{\max} . В самом деле,

$$\frac{di_m^2}{dk_x} = \frac{2\mu^2}{m_{\max}} \quad \text{или} \quad m_{\max} = \frac{2\mu^2}{di_m^2/dk_x}.$$

Построим по экспериментальным данным зависимость i_m^2 от k_x . Полученные экспериментальные точки должны укладываться на прямую, которую и надо провести по ним, пользуясь методом наименьших квадратов. До построения графика надо разумно выбрать масштабы по обеим осям координат, чтобы получившаяся прямая составляла приблизительно угол в 45° с осями координат так, как это делается всегда при графическом изображении линейных функциональных зависимостей.

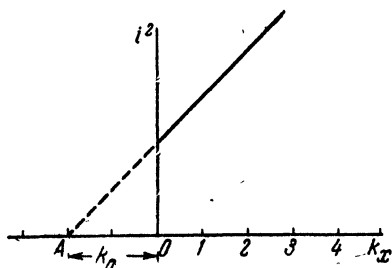


Рис. 7.

По графику построенной экспериментальной прямой, ее экстраполяцией до оси абсцисс находим k_0 .

Для отыскания значения m_x заменим производную i_m^2 по k_x отношением конечных приращений этих величин Δ . Учитывая численные значения масштабов, использованных на осях координат для величин i_m^2 и k_x , имеем

$$m_{\max} = \frac{2\mu^2}{\Delta i_m^2 / \Delta k_x}.$$

После этого, зная k_0 , оцениваем истинные значения порядков интерференции $m = m_{\max} - k_0 - k_x$ всех промеренных интерференционных колец. Значение показателя преломления μ стекла, из которого сделан диск, равно 1,511.

Упражнение 5

Изучение френелевой дифракции света у прямолинейного края непрозрачного экрана

Качественные наблюдения явления. Используемая в предшествующем упражнении оптическая система, когда на выходе из лазера помещен микроскопический объектив (рис. 6), вполне пригодна для осуществления с ее помощью френелевой дифракции света.

В самом деле, из фокуса объектива микроскопа 2 распространяется цилиндрическая монохроматическая световая волна, так как в фокусе объектива пространственно когерентный монохроматический и параллельный световой пучок лазера (имеющий прямо-

угольное удлиненное поперечное сечение) сфокусирован в тонкую вертикальную световую полоску.

Если на пути этой цилиндрической световой волны недалеко от F расположить препятствие, то на экране BB' , расположенном не слишком далеко за препятствием, можно наблюдать френелевский случай дифракции света (рис. 8; круговой экран $З$, всегда надетый на объектив 2, не показан).

В настоящем упражнении на столик 6 (рис. 4) помещается подставка, на которой закреплена стальная пластинка — экран $Э$ с острым вертикальным краем. Роль экрана выполняет одна щечка обычной входной щели коллиматора спектрографа.

Подставка экрана имеет вращающуюся шторку-флажок, назначение которой разъясняется ниже.

На краю экрана $Э$ (на его остром ножевидном крае) происходит дифракция цилиндрической волны (рис. 8).

Установленная на столик подставка притягивается к столику 6

с помощью гаек, навинчиваемых на вертикальные винты столика.

Щечка щели $Э$ располагается по отношению к падающему на нее из лазера свету так, чтобы скошенная кромка ножа была обращена к области тени за щечкой. Открытая шторка расположена при этом с освещенной лазером стороны подставки.

Если теперь повернуть на 90° кронштейн, несущий плоскопараллельную стеклянную пластинку (использованную в предшествующем упражнении задачи), то на наблюдательном экране 12 (рис. 4) можно увидеть невооруженным глазом характерную картину дифракции света, происходящей у края непрозрачного экрана $Э$. Эта картина состоит из ряда вертикальных светлых и темных полос.

Не следует ожидать в этом случае резкого контраста между темными и светлыми полосами дифракционной картины. Дело в том, что минимальная интенсивность света в самой темной полосе дифракционной картины снижается лишь примерно до 78% по отношению к интенсивности света, проходящего вдали от края экрана $Э$.

Для того чтобы сделать картину более наглядной, рекомендуется ориентировать плоскость наблюдательного экрана 12 под острым углом к оптической скамье, отчего дифракционные полосы на экране расширяются в поперечном направлении.

Оптимальное качество картины может быть достигнуто небольшими перемещениями столика 6 поперек оптической скамьи,

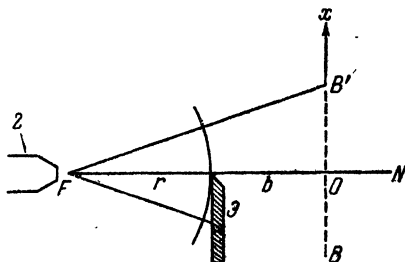


Рис. 8.

с тем, чтобы край щечки щели \mathcal{E} пришелся на середину участка волнового фронта цилиндрической волны, распространяющейся из фокуса объектива (рис. 8). Эти смещения столика осуществляются с помощью микрометрического винта 15 столика 6 (рис. 4).

Количественное изучение дифракции Френеля. Количественное изучение дифракционной картины заключается в измерении расположения дифракционных полос вдоль оси x в плоскости BB' , параллельной экрану, на краю которого происходит дифракция света. Плоскость измерений BB' и ось x показаны на рис. 8.

Но для того, чтобы произвести измерения расположения дифракционных полос, надо иметь некоторое начало отсчета на оси x . Естественным началом отсчета O на оси x была бы точка пересечения нормали FN к плоскости экрана \mathcal{E} (проведенной через его край) и оси x (рис. 8). Ясно, что точка O лежит в плоскости BB' на границе области тени от края экрана \mathcal{E} , построенной по законам геометрической оптики, без учета явления дифракции.

Но отыскать точку O с помощью окуляра невозможно. В самом деле, сильный короткофокусный окуляр, предназначенный для наблюдения со значительным увеличением дифракционной картины, нельзя сфокусировать на плоскость экрана \mathcal{E} и затем совместить крест нитей с изображением краев экрана вращением барабана 16 столика 7 (см. рис. 4).

Поэтому фактически при измерениях расположения дифракционных полос приходится принять за начало отсчета положение первой и самой яркой дифракционной полосы после области тени за экраном.

Отсчет на барабанах 16, соответствующий визированию на первую светлую полосу, будем обозначать x_1 , отсчеты, соответствующие визированию на все последующие темные и светлые полосы, будем обозначать x_n . Четные индексы будут соответствовать темным полосам, нечетные — светлым. При визировании надо приводить точку пересечения косога креста нитей на середину каждой дифракционной полосы.

Необходимо иметь в виду, что микрометрическая подача окуляра при измерениях должна осуществляться всегда в одну сторону, например, от области тени к области света. Микрометрический винт имеет неизбежный люфт, который не оказывает влияния на измерения только при неизменном вращении винта в одну сторону. Поэтому производить повторные измерения целесообразно только для всей последовательности дифракционных полос, но никак не возвращаясь эпизодически к визированию то одной, то другой полосы.

Крест нитей неподвижен в трубе окуляра, но оптическая система может перемещаться в небольших пределах, что позволяет сфокусировать крест нитей,

Надо учитывать, что наблюдение дифракционной картины лазерного светового пучка непосредственно через окуляр опасно для зрения. Поэтому при измерениях в прямом свете газового лазера поле зрения окуляра перекрывается нейтральным светофильтром, ослабляющим световой поток примерно в 10^4 раз. Нейтральный светофильтр помещается в особом держателе на стойке, несущей окуляр. Поворотом держателя, производимым в дневном свете, светофильтр фиксируется перед входным отверстием держателя окуляра. Только после этого можно открыть шторку-флажок и осветить край экрана Э (см. рис. 8) светом лазера.

Подготовка к измерениям и измерения. Измерения расположения дифракционных полос требуют специальной юстировки установки: оптическая ось системы окуляра должна совпадать с нормалью к краю плоскости экрана Э, а плоскость экрана Э должна быть нормальна к оси светового пучка лазера. Поэтому операции юстировки и измерений выполняются в следующем порядке:

1. Отпустив зажимной винт 4, опускают с помощью кремальберного винта 5 (рис. 4) микроскопический объектив 2 и надетый на него экран 3 ниже уровня лазерного светового пучка.

2. Снимают со столика 6 подставку с экраном Э.

3. Помещают на столик 7 подставку с окуляром и притягивают ее винтами к столику. Светофильтр опущен.

4. Небольшими поворотами столика 7 совместно с окуляром и вращениями барабана микрометрического винта 16 добиваются того, чтобы световой блик лазерного луча, отраженный от внешней поверхности первой линзы окуляра, вернулся на центр выходного отверстия лазера. Это требование определяет правильную ориентацию окуляра.

5. Ставят на столик 6 подставку с экраном Э и вращениями этого столика и микрометрического винта 15 добиваются того, чтобы световой блик от плоскости экрана Э вернулся на выходное окно лазера.

6. Закрывают шторку-флажок, установленную на подставке перед экраном Э и тщательно фокусируют крест нитей окуляром. Шторка-флажок имеет белую поверхность со стороны окуляра, поэтому для фокусировки креста нитей достаточно рассеянного света при нормальном освещении комнаты. В ходе последующих измерений к фокусировке креста нитей возвращаться не следует, так как всякая перефокусировка изменяет условия визирования на наблюдаемый объект, а это ведет к изменению отсчетов положения окуляра. Если перефокусировка стала в ходе измерений почему-либо неизбежной, выполнив ее, необходимо провести весь цикл измерений с новой фокусировкой. Это правило является совершенно общим при использовании всех отсчетных окуляров в микроскопах и зрительных трубах.

7. Перекрывают отверстие окуляра нейтральным светофильтром и только после этого открывают шторку-флажок, расположенную на подставке экрана Э.

После этого наблюдают в окуляр систему дифракционных полос. Повторяем еще раз, что по существу эта система полос не может быть такой контрастной, как, например, интерференционные полосы Юнга, наблюдаемые в упражнении 2. Кроме того, обращаем внимание на то, что с помощью окуляра можно резко сфокусировать крест нитей, но не дифракционные полосы. Последние при френелевой дифракции локализованы во всем пространстве и поэтому их фокусировать бессмысленно.

8. Перемещая столик 7 с окуляром микрометрическим винтом 16 (рис. 4), визируют крестом нитей поочередно центр каждой видимой светлой и темной полосы дифракционной картины и записывают соответствующие отсчеты на барабане микрометрического винта 16. Эту операцию, проходя каждый раз все видимые полосы в одном и том же направлении, проделывают несколько раз. Если окажется, что расход перемещений столика с окуляром недостаточен для последовательного визирования всех видимых дифракционных полос, то это означает, что столик 6 с экраном Э установлен неточно. Тогда перемещением столика 6 с помощью микрометрического винта 15 обеспечивают возможность наблюдения всей дифракционной картины. Ясно, однако, что если опыт потребовал перемещений столика 6, то операция отыскания всех отсчетов должна быть проделана вновь.

Обработка результатов измерений. Обработка результатов измерений заключается в сопоставлении экспериментального определения расположения дифракционных полос с его теоретическим расчетом. Прежде всего, зная отсчет x_1 на барабане микрометрического винта, соответствующий визированию на первую светлую полосу, находят расстояния от нее $x_n - x_1$ всех светлых и темных дифракционных полос. Затем наносят в подходящем масштабе все найденные расстояния на ось абсцисс прямоугольной системы координат, нумеруя их в порядке наблюдавшихся дифракционных полос. Для каждой полученной точки на оси абсцисс в дальнейшем будут отложены по оси ординат значения $S_n - S_1$ параметра спирали Корню.

Значения S отыскиваются с помощью спирали Корню. Принцип построения этой спирали и способы ее применения к решению дифракционных задач описаны во всех курсах оптики. Поэтому здесь мы останавливаемся только на том, что непосредственно относится к данному упражнению. Для обработки результатов изображение спирали Корню выдается каждому студенту.

Для того чтобы найти значение S_1 для первой светлой дифракционной полосы от края геометрической тени экрана, надо провести из точки $+F$ (рис. 9) прямую линию $+FA$ по такому

направлению, чтобы отрезок $+FA$ соответствовал максимальному расстоянию от точки $+F$ до линии внешнего витка спирали вокруг точки $-F$. Затем по делениям, нанесенным на витки спирали, можно найти значение длины витка спирали $-S$, соответствующее первой светлой дифракционной полосе. Аналогично, отыскивая точку на внешнем витке спирали, соответствующую минимальному расстоянию от точки $+F$ до внешнего витка спирали вокруг точки $-F$, можно найти значение длины дуги спирали S , соответствующее первой темной дифракционной полосе. Таким

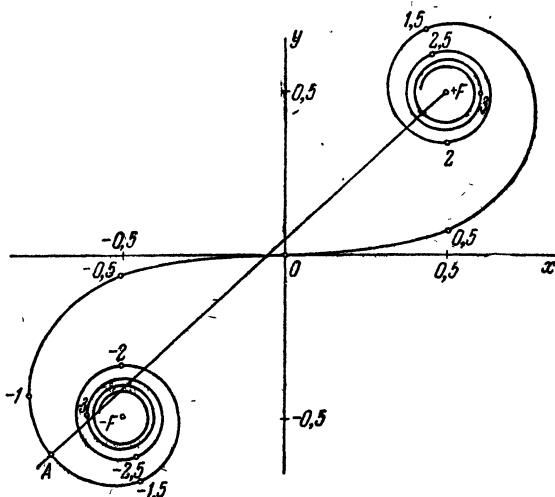


Рис. 9.

способом можно найти значения безразмерного параметра S для всех светлых и темных полос дифракционной картины.

Отложив в удобном масштабе по оси ординат значения $S_n - S_1$, соответствующие всем измеренным значениям $x_n - x_1$ для светлых и темных дифракционных полос, соединяют плавной кривой все получившиеся на графике точки. Если получившийся график достаточно близок к прямой линии, находят по нему коэффициент $K = (S_n - S_1)/(x_n - x_1)$. Значение K надо использовать для отыскания количественного соотношения между S и \bar{x} в условиях данного упражнения. Именно:

$$S = Kx \frac{S_n - S_1}{x_n - x_1} x.$$

Теоретическое значение коэффициента пропорциональности между S и x можно найти, пользуясь соотношением

$$S = \sqrt{\frac{2r}{\lambda b (r + b)}} x,$$

где r — радиус кривизны цилиндрической волны у края экрана \mathcal{E} , т. е. расстояние $F\mathcal{E}$ (рис. 8) (или расстояние от плоскости экрана \mathcal{E} до экрана \mathcal{E}). Отрезок b соответствует расстоянию от экрана \mathcal{E} до плоскости измерений BB' (рис. 8).

Сравнение значений коэффициента пропорциональности между S и x , найденных двумя разными способами, позволяет проверить согласие теории с опытом. После этого надо, пользуясь спиралью Корню, построить распределение интенсивности у края экрана в зависимости от параметра S .

Упражнение 6

Наблюдение френелевой дифракции света на краях прямолинейной щели, проволоки и предметов произвольной формы

Оптическая система предшествующего упражнения позволяет провести качественные и количественные наблюдения ряда случаев френелевой дифракции света лазера.

Вместо подставки с экраном \mathcal{E} на столик 6 (рис. 4) помещается подставка со спектрографической раздвижной щелью и притягивается к столику гайками. Со столика 7 удаляется подставка с окуляром зрительной трубы. После этого на косом экране 12 (рис. 4) можно наблюдать картину френелевой дифракции на щели. Картина эта изменяется в зависимости от ширины щели. Необходимо проследить и зарисовать полную эволюцию дифракционной картины при изменениях ширины щели от минимальной ее ширины до полного открытия щели. Не следует, однако, допускать полного смыкания щечек щели, так как острые края щели портятся при соприкосновении.

Одной из характерных черт френелевой дифракционной картины, получаемой со щелью, является формирование темной полосы минимума света в центре освещенной области на экране при некоторых значениях ширины щели, что подчеркивает различие между фраунгоферовой и френелевой дифракцией. В первом случае на экране против центра щели всегда будет свет.

Очевидно, что при широкой щели на экране 12 будут видны две дифракционные картины от прямолинейных краев каждой из щечек щели.

Эту эволюцию дифракционной картины, в зависимости от ширины щели, можно, разумеется, наблюдать не только на косом экране, но и в окуляр с нейтральным светофильтром, установив их вновь на столик 7.

Наблюдения производят, постепенно увеличивая ширину щели от ее минимального (но не нулевого) значения и записывая отсчеты на измерительном барабане винта щели, соответствующие появлению центральных темных полос в середине дифракционных картин. Эту операцию проделывают несколько раз, ведя наблюдения за

центром картины непосредственно на экране или через окуляр с нейтральным фильтром.

Для найденных значений ширины щели, соответствующих темной полосе в самой середине картины, указывают число зон Френеля на фронте цилиндрической волны, вписавшихся в отверстие щели.

Анализ хода спирали Корню позволяет установить следующее правило: интенсивность света в центре дифракционной картины от щели минимальна, всякий раз, когда на каждой половине участка волнового фронта вписавшегося в щель, укладывается четное число зон Френеля.

Весьма наглядный способ интерпретации распределения освещенности во всей френелевой дифракционной картине, полученной с помощью щели, методом спирали Корню описан в книге Г. С. Горелика [2].

После окончания опытов с раздвижной щелью на столик помещается подставка с рамкой, в прорези которой вдоль вертикальной стороны натянута тонкая проволока. На экране 12 или с помощью окуляра, защищенного нейтральным фильтром, можно наблюдать френелеву дифракцию света на узком длинном экране, образованном проволокой. Следует обратить внимание на светлую полоску (пятно Пуассона) в центре дифракционной картины, т.е. в области центра тени, построенной за проволокой по законам геометрической оптики, без учета явления дифракции света.

Наконец, вместо подставки с проволокой на столик 6 помещают подставку с предметом произвольной формы (лезвие бритвы) и наблюдают на экране дифракционные полосы вокруг всех контуров предмета.

Технические данные установки. Задача собрана на оптической скамье ОСК-2; мелкие детали установки изготовлены в мастерской физического практикума МГУ. Используются газовые лазеры, выпускаемые промышленностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1957.
2. Г. С. Горелик, Колебания и волны, Физматгиз, 1959.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

3. А. Шавлов, УФН 75, 569 (1961).
4. Р. Дитчберн, Физическая оптика, «Наука», 1965.
5. Ю. Л. Климонтович, Квантовые генераторы света и нелинейная оптика, «Просвещение», 1966.
6. В. М. Файн, Я. И. Ханин, Квантовая радиофизика, «Советское радио», 1965.
7. Ф. А. Бутаева и В. А. Фабрикант, Исследования по экспериментальной и теоретической физике. Сборник памяти Г. С. Ландсберга, Изд. АН СССР, 1959.
8. Н. Г. Басов, А. М. Прохоров, УФН 57, 485 (1955).

9. Б. Лендъел, Лазеры, «Мир», 1964.
 10. В. Беннег, О. Хивенс, Газовые лазеры и лазеры на твердых веществах, «Мир», 1964.
 11. А. Шавлов, С. Фогель, Л. Далберджер, Оптические квантовые генераторы, ИЛ, 1962.
 12. Лазеры, Сборник статей, перевод под редакцией М. Е. Жаботинского и Т. А. Шаонова, 1963.
 13. А. Н. Изнар и Б. Ф. Федоров, Оптические квантовые приборы в военной технике, «Советское радио», 1964.
 14. А. Вейлстекке, Основы теории квантовых усилителей и генераторов, ИЛ, 1963.
 15. Н. Н. Соболев, В. В. Соколов, УФН 91, 425 (1967).
 16. Оптические квантовые генераторы, Сборник статей (перевод) под редакцией Ф. В. Бункина, «Мир», 1966.
-

ПРИЛОЖЕНИЕ

НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЕ

Электроизмерительная аппаратура делится на три группы: меры, измерительные приборы, вспомогательные приспособления. Эти три группы в свою очередь подразделяются следующим образом:

Меры.

1) Однозначные меры: катушки электрического сопротивления, катушки индуктивности, конденсаторы постоянной емкости, нормальный элемент и т. п.

2) Наборы мер: магазины сопротивлений, магазины емкостей, магазины индуктивностей и т. п.

3) Меры с переменным значением; типичными представителями этой подгруппы являются вариометр индуктивностей и конденсатор переменной емкости, шкалы которых предварительно проградуированы.

Измерительные приборы:

1) Приборы с визуальным отсчетом, т. е. приборы, дающие возможность непосредственно отсчитывать значение измеряемой величины по шкале.

2) Самопишущие или регистрирующие приборы; эти приборы сами записывают значения измеряемой величины как функцию времени. В зависимости от конструкции эта запись производится или на диаграммной бумаге, или на фотопленке, или на фотобумаге.

3) Интегрирующие приборы измеряют суммарное значение измеряемой величины за время действия прибора. Типичным представителем этой подгруппы является счетчик электрической энергии.

4) Компарирующие приборы: дают возможность сравнивать измеряемую величину с мерами. К этой подгруппе относятся измерительные мосты и потенциометры.

К группе вспомогательных измерительных приспособлений и принадлежностей относятся все устройства, употребляемые при электрических измерениях и не входящие в первые две группы.

Все меры и измерительные приборы делятся на образцовые и рабочие.

Образцовые меры и измерительные приборы предназначены для воспроизведения и хранения единиц измерений, а также для поверки и градуировки рабочих мер и измерительных приборов. Этот класс мер и измерительных приборов имеет целый ряд более мелких градаций: первичные эталоны, вторичные эталоны, третичные эталоны, рабочие эталоны, образцовые меры и измерительные приборы ограниченной точности 1-го, 2-го и 3-го разрядов.

Рабочие меры и измерительные приборы предназначены для практических целей измерения. Этот класс мер и измерительных приборов делится в свою очередь по признаку точности, на лабораторные и технические.

Существует целый ряд классификаций электроизмерительных приборов по различным признакам. Наиболее существенными для лабораторной практики являются: классификация по принципу действия в зависимости от системы и классификация по степени точности.

По принципу действия приборы делятся на следующие основные типы:

- | | |
|--------------------------|------------------------|
| 1) магнитоэлектрические, | 5) термоэлектрические, |
| 2) электромагнитные, | 6) детекторные, |
| 3) электродинамические, | 7) электростатические, |
| 4) тепловые, | 8) электронные. |

Кроме перечисленных, существуют еще и другие системы приборов, которые в лабораторной практике применяются сравнительно редко.

По степени точности приборы делятся на следующие классы: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Номер класса соответствует наибольшей основной приведенной погрешности, выраженной в процентах (основной приведенной погрешностью называется отношение абсолютной погрешности к наибольшему для данного прибора значению измеряемой величины при нормальных внешних условиях: температуре, влажности, атмосферном давлении). В данном случае имеется в виду не статистическая погрешность, о которой говорится во введении к первой части практикума, а разность между фактическим показанием прибора и истинным значением измеряемой величины, соответствующей данному показанию (за истинное принимается значение величины, измеренное прибором более высокого класса точности). Приборы, не удовлетворяющие классу 4,0, считаются внеклассными. Данная классификация распространяется на амперметры, вольтметры и ваттметры магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической, электростатической, термоэлектрической и детекторной систем.

Подробно с принципом работы и устройством наиболее употребительных в физических измерениях приборов следует ознакомиться по описанию соответствующих задач практикума. Здесь дается лишь их краткая характеристика.

1. В приборах магнитоэлектрической системы рамка, обтекаемая током, поворачивается в поле постоянного магнита. Теория и устройство гальванометра магнитоэлектрической системы изложены в задаче 83. Приборы магнитоэлектрической системы изготавливаются как для измерения тока (амперметры, гальванометры), так и для измерения напряжения.

2. В электромагнитных приборах лепесток из ферромагнетика втягивается в неоднородное магнитное поле, создаваемое током, текущим по катушке. Очень схематическое описание работы этих приборов можно найти в [1], более подробно с ними можно познакомиться в [3].

Эти приборы, так же как и магнитоэлектрические, изготавливаются как для измерения тока (амперметры), так и для измерения напряжения (вольтметры). Благодаря тому, что они позволяют измерять как постоянный, так и переменный ток, просты по конструкции, устойчивы к перегрузкам, надежны в эксплуатации и дешевы, но обладают сравнительно небольшой точностью и чувствительностью, они являются основными приборами при технических измерениях, в лабораторной практике они используются реже и в основном для измерений в цепях переменного тока.

3. Электродинамическими называются приборы, работа которых основана на взаимодействии токов. В таких приборах имеются две катушки, обтекаемые током, — подвижная и неподвижная. Ваттметр такой системы описан в задаче 97 (см. также [2]). У вольтметров и амперметров, рассчитанных на слабые токи, катушки соединяются последовательно, а в амперметрах, измеряющих большие токи (больше $0,5\text{ а}$), — параллельно. Вращающий момент, действующий на подвижную часть прибора, пропорционален произведению сил токов, текущих по катушкам. Это позволяет производить измерения как на переменном, так и на постоянном токах.

Приборы этого типа всегда имеют неравномерную шкалу, так как момент силы, действующей между катушками, зависит от взаимного расположения катушек. Магнитные поля катушек электродинамических приборов сравнительно невелики, поэтому данные приборы подвержены влиянию внешних магнитных полей. Для устранения этого недостатка применяются магнитные экраны и аста-

тические конструкции отклоняющих систем [3]. Для успокаивания собственных колебаний подвижной части в электродинамических приборах применяются как воздушные, так и магнитные демпферы.

Приборы этого типа обладают высокой точностью при сравнительно небольшой чувствительности. Они мало устойчивы к перегрузкам. Кроме того, они обладают большим собственным потреблением мощности. Применяются электродинамические приборы в основном для лабораторных измерений на переменном токе. В технике они применяются редко из-за их высокой стоимости.

4. Принцип действия тепловых приборов основан на удлинении металлической нити или на деформации биметаллической пластинки при нагревании их измеряемым током. Однако так как эти приборы имеют ряд существенных недостатков (инерционность, зависимость показаний от внешней температуры, неустойчивость к перегрузкам, неравномерность шкалы), они в лабораторной практике почти не применяются.

5. Термоэлектрический прибор состоит из чувствительного прибора магнитоэлектрической системы в сочетании с термопреобразователем. Термопреобразователь представляет собой одну или несколько термпар, соответствующие спай которых нагреваются измеряемым током, проходящим по тонкой металлической нити. Термопреобразователи бывают вакуумные и обычные.

Термоэлектрические приборы обладают малой точностью. Изменение температуры окружающей среды вносит в их показания дополнительную погрешность. Собственное потребление мощности этими приборами весьма мало. Они не переносят перегрузки — кратковременная перегрузка на 10% выводит прибор из строя.

Употребляются эти приборы исключительно для измерения токов радиочастот (до 6 Мгц). При более высоких частотах они могут служить как индикаторы тока.

6. Детекторные приборы представляют собой сочетание чувствительного измерительного прибора магнитоэлектрической системы с полупроводниковым выпрямителем (см. задачу 99). Схемы соединений приведены на рис. 1.

Детекторные приборы применяются для измерений на переменном токе промышленной и звуковых частот (до 10 кгц). Они имеют равномерную шкалу, за исключением ее начала. Класс точности детекторных приборов не выше 1,5. Собственное потребление мощности невелико. Детекторные приборы часто изготавливаются в виде универсальных многопредельных вольтамперметров.

7. В приборах электростатической системы отклоняющий момент, действующий на подвижную систему, возникает в результате электростатического взаимодействия двух разноименно заряженных проводников. Поэтому эти приборы могут измерять только напряжения. Описание принципа действия и конструкции одного из выпускаемых нашей промышленностью электростатических вольтметров приведено в задаче 66.

Электростатические вольтметры могут измерять как постоянное, так и переменное напряжение; обладают неравномерной шкалой (сжатой вначале и приближающейся к равномерной в конце); имеют малую чувствительность, обладают небольшой точностью (не выше класса 1,5). Кроме того, обладают хорошей устойчивостью к перегрузкам напряжения; чувствительны к внешним электростатическим полям и, следовательно, нуждаются в электростатическом экранировании.

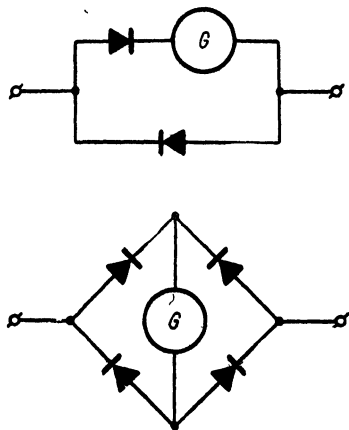


Рис. 1.

8. Электронные приборы. В настоящем кратком описании различных электроизмерительных приборов мы остановимся только на ламповом (катодном) вольтметре, который находит себе в практике широкое применение.

В ламповом вольтметре используется зависимость анодного тока электронной лампы от напряжения на ее сетке. При использовании электронной лампы в так называемых мостовых электрических схемах это свойство лампы удобно рассматривать как зависимость сопротивления лампы от напряжения на ее сетке. На рис. 2 изображена схема простого лампового вольтметра. Триод \mathcal{L} , сопротивление R_1 и потенциометр R_2 образуют мост, в диагональ которого включен прибор V .

В случае измерения постоянного напряжения последнее подключают к сетке триода. Это приводит к изменению сопротивления лампы постоянному току, нарушает баланс моста и вызывает отклонение стрелки прибора, шкала которого градуирована в значениях напряжений на сетке лампы.

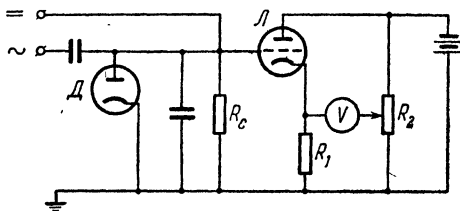


Рис. 2.

Основным достоинством лампового вольтметра является высокое значение входного сопротивления (10—100 *Мом*), позволяющее использовать прибор для измерений напряжений на высокоомных элементах исследуемых схем.









Для измерений переменного напряжения в схему лампового вольтметра вводится диодный детектор D . Полученное в результате детектирования на R_c постоянное напряжение приложено к сетке триода и вызывает отклонение стрелки прибора. Рассмотренная схема используется в ламповом вольтметре ВКС-7 (задача 107), при помощи которого может измеряться напряжение высокой частоты, до 50 *Мгц*. Чтобы не нарушать работу высокочастотных схем емкостью и индуктивностью соединительных проводов, в вольтметре ВКС-7 диодный детектор смонтирован в выносном блоке, что позволяет подключать его непосредственно к элементам высокочастотных схем. Применяются и более сложные ламповые вольтметры, чувствительность которых повышена применением специальных усилителей (ламповые милливольтметры, микровольтметры и ламповые электрометры).

Оформление шкал электроизмерительных приборов. Наиболее существенные технические характеристики прибора помещаются на его шкале, к ним относятся:

- 1) фирменный знак,
- 2) обозначение размерности измеряемой величины,
- 3) условное обозначение класса прибора и № ГОСТ,
- 4) условное обозначение рода тока,
- 5) условное обозначение системы прибора,
- 6) условное обозначение нормального положения прибора, если оно необходимо,
- 7) условное обозначение испытательного напряжения изоляции,
- 8) условное обозначение прибора, тип и год выпуска,
- 9) заводской номер прибора.

Ниже приводятся условные обозначения, помещаемые на шкалах приборов.

Условные обозначения систем приборов

Система прибора	Условное обозначение	Система прибора	Условное обозначение
Магнитоэлектрическая		Детекторная	
Электромагнитная		Электростатическая	
Электродинамическая		Электронная	
Тепловая			
Термоэлектрическая			

Условные обозначения различных технических характеристик приборов

Техническая характеристика	Условные обозначения
Класс точности прибора 2,5	2,5
Изоляция прибора испытана напряжением 2 кв.	$\sum 2 \text{ кв}$
Прибор предназначен для включения в цепь постоянного тока	—
Прибор предназначен для включения в цепь переменного тока	~
Прибор может включаться в цепи постоянного и переменного тока	$\overline{\sim}$
Трёхфазный ток	3 ~
Частота 50 гц	$\sim 50 \text{ гц}$
Вертикальная установка прибора	\uparrow
Наклонная установка прибора под углом 60°	$\angle 60^\circ$
Горизонтальная установка прибора	—
Предостерегающий знак высокого напряжения	\sim

ЛИТЕРАТУРА

1. Ш т р а у ф, Электричество и магнетизм, Гостехиздат, 1950, гл. II, § 6 (2), III, § 7, стр. 396.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. Г. П. Ш к у р и н, Справочник по электроизмерительным приборам, Военгиз, 1956.

3. М. Ф. В л а с о в, С. М. П и г и н и В. И. Ч е р в я к о в а, Сборка и регулировка электроизмерительных приборов, Госэнергоиздат, 1955.

ТАБЛИЦЫ

1. Сопротивления и веса медных проводов

(Удельное сопротивление равно $0,178 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$; плотность равна 8,89)

Сечение, мм^2	Диаметр, мм	Сопротивление при длине 100 м, ом	Вес 100 м провода, кг
0,5	0,8	3,57	
0,75	1,0	2,38	0,445
1	1,1	1,78	0,666
1,5	1,4	1,19	0,889
2,5	1,8	0,71	1,33
4	2,3	0,45	2,22
6	2,8	0,30	3,56
10	3,6	0,18	5,33
16	4,5	0,11	8,89
25	5,6	0,071	14,2
35	6,7	0,051	22,2
50	8,0	0,036	31,1
70	10,9	0,026	44,5
95	12,6	0,019	62,2
120	14,5	0,015	84,5
150	15,8	0,012	106,8
185	17,6	0,0097	133,2
240	20,4	0,0074	164,4
310	22,8	0,0058	211,5
400	26,3	0,0045	275,5
500	29,4	0,0036	355,5
625	32,9	0,0029	444,5
800	37,2	0,0022	555,0
1000	41,6	0,0018	711,0
			889,0

2. Удельное сопротивление некоторых изоляторов

(в $\text{ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$)

Изоляторы	ρ	Изоляторы	ρ	Изоляторы	ρ
Шифер	$1 \cdot 10^8$	Стекло	$5 \cdot 10^{18}$	Кварц \perp	$3 \cdot 10^{16}$
Фибра	$5 \cdot 10^9$	Кварц 	$1 \cdot 10^{14}$	Сера	$1 \cdot 10^{17}$
Мрамор	$1 \cdot 10^{10}$	Миканит	$1 \cdot 10^{15}$	Эбонит	$1 \cdot 10^{18}$
Целлулоид	$2 \cdot 10^{10}$	Шеллак	$1 \cdot 10^{18}$	Парафин	$3 \cdot 10^{18}$

3. Удельное сопротивление некоторых металлов и сплавов

(в $\text{ом} \cdot \text{см}$ при 18°C)

Чистые металлы и сплавы	$10^4 \rho$	Чистые металлы и сплавы	$10^4 \rho$	Чистые металлы и сплавы	$10^4 \rho$
Серебро	0,016	Кадмий	0,076	Манганин	0,43
Медь	0,017	Латунь	0,08	Сурьма	0,45
Золото	0,023	Железо	0,086	Константан	0,50
Алюминий	0,029	Кобальт	0,090	Ртуть	0,958
Иридий	0,053	Палладий	0,107	Висмут	1,20
Вольфрам	0,056	Платина	0,107	Натрий	0,049
Родий	0,060	Олово	0,113	Калий	0,070
Цинк	0,060	Тантал	0,12	Никелин	0,42
Никель	0,070	Свинец	0,21	Нихром	1,10

4. Удельное сопротивление некоторых водных растворов при 18°C Сопротивление (в омах) 1 см^2 различных растворов.

Содержание безводной соли или кислоты, %	Наша- тырь NH_4Cl	Хлори- стый натрий NaCl	Цинко- вый купорос ZnSO_4	Медный купорос CuSO_4	Едкий калий КОН	Едкий натр NaOH	Серная кислота H_2SO_4
5	10,9	14,9	52,4	52,9	5,8	5,1	4,8
10	5,6	8,3	31,2	31,3	3,2	3,2	2,6
15	3,9	6,1	24,1	23,8	2,4	2,9	1,8
20	3,0	5,1	21,3	—	2,0	3,0	1,5
25	2,5	4,7	20,8	—	1,9	3,7	1,4
30	—	—	22,7	—	1,8	4,8	1,35
35	—	—	—	—	2,0	6,4	1,4
40	—	—	—	—	2,2	8,3	1,5

5. Электропроводность водных растворов серной кислоты

(в $\text{ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$)

$1/2 \text{H}_2\text{SO}_4$, концентрация в %													
5	10	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90	100
0,208	0,391	0,543	0,653	0,717	0,739	0,724	0,680	0,540	0,373	0,216	0,110	0,107	0,016

6. Температурные коэффициенты сопротивлений некоторых металлов и сплавов ($\alpha \cdot 10^3$)

Алюминий	+ 4,2	Медь	+ 4,1
Бронза	- 0,5	Никелин	+ 0,3
Вольфрам	+ 4,5	Никель	+ 6,2
Золото	+ 3,9	Нихром	+ 0,15—0,4
Железо	+ 6,0	Платина	+ 3,9
Константан	+ 0,002	Свинец	+ 4,2
Латунь	+ 2	Серебро	+ 4,0
Манганин	+ 0,006	Ртуть	+ 0,27

7. Диэлектрические проницаемости различных веществ при 18°C

Ацетон	21	Соль каменная	5,6
Бакелит	3,9	Слюда	6—9
Бензол	2,3	Спирт метиловый	33
Бумага	2—2,5	» этиловый	26
Вода	81	Стекло обычное	5—7
Гуттаперча	4,4	Оптическое стекло	до 10
Дерево (сухое)	2—8	Сера	3,6—4,3
Касторовое масло	4,67	Сероуглерод	2,6
Каучук	2,2—3	Фарфор	6
Кварц		Целлулоид	3,9
оси	4,7	Шеллак	3—3,7
└ оси	4,4	Шифер	12—50
Кварц плавлен.	3,7	Эбонит	2,7
Керосин	2	Янтарь	2,8
Ксилол	2,2—2,6	Углекислый газ	1,00097
Мрамор	8,3	Азот	1,000606
Нитробензол	36	Воздух	1,000590
Парафин	2	Кислород	1,000547
Парафиновое масло	2,2	Водород	1,000264
Рутил	170	Гелий	1,000074

8. Термоэлектродвижущие силы

А. В таблице даны выраженные в 10^{-8} в термоэлектродвижущие силы пар: платина—платинородий и платина—платиноиридий для различных температур одного из сплавов; другой сплав находится при 0°C .

Пара	$t^{\circ}\text{C}$	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Pt и PtRh (90% Pt, 10% Rh)	0	0	23	51	83	119	158	199	242	286	331
	500	337	423	470	518	567	617	668	720	773	826
	1500	880	935	991	1048	1106	1225	1165	1286	1348	—
Pt и PtIr (90% Pt, 10% Ir)	9	0	58	125	195	268	343	420	498	577	657
	500	737	818	899	981	1064	1147	1231	1315	1400	1485
	1500	1571	1657	1744	1831	1919	2007	2096	2185	2275	—

Б. В таблице даны выраженные в 10^{-8} в (в микровольтах) термоэлектродвижущие силы пар, составленных из платины и одного из приведенных в таблице металлов. Один из сплавов находится при 0°C , а другой — при указанной в таблице температуре.

Ток течет через нагретый спай от металла, имеющего (алгебраически) меньший потенциал.

Металл	-190°	$+100^{\circ}$	Металл	-190°	$+100^{\circ}$
Алюминий	+ 390	+ 380	Медь	- 200	+ 700
Бронза	—	около + 400	Нейзильбер ^{а)}	—	около -1000
Висмут	+12300	-6500	Никель	+2200	-1640
Железо	- 2900	около +1600	Олово	+ 200	+ 410
Золото	- 120	+ 730	Палладий	+ 790	- 560
Кадмий	- 60	+ 900	Ртуть	—	0
Кобальт	—	-1520	Свинец	+ 210	+ 410
Константан ¹⁾	—	-3440	Серебро	- 140	+ 710
Магний	+ 330	+ 410	Сурьма	—	+4700
Манганин ²⁾	—	+ 570	Тантал	—	+ 330
			Цинк	- 120	+ 750

¹⁾ 60% меди, 40% никеля.

²⁾ 84% меди, 4% никеля, 12% марганца.

³⁾ 60% меди, 15% никеля, 25% цинка.

9. Электродвижущие силы элементов

Название элемента	Отрицат. электрод	Растворы	Положит. электрод	Вольты	
Даниеля	Амалг. Zn	1 часть H_2SO_4 на 4 части H_2O	Медь	1,06	
»	»	1 часть H_2SO_4 на 12 частей H_2O		»	1,09
»	»	5% раствор $ZnSO_4 + 6H_2O$		»	1,08
»	»	1 часть NaCl на 4 части H_2O		»	1,05
Поггендорфа	»	1 часть H_2SO_4 на 12 частей H_2O		Уголь	2,03
Грене	»	12 частей $K_2Cr_2O_7 + 25$ частей $H_2SO_4 + 100$ частей H_2O	»	2,01	
Лекланше	»	Раствор нашатыря. Перекись марганца с угольным порошком	»	1,46	
Сухой	Zn	1 часть ZnO, 1 часть NH_4Cl , 3 части гипса, 2 части $ZnCl_2$ и вода до получения пасты	»	1,3	
Вестона	Амалг. Cd	Насыщенный раствор $CdSO_4$, паста из Hg_2SO_4 и $CdSO_4$	Ртуть	1,0183	
Кларка	Амалг. Zn	Насыщенный раствор $ZnSO_4$, паста из Hg_2SO_4 и $ZnSO_4$	»	При 20° C 1,434	
Свинцовый аккумулятор	Губчатый свинец	27—28% раствор свободной от хлора H_2SO_4 ; плотность 1,20 (24° Бомэ)	Перекись свинца Pb_3O_6	При 15° C 2,0—1,9	
Щелочной аккумулятор	Железо	20% раствор едкого кали	Двуокись никеля NiO_2	1,2—1,3	

Температурные формулы

Для элемента Вестона: $E_t = E_{20} - 0,0000406(t - 20) - 0,00000095(t - 20)^2 + 0,00000001(t - 20)^3$.

Для элемента Кларка: $E_t = E_{15} - 0,00119(t - 15) - 0,000007(t - 15)^2$.

10. Электрохимические эквиваленты

Ток 1 а выделяет мг:					
	Серебра	Меди	Водорода	Воды	см ³ гремучего газа при 0° и 760 мм Hg
В 1 сек.	1,118	0,3294	0,01036	0,0933	0,1740
В 1 мин.	67,08	19,76	0,6215	5,60	10,44
В 1 час.	4025	1186	37,29	335,9	626

11. Длины волн некоторых спектральных линий
в Å (10^{-8} см)

Элемент	λ	Элемент	λ	Элемент	λ
Ba	4554	H	3970	Li	4603
	4934		4102		6104
	5535		4340		6708
	5778		4861	Na	5890
	5972		6563		5896
	6142	He	3889	Sr	4607
	6496		4026		6386
	Ca		4455		4471
4878		4713			
5270		4922			
5349		5016			
5590		5876			
5857		6578			
6122		7065			
6162		K	4045		
6439	6911				
Cu	4023		6939		
	4063		7665		
	4275		7699		
	4378				
	4587				
	5153				
	5218				
	5700				
5782					

**12. Длины волн спектральных линий
ртутно-кадмиево цинковой лампы**

λ в Å	Элемент	Интенсивность	λ в Å	Элемент	Интенсивность
6438,4696	Cd	10	4799,914	Cd	10
6362,345	Zn	10	4722,163	Zn	10
6234,35	Hg	4	4680,140	Zn	10
6123,46	Hg	5	4678,150	Cd	10
6072,63	Hg	4	4358,343	Hg	10
5790,66	Hg	10	4347,50	Hg	6
5769,60	Hg	10	4339,21	Hg	6
5460,724	Hg	10	4108,07	Hg	5
5085,823	Cd	10	4077,8	Hg	7
4916,0	Hg	10	4046,77	Hg	7
4810,534	Zn	10			

13. Длины волн некоторых линий в спектре неона

№ п/п	Положение и окраска линии	Относительная яркость	Длина волны, м.мк
1	Яркокрасная	10	640,2
2	Красно-оранжевая, левая из двух близких линий	10	614,3
3	Оранжевая, первая заметная влево от 4-й	5	594,5
4	Желтая	20	585,2
5	Светлозеленая, первая заметная вправо от 4-й	4	576,0
6	Зеленая левая из двух одиноких линий	6	540,0
7	Зеленая правая из двух одиноких линий	8	533,0 ¹⁾
8	Зеленая правая из пяти равноудаленных линий	5	503,1
9	Сине-зеленая одинокая	8	484,9

¹⁾ Эта линия двойная (дублет). Здесь дано среднее значение длин волн обеих компонент.

15. Длины волн главных фраунгоферовых линий

Обозначение линии	Элемент	Длина волны в Å	Обозначение линии	Элемент	Длина волны в Å
A	Кислород	7621	b ₄	Железо, магний . .	5167,4
a		7185	c	Железо	4957,6
B	Кислород	6870	F	Водород	4861,3
C	Водород	6562,8	d	Железо	4668
a	Кислород	6278,1	e	»	4383,6
D ₁	Натрий	5895,9	f	Водород	4340,5
D ₂	»	5890,0	γ	Железо	4325,8
D ₃	Гелий	5875,6	G	Железо, кальций .	4307,9
E	Железо	5269,6	g	Кальций	4226,7
b ₁	Магний	5183,6	h	Водород	4101,7
b ₂	»	5172,7	H	Кальций	3968,6
b ₃	Железо	5169,0	K	»	3933,6

16. Коэффициенты преломления некоторых твердых тел при 18° С относительно воздуха и вращательная способность кварца в 1 мм толщины

Длина волн в μ	A 0,760	B 0,687	C (H) 0,6563	D (Na) 0,5893	E 0,5270	F (H) 0,4861	f (H) 0,4341	G 0,4308	H 0,3968	
Кронглас {	легкий	1,5099	1,5118	1,5127	1,5153	1,5186	1,5214	1,5264	1,5267	1,5312
	тяжелый	1,6097	1,6117	1,6126	1,6152	1,6185	1,6213	1,6262	1,6265	1,6308
Флинт-глас {	легкий	1,5986	1,6020	1,6038	1,6085	1,6145	1,6200	1,6302	1,6308	1,6404
	тяжелый	1,7351	1,7406	1,7434	1,7515	1,7623	1,7723	1,7910	1,7922	1,8110
Известк. шпат {	обыкн.	1,6500	1,6530	1,6545	1,6585	1,6685	1,6679	1,6755	1,6762	1,6833
	необыкн.	1,4827	1,4840	1,4846	1,4864	1,4887	1,4908	1,4943	1,4946	1,4978
Кварц {	обыкн.	1,5391	1,5409	1,5418	1,5442	1,5471	1,5496	1,5539	1,5543	1,5581
	необыкн.	1,5481	1,5500	1,5509	1,5533	1,5563	1,5589	1,5634	1,5637	1,5677
Вращение в кварце при 18° С . .	12,7°	15,7°	17,3°	21,71°	27,5°	32,7°	42,0°	42,6°	51,2°	

17. Показатели преломления некоторых жидкостей

Наименование	Формула	$t, ^\circ\text{C}$	n_D
Ацетон	CH_3COCH_3	20	1,359
Анилин	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$	20	1,586
Бензол	C_6H_6	20	1,501
Вода	H_2O	20	1,333
Иодистый метилен	CH_2I_2	19	1,742
Канадский бальзам	—	—	1,53
Ксилол	$\text{C}_8\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$	15,7	1,50
Метиловый спирт	CH_3OH	18	1,330
Нитробензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	20	1,553
Серная кислота	H_2SO_4	23	1,429
Сероуглерод	CS_2	15,7	1,631
Соляная кислота	HCl	10,5	1,254
Четыреххлористый углерод	CCl_4	20	1,460
Этиловый спирт	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	17,5	1,362
α -монобромнафталин	$\text{C}_{10}\text{H}_7\text{Br}$	20	1,65820

18. Интерференционные окраски кварцевого клина при скрещенных и параллельных николях

Толщина клина в миллиметрах	При скрещенных николях	При параллельных николях	
0,15	Красный	Зеленый	Третий порядок
0,14	Желтый	Серо-голубой	
0,13	Зеленый	Красный	
0,12	Синий	Желтый	
0,11	Пурпуровый	Зеленый	
0,10	Красный	Голубовато-зеленый	Второй порядок
0,09	Оранжевый	Темно-голубой	
0,08	Зеленый	Пурпуровый	
0,07	Небесно-голубой	Золотисто-желтый	
0,06	Синий	Желтый	
0,05	Пурпуровый	Зеленый	
	Красный		
0,04	Оранжевый	Синий	Первый порядок
0,03	Желтый	Голубой	
0,02	Зеленый	Бурый	
0,01	Черный	Белый	

20. Плотность водных растворов сахара в интервале температур от 0 до 50° С

С. %	Температура, °С							
	0	10	15	20	25	30	40	50
0	0,99987	0,99973	0,99913	0,99823	0,99707	0,99567	0,99232	0,98813
1	1,00390	1,00365	1,00301	1,00212	1,00093	0,99952	0,99615	0,99197
2	1,00798	1,00760	1,00693	1,00602	1,00481	1,00340	1,00001	0,99575
3	1,01207	1,01157	1,01087	1,00993	1,00872	1,00731	1,00387	0,99958
4	1,01619	1,01557	1,01484	1,01388	1,01266	1,01124	1,00777	1,00340
5	1,02033	1,01960	1,01884	1,01785	1,01661	1,01518	1,01169	1,00735
6	1,02449	1,02366	1,02287	1,02186	1,02060	1,01916	1,01563	1,01127
7	1,02867	1,02774	1,02692	1,02588	1,02461	1,02316	1,01960	1,01521
8	1,03287	1,03185	1,03100	1,02994	1,02864	1,02717	1,02359	1,01918
9	1,03710	1,03599	1,03512	1,03403	1,03271	1,03122	1,02761	1,02198
10	1,04135	1,04016	1,03925	1,03814	1,03679	1,03530	1,03165	1,02319
11	1,04564	1,04437	1,04343	1,04229	1,04092	1,03940	1,03573	1,03126
12	1,04994	1,04859	1,04762	1,04646	1,04507	1,04353	1,03982	1,03533
13	1,05429	1,05286	1,05186	1,05066	1,04925	1,04770	1,05043	1,03943
14	1,05865	1,05714	1,05612	1,05490	1,05346	1,05189	1,04809	1,04356
15	1,06305	1,06146	1,06041	1,05917	1,05772	1,05612	1,05229	1,04772
16	1,06746	1,06581	1,06473	1,06346	1,06198	1,06035	1,05650	1,05191
17	1,07191	1,07020	1,06909	1,06779	1,06629	1,06464	1,06074	1,05614
18	1,07640	1,07461	1,07347	1,07215	1,07062	1,06896	1,06502	1,06038
19	1,08092	1,07906	1,07789	1,07654	1,07499	1,07329	1,06933	1,06467
20	1,08546	1,08353	1,08233	1,08096	1,07940	1,07767	1,07366	1,06898
22	1,09466	1,09260	1,09134	1,08990	1,08830	1,08652	1,08244	1,07771
24	1,10398	1,10178	1,10046	1,09897	1,09731	1,09550	1,09135	1,08657
26	1,11343	1,11110	1,10972	1,10818	1,10647	1,10461	1,10039	1,09557
28	1,12302	1,12056	1,11911	1,11751	1,11575	1,11386	1,10957	1,10470
30	1,13274	1,13014	1,12863	1,12698	1,12517	1,12324	1,11888	1,11398
32	1,14262	1,13988	1,13831	1,13660	1,13474	1,13276	1,12834	1,12340
34	1,15262	1,14975	1,14811	1,14634	1,14443	1,14241	1,13794	1,13295
36	1,16278	1,15976	1,15806	1,15624	1,15427	1,15221	1,14768	1,14265
38	1,17307	1,16990	1,16814	1,16627	1,16425	1,16214	1,15756	1,15249
40	1,18349	1,18020	1,17837	1,17645	1,17439	1,17214	1,16759	1,16248
42	1,19406	1,19063	1,18875	1,18677	1,18468	1,18248	1,17777	1,17215
44	1,20477	1,20121	1,19927	1,19725	1,19512	1,19287	1,18809	1,18290
46	1,21562	1,21194	1,20994	1,20787	1,20570	1,20341	1,19856	1,19334
48	1,22661	1,22281	1,22076	1,21864	1,21644	1,21411	1,20919	1,20392
50	1,23775	1,23382	1,23173	1,22957	1,22732	1,22495	1,21996	1,21465
55	1,26621	1,26203	1,25981	1,25753	1,25516	1,25271	1,24756	1,24211
60	1,29560	1,29117	1,28884	1,28646	1,28399	1,28144	1,27615	1,27058

21. Формулы размерностей электромагнитных единиц

Название величин и их определение	Размерность единицы в системе ЛМТ	Размерность единицы в системе CGS и название единицы	Некоторые употребительные единицы, не входящие в систему CGS, их отношение к единицам системы CGS и их название	Сокращенные обозначения единиц
Количество магнетизма $m \sim \sqrt{L^2 F}$	$[m] = L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	$cm^{\frac{3}{2}} \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot sec^{-1}$		
Магнитный момент $\mathfrak{M} \sim mL$	$[\mathfrak{M}] = L^{\frac{5}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	$cm^{\frac{5}{2}} \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot sec^{-1}$		
Напряженность магнитного поля $H \sim \frac{F}{m}$	$[H] = L^{-\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	$cm^{-\frac{1}{2}} \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot sec^{-1}$ (эрстед)		э
Индукция магнитного поля	$[B] = L^{-\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	(гаусс)		гс
Магнитный поток	$[\Phi] = L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	$cm^{\frac{3}{2}} \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot sec^{-1}$ (максвелл)	вебер $\equiv 10^8$ МКС	МКС
Электрические единицы в электростатической системе				
Количество электричества $e_e \sim \sqrt{L^2 F}$	$[e_e] = L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	$cm^{\frac{3}{2}} \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot sec^{-1}$	кулон $\equiv 3 \cdot 10^9$ CGSE	кулон — к
Поверхностная плотность электричества $\sigma_e \sim \frac{e}{S}$	$[\sigma_e] = L^{-\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	$cm^{-\frac{1}{2}} \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot sec^{-1}$		
Электрический потенциал, электродвижущая сила $V_e \sim \frac{e}{L}$	$[V_e] = L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	$cm^{\frac{1}{2}} \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot sec^{-1}$	вольт $\equiv \frac{1}{300}$ CGSE	вольт — в
Напряженность, индукция электростатического поля $E_e \sim \frac{F}{e_e}$	$[E_e] = L^{-\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	$cm^{-\frac{1}{2}} \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot sec^{-1}$		

Емкость $C_e \sim \frac{e}{V_e}$	$[C_e] = L$	с.м.	фарада = 10^9 микрофарада = $9 \cdot 10^{11}$ CGSE	фарада — ϕ
Сила тока $I_e \sim \frac{e}{T}$	$[I_e] = L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}$	$\frac{1}{\text{с.м.}^2} \cdot 2^{\frac{1}{2}} \cdot \text{сек.}^{-2}$	ампер = $\frac{\text{кулон}}{\text{сек.}}$ = $3 \cdot 10^9$ CGSE	ампер — a
Сопротивление $R_e \sim \frac{V_e}{I_e}$	$[R_e] = L^{-1} T$	с.м. $^{-1} \cdot \text{сек.}$	ом = $\frac{\text{вольт}}{\text{ампер}}$ = $\frac{1}{9} 10^{-11}$ CGSE	ом
Удельное сопротивление $\rho_e \sim R_e \frac{S}{L}$	$[\rho_e] = T$	сек		
Электрические единицы в электромагнитной системе				
Количество электричества $e_m \sim I_m T$	$[e_m] = L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}}$	$\frac{1}{\text{с.м.}^2} \cdot 2^{\frac{1}{2}} = 3 \cdot 10^{10} [e_e]$	кулон = $0,1$ CGSM	
Потенциал, электродвижущая сила $V_m \sim \frac{W}{e_m}$	$[V_m] = L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}$	$\frac{3}{\text{с.м.}^2} \cdot 2^{\frac{1}{2}} \cdot \text{сек.}^{-2} = \frac{1}{3} 10^{-10} [V_e]$	вольт = 10^8 CGSM	
Емкость $C_m \sim \frac{e_m}{V_m}$	$[C_m] = L^{-1} T^2$	с.м. $^{-1} \cdot \text{сек.}^2 = 9 \cdot 10^{20} [C_e]$	фарада = 10^{-9} CGSM	
Сила тока $I_m \sim \frac{FL}{m}$	$[I_m] = L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	$\frac{1}{\text{с.м.}^2} \cdot 2^{\frac{1}{2}} \cdot \text{сек.}^{-1} = 3 \cdot 10^{10} [I_e]$	ампер = 10^{-1} CGSM	
Сопротивление $R_m \sim \frac{V_m}{I_m}$	$[R_m] = L T^{-1}$	с.м. $\cdot \text{сек.}^{-1}$	ом = $\frac{\text{вольт}}{\text{ампер}}$ = 10^9 CGSM	
Удельное сопротивление $\rho_m \sim R_m \frac{S}{L}$	$[\rho_m] = L^2 T^{-1}$	с.м. $^2 \cdot \text{сек.}^{-1}$		
Коэффициенты индукции и самоиндукции $L_m \sim L$	$[L_m] = L$	с.м.	генри = 10^9 CGSM	генри — $2H$

22. Показатели преломления газов при 0° С 760 мм рт. ст. для желтой линии натрия n_D (5893 Å)

Газ или пар	n_D	Газ или пар	n_D
Азот	1,000297	<i>n</i> -Пентан	1701
Азота закись	515	Ртуть	933
» окись	297	Селен	895
Аммиак	375	Сера	1111
Аргон	284	» шестифтористая	783
Ацетилен	606	Сернистый газ	660
Бензол	788	Серный ангидрид	737
Бром	1125	Сероводород	619
Водород	138	Сероуглерод	1476
» бромистый	570	Спирт метиловый	586
» йодистый	906	Теллур	991
» хлористый	444	» четыреххлористый	2600
Воздух	292	Углекислота	450
Гелий	035	Углерод четыреххлористый	1768
Кислород	272	Углерода окись	334
Криптон	427	Фосфор	1212
Ксенон	702	» треххлористый	1730
Метан	441	Фтор	195
Метил фтористый	449	Хлор	768
» хлористый	865	Хлороформ	1455
Мышьяк	1552	Цинк	2050
Неон	067	Этилен	696
Пары воды	1,000252		

23. Времена экспозиций, вызывающие одинаковые почернения

Как показывает опыт, при изменениях интенсивности света I , падающего на фотопластинку, и времени ее экспозиции t почернение эмульсии остается неизменным при $I \cdot t^p = \text{const}$ (закон Шварцшильда), где p — постоянная Шварцшильда, изменяющаяся в пределах от 0,7 до 0,9, в зависимости от сорта пластинок, проявителя и т. д.

Относительная интенсивность, I	Относительные времена экспозиций	
	$p = 1$	$p = 0,9$
1	1	1
1/2	2	2,16
1/10	10	13
1/100	100	170
1/1000	1000	2100
1/10000	10000	28000

24. Яркость и цветовая температура некоторых обычных источников света

Источник	Яркость, св/см ²	Цветовая температура °К
Свеча	0,5	1930
Парафиновое пламя (плоский фитиль)	1,25	2055
» » (круглый фитиль)	1,5	1920
Ацетиленовое пламя (горелка Кодак)	10,8	2360
Лампа с калильным колпачком (низкого давления)	4,8—5,8	—
Лампа с калильным колпачком (высокого давления)	25	—
Электрическая лампа с вольфрамовым волокном (вакуумная, 7,9 лм/вт)	125	2400
Электрическая лампа с вольфрамовым волокном (газополная, 12,9 лм/вт)	597	2740
Электрическая лампа с вольфрамовым волокном (газополная, 15,2 лм/вт)	772	2810
Электрическая лампа с вольфрамовым волокном (газополная, 18,1 лм/вт)	1000	2920
Электрическая лампа с вольфрамовым волокном (газополная, 21,2 лм/вт)	1325	3000
Ртутная лампа (стеклянная)	2,3	—
» » (высокого давления)	20 000	—
Проекционная лампа (250 вт)		
» » (1000 вт)	40 000	—
Люминесцентная лампа (80 вт)	0,6	—
Кратер электрической дуги (цельные угли)	17 200	3780
» » » (наибольшая яркость, ток 150 а)	80 000	5000—5500
Дуговая лампа с цирконием	3000—10 000	—
Ясное голубое небо	0,4	12 000—24 000
Солнце в зените (отсчет на поверхности земли)	165 000	5400

25. Магнитное вращение плоскости поляризации

Постоянная Верде R показывает угол поворота плоскости поляризации луча на протяжении 1 см, если напряженность магнитного поля равна единице: $R = \alpha/H$, где α — угол поворота плоскости поляризации (в угловых минутах) в каком-либо веществе в магнитном поле с напряженностью H (эрстед); l — длина пути, проходимого светом вдоль силовых линий. Если свет распространяется в направлении силовых линий, то направление вращения считается положительным, если плоскость поляризации вращается по часовой стрелке для наблюдателя, который смотрит вдоль луча в направлении его распространения.

В следующей таблице вращение плоскости поляризации дано для линии D натрия (5893 Å) за двумя исключениями: (1) $\lambda = 6439$ Å и (2) $\lambda = 2194$ Å.

Вещество	Температура, °C	Вращение
Вода	0	+0,01311
»	20	+0,01312
Иенское стекло:		
фосфатный крон . .	18	+0,0161
экстраплотн. флинт .	18	+0,0888
Кварц \perp оси (1)	20	+0,01368
То же	20	+0,01664
» » (2)	20	+0,1587
Сероуглерод	0	+0,04347
»	18	+0,04200

Вещество	Температура, °C	Вращение по отношению к воде	
FeCl ₃ {	плотность 1,693 . .	15	-0,2026
	плотность 1,023 . .	15	+0,0122
Бензол	15	2,062	
Кислота муравьиная	20,8	0,7990	
» пропионовая	20,3	0,8369	
» уксусная	21,0	0,7976	
Спирт изо-амиловый	19,9	0,9888	
» <i>n</i> -пропиловый	15,6	0,9139	
» этиловый	16,8	0,8637	
Этил бромистый	19,7	1,395	
» йодистый	18,1	2,251	
» хлористый	5,0	1,035	

26. Показатель преломления воды при 20° C для различных длин волн

Длина волны, Å	12 560	6708	6563	6438	5893	5461
Показатель преломления	1,3210	1,3308	1,3311	1,3314	1,3330	1,3345
Длина волны, Å	5086	4861	4800	4047	3034	2144
Показатель преломления	1,3360	1,3371	1,3374	1,3428	1,3581	1,4032

27. Красная граница фотоэффекта для некоторых веществ
(длины волн в ангстремах)

Алюминий	4500	Платина	2800
Висмут	3300	Ртуть	2600
Водород	1400	Свинец	3100
Вольфрам	2600	Селен	2200
Железо	2870	Сера	2300
Золото	2850	Серебро	3300
Кадмий	3200	Сурьма	3100
Калий	10000	Углерод	2550
Кальций	3700	Хлор	1200
Литий	5260	Цинк	2700
Магний	3300	Антрацен	2100
Медь	2800	Вода	2000
Мышьяк	2360	Воздух	1800—1200
Натрий	600	Метилвиолет	2600
Никель	3050	Парафин	2150
Палладий	2850	Хлористый цинк	1850

28. Универсальные физические константы

Постоянная Фарадея	$96501,2 \pm 10 \text{ к} \cdot \text{г} \cdot \text{экв}^{-1}$
Число Авогадро	$(6,0228, \pm 0,0011) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана k	$(1,38047 \pm 0,00026) \cdot 10^{-16} \text{ э} \cdot \text{град}^{-1}$
Масса атома водорода H^1	$(1,67339, \pm 0,00031) \cdot 10^{-24} \text{ г}$
Масса протона	$(1,67248, \pm 0,00031) \cdot 10^{-24} \text{ г}$
Масса электрона	$(9,1066, \pm 0,0032) \cdot 10^{-28} \text{ г}$
Заряд электрона	$(4,8025, \pm 0,0010) \cdot 10^{-10} \text{ CGSE}$ $(1,60203, \pm 0,00034) \cdot 10^{-20} \text{ CGSM}$
Удельный заряд электрона $\frac{e}{m}$	$(1,7592 \pm 0,0005) \cdot 10^7 \text{ CGSM} \cdot \text{г}^{-1}$
Скорость света (в вакууме)	$(2,99776 + 0,00004) \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{сек}^{-1}$
Квантовая постоянная h	$6,62 \cdot 10^{-27} \text{ э} \cdot \text{сек}$

29. Периодическая система

Периоды	Ряды	Группы				
		I — R ₂ O	II — RO	III — R ₂ O ₃	IV RH ₄ RO ₂	V RH ₃ R ₂ O ₅
I	1	H Водород 1,0080				
II	2	Li Литий 6,940	Be Бериллий 9,012	B Бор 10,811	C Углерод 12,011	N Азот 14,007
III	3	Na Натрий 22,999	Mg Магний 24,312	Al Алюминий 26,98	Si Кремний 28,09	P Фосфор 30,97
IV	4	K Калий 39,102	Ca Кальций 40,08	Sc Скандий 44,96	Ti Титан 47,90	V Ванадий 50,94
	5	Cu Медь 63,54	Zn Цинк 65,37	Ga Галлий 69,72	Ge Германий 72,59	As Мышьяк 74,92
V	6	Rb Рубидий 85,47	Sr Стронций 87,62	Y Иттрий 88,905	Zr Цирконий 91,22	Nb Ниобий 92,91
	7	Ag Серебро 107,870	Cd Кадмий 112,40	In Индий 114,82	Sn Олово 118,69	Sb Сурьма 121,75
VI	8	Cs Цезий 132,91	Ba Барий 137,34	La Лантан 138,91	Hf Гафний 178,49	Ta Тантал 180,95
	9	Au Золото 197,0	Hg Ртуть 200,59	Tl Таллий 204,37	Pb Свинец 207,19	Bi Висмут 208,98
VII	10	Fr Франций (223,02)	Ra Радий 226,025	Ac Актиний 227,028	Ku Курчаговий	

Лантаниды	Ce Церий 140,12	Pr Празеодим 140,91	Nd Неодим 144,24	Pm Прометий (145)
	Tb Тербий 158,92	Dy Диспрозий 162,50	Ho Гольмий 164,93	Er Эрбий 167,2

Актиниды	Th Торий 232,038	Pa Протактиний 231	U Уран 238,03	Np Нептуний (237)
	Bk Берклий (247)	Cf Калифорний (251)	Es Эйнштейний (254)	Fm Фермий (253)

элементов Д. И. Менделеева

элементов

VI RH ₂ RO ₃		VII RH R ₂ O ₇		VIII RO ₄			0
							2 Гелий He 4,003
8 Кислород O 16,00		9 Фтор F 19,00					10 Неон Ne 20,183
16 Сера S 32,064		17 Хлор Cl 35,45					18 Аргон Ar 39,948
Cr Хром 52,00	24 Mn Марганец 54,94	25	26 Железо Fe 55,85	27 Кобальт Co 58,93	28 Никель Ni 58,71		
34 Селен Se 78,96		35 Бром Br 79,916					36 Криптон Kr 83,80
Mo Молибден 95,94	42 Tc Технеций (97)	43	44 Рутений Ru 101,07	45 Родий Rh 102,90	46 Палладий Pd 106,4		
52 Теллур Te 127,60		53 Йод J 126,90					54 Ксенон Xe 131,30
W Вольфрам 183,85	74	Re Рений 186,2	75	76 Осмий Os 190,2	77 Иридий Ir 192,2	78 Платина Pt 195,09	
84 Полоний Po 208,98		85 Астатин At (210)					86 Радон Rn 222

Sm Самарий 150,35	62	Eu Европий 151,96	63	Gd Гадолиний 157,25	64
Tu Туллий 168,93	69	Yb Иттербий 173,04	70	Lu Лютеций 174,97	71
Pu Плутоний (244)	94	Am Америций (243)	95	Cm Кюрий (245)	96
Mv Менделевий (259)	101	(No) (Нобелий) (254)	102	Lw Лоуренсий (265)	103

Изотопы водорода		
H Протий 1,0079	D Дейтерий 2,0142	T Тритий 3,0170

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

Электричество и оптика

М., 1968 г., 816 стр. с илл.

Редактор *Е. Б. Кузнецова*

Техн. редактор *В. Н. Крючкова*

Корректоры *А. Ф. Серкина, О. А. Сигал*

Сдано в набор 15/XII 1967 г. Подписано к печати 22/IV 1968 г. Бумага 60×90^{1/16}. Физ. печ. л. 51+2 вкл. Условн. печ. л. 51,625. Уч.-изд. л. 52,51. Тираж - 45 000 экз. Т-00176. Цена книги 1 р. 96 к. Заказ № 1338.

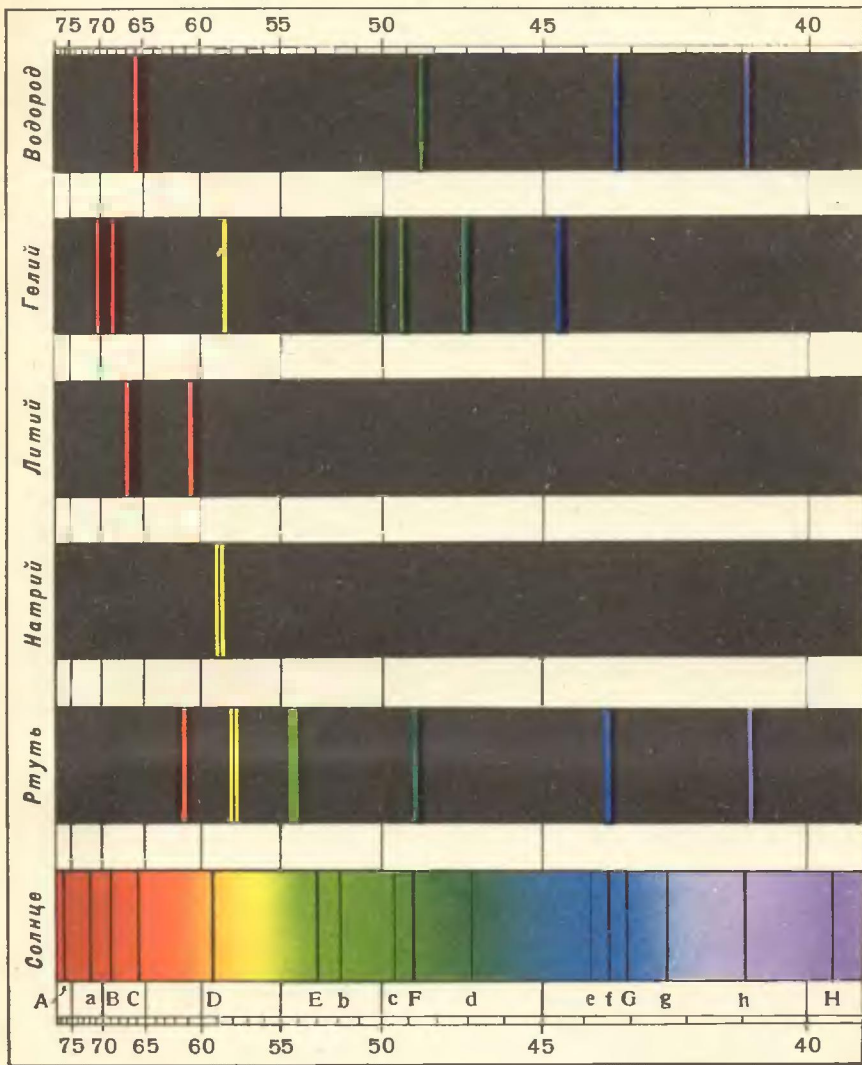
Издательство «Наука»

Главная редакция

физико-математической литературы
Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 1 «Печатный Двор» им. А. М. Горького Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР,
г. Ленинград, Гатчинская ул., 26.

14. Спектры водорода, гелия, лития, натрия, ртути и солнца.



19. Цветная номограмма интерференционной окраски кварцевого клина

