

Н. Д. ЖЕВАНДРОВ

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

МОСКВА 1969

Свет характеризуется многими признаками и качествами. В обыденной жизни мы часто пользуемся терминами «цвет», «яркость», «темно», «светло» и т. д. Оптика в таких случаях оперирует понятиями спектра, частоты или длины волны, интенсивности (энергии) света и т. д. Все это — скалярные величины. Но есть целая область оптических явлений, которые описываются векторными величинами. Это — поляризация света, очень важное и своеобразное его свойство.

О поляризации света и рассказывается в этой книге: о физической сущности поляризации и ее формах, о ее значении в истории оптики и в объяснении природы света, о квантовом истолковании поляризации, о ее роли в явлениях интерференции. Описаны интересные явления природы, связанные с поляризацией, и экспериментальные методы получения и исследования поляризованного света. Отдельные главы посвящены практическому применению поляризаций света.

Николай Дмитриевич Жевандров

Поляризация света

*Утверждено к печати редколлегией
серии научно-популярных изданий
Академии наук СССР*

Редактор *И. К. Шувалов*. Художник *Ю. В. Алексеев*
Технический редактор *А. П. Гусева*

Сдано в набор 14/V-1969 г. Подписано к печати 25/IX-1969 г.

Формат 84 × 108¹/₃₂. Бумага № 1. Усл. печ. л. 10,08.

Уч.-изд. л. 9,6. Тираж 13000 экз. Т-11677 Тип. зак. 2250.

Цена 58 коп.

Издательство «Наука» Москва, К-62, Подсосенский пер., 21

2-я типография издательства «Наука». Москва, Г-99, Шубинский пер.

СВЕТ

Все, несомненно, знают, что свет — это электромагнитные волны. Однако глубина этого знания может быть очень разной. Надо разобраться в двух обстоятельствах: что такое вообще волны и как они могут быть электромагнитными.

Понятие «волна» привычно каждому. Волны на поверхности жидкости, волна, бегущая по упругому натянутому шнуру, — образы наблюдаемой повседневности. Но очень многие волны увидеть невозможно, например звуковые волны в воздухе, волны сжатия в упругом стержне или в земной коре.

С волной всегда связано некоторое перемещение в пространстве. Первый вопрос — перемещение чего? Обычно при движении в пространстве перемещается вещество: отдельные тела, молекулы, элементарные частицы. Волна — иное дело, это перемещение в пространстве не самого вещества, а его состояния.

Набросаем на поверхность воды в ряд несколько легких щепочек или кусочков пробки, а затем возбудим волны, бросив в воду камень вблизи крайней щепочки. Волна пойдет во все стороны, в том числе и вдоль линии щепочек. А как будут двигаться сами щепочки? Легко обнаружить, если произвести опыт аккуратно (а опыт и аккуратность — понятия неразделимые), что щепочки совершенно не будут смещаться в направлении волны (по горизонтали), а будут только по очереди подниматься и опускаться, смещаясь перпендикулярно направлению самой волны. Получается, что вдоль распространения волны перемещаются не сами щепочки, а их отклонения от равновесия, т. е. некоторые их состояния. В этом и состоит главная особенность любой волны. Волны рассмотренно-

го типа, в которых направление колебаний перпендикулярно направлению волны, называются поперечными.

Иной характер имеют, например, звуковые волны в органной трубе. Вдоль трубы распространяется волна сжатия и разрежения воздуха, причем его частицы колеблются в том же направлении, в каком распространяется волна. Такие волны называются продольными. Понятия о поперечных и продольных волнах нам очень пригодятся в дальнейшем.

Волны в жидкости, в воздухе привычны. А что такое электромагнитные волны?

Вспомним сначала, что такое электромагнитное поле. Это — особая физическая сущность или состояние пространства, окружающего как неподвижные электрические заряды, так и движущиеся (т. е. электрические токи). В первом случае есть только электрическое поле, магнитного нет. Но как только заряды начинают двигаться, так в окружающем пространстве возникает и магнитное поле, а электрическое поле изменяется, так как оно определяется пространственным распределением зарядов, изменяющимся при их движении. Это обстоятельство позволяет при феноменологическом описании полей обходиться и без понятия зарядов, считая причиной возникновения магнитного поля просто изменение электрического поля. Это утверждение не содержит в себе ничего иного, кроме физического смысла известных эмпирических законов Кулона и Био — Савара. В свою очередь, из закона электромагнитной индукции Фарадея следует, что изменение магнитного поля влечет появление электрического. Эти свойства и позволяют ввести единое понятие электромагнитного поля. Его главной количественной мерой являются векторы напряженности электрического и магнитного полей, определить которые можно, измерив силы, с которыми поле действует на заряды и токи.

Формулировка основных физических понятий об электромагнитном поле принадлежит Фарадею. Строгую математическую теорию электромагнитного поля создал Максвелл. Суть этой теории наиболее полно и в то же время наиболее сжато можно выразить с помощью математического аппарата векторного анализа, более громоздко — в координатной форме с помощью уравнений в частных производных. Суть физических результатов теории Максвелла сводится к следующему.

Электромагнитная волна представляет собой периодическое изменение в пространстве и времени электрического и магнитного полей, распространяющееся во все стороны от той области пространства, где возникают электромагнитные колебания, т. е. изменения полей в данной точке с течением времени. При распространении в пространстве волна несет поток электромагнитной энергии, тем больший, чем больше напряженности полей.

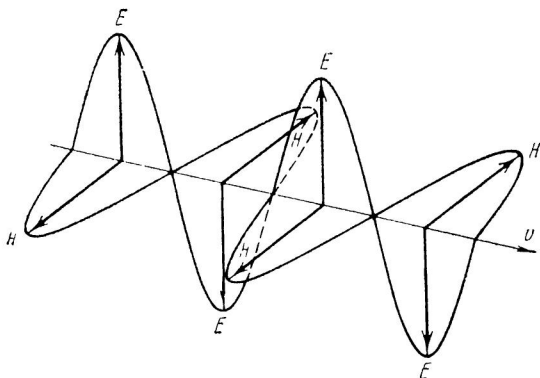


Рис. 1. Бегущая электромагнитная волна

Бегущая в пространстве электромагнитная волна описывается взаимно перпендикулярными векторами напряженности электрического E и магнитного H полей, изменяющимися синхронно (т. е. в одинаковой фазе) и перпендикулярными к направлению распространения (вектору скорости V) волны (рис. 1). Отметим здесь два важных для дальнейшего обстоятельства: 1) поперечность электромагнитных волн, 2) однозначную пространственную связь E и H — положение одного полностью определяет положение другого, так как векторы V , E , H образуют правую тройку.

Совершенно потрясающим, без преувеличения, было решение вопроса о скорости электромагнитных волн, следующее из теории Максвелла.

Для того чтобы лучше понять и эмоционально почувствовать значение этого результата, нам придется немного поговорить о предмете, на первый взгляд весьма далеком от нашей темы, — о системах единиц, применяемых в теории электричества.

Дело в том, что применяемая в механике система CGS в теории электричества «раздвоилась» на две системы — CGSE и CGSM. Произошло это не случайно и имело причиной наличие двух типов взаимодействия: электрического и магнитного (или статического и динамического). Иными словами, взаимодействия зарядов и взаимодействия токов. Единицы электрических зарядов можно, следовательно, ввести двумя способами. Первый — назвать единицами зарядов такие, которые на расстоянии в 1 см взаимодействуют с силой в 1 *дину*. Второй — назвать единицами токов такие, которые на расстоянии в 1 см взаимодействуют с силой в 1 *дину*; тогда единицей заряда будет такой заряд, который, протекая за 1 секунду, создает ток, сила которого равна единице. Итак, в одной и той же системе единиц мы получили две разные единицы электрического заряда.

Электромагнитная единица заряда q_{CGSM} оказалась во много раз больше электростатической единицы q_{CGSE} . Переводной коэффициент принято обозначать латинской буквой c .

$$q_{CGSE} = \frac{q_{CGSM}}{c} .$$

Анализ размерностей показывает, что коэффициент c имеет размерность скорости. А когда (в 1856 г.) этот коэффициент был впервые измерен экспериментально, оказалось, что он равен $3 \cdot 10^{10}$ см/сек, т. е. совпадает со скоростью света. Последняя была известна из астрономических опытов, проводившихся еще в XVII в. и позже, а также из известных опытов Физо (1849 г.).

Со временем были придуманы более точные способы измерений скорости света. Вследствие огромности измеряемой скорости первые варианты этих методов (в том числе и метод Физо) требовали огромной базы (расстояния, на котором измеряется скорость прохождения) — порядка многих километров, что, естественно, приводило к значительным ошибкам в окончательных результатах. Чем более быстродействующими становились оптические затворы, необходимые для отсчета начала и конца времени измерения, тем короче требовалась используемая база. Современные затворы дают возможность прерывать световой поток миллиарды раз в секунду, что позволяет пользоваться базой всего в несколько метров. Точность

измерений при этом достаточно высока. И чем точнее измеряли экспериментаторы скорость света, тем точнее она совпадала с переводным коэффициентом c .

Это невероятное совпадение было необъяснимой физической загадкой.

Легко понять поэтому, какое важное значение имело следствие теории Максвелла, утверждающее, что скорость электромагнитных волн в пустоте равна коэффициенту c .

Отсюда мог следовать только один несомненный вывод: свет — это электромагнитные волны.

Этот вывод был грандиозным результатом теории Максвелла, и впечатление, которое он произвел на всех физиков, было таким сильным, что мало можно подобрать в истории науки аналогичных примеров. И дело было не только в коэффициенте c . Главное заключалось в понимании самой природы света, зашедшем, казалось, в глухой тупик, выход из которого оказался блистательно открыт теорией Максвелла.

Вторая половина XIX в. была временем бурного расцвета науки о свете — физической оптики. Именно тогда закладывались основы учения о взаимодействии света с веществом, возникла спектроскопия и другие области оптики, приведшие к открытию новой эры в науке — созданию квантовой механики. С другой стороны, оптические эксперименты (знаменитый опыт Майкельсона) сыграли огромную роль в рождении теории относительности. В итоге этого периода Брэгг с полным правом мог написать свою знаменитую фразу: «В слове «свет» заключена вся физика и тем самым все науки». Легко понять, сколь фундаментальным был в те годы вопрос о природе света.

Каковы же были трудности этой проблемы? Чтобы ясно их понять, надо оглянуться на ее историю.

В противовес великому Ньютону, считавшему свет потоком упругих частичек, знаменитый голландский физик Гюйгенс в конце XVII в. первый высказал гипотезу о волновой природе света. С помощью этой гипотезы он смог не только объяснить ряд известных оптических явлений (например, закон отражения света), истолкование которых не встречало затруднений и у корпускулярной теории, но также рассмотреть и интерпретировать новые классы явлений (например, двойное преломление света в кристаллах). Однако в те годы перевесил авторитет Ньютона и победа осталась за ним (именно не столько за

корпускулярной теорией света, сколько за самим Ньютоном). Прошли годы, и в начале XIX в. волновая теория в трудах Юнга, Френеля и других физиков одержала, казалось, решительную победу, объяснив такие явления — прежде всего интерференционные и дифракционные, — перед которыми корпускулярная теория была бессильна.

Однако о каких же волнах шла речь в этой теории? Какой природы подразумевались они?

Единственно возможными казались тогда упругие волны. Повседневный опыт показал, что свет может распространяться в любых прозрачных средах: твердых, жидких и газообразных, а также в вакууме. Возникал вопрос — почему же упругие световые волны могут распространяться как в телах с высокой упругостью, так и в вакууме — говорить об упругости которого бессмысленно. Для устранения этого затруднения была введена гипотетическая, наполняющая всю вселенную среда — «упругий эфир» — носитель упругих световых волн. Однако с упругим эфиром возникли новые трудности.

Не удавалось примирить эту гипотезу с целым рядом явлений. И в первую очередь здесь стала очень сложной ситуация, связанная с решением вопроса о том, являются ли упругие световые волны продольными или поперечными. Собственно, сначала этот вопрос не вставал — казалось несомненным, что упругие волны могут быть только продольными. Такими их и считал Юнг в своих ранних работах по интерференции и дифракции. Однако вскоре результаты экспериментальных работ Френеля, в частности отсутствие интерференционной картины при взаимодействии взаимно перпендикулярно поляризованных лучей (см. далее в главе VI), убедительно доказали полную поперечность световых колебаний.

Это породило непреодолимые трудности упругой волновой теории света. Они заключались, пожалуй, не столько в том, что в упругой среде невозможны поперечные волны (некоторые специальные предположения о характере упругости среды допускали их возникновение), сколько в невозможности полного отсутствия продольных волн. Для объяснения этого оставалось только допустить полную несжимаемость среды. Естественно, что столь решительная гипотеза сразу приводила к новым загадкам: как, например, примирить представление о несжимаемом (или хотя бы очень упругом, например, та-

ком, как сталь) эфире с полным отсутствием сколькó-нибудь заметного влияния этой среды, заполняющей космическое пространство, на движение планет.

Тем не менее успехи поперечной волновой теории Френеля были столь убедительными, что их были вынуждены признать все физики, даже такой великий авторитет и убежденный сторонник корпускулярной теории, как Лаплас.

Создалось парадоксальное положение — правильность представления о поперечных световых волнах и полная невозможность объяснить и понять их в рамках теории упругого эфира.

Теперь легко понять, каким блестящим выходом из этого тупика явилась электромагнитная теория света Максвелла.

Торжество этой теории продолжалось до начала XX в., когда новые открытые явления, происходящие главным образом при взаимодействии света с веществом, заставили физиков признать недостаточность волновой теории и ввести в рассмотрение кванты (или фотоны) света. Но это не было возвратом к ньютоновским представлениям. Это было формирование новых, более глубоких и сложных понятий. С другой стороны, это не умаляет заслуг электромагнитной волновой теории света, сыгравшей важнейшую роль в понимании оптических явлений.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Поперечные (и только поперечные) волны обладают изначальным, по самой природе присущим им свойством известным под названием поляризации волн. По отношению к световым волнам применяется термин «поляризация света». Под этим понимается пространственное соотношение между направлением распространения светового луча и направлением его электрического (или магнитного) вектора. Ведь теория Максвелла утверждает только, что эти векторы лежат в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения света, но не накладывает никаких ограничений на их поведение в этой плоскости. Как ведет себя, например, электрический вектор? Будет ли он фиксирован в каком-то определенном направлении, лежащем в этой плоскости, и в каком именно; совсем ли не будет фиксирован или только частично (нежестко) или же направление его может изменяться по определенному закону (и опять-таки эти законы могут быть различны)? Возможны все эти случаи. И все они составляют разные типы поляризации света.

Очевидно, что для продольных волн понятие поляризации лишено смысла.

История открытия поляризации света весьма интересна.

Экспериментально впервые обнаружил явление, в котором проявляется поляризация света — двойное преломление¹, датчанин Эразм Бартолин в 1669 г. Гюйгенс подробно исследовал это явление и описал его закономерности с помощью остроумной, хотя и формальной теории

¹ О сущности этого явления и его связи с поляризацией света будет идти речь в главе V.

(1690). Само явление состоит в том, что в кристаллах луч света, преломляясь, расщепляется на два луча. Один из этих лучей по причинам, о которых будет сказано в главе V, называют обыкновенным, а другой — необыкновенным. Суть же дела была в том, что эти два луча в кристалле имеют разную поляризацию. Но к пониманию того, что здесь речь идет о принципиально новом и изначальном свойстве света, Гюйгенс, разработавший лишь феноменологическую теорию явления, прийти не смог.

Мысль об этом впервые родилась у основоположника корпускулярной теории света — Ньютона.

В своей знаменитой «Оптике» Ньютон писал, пытаясь осмыслить причину двойного преломления в кристаллах: «Существует изначальное различие в лучах света, благодаря которому некоторые лучи в этом опыте постоянно преломляются обыкновенно, другие же — постоянно необыкновенно...

Не обладают ли лучи света различными сторонами с различными изначальными свойствами?...

Каждый луч можно рассматривать как имеющий четыре стороны, или четверти, две из которых, противоположные одна другой, склоняют луч к необыкновенному преломлению; ...две же другие стороны... склоняют его только к обыкновенному преломлению.

Ясно, что эти расположения существовали в лучах изначалью...

Остается исследовать, нет ли еще свойств света, по отношению к которым отличались бы стороны луча и различились одна от другой¹.

Это не что иное, как первое в истории науки феноменологическое определение поляризации света.

Совет Ньютона был исполнен поколениями физиков. Таких свойств оказалось много, и притом интереснейших.

Крупнейший советский физик-оптик и глубокий знаток творчества Ньютона академик С. И. Вавилов по этому поводу писал: «Ньютон не извлек дальнейших выводов из своей удачной гипотезы, едва ли также он серьезно занимался экспериментальным изучением двойного преломления; во всяком случае ему принадлежит честь введения понятия поляризации светового луча в оптику².

¹ И. Ньютон. Оптика. Изд. 2. М., 1954, стр. 271—273.

² С. И. Вавилов. Собрание сочинений, т. III, М., изд-во АН СССР, 1956, стр. 358.

Сам термин «поляризация света» был введен французским физиком Малюсом, который более столетия спустя после работ Гюйгенса открыл явление поляризации света при отражении от поверхности стекла (см. главу V). Принято считать, что это крупнейшее открытие было им сделано случайно. Но случайно ли наличие интуиции у исследователя в поиске? В 1808 г. Малюс, наблюдая сквозь кусок исландского шпата отражение заходящего солнца в окнах Люксембургского дворца в Париже, обнаружил различную яркость двух изображений, меняющуюся при вращении кристалла. Говоря словами Ньютона, Малюс обнаружил, что свет, отраженный от стекла, также имеет «стороны». Семантика предложенного им термина «поляризация» явно корпускулярного происхождения. И это вполне объяснимо, потому что разрабатываемая в ту пору волновая теория света, как уже указывалось, опиралась на представление о продольных упругих волнах, для которых представление о «сторонах» луча было исключено. В корпускулярных же представлениях описание оказывалось возможным с помощью несимметричных и каким-то образом ориентированных световых частиц (аналогично поляризации диэлектриков в электрическом поле).

Таким образом, не только само понятие, но и термин прямо или косвенно ведут начало от Ньютона.

Пока волновая теория света оставалась «продольной», только корпускулярная теория имела какую-то точку зрения на сущность поляризации и пользовалась ею для объяснения новых экспериментальных открытий в этой области, которые не заставили себя ждать. Достаточно назвать открытие вращения плоскости поляризации в кварце (Араго, 1811) и в жидкостях (Био, 1815), хроматической поляризации (изменчивость цвета кристаллических пластинок; Араго, 1811), работы Брюстера и др. Однако методы корпускулярной теории оказались весьма несовершенными и громоздкими. Для объяснения новых фактов требовалось введение дополнительных гипотез и усложнение первоначальных. Так, Био для объяснения хроматической поляризации предложил в 1812 г. корпускулярную «теорию подвижной поляризации», основанную на произвольной гипотезе об изменении ориентации световых частиц по мере прохождения света через кристалл. Попытки применить эту гипотезу к объяснению вращения плоскости поляризации потребовали ее дальнейшего

усложнения и тем не менее не увенчались успехом.

Только поперечная волновая теория света создала адекватные представления для описания и объяснения разнообразных свойств и явлений поляризации света.

Прежде чем переходить к их систематическому изложению, отметим только, что приоритет введения понятия поляризации света, принадлежащий корпускулярной теории, представляет большой исторический интерес в связи с трактовкой этих явлений с квантовых (фотонных) позиций, о чем пойдет речь в главе VII.

РАЗЛИЧНЫЕ ТИПЫ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

Если при распространении световой волны направление колебаний электрического вектора бессистемно, хаотически изменяется и, следовательно, любое его направление в плоскости, перпендикулярной к распространению волны, равновероятно, то такой свет называют неполяризованным или естественным.

Большинство природных и искусственных источников света (как тепловых, так и нетепловых) излучают именно такой свет, чем и обусловлено второе название.

Если колебания электрического вектора фиксированы строго в одном направлении, то свет называется линейно поляризованным. Он может быть вертикально линейно поляризован, горизонтально линейно поляризован или линейно поляризован по любому другому направлению.

С таким же правом, конечно, можно рассматривать колебания не электрического, а магнитного вектора. Фиксация одного из них однозначно определяет второй. Условно принято рассматривать именно электрический вектор, так как он играет более важную роль в большинстве известных процессов взаимодействия света с веществом. В принципе же вопрос о том, какой из векторов — электрический или магнитный — является главным световым вектором, разумеется, лишен смысла, все зависит от той конкретной системы, которая взаимодействует со светом.

Удобно графически изображать поляризованный свет в виде проекции траектории конца колеблющегося электрического вектора на плоскость, перпендикулярную лучу. В случае линейно поляризованного света такая проекционная картина очень проста — отрезок прямой под определенным углом φ к одной из выбранных осей координат. Угол φ можно назвать азимутом поляризации (рис. 2).

Однако в других более сложных случаях помощь от таких картин может быть существенной.

Если по одному направлению пустить два световых луча — естественный и линейно поляризованный, то получившаяся смесь будет частично поляризованным светом. Этот вид поляризации можно пояснить следующим образом (рис. 3). Выберем в плоскости колебаний электрического вектора естественного света произвольную ортогональную систему координат и мысленно спроектируем на оси X и Y все возможные положения электрического вектора, а затем просуммируем все x -компоненты и все y -компоненты. Очевидно, что в случае естественного света эти две суммы всегда, при любой ориентации системы координат будут равны $\Sigma x \equiv \Sigma y$. Это можно считать определением естественного света. В случае же частично поляризованного света всегда можно так ориентировать систему координат, что $\Sigma x \neq \Sigma y$. Если, например, ось y при этом вертикальна и $\Sigma y > \Sigma x$, то свет будет частично вертикально поляризован; если же в этом случае $\Sigma x > \Sigma y$, то это значит, что свет частично поляризован горизонтально. Частично поляризованный свет — наиболее общий случай. Один крайний случай — естественный свет, другой — линейно поляризованный (при соответствующей ориентации осей координат либо Σx , либо Σy равна нулю). Частично поляризованный свет можно характеризовать величиной, называемой степенью поляризации P . Если интенсив-

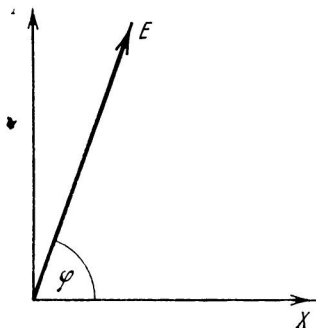


Рис. 2. Линейно поляризованный свет

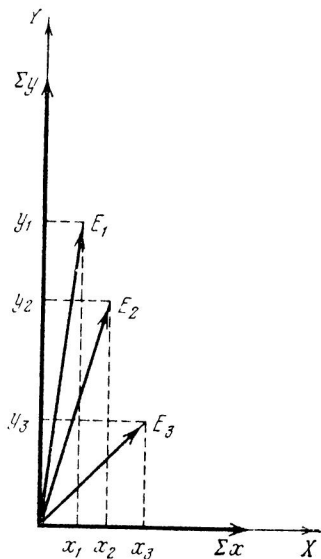


Рис. 3. Частично поляризованный свет

ность¹ суммарной x -компоненты обозначить I_x , а y -компоненты — I_y , то

$$P = \frac{I_y - I_x}{I_y + I_x}.$$

P выражается дробью или в процентах. Для линейно поляризованного света $P = 100\%$, а для естественного $P = 0$. Если по одному направлению распространяется несколько пучков света с интенсивностями I_i и степенями поляризации P_i , то, как легко показать, степень поляризации результирующего пучка P выразится через парциальные степени поляризации P_i следующим образом:

$$P = \frac{\sum_i I_i P_i}{\sum_i I_i}.$$

Для характеристики частично поляризованного света применяется также величина $\rho = \frac{I_x}{I_y}$, называемая поляризационным отношением. Очевидно, что

$$P = \frac{1 - \rho}{1 + \rho}.$$

Можно кратко определить частично поляризованный свет как такой, в котором электрический вектор имеет преимущественную ориентацию в определенном направлении. Частично поляризованный свет всегда можно представить (по крайней мере формально) как совокупность естественного и линейно поляризованного.

Далее зададимся следующим вопросом. Какова будет поляризация, если по одному направлению распространяются две монохроматические с одинаковой длиной волны λ линейно поляризованные волны? Ответ неоднозначен, могут быть разные случаи. Разберем их.

Если азимут поляризации обеих волн одинаков, то очевидно, что независимо от соотношения их фаз результирующая волна также будет линейно поляризована с тем же азимутом.

Теперь рассмотрим случай, когда направления поляризации этих двух волн взаимно перпендикулярны. Здесь

¹ Интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды световой волны.

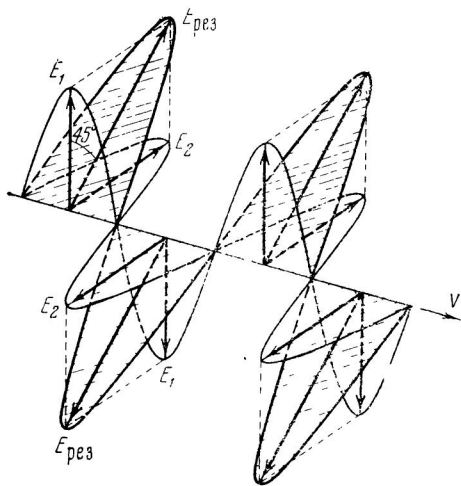


Рис. 4. Сложение взаимно перпендикулярно поляризованных волн, совпадающих по фазе

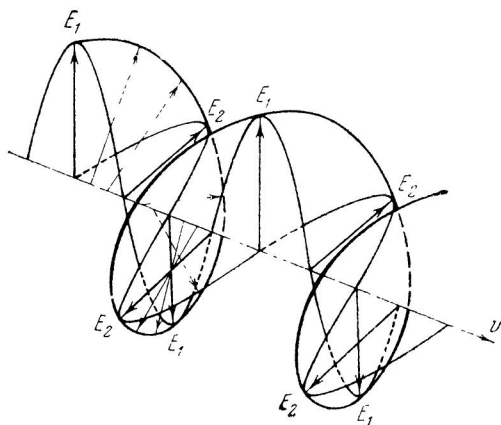


Рис. 5. Циркулярная поляризация, возникающая в результате сложения взаимно перпендикулярно поляризованных волн с разностью фаз $\pi/2$

результат существенно зависит от разницы фаз волн. Пусть волны имеют равные амплитуды и совпадают по фазе. Легко видеть из рис. 4, что при этом результирующая волна будет линейно поляризована с азимутом $+45^\circ$. Если разность фаз π (разность хода $\lambda/2$), то азимут линейной поляризации результирующей волны будет -45° . Как видим, пока мы не получили принципиально новых типов поляризации.

Новое будет при иных разностях хода. Пусть разность фаз $\pi/2$ (разность хода $\lambda/4$). Рис. 5 показывает, что в этом случае конец электрического вектора результирующей волны описывает правовинтовую линию по поверхности кругового цилиндра. Если первая волна будет не отставать от второй по фазе на $\pi/2$, а опережать ее, то линия будет левовинтовой.

В обоих случаях поляризация света называется круговой (или циркулярной); в первом случае правая круговая (по часовой стрелке для наблюдателя, смотрящего навстречу лучу), во втором — левая круговая. Проекционные картины, очевидно, будут выглядеть очень просто (рис. 6).

Распространение циркулярно поляризованного света вдоль направления v следует представлять не как вращение винтовой поверхности вокруг оси v , но как перенесение всей винтовой поверхности как целого, без вращения, вдоль оси v со скоростью света.

Мы получили свет, поляризованный по кругу, как результат сложения двух линейно поляризованных лучей. Поэтому может создаться впечатление, что линейно поляризованный свет по своей природе является элементарным, а циркулярно поляризованный — уже сложной формой, которую можно разложить на элементарные составляющие. Но это неверно. Циркулярно поляризованный свет столь же элементарен, как и линейно поляризованный. Последний с таким же успехом можно разложить на две составляющие — правокруговую и левокруговую, в чем легко убедиться с помощью рис. 7. Таким образом, обе эти формы поляризованного света в равной степени являются по своей природе элементарными (по крайней мере с классической точки зрения).

Вернемся к рассмотрению различных случаев результирующей волны. В общем случае при произвольном сдвиге фаз конец результирующего электрического вектора будет описывать эллиптическую винтовую линию, а про-

екционная картина изображится в виде эллипса (рис. 8). Эллиптичность (отношение полуосей b/a) и ориентация (угол α) эллипса зависят от сдвига фаз.

Такая поляризация световой волны носит название эллиптической поляризации. Она также может быть правой и левой.

Петрудно понять, что эллиптическую поляризацию можно получить и при сложении волн с разностью фаз $\pi/2$, если у этих волн различные амплитуды. При этом направление большей оси эллипса будет совпадать с направлением поляризации волны с большей амплитудой.

Линейная, круговая и эллиптическая поляризации составляют три основных типа поляризации света. При этом эллиптическая включает две другие, как крайние случаи. При эллиптичности, равной нулю, получаем линейную поляризацию; при эллиптичности, равной единице — круговую.

Во многих книгах вместо термина «линейно поляризованный свет» употребляется термин «плоско поляризованный свет». При этом исторически возникла неоднозначность термина. Под плоскостью поляризации одни авторы понимают плоскость, содержащую направление луча и направление электрического вектора, а другие — пер-

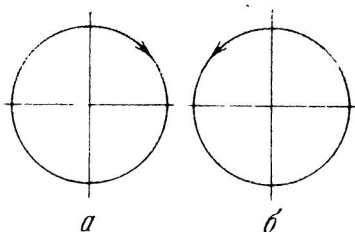


Рис. 6. Правая (а) и левая (б) круговые поляризации

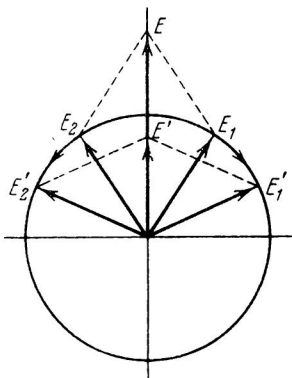


Рис. 7. Разложение линейно поляризованного света E на две компоненты — с правой E_1 и левой E_2 круговыми поляризациями

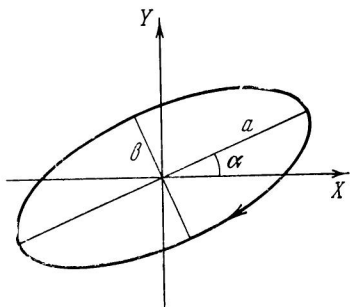


Рис. 8. Проекционная картина эллиптически поляризованного света

пендикулярную ей плоскость. Однако неоднозначность термина простирается дальше. Представим себе два луча света, распространяющиеся в вертикальной плоскости, но в разных направлениях, один — вертикально, другой — горизонтально. Оба луча линейно поляризованы так, что их электрические векторы лежат в вертикальной плоскости. С точки зрения первого определения плоскости поляризации эти два луча одинаково плоско поляризованы. Несовершенство понятия становится здесь очевидным, так как направление электрических векторов лучей различно. Столь же легко подобрать лучи, имеющие различные плоскости поляризации, но одно и то же направление колебаний электрического вектора.

Термины же «линейно поляризованный свет» и «направление колебаний электрического вектора» обладают полной однозначностью и четкостью, а также наглядностью и легко запоминаются. Они не создают добавочных искусственных сложностей пространственного представления, которых в описании поляризованного света и без того достаточно.

Приведенные определения разных типов поляризации строго применимы только к монохроматичному свету. А как повлияет на поляризацию немонахроматичность? Линейно поляризованный, формально говоря, должен остаться самим собой. Но на практике всегда от этого будут отступления. Дело в том, что, как мы увидим дальше, все экспериментальные способы получения поляризованного света зависят от длины волны. Чем шире спектр светового пучка, тем больше будут отклонения от строго линейной поляризации. Циркулярно поляризованный луч с конечной шириной спектра, как нетрудно сообразить, всегда будет иметь примесь эллиптически поляризованного. В свою очередь проекционная картина эллиптического света будет представлять эллипс, меняющийся со временем (от цикла к циклу). Это изменение, эти отступления от «чистого типа» будут всегда тем больше, чем шире спектр светового пучка.

Заметим, наконец, что, так же как существует частично линейно поляризованный свет, может быть свет частично циркулярно или частично эллиптически поляризованный. Пучки такого света всегда можно представить как совокупность естественного пучка с пучком, полностью поляризованным циркулярно или эллиптически.

роту ω ($-90^\circ \leq \omega \leq 90^\circ$). Положительная долгота отсчитывается от начальной точки z по часовой стрелке, если смотреть сверху; положительная широта — от экватора вниз. Некоторая произвольная точка O на сфере соответствует, таким образом, полностью эллиптически поляризованному лучу, у которого эллипс имеет азимут $\alpha = \varphi/2$ и эллиптичность $b/a = \operatorname{tg} |\omega/2|$, причем направление вращения левое при $\omega < 0$ и правое при $\omega > 0$. Можно, конечно, определять положение точки на сфере и с помощью декартовой системы координат.

Сфера Пуанкаре имеет ценность не только как наглядное графическое представление, но и как рабочий инструмент, позволяющий довольно быстро и просто решать сложные задачи об изменении поляризации света при взаимодействии его с различными оптическими поляризационными устройствами. Очевидно, что для получения нужного результата требуется только провести на сфере дугу, соединяющую точки, определяющие исходную и конечную поляризации (или осуществить соответствующий поворот сферы). Все дело в том, как построить эту дугу или осуществить этот поворот. Некоторые примеры применения сферы Пуанкаре для решения подобных задач будут приведены в главе V.

Мы познакомились с основными видами поляризации света и их формальным описанием. Давно уже назрел вопрос: а как реально на опыте получить и исследовать эти разные типы поляризации света?

Описанию методов экспериментального получения поляризованного света и тех интересных физических явлений, которые лежат в основе этих методов, посвящены две следующие главы.

НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА

1. ПОЛЯРИЗОВАННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

Прежде чем говорить об экспериментальных устройствах, превращающих естественный свет в поляризованный и разные типы поляризации друг в друга, рассмотрим те сравнительно немногочисленные случаи, когда источники (природные или искусственные) испускают свет не естественный, а так или иначе поляризованный.

Излучение света макроскопическим источником складывается из элементарных актов излучения отдельных цугов электромагнитных волн атомами или молекулами, из которых этот источник состоит. Поэтому надо начать с этих элементарных актов излучения.

В конце XIX и начале XX в. за созданием максвелловской теории электромагнитного поля последовала успешная разработка вопросов взаимодействия этого поля с веществом. Эта область физики получила название электронной теории. Одними из важнейших вопросов этой теории являются механизмы поглощения и излучения света.

Для объяснения этих процессов была предложена простейшая классическая модель элементарного излучателя — электрический дипольный линейный осциллятор. В простейшем случае осциллятор представляет собой совокупность двух тел, связанных между собой силой, возникающей при смещении одного из них и направленной против этого смещения (по аналогии с силой упругости эта сила именуется квазиупругой). Если эти тела несут заряды разного знака (такую систему называют диполем), то при ее колебаниях в окружающее пространство будут излучаться электромагнитные волны, частота колебаний которых равна частоте колебаний системы. С помощью уравнений Максвелла можно рассчитать характеристики этих волн. Оказывается, что на расстояниях от диполя,

значительно превышающих размер самого диполя (в так называемой волновой зоне), волны, излучаемые в любом направлении линейным гармоническим осциллятором, полностью линейно поляризованы. Направление колебаний электрического вектора при этом определяется следующим правилом: он направлен по касательным к меридианам сферы с диполем в центре и полярной осью, совпадающей с направлением колебаний D диполя (рис. 10). Радиус-вектор данной точки на сфере соответствует направлению данного светового луча S .

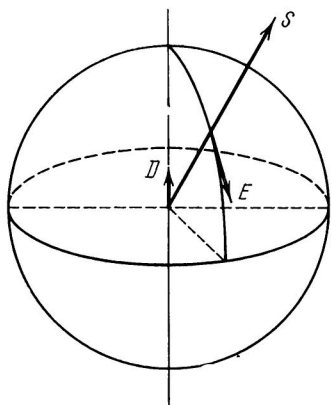


Рис. 10. Поляризация излучения электрического диполя

Совокупности диполей, определенным образом связанных между собой по фазе, являются более сложными излучателями. Совокупность двух диполей называется «квадруполь», четырех — «октуполь» и т. д. Расчеты этих систем более сложны, но и они приводят к выводу, что в волновой зоне излучаемые электромагнитные волны тоже полностью линейно поляризованы.

Другой важной моделью элементарного излучателя является электрический ротатор — совокупность неподвижного положительного заряда и подвижного отрицательного (электрона), который равномерно вращается вокруг первого по плоской круговой орбите. Для расчета такого излучателя его можно представить как сумму двух линейных взаимно перпендикулярных осцилляторов со сдвигом фазы на четверть периода. Свет от такого излучателя будет в общем случае поляризован эллиптически, а вдоль оси ротатора — циркулярно.

Обе модели элементарных излучателей тесно связаны с классическими представлениями о строении атомов и молекул. По этим представлениям атомы и молекулы являются системами из положительных и отрицательных зарядов, которые колеблются относительно друг друга (в случае атома это соответственно ядро и электроны). В атоме ядро можно считать неподвижным и рассматривать

только колебания электронов. Это связано с тем, что ядро значительно тяжелее электронов. Для водорода отношение их масс составляет примерно 1800. В других случаях оно еще больше.

Представление об элементарных излучающих осцилляторах очень плодотворно. С его помощью оказалось возможным понять обнаруженные экспериментально явления поляризации света, излучаемого не только атомами и простейшими двухатомными молекулами, но и системами, состоящими из очень сложных многоатомных молекул (например, органических соединений). При этом электронная природа осцилляторов еще не во всех случаях до конца понятна. Иногда относительно нее можно высказать только предварительные гипотезы. Так, во многих люминесцирующих органических молекулах имеются цепочки чередующихся одинарных и двойных валентных связей, которые называются конъюгированными связями и осуществляются «обобществленными» электронами, принадлежащими не отдельным атомам, а всей молекуле в целом. Многие экспериментальные факты говорят за то, что такие направленные цепи частично свободных электронов (они называются π -электронами) и образуют осцилляторы излучения и поглощения света в молекулах.

Таким образом, поляризация света, излучаемого в элементарном акте, непосредственно следует из классической теории излучения.

Однако хорошо известно, что природа света дуалистична. Одна классическая волновая электромагнитная теория не в состоянии объяснить всей совокупности оптических явлений. Другая сторона природы света — квантовая, корпускулярная — сильнее всего проявляется как раз в вопросах взаимодействия света и вещества; в частности, в вопросах поглощения и излучения света, о которых сейчас идет речь.

Исходное положение квантовой теории состоит в том, что электроны в атоме могут иметь строго определенный дискретный набор уровней энергии, характерный для данного атома, и, следовательно, поглощать и излучать энергию лишь определенными порциями. Сами процессы поглощения и излучения света происходят по следующей весьма упрощенной схеме.

Атом в стационарном состоянии не испускает света. При поглощении определенной дискретной порции энер-

гии (светового кванта) атом переходит в какое-то определенное возбужденное состояние, в котором пребывает очень недолго (как правило, миллиардные доли секунды). Затем атом возвращается в исходное стационарное состояние, испуская дискретную порцию энергии — квант света.

Переходы, в результате которых испускаются кванты света, соответствующие видимой и ближней ультрафиолетовой областям спектра, происходят, как правило, между уровнями, определяющими энергию электронов, движущихся в атоме или молекуле по некоторым орбитам вокруг атомных ядер. Дискретные количественные характеристики электронных уровней называются квантовыми числами и имеют глубокий физический смысл, определяя основные энергетические параметры электронов в атоме — размеры орбит, моменты количества движения и т. д.

Главное квантовое число n определяет размеры орбиты, по которой движется электрон (и, следовательно, его энергию). Это число может принимать значения $n = 1, 2, 3..$ и т. д. ($n = 1$ соответствует самой ближней к ядру орбите, $n = 2$ — второй и т. д.).

Орбитальное квантовое число l характеризует момент количества движения электрона по орбите и тем самым форму орбиты. Оно может иметь значение $l = 0, 1, 2.. (n - 1)$, т. е. не может равняться или превышать n .

Спиновое квантовое число S связано с собственным механическим моментом электрона (спином), который для наглядности можно условно представить как момент количества движения вокруг некоторой собственной оси. Оно определяет ориентацию спина относительно орбитального момента и может принимать только два значения $S = \pm 1/2$. Это связано с тем, что сам спин электрона в принятых в квантовой механике единицах имеет значение, равное половине.

Вместо S можно употреблять полное квантовое число J , характеризующее суммарный момент количества движения электрона и имеющее, очевидно, значения $J = l + 1/2$.

Магнитное квантовое число m характеризует поведение электрона в атоме, помещенном во внешнее магнитное поле. При этом возможны не любые, а только определенные ориентации орбитального (а также суммарного) момента относительно внешнего поля. m может принимать все целые значения от $+l$ до $-l$ (m_J соответственно от $+J$ до $-J$).

Переходы с поглощением или испусканием квантов света возможны далеко не между любыми уровнями, но подчиняются строгим правилам, именуемым правилами отбора. Эти правила можно сформулировать с помощью тех же квантовых чисел. Квантовое число n ограничениям не подвержено, его изменение Δn может быть произвольным. Квантовое число l при переходах может изменяться только на единицу: $\Delta l = \pm 1$. Квантовое число m также может меняться на единицу, и, кроме того, может оставаться неизменным $\Delta m = 0$ или ± 1 .

Квантовая теория поляризации излучения света основана на анализе пространственной анизотропии вероятностей переходов между уровнями, допускаемых правилами отбора.

Основные результаты этой теории сводятся к следующему.

При переходе с $\Delta m = 0$ поглощается или излучается линейно поляризованный свет (он называется π -компонентой). Переходам с $\Delta m = +1$ соответствует поглощение или излучение света, поляризованного правоциркулярно или левоциркулярно (так называемые σ -компоненты). Это же правило справедливо и для квантового числа m_l .

Очень существенно, что и в отсутствие внешнего магнитного поля излучение имеет ту же поляризацию, которую оно имело бы, если бы излучающая система находилась во внешнем поле, не изменяющем симметрию системы.

Итак, и с классической и с квантовомеханической точек зрения свет, излучаемый в элементарном акте, всегда поляризован. На первый взгляд этот вывод находится в противоречии с тем обстоятельством, что практически все природные источники излучают неполяризованный свет, который именно поэтому и получил также наименование естественного. Однако это только на первый взгляд. На самом деле противоречия здесь нет.

Макроскопический источник света, как правило, представляет собой хаотическую совокупность элементарных излучателей, не обладающую их упорядоченностью и ориентацией. Поэтому в отдельных элементарных актах испускается свет с различной поляризацией (например, со всевозможными азимутами линейной поляризации). Следовательно, в целом мы и получаем неполяризованный свет.

Отсюда ясно, какими свойствами должны обладать источники, чтобы они в целом излучали поляризованный свет. Такие источники либо должны обладать собственной регулярностью, упорядоченностью строения, определенной ориентацией, (полной или хотя бы частичной) элементарных излучателей, либо эта упорядоченность должна быть в них создана каким-то внешним воздействием. Упорядоченность структуры системы всегда приводит к различию ее свойств по разным направлениям, называемому анизотропией. Например, волокнистое строение древесины приводит к анизотропии прочности березового полена, в которой каждый легко убеждается с помощью топора, пытаясь рубить его поперек или вдоль волокон.

Различие оптических свойств по разным направлениям называется оптической анизотропией.

Используя этот термин, можно сказать, что источник света должен обладать либо собственной, либо наведенной анизотропией, чтобы излучаемый им свет был поляризованным.

К первым относятся прежде всего кристаллы всех сингоний, кроме кубической (последние оптически изотропны), а также природные и искусственные пленки и волокна, состоящие из длинных упорядоченных макромолекул.

Искусственная ориентация молекул может осуществляться целым рядом воздействий: влиянием электрического и магнитного полей, механической деформацией (например, растяжением пленки), ориентацией молекул в потоке жидкости и некоторыми другими.

Весьма интересным является случай создания искусственной анизотропии возбуждающим светом — поляризованным и даже естественным.

Ниже подробнее рассказано о поляризованной люминесценции, излучаемой средами с собственной или наведенной анизотропией.

Наиболее типичен случай анизотропных кристаллов. Не случайно именно у них уже более ста лет назад была впервые обнаружена поляризованная люминесценция. Первыми объектами таких наблюдений были кристаллы платиносинеродистых солей кальция, бария, стронция и магния. Позже была обнаружена поляризованная люминесценция у многих минералов.

Одно из самых известных, распространенных и широко применяемых на практике кристаллических люминесци-

рующих веществ — сернистый цинк — в монокристаллах гексагональной симметрии излучает частично поляризованную люминесценцию. То же обнаружено и у ряда других анизотропных ионных кристаллов: сернистого кадмия (гексагональная система), нитрита натрия, активированного таллием (тетрагональная система), и многих других.

Очень много люминесцирующих веществ встречается среди молекулярных кристаллов. Молекулярными кристаллами называют такие кристаллы, в которых силы взаимодействия между молекулами значительно меньше сил взаимодействия между атомами внутри молекул. В связи с этим молекулы в решетке кристалла в известной степени сохраняют свою индивидуальность. Отдельные молекулы оптически анизотропны — они обладают, как уже говорилось, собственными осцилляторами поглощения и излучения. Во многих случаях эти осцилляторы можно считать линейными и, следовательно, анизотропию молекул полной.

С другой стороны, в кристаллической решетке все молекулы имеют определенную ориентацию. Если бы ориентация всех молекул в кристалле была в точности одинаковой, то, очевидно, излучаемая кристаллом люминесценция была бы полностью линейно поляризована. В реальных молекулярных кристаллах всегда имеется несколько видов ориентации молекул. Этот факт является следствием общего кристаллохимического «закона плотной упаковки», утверждающего, что молекулы в кристаллической решетке всегда размещаются так, чтобы между ними оставалось как можно меньше «пустого места». В очень многих органических кристаллах есть по два типа ориентации молекул. Реже встречается по три, четыре.

На рис. 11 приведен вид элементарной ячейки типичного в этом отношении вещества — антрацена, а также структурная формула его молекулы, положение осциллятора излучения и осцилляторная схема ячейки. Очевидно, что, поскольку осцилляторы отдельных молекул излучают несогласованно (некогерентно), без закономерной связи по фазе, излучаемая люминесценция будет частично линейно поляризована. Если между осцилляторами есть связь по фазе, то можно ожидать эллиптически или циркулярно поляризованной люминесценции. Опыт показывает, что почти всегда осуществляется первый случай.

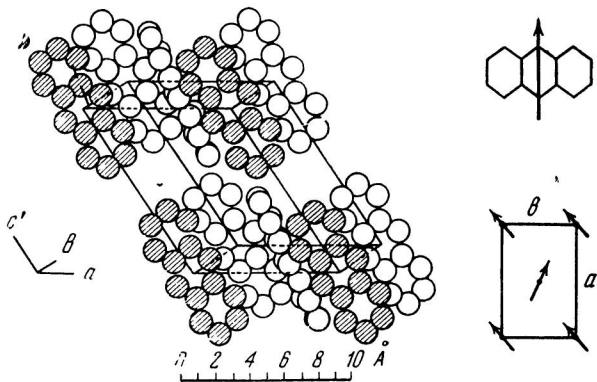


Рис. 11. Элементарная ячейка молекулярного кристалла антрацена

Эллиптическая поляризация люминесценции представляет собой уникальное явление. Она обнаружена лишь у нескольких веществ. По-видимому, не случайно эти вещества обладают большой способностью к вращению плоскости поляризации (об этом явлении будет речь в главе V).

В остальных случаях у молекулярных кристаллов обнаруживается частичная линейная поляризация. Степень поляризации определяется собственной структурой кристалла, и поэтому возбуждение может быть совершенно изотропным. Например, можно возбуждать кристалл естественным светом (как правило, в ультрафиолетовой области спектра) и наблюдать поляризованную люминесценцию в направлении возбуждения. Конечно, все сказанное относится только к монокристаллам; в поликристаллическом порошке случайная ориентация отдельных кристалликов приводит к общей изотропии.

Степень поляризации люминесценции монокристалла зависит от взаимной ориентации молекул и различна для разных направлений наблюдения. Точнее можно сказать так: степень поляризации определяется углом между проекциями осцилляторов разной ориентации на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения. Если этот угол мал, степень поляризации приближается к 100%, поляризация близка к линейной. Если же угол мало от-

личается от прямого, степень поляризации близка к нулю, свет будет почти естественный.

Измерение степени поляризации можно осуществить с помощью различных приборов — поляриметров, о которых будет рассказано в главе VIII.

Важно отметить, что поскольку причиной поляризации люминесценции перечисленных типов кристаллов является их собственная анизотропия, то это свойство в равной степени проявляется как при возбуждении естественным светом, так и при других изотропных видах возбуждения. Например, люминесценция молекулярных кристаллов имеет при корпускулярном возбуждении (α -частицами, γ -лучами) такую же степень поляризации, как и при фотовозбуждении.

Иное дело кубические кристаллы. Они оптически изотропны, поэтому при изотропном возбуждении их люминесценция неполяризована. Однако при поляризованном возбуждении и их люминесценция может стать поляризованной. Об этом подробнее будет рассказано немного дальше, когда мы перейдем к рассмотрению поляризованной люминесценции изотропных сред.

Кроме кристаллов спонтанную (т. е. собственную) поляризацию люминесценции обнаруживают также анизотропные пленки и волокна.

Самый простой способ создания искусственно анизотропной среды — это механическое растяжение пленок (целлофановых, полистироловых и других полимерных), окрашенных анизотропными люминесцирующими молекулами, например ярко люминесцирующими красителями или ароматическими соединениями. При этом молекулы ориентируются своими длинными осями вдоль направления растяжения. Ориентация при этом получается только частичная, полной добиться практически невозможно, однако довольно высокую анизотропию получить можно. Если в молекулярном кристалле все молекулы ориентированы, хотя бы и не все одинаково, то в такой пленке вообще не все молекулы ориентированы. Число молекул, длинная ось которых составляет определенный угол с осью растяжения, тем больше, чем меньше этот угол. Кроме того, оно зависит, конечно, от степени растяжения.

Можно условно представить всю совокупность молекул состоящей из двух частей — полностью ориентированных и полностью хаотичных. Чем больше первая часть,

тем выше анизотропия пленки. Если возбуждать люминесценцию пленки естественным светом и наблюдать люминесценцию в том же направлении, то будет обнаружена ее частичная поляризация, обусловленная именно этой частичной ориентацией молекул.

В природе и в технологических процессах встречается много пленок и волокон такого типа — естественного или искусственного происхождения. В качестве примеров можно назвать окрашенные флуорохромами миелотропные нервные волокна, волокна искусственного шелка, растянутые нити овечьей шерсти, имеющие собственную люминесценцию в ультрафиолетовой области, ось птичьего пера и многие другие.

Искусственную ориентацию люминесцирующих анизотропных молекул можно получить также с помощью сильных электрических и магнитных полей.

Любопытным способом ориентации вытянутых по форме линейных молекул является ориентация их в струе раствора. Этот вид ориентации подобен ориентации бревен вдоль течения реки в молевом сплаве.

Интересным случаем ориентированных сред, обладающих спонтанной поляризацией люминесценции, являются так называемые мезофазы или жидкие кристаллы. Это состояние вещества является промежуточным между жидким и кристаллическим. Известно очень много органических веществ, способных к образованию жидких кристаллов. На вид и по многим свойствам они напоминают жидкость, но обладают внутренним упорядоченным строением. Две основные структурные разновидности жидких кристаллов — нематическая (молекулы вытянуты параллельно друг другу с сохранением лишь ближнего порядка без упорядочения продольных сдвигов молекул) и смектическая (молекулы образуют слои, располагаясь перпендикулярно к плоскости слоев). Такие структуры образуются также в некоторых коллоидных растворах, например в водных растворах мыла.

Если такие нематические и смектические системы прокрашивать флуоресцирующими красителями или ароматическими соединениями и возбуждать естественным светом, то флуоресценция оказывается частично поляризованной.

Многие элементарные биологические образования (границы хлоропластов, отдельные элементы клеток — рибосо-

мы, митохондрии и др., палочки и колбочки светочувствительного слоя сетчатки и многое другое) являются системами упорядоченными, с определенной внутренней структурой, которые можно назвать квазикристаллами. Поэтому как собственная люминесценция таких систем, так и люминесценция окрашивающих их флуорохромов может быть поляризованной. Как правило, наблюдать эту поляризацию в столь сложных и нестабильных системах весьма трудно.

Ясно, что во всех перечисленных случаях ориентированных сред — от кристаллов до биологических объектов — поляризация люминесценции может служить тонким методом исследования их структуры и протекающих в них процессов. Но об этом будет речь в главе VIII. Сейчас они нас интересовали только как примеры систем, излучающих поляризованный свет.

Поляризованную люминесценцию можно наблюдать и в изотропных средах — растворах, парах, кубических кристаллах, если возбуждать ее анизотропно. Возбуждающий световой луч в общем случае анизотропен вследствие поперечности колебаний световой волны. Его анизотропия максимальна, когда он линейно поляризован. Поэтому рассмотрим в первую очередь случай, когда люминесценция изотропного жидкого раствора анизотропных молекул возбуждается линейно поляризованным светом (рис. 12).

Раствор вещества, у молекул которого осцилляторы излучения линейны, помещен в стеклянную кювету. Возбуждение производится сбоку линейно вертикально поляризованным светом. Люминесценция наблюдается в направлении, перпендикулярном возбуждению. Вертикально поляризованным светом из хаоса молекул будут выбираться и возбуждаться преимущественно те (A_1), которые ориентированы так, что у них осциллятор поглощения вертикален. Совсем не будут возбуждаться те молекулы, у которых он горизонтален (A_2). Молекулы, ориентированные промежуточным образом (A_3), имеют и промежуточную вероятность поглощения возбуждающего света. В результате возбуждены будут молекулы с некоторой преимущественной ориентацией, и если осциллятор излучения направлен в молекуле так же, как и осциллятор поглощения, то люминесценция будет частично вертикально поляризована. Однако молекулы в растворе испытывают враща-

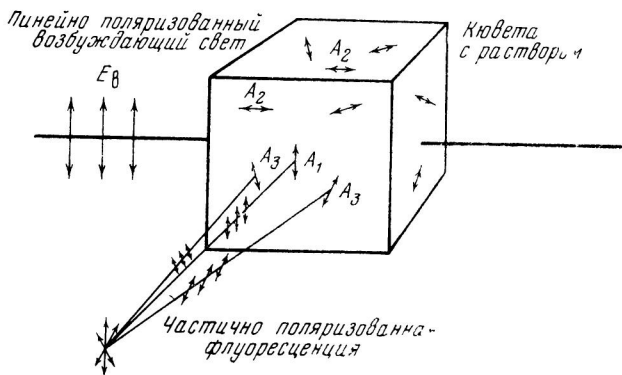


Рис. 12. Схема возникновения частичной поляризации флуоресценции раствора при возбуждении поляризованным светом

тельное тепловое движение. Если за время жизни возбужденного состояния молекулы могут повернуться на значительный угол, то ясно, что приобретенная при возбуждении анизотропия раствора к моменту излучения будет утрачена. Поэтому поляризация флуоресценции имеет место только у вязких растворов (в глицерине, маслах) или при очень низкой температуре, когда броуновское движение очень мало.

Предельная (максимальная) поляризация будет, очевидно, в том идеальном случае, когда молекулы неподвижны. С помощью несложного расчета можно показать, что в этом случае $P = 50\%$.

Если в рассмотренном эксперименте производить возбуждение естественным светом, то легко понять, что флуоресценция все же останется поляризованной, хотя степень поляризации станет меньше. Дело в том, что возбужденные осцилляторы, расположенные в горизонтальной плоскости перпендикулярно к направлению возбуждения, не могут излучать свет в выбранном нами направлении наблюдения вследствие поперечности световых колебаний. Если же при возбуждении естественным светом вести наблюдение в направлении, совпадающем с направлением возбуждения, то в этом случае флуоресценция будет конечно неполяризованной.

Попытки экспериментально обнаружить поляризацию люминесценции сложных молекул в парах пока не увенчались успехом. Зато в парах давно обнаружена и исследована поляризация флуоресценции двухатомных молекул, а также флуоресценции и резонансного излучения атомов. В двухатомных молекулах осцилляторы излучения связаны с осью молекулы. Молекулы в парах все время вращаются, что, очевидно, должно приводить к деполяризации излучаемого света, однако все же полной деполяризации не наступает. Степень поляризации в парах, согласно классической теории, не должна превышать 15%. На опыте же в ряде случаев наблюдаются и большие степени поляризации. Эти случаи удастся объяснить только с помощью квантовой теории.

Экспериментально поляризация люминесценции двухатомных молекул обнаружена и исследована в парах различных веществ — натрия, йода, рубидия, калия, ртути, кадмия, цинка.

Поляризация резонансного излучения атомных паров также давно открыта на опыте и хорошо изучена. Резонансное излучение возникает в результате перехода между теми же уровнями энергии в атоме, что и поглощение света, только в обратном направлении (рис. 13, *a*). Поляризация резонансного излучения хорошо объясняется с помощью классических представлений об осцилляторах. Изучение явления осложняется тем, что результат очень сильно зависит от внешнего магнитного поля (почему, станет ясно ниже), даже очень слабого, например магнитного поля земли. Оно не влияет только в том случае, когда его направление совпадает с направлением электрического вектора возбуждающего света.

В отсутствие магнитного поля при возбуждении линейно поляризованным светом резонансное излучение должно быть полностью линейно поляризовано, если наблюдать его в направлении, перпендикулярном возбуждающему электрическому вектору, и неполяризованным, если наблюдать его в направлении возбуждающего электрического вектора. Во втором случае интенсивность его будет очень мала.

При возбуждении резонансного излучения светом, поляризованным по кругу, излучение, наблюдаемое в направлении возбуждения, также поляризовано по кругу с таким же направлением вращения.

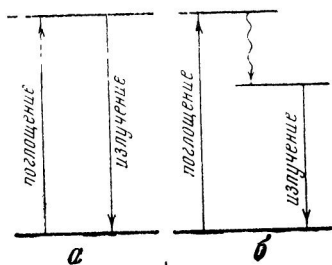


Рис. 13. Схема переходов, соответствующих резонансному излучению (а) и флуоресценции атомов (б)

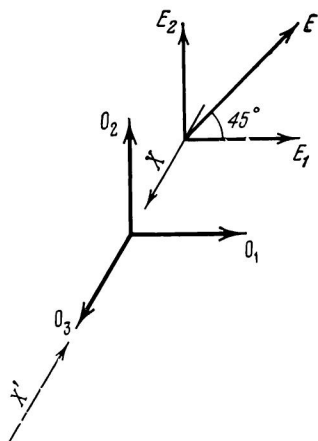


Рис. 14. Схема, поясняющая зависимость поляризации люминесценции кубического кристалла от взаимной ориентации кристалла и возбуждающего электрического вектора

O_1, O_2, O_3 — осцилляторы излучения, ориентированные вдоль осей кубического кристалла. X, X' — соответственно направления пространства возбуждающего излучения и наблюдения люминесценции

Именно эти предсказанные теорией закономерности и обнаруживаются на опыте.

Атомная флуоресценция, при которой излучение, в отличие от резонансного, происходит с иного уровня, чем тот, на который произошел переход при поглощении (рис. 13, б), также обладает поляризацией. Однако ее закономерности достаточно сложны и полностью могут быть описаны только с помощью квантовой теории.

Наконец, еще один пример изотропных сред, которые излучают поляризованную люминесценцию при возбуждении поляризованным светом, — это кубические кристаллы. Симметричное строение их решетки приводит к тому, что они являются оптически изотропными и не обладают двойным преломлением¹. Однако их изотропия существенно отличается от изотропии, например, жидких растворов. Осцилляторы излучения в кубических кристаллах не образуют хаотически равномерную макроскопическую систему, а строго ориентированы вдоль осей симметрии кристалла. Но именно поэтому при изотропном возбуждении результат получается таким же, как и в случае жидких растворов, —

¹ Об этом явлении речь будет в главе V.

люминесценция не поляризована. Отличие от растворов проявляется в том, что при линейно поляризованном возбуждении результат зависит от ориентации кристалла относительно электрического вектора возбуждающего света. Из рис. 14 легко видеть, что при ориентации E под 45° относительно осцилляторов O_1 и O_2 люминесценция будет не поляризована. Зато при такой ориентации, когда электрический вектор E_2 или E_1 совпадает с одним из осцилляторов излучения, степень поляризации люминесценции будет максимальной (соответственно $+100\%$ и -100%). Это существенно отличает данный случай от жидкого раствора.

Можно сказать, что кубические кристаллы обладают внутренней скрытой анизотропией, которую можно проявить с помощью поляризованного возбуждения.

Экспериментально поляризованная люминесценция описанного типа была открыта и исследована на монокристаллах флюорита CaF_2 , LiF , NaF , CsI и др. с различными активаторами.

2. ЭФФЕКТ ЗЕЕМАНА

(Расщепление спектральных линий
в магнитном поле)

Обнаружение в конце XIX в. этого явления, названного по имени первооткрывателя, было важным шагом в истории оптики. Как и эффект Фарадея (см. главу V), оно показало тесную связь оптических и магнитных явлений. Для нас этот эффект сейчас представляет интерес потому, что он связан с получением поляризованного света.

Схема экспериментальной установки, на которой можно продемонстрировать это явление, показана на рис. 15.

Источник света S с линейчатым спектром помещен между полюсами сильного электромагнита. Наблюдение спектра может осуществляться вдоль магнитного поля a (продольный эффект) и поперек b (поперечный эффект). В том и другом направлениях анализируются спектр и поляризация света в отсутствие и при наличии магнитного поля.

Для простых одиночных спектральных линий (например, некоторых линий в спектрах водорода, цинка, кадмия) наблюдаются следующие результаты (рис. 16).

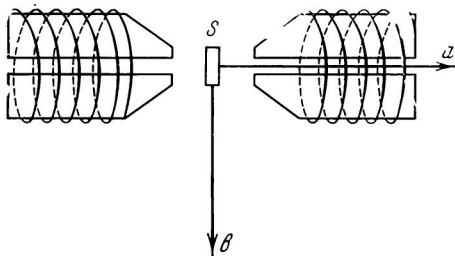


Рис. 15. Схема установки для исследования эффекта Зеемана

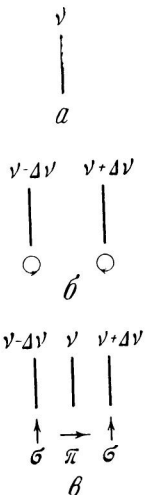


Рис. 16. Эффект Зеемана:

a — без магнитного поля, *б* — в продольном и *в* — в поперечном магнитных полях

Неполяризованная линия с частотой ν в отсутствии поля, при его наложении в продольном направлении, расщепляется на две линии с частотами $\nu - \Delta\nu$ и $\nu + \Delta\nu$, причем первая из них поляризована по левому кругу, а вторая — по правому. В поперечном направлении наблюдаются три линии с частотами $\nu - \Delta\nu$, ν и $\nu + \Delta\nu$. Крайние линии линейно поляризованы перпендикулярно направлению магнитного поля H , а средняя линия поляризована тоже линейно, но вдоль поля. Эта линия с неизменной частотой называется π -компонентой, а обе линии с измененной частотой — σ -компонентами. Величина смещения частоты пропорциональна напряженности H магнитного поля. По интенсивности π -компонента вдвое сильнее каждой из равных σ -компонент.

Объяснения этого явления надо, очевидно, искать во взаимодействии магнитного поля и элементарных электронных излучателей света. Гармоническое колебание электрона в атоме всегда может быть для простоты и наглядности разложено на произвольные компоненты, лишь бы их сумма всегда давала исходное колебание. Разложим колебание электрона на гармоническое линейное колебание вдоль направления магнитного поля H и два равномерных круговых движения (правое и левое) в плоскости, перпендикулярной H . На движущийся в магнитном поле электрон действует со стороны этого магнитного поля си-

ла, называемая силой Лоренца (именно она лежит в основе работы ускорителей элементарных частиц). Направление этой силы определяется школьным правилом левой руки, а величина ее зависит от H и от угла между H и направлением движения заряда

$$F_{\text{лор}} = evH \sin(\widehat{v, H}),$$

где e — заряд электрона, v — его скорость. Поэтому действие поля H на первую компоненту равно нулю ($\sin(vH) = 0$), а действие поля на круговые компоненты выразится в силе, направленной по радиусу в одном случае к центру, в другом — от центра. Изменение же центростремительной силы приводит к изменению частоты вращения. Это изменение частоты, как показывает простой расчет на основе элементарной механики, равно

$$\Delta v = \pm \frac{1}{4\pi} \frac{e}{m} H$$

(m — масса электрона), т. е. действительно пропорционально H . Колебание же вдоль поля сохраняет первоначальную частоту ν . В связи с этим излучение осциллятора состоит из трех частот: ν (π -компонента) и $\nu \pm \Delta \nu$ (σ -компоненты). В направлении, перпендикулярном полю, π -компонента линейно поляризована по полю (в соответствии с направлением колебаний этой компоненты осциллятора), а σ -компоненты представляются линейно поляризованными перпендикулярно полю (соответственно проекциям круговых колебаний на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения). При наблюдении вдоль поля π -компонента не излучается вследствие поперечности световых колебаний, а σ -компоненты являются поляризованными по правому и левому кругу в соответствии с моделью электрического ротатора.

Таким образом, эта классическая модель полностью объясняет свойства эффекта Зеемана.

Столь же полно явление может быть объяснено и с квантовой точки зрения. Во внешнем магнитном поле происходит расщепление уровней, соответствующее дискретным возможностям ориентации момента количества движения относительно направления поля и определяемое магнитным квантовым числом m .[‡] Излучательные переходы с образовавшихся уровней согласно правилам

отбора дают линейно поляризованный свет при $\Delta m = 0$ (π -компонента) и циркулярно (право и лево) поляризованный при $\Delta m = \pm 1$ (σ -компоненты).

Описанное явление носит название нормального эффекта Зеемана и относится к простым одиночным спектральным линиям.

Линии, обладающие сложным строением (мультиплеты), дают в магнитном поле сложное расщепление на π - и σ -компоненты, называемое аномальным эффектом Зеемана.

Также весьма сложное расщепление на π - и σ -компоненты наблюдается для спектральных линий в сильных электрических полях и называется эффектом Штарка.

Оба последних эффекта не могут быть объяснены на основе классических представлений и интерпретируются с помощью квантовой механики.

3. ЯВЛЕНИЕ ВАВИЛОВА — ЧЕРЕНКОВА

Этот принципиально новый вид излучения света был открыт и изучен советскими физиками. Это излучение сопровождает движение заряженных частиц (например, электронов) в некоторой среде (например, в воде) со скоростью, превышающей фазовую скорость света в данной среде¹. Не вдаваясь здесь в подробное объяснение свойств этого интереснейшего явления, отметим только то, что представляет интерес для нашего предмета.

Излучение Вавилова — Черенкова направлено только вперед (вдоль движения частиц) в виде конуса, ось которого совпадает с направлением движения частиц (рис. 17). Излучение поляризовано. Электрический вектор лежит в плоскости, содержащей направление скорости частицы и направление излучения (рис. 18). Поэтому при наблюдении в строго определенном направлении свет будет линейно поляризованным. При интегральном же наблюдении всего потока излучения оно будет представляться неполяризованным. Можно сказать, что оно будет в этом случае обладать «скрытой» поляризацией.

¹ Здесь нет противоречия со специальной теорией относительности, утверждающей, что не может быть скорости, превышающей скорость света в пустоте.

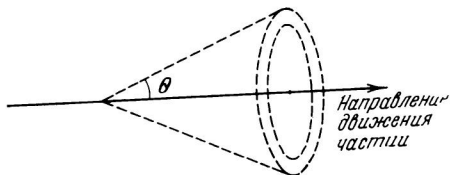


Рис. 17. Пространственное распределение излучения Вавилова — Черенкова. Стрелкой показано направление полета частицы

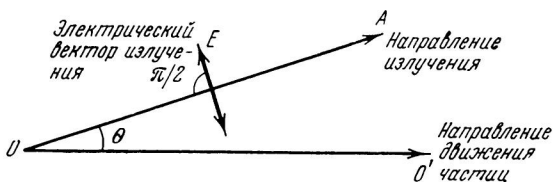


Рис. 18. Поляризация излучения Вавилова — Черенкова

OO' — направление полета частицы, OA — направление излучения, E — электрический вектор

4. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРОВ

В последние годы получил широкую известность новый тип мощных источников света, называемых лазерами. Излучаемый ими свет отличается не только большой мощностью, но и некоторыми важными физическими свойствами — строгой направленностью, когерентностью и др. Когерентность означает согласованность по времени фаз различных излучаемых световых волн. Только такие волны могут давать устойчивую интерференционную картину (см. главу VI).

Обычные источники света (как естественные, так и искусственные) излучают свет некогерентный, потому что элементарные акты испускания света отдельными атомами или молекулами в них никак не согласованы между собой. В лазерах же сам принцип действия основан на такой согласованности. В некотором веществе (рабочем теле лазера) производится предварительное возбуждение атомов или молекул, переводящее их на возбужденный уро-

вень. Этот процесс называется оптической накачкой и осуществляется обычно с помощью мощного источника света, поглощаемого рабочим телом (например, с помощью мощной импульсной лампы). В результате оптической накачки возникает инверсная заселенность возбужденных уровней; иными словами, в возбужденном состоянии оказывается больше атомов или молекул, чем в основном. Если затем на такую систему подействовать квантами света с такой же энергией (т. е. равной разности энергий возбужденного и основного уровней), то этот свет работает как стимулятор и вызовет индуцированные переходы с излучением у некоторых возбужденных атомов, что в свою очередь мгновенно вызовет новые индуцированные переходы и т. д. Образуется лавина квантов (т. е. мощная вспышка света), излученных практически синхронно, с одинаковой фазой, а следовательно, когерентных. Стимулирующим светом вполне может служить собственная люминесценция рабочего тела.

В качестве последнего могут быть выбраны в принципе любые вещества (твердые, жидкие и газообразные), обладающие подходящими уровнями. Однако многочисленные технические, технологические и иные трудности весьма осложняют выбор веществ для лазеров. Широкое распространение получили, например, лазеры на кристаллах рубина и газовые лазеры на смесях гелия и неона.

Для того чтобы описанный процесс осуществился, необходимо соблюдение еще одного важного условия. Нужно, чтобы мощность индуцированного излучения компенсировала уход энергии света как в виде самого лазерного луча, так и непроизводительных потерь (поглощение света стенками, в которых заключено рабочее тело, и т. п.). Для осуществления этого рабочее тело помещают в резонатор. Роль его с успехом могут играть полупрозрачные зеркала, ограничивающие торцы рабочего тела. В случае рубина иногда непосредственно серебрятся полированные торцы цилиндрического рубинового стержня. Роль резонатора кратко сводится к тому, что он накапливает ранее излученную молекулами энергию и с помощью индуцирования управляет излучением молекул в последующие моменты времени.

Вследствие этого резонатор всегда усиливает преимущественно такое излучение, которое изначально обладает большей интенсивностью. Именно поэтому происходит

сужение излучаемой спектральной полосы и луч лазера обладает очень высокой монохроматичностью.

Очевидно, нечто подобное должно иметь место и в отношении поляризации излучения. Это свойство можно назвать анизотропией оптического усиления.

Излучение газовых лазеров, как правило, не поляризовано. Это естественно, так как не поляризована исходная собственная люминесценция хаотической совокупности молекул, образующих газ. Нет преимущества ни у одного из направлений, и анизотропия оптического усиления не может проявиться. Если, однако, каким либо способом (например, наложением внешнего электрического поля) создать преимущественное направление, то в отношении этого направления немедленно проявится анизотропия оптического усиления и излучение станет поляризованным.

Преимущественная компонента будет усиливаться сильнее, чем другая, ей перпендикулярная, в результате чего поляризация будет возрастать, приближаясь к полностью линейной. Стоит только устранить искусственно введенный фактор анизотропии (внешнее поле), как излучение лазера вновь станет неполяризованным, потому что усиление не сможет производить отбор преимущественной компоненты.

В ряде работ экспериментально исследованы поляризационные характеристики излучения лазеров на рубине.

Прежде всего результат зависит от кристаллографической ориентации монокристаллического рубинового стержня. Наиболее четкий и повторяющийся в опытах различных авторов результат получен для стержней, геометрическая ось которых перпендикулярна оптической оси (рубин — одноосный кристалл). В большинстве случаев излучение лазера при этом оказывалось линейно поляризованным, причем электрический вектор перпендикулярен главной плоскости кристалла (т. е. плоскости, содержащей направление луча и оптическую ось).

Некоторые исследователи, правда, замечали, что такую поляризацию лазер дает только в начале своей работы, а после достаточно большого числа импульсов появляется слабая компонента излучения, поляризованная в главной плоскости. Возможно, что это связано с изменением в течение работы свойств слоев посеребрения на торцах рубинового стержня.

Обычная фотолюминесценция монокристалла рубина с длиной волны такой же, как у излучения лазера $\lambda = 6943 \text{ \AA}$ (так называемая линия R_1), частично линейно поляризована (степень поляризации около 80%) и преимущественная компонента также перпендикулярна главной плоскости. Это и является первопричиной линейной поляризации излучения лазера, возникающей в результате описанного выше явления анизотропии оптического усиления, которое представляет собой весьма специфический способ получения поляризованного света, свойственный только оптическим квантовым генераторам.

Первые данные, полученные со стержнями рубина, геометрические оси которых параллельны оптической оси, показали, что излучение лазера в этом случае не поляризовано. Это согласуется с тем обстоятельством, что и обычная фотолюминесценция в R_1 -линии при наблюдении вдоль оптической оси также неполяризована, что и следовало ожидать, учитывая, что оптическая ось всегда является осью симметрии.

Однако в других работах, выполненных позже, вскрылась более сложная картина поляризации. При этом данные разных авторов не всегда согласуются между собой. Обнаружено наличие поляризации и вдоль оптической оси, причем она меняется со временем и зависит от энергии накачки. Показано, что наличие или отсутствие поляризации излучения лазера на рубиновом стержне, ось которого совпадает с оптической осью, зависит также от совершенства кристаллов, наличия примесей, от свойств резонатора (в частности, от его симметрии или асимметрии). Установлено, что в кристаллах всякой ориентации (в том числе и перпендикулярных оптической оси) с возрастанием энергии накачки степень поляризации излучения лазера уменьшается. Это, по-видимому, связано с тем, что, говоря упрощенно, в этом случае успевают достаточно усилиться и малая компонента.

Во многих случаях замечено также различие поляризации излучения от различных областей торца кристалла. Причина этого, по-видимому, связана с качеством и неоднородностью кристалла, а также с типом и числом возникающих в кристалле световых колебаний (мод).

Понимание всех этих явлений затрудняется еще тем обстоятельством, что поляризация собственной фотолюминесценции монокристаллов рубина имеет достаточно

сложный характер; в частности, сильно зависит от длины волны излучения. Степень поляризации многочисленных линий и полос люминесценции имеет самые различные значения. Вопрос этот до конца еще не изучен.

Работы по лазерам начаты сравнительно недавно. Естественно, что в настоящее время в этой области есть еще много неясных явлений, факторов, деталей, как принципиальных, так и технических. В частности, это относится и к некоторым указанным чертам поляризации излучения лазеров.

Несомненно, что в разнообразных использованиях лазеров для практических целей поляризация их излучения может найти в ряде случаев полезное применение.

5. НЕКОТОРЫЕ ДРУГИЕ СЛУЧАИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА

Поляризованным является тепловое излучение раскаленных анизотропных материалов.

Значительной степенью поляризации (до 70%) обладает тормозное излучение релятивистских электронов (т. е. электронов, имеющих очень большую скорость, приближающуюся к скорости света), движущихся в магнитном поле. По-видимому, именно этот механизм излучения света объясняет поляризацию, наблюдаемую у некоторых туманностей (например, крабовидной).

Дипольные радиопередающие антенны излучают линейно поляризованные радиоволны, а спиральные антенны — циркулярно поляризованные.

Часто поляризован свет разных типов газовых разрядов.

Можно назвать и ряд других примеров. Следует, однако, учитывать, что в некоторых случаях при этом поляризация возникает не в самом процессе излучения, а вследствие вторичных процессов (отражение, преломление, рассеяние света), о влиянии которых на поляризацию будет идти речь в следующей главе.

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО СВЕТА В ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ И ИЗМЕНЕНИЯ ТИПА ПОЛЯРИЗАЦИИ

Эти методы могут быть основаны на любых оптических явлениях, в процессе которых свет так или иначе поляризуется или меняет свою поляризацию. Такие явления довольно многочисленны и разнообразны. Наиболее известными, изученными и используемыми из них можно считать отражение и преломление на границе изотропных диэлектриков, двойное преломление кристаллов, дихроизм (зависимость поглощения света от его поляризации), рассеяние света. В этой главе мы рассмотрим суть этих явлений и возможность их применений для интересующих нас целей.

1. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА ПРИ ОТРАЖЕНИИ И ПРЕЛОМЛЕНИИ НА ГРАНИЦЕ ИЗОТРОПНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

С помощью любого поляризационного прибора (которые пока еще нам не знакомы, но многие из которых будут описаны в этой главе) легко убедиться, что свет, отраженный от гладкой полированной поверхности диэлектрика (стекло, пластмассы, мрамор, поверхность воды и других жидкостей и т.д.), всегда частично, а иногда полностью линейно поляризован. Как уже говорилось, этот способ поляризации был открыт Малюсом в 1810 г. Основной закон поляризации при отражении был установлен Брюстером в 1815 г. Попытаемся прежде всего понять физический смысл явления. Пусть на границу прозрачного диэлектрика, например стекла, падает луч естественного света (рис. 19). На границе он разделяется на два луча — отраженный и преломленный. Первый

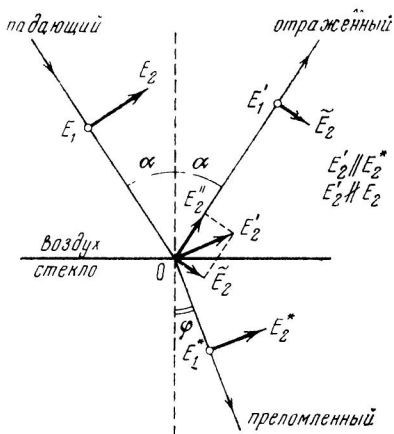


Рис. 19. Поляризация света при отражении

идет обратно в воздух под углом, равным углу падения, второй распространяется в стекле под углом преломления φ (к нормали), который связан с углом падения α следующим соотношением:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \varphi} = n = \frac{c}{v}, \quad (1)$$

где c — скорость света в воздухе, v — в стекле, n — показатель преломления стекла. Эти законы отражения и преломления света следуют из волновой теории и излагаются во многих учебниках и популярных книгах. Поэтому мы примем их как известные и сосредоточим внимание на вопросе о поляризационной стороне этих процессов. Как уже указывалось, мы можем заменить хаос всевозможных направлений электрического вектора в естественном свете совокупностью двух равных взаимно перпендикулярных компонент. Пусть они будут расположены E_2 в плоскости падения и перпендикулярно ей E_1 (от этой компоненты на рисунке виден только след в виде точки). Причиной возникновения в точке O отраженного и преломленного лучей является взаимодействие падающего света со средой. Эти вторичные волны — следствие электромагнитных колебаний, вызванных в атомах среды падающим светом. Компонента электрического век-

тора преломленной волны E_1^* , перпендикулярная плоскости падения, параллельна E_1 . Но E_2^* уже не параллельна E_2 , ибо преломленный луч не параллелен падающему. При этом очень существенно, что векторы E_1^* и E_2^* не равноправны в отношении отраженного луча. E_1^* для него поперечен, и поэтому он с равной вероятностью может распространяться как в преломленном, так и в отраженном луче (E_1^* и E_1'). Но этого нельзя сказать о E_2^* . Разложим его в свою очередь на компоненты E_2'' и \tilde{E}_2 . Вследствие поперечности световых волн только \tilde{E}_2 может распространяться в отраженном луче. В то же время для распространения компоненты E_2^* в преломленном луче препятствий нет. Отсюда сразу следует вывод, что и отраженный и преломленный лучи частично поляризованы, причем преимущественное направление в отраженном свете перпендикулярно плоскости падения E_1 , а в преломленном — лежит в этой плоскости E_2 . Для запоминания существует мнемоническое правило — отражается преимущественно «глядящая» компонента, а проходит «колющая».

Особый интерес представляет случай, изображенный на рис. 20, когда угол между отраженным и преломленным лучами прямой. В этом случае E_2' совпадает с направлением отраженного луча, и следовательно, совсем не может в этом направлении распространяться. Отраженный луч будет полностью линейно поляризован. Поля-

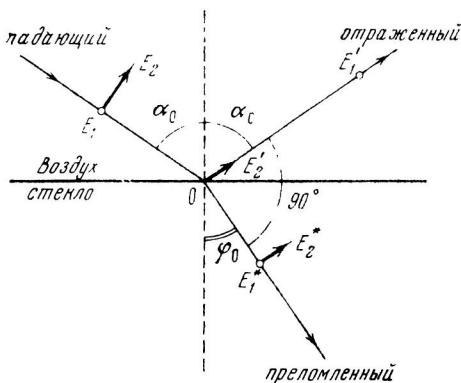


Рис. 20. Угол полной поляризации

ризация преломленного луча будет при этом максимальная, но далеко не полная (для обычного стекла около 15%). Угол α_0 в этом случае называют углом Брюстера (или углом полной поляризации).

Так как $\alpha_0 + \varphi_0 = 90^\circ$, то $\sin \varphi_0 = \cos \alpha_0$, и, учитывая (1), мы получаем условие для определения угла Брюстера данного материала

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = n. \quad (2)$$

Итак, мы имеем теперь первый (но будем надеяться не последний) способ превращать естественный свет в линейно поляризованный. Для обычного стекла угол Брюстера составляет около 57° . А как нам экспериментально убедиться в том, что свет, отраженный под углом Брюстера, действительно линейно поляризован? Для этого можно воспользоваться второй такой же отражающей поверхностью, поместив ее на пути первично отраженного луча тоже под углом Брюстера, но в скрещенном положении (чтобы «глядящая» компонента стала «колющей»). Если это расположение осуществить достаточно точно, то интенсивность света, отраженного от второго зеркала, будет равна нулю. Такое относительное расположение двух поляризующих устройств называют скрещенным. Первое устройство (первое зеркало) принято называть поляризатором, а второе — анализатором. Повернув второе зеркало на 90° вокруг оси, совпадающей с направлением луча между зеркалами, получим параллельное расположение устройств (зеркал), при котором «глядящая» компонента остается «глядящей» и для второго зеркала. Интенсивность дважды отраженного луча в этом случае максимальна.

Совокупность поляризатора и анализатора представляет собой типичную поляризационную установку, позволяющую исследовать различные поляризационные явления в разных средах, помещая их между поляризатором и анализатором. Очевидно, например, что любое изменение поляризации первично отраженного света будет немедленно замечено в скрещенном положении зеркал, так как оно нарушит темноту и вызовет просветление. В дальнейшем мы будем много пользоваться подобными установками.

Именно с помощью поляризации при отражении были созданы первые поляризационные приборы такого типа,

сыгравшие большую роль в экспериментальных исследованиях поляризации света; например, широко известный старинный прибор Нерремберга (рис. 21).

Известно, что показатель преломления зависит от длины волны света (явление дисперсии). Следовательно, угол Брюстера должен быть различен в разных участках спектра. У некоторых веществ с большой дисперсией это различие может быть заметным, например у исследованных Вудом пара-нитрозо-диметил-анилина и нитрозо-бензил-этил-анилина. При этом скрещенное положение поляризатора и анализатора в белом свете дает не темноту, а окрашенную картину. Но для большинства прозрачных сред дисперсия слишком мала, чтобы заметно повлиять на величину угла полной поляризации. Поэтому скрещенность в этих случаях достигается полностью практически по всему видимому спектру.

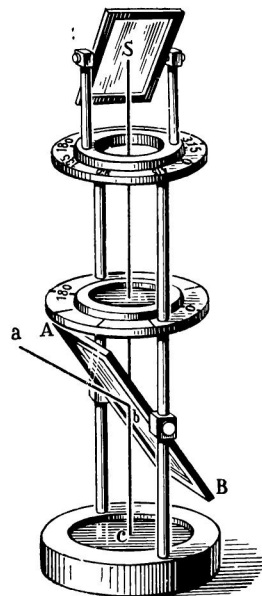


Рис. 21. Прибор Нерремберга

Измерение угла полной поляризации света при отражении может служить простым методом определения показателя преломления вещества.

Как уже было сказано, поляризация преломленных лучей (даже при падении света под углом Брюстера) далеко не полная. Чтобы ее увеличить, можно подвергнуть преломленные лучи второму, третьему и т. д. преломлениям. Достаточно преломлений в 8—10 наложенных друга на друга стеклянных пластинок, чтобы при падении света под углом Брюстера не только отраженный, но и преломленный свет стал практически полностью поляризованным. Такую совокупность пластинок называют стопой. Стопа может служить поляризатором (или анализатором) как в отраженном («глядящая» компонента), так и в проходящем («колющая» компонента) свете.

Для разных областей спектра применяются стопы из разных материалов. Так, для видимой области практичнее всего различные сорта стекла, для ультрафиолето-

вой — плавленный кварц, для инфракрасной — хлористое серебро, селен.

Описанные явления поляризации при отражении не имеют места на поверхности металлов, как бы хорошо она ни была отполирована. Зеркала, покрытые тонким слоем металла, также не поляризуют отраженный свет, если падающий свет естественный. Причина этого заключается в том, что металлы чрезвычайно сильно поглощают свет. Это обстоятельство в свою очередь объясняется наличием в металлах огромного количества свободных электронов, на которые действует электрическое поле падающей световой волны. Основная часть света (90% и более), падающего на поверхность металла, отражается. Та часть, которая проходит внутрь металла, испытывает полное поглощение в тончайших слоях. Несколько утрируя, можно сказать, что в металлах нет преломленной волны. Поляризация же возникает, как мы видели выше, от неодинакового распределения компонент электрического вектора между отраженной и преломленной волнами. Так что если нет преломленной волны, то отраженная не может быть поляризована в случае падения естественного света.

Мы рассмотрели пока только возможность получения линейно поляризованного (полностью или частично) света из неполяризованного с помощью явлений отражения и преломления. Однако эти явления можно использовать и для превращения света одного типа поляризации в другой. Для того чтобы понять это, следует обратить внимание на фазовые соотношения световых волн при этих процессах. Рассмотрим простейший случай — отражение электромагнитной волны при нормальном падении на границу двух сред. В падающей волне направления векторов электрического E и магнитного H полей подчиняются строгому правилу, образуя с направлением падения света правовинтовую систему (см. главу I). В отраженной волне правовинтовая система обязана сохраниться. Однако, поскольку направление распространения изменилось на обратное, это условие может быть выполнено только в том случае, если либо направление E , либо направление H также изменится на обратное. Экспериментальные данные и детальная теория показывают, что при отражении от более оптически плотных сред (с большим показателем преломления, чем у среды, из которой

падает свет) меняет направление вектор E , а направление H остается неизменным. Это означает, что E изменяет свою фазу на π (180°).

Во всех случаях падения света на границу двух сред имеется однозначное соотношение амплитуд и фаз падающих и отраженных волн, зависящее от угла падения и показателей преломления сред. Особый интерес представляет случай полного внутреннего отражения — отражения от менее плотной среды, — наступающего при достаточно большом угле падения. Величина этого предельного угла падения α_n определяется из следующего условия. Если φ — угол преломления, то $\sin \alpha / \sin \varphi = n$; при $\sin \varphi = 1$, $\sin \alpha_n = n$ (здесь $n < 1$).

При углах, больших α_n , не может быть преломленного луча, следовательно, весь свет будет отражаться. При этом компоненты отраженного луча (лежащая в плоскости падения и перпендикулярная ей) испытывают различные изменения фазы. Это обстоятельство было остроумно использовано Френелем для экспериментального получения света, поляризованного по кругу. Идея этого метода состоит в том, чтобы линейно поляризованный под углом 45° к плоскости падения свет, испытав полное внутреннее отражение, приобрел разность фаз между компонентами (лежащей в плоскости падения и перпендикулярной к ней), равную 90° ($\pi/4$). Оказалось, что в области видимого света (а также инфракрасного и ультрафиолетового) создание такой разности фаз при помощи однократного полного внутреннего отражения невозможно. Однако можно получить разность фаз в 45° . Следовательно, при двукратном полном внутреннем отражении можно получить 90° .

Исходя из этих соображений, Френель предложил устройство, изображенное на рис. 22 и получившее название ромба Френеля. Оно представляет собой стеклянный параллелепипед с показателем преломления $n = 1,51$ и острым углом $54^\circ 37'$. Если линейно поляризованный луч, азимут поляризации которого относительно плоскости падения составляет 45° , нормально падает на меньшую грань этого параллелепипеда, то он испытывает двукратное полное внутреннее отражение от длинных граней под углом $54^\circ 37'$. В результате возникает разность фаз между компонентами, равная 90° , следовательно, выходящий нормально через вторую малую грань луч будет поляри-

зован по кругу. Очевидно, если заставить его пройти через второй ромб Френеля, то разность фаз возрастет до 180° и вновь получится луч, линейно поляризованный, но направление его поляризации будет перпендикулярно направлению поляризации луча, падающего на первый ромб Френеля. Если исходный луч бросить на ромб Френеля не по нормали, а под несколько иным углом, то разность фаз будет отличаться от 90° и выходящий луч будет эллиптически поляризован.

Позже были предложены иные модификации этого устройства, например ромб Муни (рис. 23). Последний имеет по сравнению с ромбом Френеля и свои недостатки (обратный выход луча), и свои преимущества (значительно меньше влияние наклонного падения, вследствие чего можно применить световые пучки с большим угловым расхождением).

Эллиптически поляризованным становится также линейно поляризованный свет после отражения от поверхности металлов. Причина этого тоже заключается в возникновении разности фаз между компонентой, поляризованной в плоскости падения и перпендикулярно ей.

В заключение этого раздела следует упомянуть еще об одном поляризационном эффекте, происходящем при отражении света. Он очень прост. Состоит он в том, что при отражении по нормали (или близко к нормали) от полированной стеклянной пластинки правоциркулярно поляризованный свет превращается в левоциркулярно поляризованный. В самом деле, обе линейно поляризованные компоненты, на которые можно разложить свет, поляризованный по кругу, испытают при отражении одинаковое изменение фазы (на π), как указывалось выше.

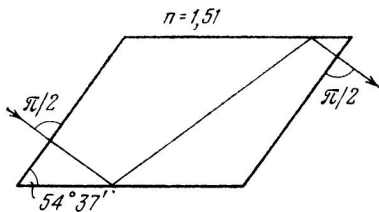


Рис. 22. Ромб Френеля

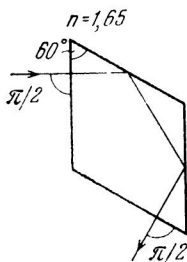


Рис. 23. Ромб Муни

Следовательно, разность фаз между ними не изменится, а направление луча изменится на обратное. Отсюда ясно, что правая циркуляция превратится в левую (и наоборот).

2. ДВОЙНОЕ ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА В КРИСТАЛЛАХ

Как уже говорилось в главе II, двойное преломление было первым явлением, в котором была экспериментально обнаружена поляризация света. Двойное преломление свет испытывает только на границе анизотропных прозрачных тел, в первую очередь кристаллов. Именно двойным преломлением объясняется широко известный факт двойного изображения предметов, на которые смотрят, например, сквозь пластинку исландского шпата, являющегося классическим примером двупреломляющего кристалла (это свойство у него выражено очень сильно). Попытаемся разобраться в причинах двойного преломления.

Преломление луча на границе изотропной прозрачной среды имеет причиной изменение скорости света в среде по сравнению с вакуумом (или воздухом) (рис. 24, а). Оно характеризуется показателем преломления $n = c/v$, постоянной величиной для данной среды и данной длины волны света, не зависящей от угла падения. Это и естественно, ибо среда изотропна.

В случае анизотропной среды столь же естественно ожидать, что n будет различен для разных направлений, что он будет функцией угла падения (рис. 24, б). Это действительно так, но это еще не объясняет двойного преломления, т. е. расщепления падающего под определенным углом луча на два преломленных, идущих по разным направлениям (рис. 24, в). Чтобы найти путь объяснения этого явления, надо вспомнить, что световые волны поперечны и что направление самого луча не является единственным направлением, его характеризующим. Есть еще второе направление — направление колебаний электрического вектора. Анизотропия среды должна реагировать не только на направление луча, но и на направление его поляризации. Пусть падающий луч естественный. Поступим, как и прежде: разложим всевозможные направления электрического вектора на компоненты E_1 в плоскости падения и E_2 перпендикулярно ей и просуммируем их.

Вследствие анизотропии кристалла E_1 и E_2 встретят в нем разные свойства и будут распространяться в общем случае с разными скоростями. Следовательно, у них будут разные показатели преломления, разные углы преломления, иначе говоря, разные направления распространения (рис. 24, z). Это и означает расщепление падающего луча на два взаимно перпендикулярно поляризованных — двойное преломление.

На первый взгляд должно показаться, что мы искусственно получили именно двойное, а не многократное преломление, так как произвольно выбрали систему разложения векторов E . Произведя разложение в другой паре взаимно перпендикулярных плоскостей, мы получили бы еще два вектора E'_1 и E'_2 , которые тоже должны иметь собственные направления распространения в кристалле и т. д. В результате получилось бы, что падающий свет в кристалле должен расщепиться не на два, а на бесконечное множество лучей с разной поляризацией.

Дело, однако, обстоит не так. Выбор системы координат не может быть произвольным — он однозначно определяется свойствами самого кристалла.

Чтобы стало ясно, в чем тут суть дела, рассмотрим совсем иной пример анизотропии. Возьмем стержень кругового сечения (рис. 25, a). Если ударить по одному из его концов в направлении F_1 , то в нем возникнут упругие колебания, сопровождающиеся звуком определенной частоты. Та же частота получится, если ударить в направлении F_2 (стержень круглый, он изотропен относительно своей центральной оси). Теперь возьмем стержень эллиптического сечения (рис. 25, b). Если его ударить в направлении F_1 , получится одна частота звука, если в направлении F_2 — другая (стержень анизотропен относительно центральной оси). А что будет, если ударить его в промежуточном направлении F_3 ? При этом не получится звука с новой промежуточной частотой. Вместо этого стержень издаст одновременно оба звука с прежними частотами (собственные частоты стержня).

Аналогично этому в кристалле имеются два собственных направления, в которых только и может совершаться колебания электрический вектор преломленного света.

Рассмотрим, как определяются в кристаллах эти направления. Прежде всего легко понять, что если в кристалле есть ось достаточно высокой симметрии, которая в

оптическом отношении является осью полной симметрии, то относительно нее кристалл изотропен. Следовательно, при распространении света в направлении этой оси не должно быть двойного преломления. Такое направление называется оптической осью кристалла. Это именно направление, а не линия. Этим свойством обладают все линии, параллельные данному направлению.

Анизотропия кристалла обусловлена строением его решетки. Атомы и молекулы, из которых построен кристалл, расположены в определенном порядке, но этот порядок не обязательно одинаков в разных направлениях. Например, расстояния между атомами, строго одинаковые вдоль одной какой-то кристаллографической оси, могут быть другими вдоль других осей. Только в кристаллах самой простой системы — кубической — межатомные расстояния одинаковы по всем трем главным осям, поэтому эти кристаллы изотропны и, в частности, не обладают двойным преломлением света.

Все остальные системы кристаллов обладают двойным преломлением. При этом в кристаллах тетрагональной и гексагональной систем имеется только одно направление, в котором не происходит двойного преломления, одна оптическая ось. Поэтому все они называются одноосными. В кристаллах ромбической, моноклинной и триклинной систем таких направлений два. Они имеют, таким образом, две оптические оси и называются двуосными.

Исландский шпат CaCO_3 — наиболее известный и применяемый вследствие сильно выраженного двойного преломления — принадлежит к гексагональной системе и является, следовательно, одноосным кристаллом. Когда луч света падает на кристалл вдоль оптической оси, разные направления его электрического вектора попадают в кристалле в одинаковые условия, так как оптическая ось есть ось полной оптической симметрии кристалла, т. е. свойства кристалла по всем направлениям, перпендикулярным оси, одинаковы. Это можно проиллюстрировать такими опытами. Пластинку кристалла, вырезанную перпендикулярно этой оси, покрывают тонким слоем воска, просверливают в центре, пропускают через отверстие проволоку и нагревают ее электрическим током. Воск плавится, причем следы плавления имеют круглую форму. Если пластинку вырезать не перпендикулярно оси, то следы плавления будут овальными. Оптические свойства

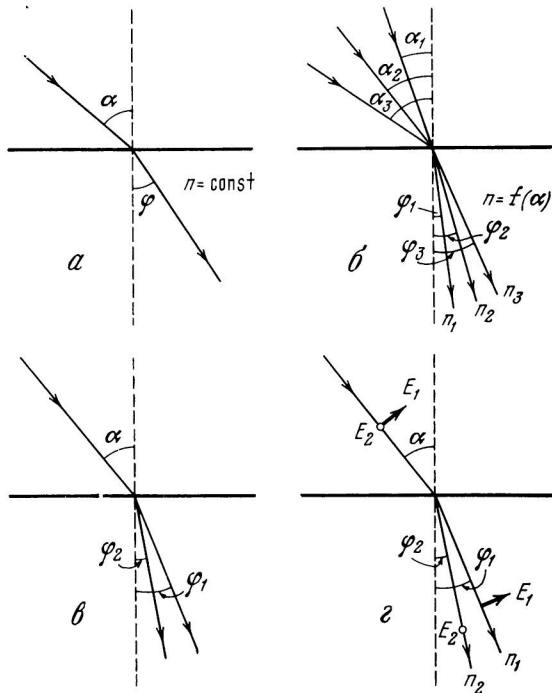


Рис. 24. Преломление света на границе изотропной среды и кристалла. Свет падает из воздуха в изотропную среду (*a*) и в кристалл (*б*, *в*, *г*)

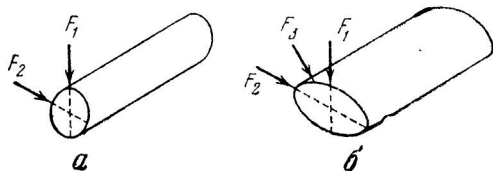


Рис. 25. Анизотропия упругого стержня

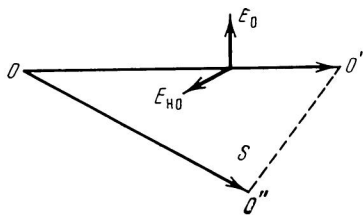


Рис. 26. Поляризация лучей в одноосном кристалле

E_0 , $E_{н0}$ — электрические векторы обыкновенного и необыкновенного лучей; OO' — направление падающего луча, OO'' — оптическая ось, $OO'O''$ — главная плоскость

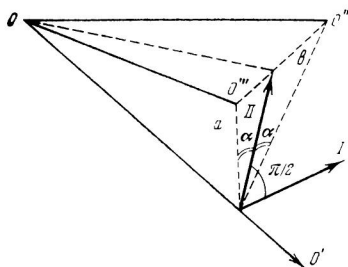


Рис. 27. Поляризация лучей в двуосном кристалле

OO' , OO'' и OO''' — соответственно на направление падающего луча и оптические оси кристалла; I и II — электрические векторы двух лучей в кристалле

имеют аналогичную пространственную структуру. Поэтому луч света, идущий в кристалле вдоль оптической оси, «чувствует себя» совершенно так же, как в изотропной среде, ибо любое направление его электрического вектора перпендикулярно оптической оси.

Рассмотрим теперь случай, когда луч падает на кристалл под некоторым углом к оптической оси. Плоскость, в которой лежат луч и оптическая ось, называется главной плоскостью кристалла. Именно она определяет поляризацию двух лучей, на которые расщепляется луч в кристалле. Электрический вектор первого из этих лучей перпендикулярен главной плоскости, электрический вектор второго лежит в ней (рис. 26). Таким образом, первый поляризован перпендикулярно оптической оси, и, следовательно,

он по-прежнему будет «чувствовать себя», как в изотропной среде, — он не преломляется при нормальном падении и его показатель преломления не зависит от направления этого луча в кристалле. За эти свойства этот луч получил название обыкновенного. Второй луч, поляризованный в главной плоскости, тем самым не попадает в кристалле «в изотропные условия» и испытывает на себе «превратности анизотропии». Его коэффициент преломления меняется с направлением, и он испытывает преломление даже при нормальном падении луча на кристалл. За эти свойства, вызывавшие недоумение у первооткрывателей, второй луч был назван необыкновенным.

Легко понять, что оптическая ситуация может иметь место только в том случае, если в кристалле есть лишь одна оптическая ось. В двусосных кристаллах обе компоненты расщепления будут необыкновенными лучами. Поляризация их определяется следующим правилом: электрические векторы компонент лежат в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, являющихся биссектрисами углов между плоскостями a и e , проходящими через направление луча и оптические оси (рис. 27). Очевидно, что одноосный кристалл представляет собой частный случай — две оптические оси сливаются в одну, соответственно две плоскости a и e сливаются в одну главную плоскость, одна из биссектрисных плоскостей тоже сливается с этой главной плоскостью, вторая становится перпендикулярной ей.

Существует довольно много разных способов графического описания двойного преломления в кристаллах. Однако, прежде чем к ним перейти, следует сделать одно важное замечание. Когда мы говорим о направлении света, то в это, казалось бы, простое понятие мы вкладываем два разных содержания, во-первых, направление распространения волнового фронта (определяемое фазовой скоростью) и, во-вторых, направление распространения энергии волны (определяемое лучевой скоростью). Оба направления тождественно совпадают в изотропной среде, когда волновой фронт от точечного источника является сферическим и когда нормаль к волне совпадает с лучом, т. е. радиусом-вектором соответствующей точки волнового фронта. Поэтому обычно в оптике пользуются обоими терминами и понятиями как равнозначными. Иное дело в кристаллооптике. Если для обыкновенного луча в одноосном кристалле волновой фронт от точечного источника будет сферическим, то для необыкновенно-

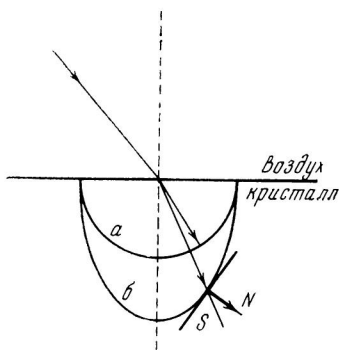


Рис. 28. Волновой фронт обыкновенного (а) и необыкновенного (б) лучей

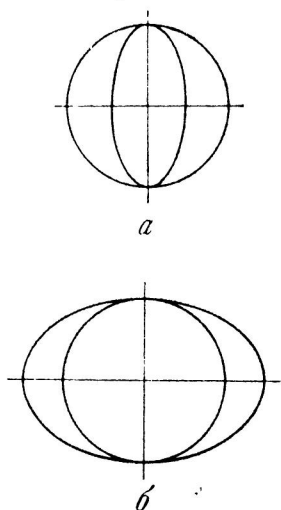


Рис. 29. Сечение двойных волновых поверхностей одноосных кристаллов: положительного (а) и отрицательного (б)

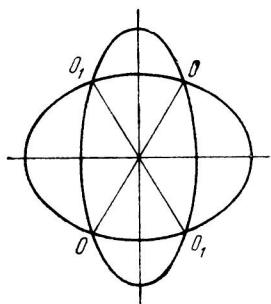


Рис. 30. Сечение двойной волновой поверхности двуосного кристалла

описан около нее — отрицательным. Примером первых является кварц, вторых — исландский шпат. Аналогичное графическое построение для двуосного кристалла позволяет получить двойную поверхность доволь-

равлениям, волновой фронт будет поверхностью эллипсоида вращения (рис. 28). А в двуосных кристаллах он будет еще более сложной поверхностью для обоих лучей. В соответствии с этим волновая нормаль N не будет совпадать с направлением луча S . Эти направления в кристалле не тождественны. Их нельзя смешивать и заменять одно другим. Однако между ними есть однозначная связь и любое описание с помощью волновых нормалей может быть переведено на «лучевой язык».

Можно графически представить картину двойного преломления в кристаллах с помощью двойных волновых (или лучевых) поверхностей. Откладывая по разным направлениям одноосного кристалла от начала координат волновые скорости для обыкновенного и необыкновенного лучей и проводя поверхности через отложенные точки, мы, очевидно, получим для обыкновенного луча сферу, а для необыкновенного — эллипсоид вращения. Последний касается сферы в двух точках, соответствующих совпадению обеих скоростей, т. е. определяющих оптическую ось. На рис. 29 показано сечение этой двойной поверхности плоскостью, в которой лежит оптическая ось. Если для какого-то кристалла эллипсоид вписан в сферу, такой кристалл принято называть положительным, если

но сложной формы; некоторое представление о ней дает рис. 30, где схематически изображено сечение этой двойной поверхности плоскостью оптических осей. В точках O , O_1 , соответствующих этим осям, скорости обоих лучей совпадают.

Вместо двойных поверхностей можно строить одинарные, заключающие в себя равноценную информацию. Эта поверхность, называемая индикатрисой, строится таким образом, что в плоскости, перпендикулярной любому направлению луча, откладываются от центра координат по двум взаимно перпендикулярным направлениям обе величины — обыкновенная и необыкновенная (скорости или показатели преломления). Индикатриса одноосных кристаллов представляет собой эллипсоид вращения, а индикатриса двуосных — эллипсоид с тремя различными по длине главными осями.

Возможны и другие графические (волновые и лучевые) представления двойного преломления. Однако все это многообразие не имеет принципиального значения, служит лишь для удобства вычислений при решении задач разного типа и базируется на одних и тех же физических основах.

Очевидно, двойное преломление света в кристаллах можно использовать для превращения естественного света в поляризованный. Сами расщепившиеся в кристалле компоненты линейно поляризованы. По выходе из плоско параллельной пластинки кристалла они пойдут параллельно. Стоит задиафрагмировать одну из них, и, казалось бы, задача решена. Однако это простое решение наталкивается на большие трудности. Дело в том, что линейное расхождение лучей в кристалле очень мало.

При ничтожном линейном расхождении и конечной ширине пучков разделить их не так-то просто. Для этого нужны очень узкие световые пучки, но такие пучки несут очень мало света.

Впервые Николь предложил остроумное устройство, использующее не линейное расхождение лучей, а различие их показателей преломления. Оно получило название призмы Николя (очень часто его называют просто николем) и его принцип стал одним из основных в конструкции поляризационных оптических приборов.

Призма Николя схематически изображена на рис. 31. Призма из исландского шпата разрезается по линии

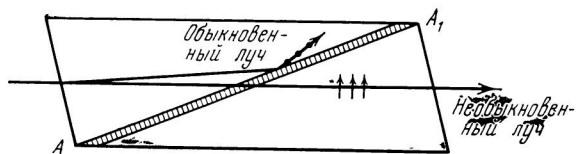


Рис. 31. Призма Николя

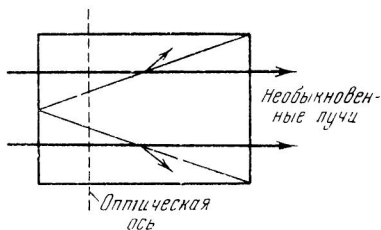
AA_1 и склеивается специальным клеем — канадским бальзамом. Дело не в том, что канадский бальзам хороший клей, а в том, что его показатель преломления $n = 1,55$ имеет промежуточное значение между показателями преломления обыкновенного ($n_0 = 1,658$) и необыкновенного ($n_e = 1,486$) лучей, идущих в призме в указанном на чертеже направлении. Следовательно, на границе склеивающего слоя первый падает из более оптически плотной среды на менее плотную и при соответственно выбранном угле падения (который и предусмотрен в призме Николя) испытает полное внутреннее отражение и через призму не пройдет. После отражения он упадет на зачерненную боковую поверхность, где и поглотится. Необыкновенный же луч ни при каком угле падения не может на этом слое испытать полного внутреннего отражения, потому что он падает из среды менее оптически плотной на среду более плотную. Поэтому он пройдет сквозь призму. Вышедший свет будет, таким образом, линейно поляризован.

Призма Николя сыграла в оптике большую роль и пользуется заслуженным почетом. Но ряд недостатков, связанных, в частности, с наклоном входной и выходной поверхностей, заставил ее уступить место другим, более совершенным призмам. Однако, во-первых, все они основаны на идее Николя, а, во-вторых, по традиции часто тоже называются николями. «Николь» и «поляризационная призма» — почти синонимы.

Различных поляризационных призм существует довольно много. Перечислим здесь только некоторые.

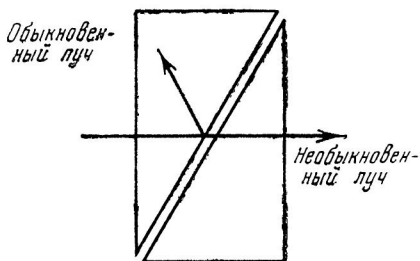
Призма Аренса (рис. 32) состоит из трех призм из исландского шпата, склеенных канадским бальзамом, как показано на рисунке. Там же показано положение оптической оси и ход лучей. Это очень хорошая призма. Она обладает высокой поляризующей способностью и большим рабочим полем.

Рис. 32. Призма Аресса



В ультрафиолетовой области спектра непригодны призмы, склеенные канадским бальзамом, который сильно поглощает ультрафиолетовые лучи. В этой области применяются призмы с воздушной прослойкой или склеенные прозрачными для ультрафиолетовых лучей веществами — глицерином, некоторыми маслами. Примером может служить призма Глана — Фуко (рис. 33). В ней две призмы из исландского шпата отделены друг от друга воздушным зазором. Оптические оси обеих призм перпендикулярны падающему лучу и плоскости чертежа.

Рис. 33. Призма Глана — Фуко



Другой тип поляризационных призм, в отличие от николей разных типов, представляет собой такую комбинацию призм, которая пропускает не один из расщепившихся в кристалле лучей, а оба, но разводит их под возможно большим углом. Из них наиболее известна призма Волластона (рис. 34). Она составлена из двух кусков исландского шпата, склеенных канадским бальзамом. Расположение оптических осей и ход лучей ясны из рисунка. Однако получаемое в этой призме угловое расхож-

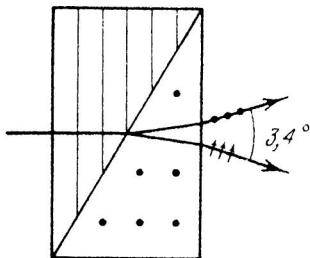


Рис. 34. Призма Волластона

дение взаимно перпендикулярно поляризованных лучей сравнительно невелико. Оно составляет всего $3,4^\circ$.

Значительно больший угол расхождения дает призма Аббе (рис. 35). Она состоит из центральной равносторонней призмы из исландского шпата 2 с оптической осью, параллельной преломляющему ребру, и двух стеклянных призм 1. Необыкновенный луч проходит через призму без отклонения, обыкновенный — отклоняется на

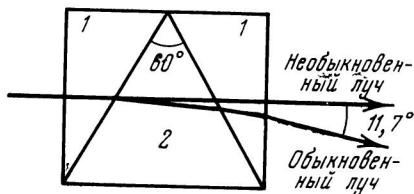


Рис. 35. Призма Аббе

$11,7^\circ$. Увеличивая преломляющий угол центральной кристаллической призмы до 90° , можно достигнуть угла расхождения лучей почти в 23° .

Итак, если на пути естественного луча поставить любую поляризационную призму типа николя, то из нее выйдет линейно поляризованный свет. Если далее на его пути поместить второй николю, то результат будет зависеть от взаимной ориентации обеих призм. Если их главные плоскости (т. е. направления пропускаемых колебаний электрического вектора) будут параллельны, то интенсивность прошедшего через обе призмы луча будет наибольшей. Если же эти направления будут перпендику-

лярны друг другу, то через вторую призму свет не пройдет вовсе. Такое положение призм называют скрещенным.

В промежуточном случае, когда эти направления составляют между собой некоторый угол α , интенсивность прошедшего света будет пропорциональна $\cos^2 \alpha$. В этом легко убедиться (рис. 36), разложив амплитуду колебаний электрического вектора A луча, прошедшего через первый николю, на две компоненты — параллельную и перпендикулярную направлению колебаний A_1 , пропускаемых вторым николем, сведя таким образом задачу к

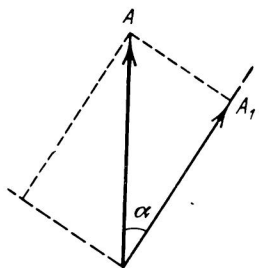


Рис. 36. К закону Малюса

двум предыдущим и учитывая, что интенсивность, характеризующая энергию луча, пропорциональна квадрату амплитуды колебаний электрического вектора. Этот закон впервые был установлен Малюсом и носит его имя.

Первый николю играет роль поляризатора, второй — анализатора (аналогично соответствующим зеркалам в приборе Нерремберга). Совокупность этих элементов является главной частью многих поляризационных приборов и установок.

Полезно отметить особенности двойного преломления в кристалле (например, одноосном) в том случае, если падает на кристалл свет не естественный, а линейно поляризованный. Легко понять, что результат будет зависеть от азимута его поляризации. Когда он будет поляризован под 45° к главной плоскости, то в кристалле возникнут оба преломленных луча — обыкновенный и необыкновенный — с одинаковой интенсивностью. Если же электрический вектор падающего луча совпадает по направлению с электрическим вектором обыкновенного (или необыкновенного) луча, то в кристалле возникнет соответственно

только один из этих лучей. Такие азимуты поляризации падающего света называют унирадиальными. В этих случаях нет двойного преломления, хотя свет идет не по оптической оси. При всех других азимутах в кристалле идут оба луча, но с различной интенсивностью.

С помощью двойного преломления можно также получить свет, циркулярно и эллиптически поляризованный. Предназначенные для этого устройства носят общее название фазовых пластинок.

Возьмем плоскопараллельную пластинку, вырезанную из одноосного кристалла (например, кварца) так, что ее поверхность параллельна оптической оси. Ориентируем ее в вертикальной плоскости так, чтобы оптическая ось была вертикальна, и пропустим через нее в горизонтальном направлении (перпендикулярно пластинке) монохроматический луч линейно поляризованного света, для чего предварительно пропустим этот луч через николю. Николь ориентируется так, чтобы направление пропускаемых световых колебаний составляло угол 45° с вертикалью. Тогда в пластинке возникнут два луча — необыкновенный (поляризованный вдоль оптической оси) и обыкновенный (поляризованный перпендикулярно оси). Интенсивность их одинакова. Распространяются они с разной скоростью, так как имеют разные коэффициенты преломления. В результате эти лучи при прохождении пластинки наберут разность хода (или разность фаз), величина которой зависит от материала и толщины пластинки. Следовательно, в результате сложения этих лучей по выходе из пластинки мы получим в общем случае свет, эллиптически поляризованный (см. главу III).

Здесь важно отметить, что необходимым условием является линейная поляризация падающего луча. Если бы падал луч естественный, то возникшие в пластинке компоненты были бы некогерентны и эллиптической поляризации на выходе мы бы не получили. Подробнее об этом будет сказано в главе VI.

Если подобрать такую толщину пластинки, чтобы разность хода двух лучей составила четверть длины волны (что соответствует разности фаз $\pi/2$), то вышедший свет будет поляризован по кругу. Такая пластинка так и называется «пластинка в $1/4$ волны». Кварцевая пластинка в $1/4$ волны, например, должна иметь толщину 15 микрон (для желтого света пламени натрия). Изготовление вы-

сококачественных пластинок столь малой толщины — довольно трудная задача, поэтому на практике пользуются более толстыми пластинками, дающими разность хода $(k\pi + 1/4)\lambda$, где k — некоторое целое число. Очевидно, что пластинка в $1/4$ волны дает на выходе циркулярно поляризованный свет только в том случае, когда электрический вектор падающего света составляет с оптической осью угол 45° . При других ориентациях электрического вектора интенсивность обыкновенного и необыкновенного лучей будет различной и выходящий свет поляризован эллиптически, причем одна ось эллипса будет горизонтальной, другая — вертикальной.

С другой стороны, если не менять ориентации падающего электрического вектора, но варьировать толщину пластинки (или брать пластинки из разных материалов), меняя этим разность хода, мы также получим на выходе эллиптически поляризованный свет. Если подобрать такую толщину пластинки, чтобы разность хода стала равной $1/2\lambda$ («пластинка в полволны»), то на выходе получим свет, вновь линейно поляризованный под углом 45° , но в дополнительном квадранте (рис. 37).

Кроме кварца и исландского шпата для изготовления фазовых пластинок часто употребляют слюду, из которой расщеплением можно легко получать однородные тонкие пластинки. Хотя слюда не одноосный, а двуосный кристалл, смысл вышеприведенных рассуждений в принципе сохраняется. Кроме кристаллов с успехом применяются пленки ориентированных органических полимеров, также обладающие двойным преломлением. Прекрасные фазовые пластинки можно, например, изготовить из наг-

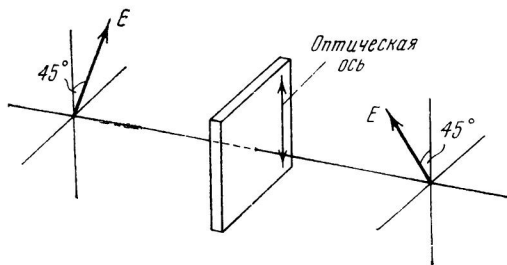


Рис. 37. Пластинка в $1/2$ волны

ретьх и растянутых в определенном направлении пленок поливинилового спирта.

По самому определению пластинки в $\frac{1}{4}$ волны или в $\frac{1}{2}$ волны являются таковыми только для определенной длины волны, т. е. они являются хроматичными (избирательными к цвету). Так, пластинка в $\frac{1}{4}$ волны только определенный монохроматический свет будет превращать в циркулярно поляризованный, а свет остальных длин волн — в эллиптически поляризованный, причем с различной эллиптичностью.

Создание ахроматических фазовых пластинок — задача довольно трудная. Однако в отдельных конкретных случаях ее удастся решить. Например, можно компенсировать хроматизм одной пластинки с помощью другой (из другого материала). Особенно успешно это удастся с помощью фазовых пластинок пленочного типа. Дело в том, что при растяжении различных органических полимерных пленок в них возникает двойное преломление разного знака (одни аналогичны положительным одноосным кристаллам, другие — отрицательным). Хорошие результаты дает, например, комбинация растянутых пленок ацетата целлюлозы и нитрата целлюлозы. Пленки при этом взаимно ориентируются так, чтобы направления наибольших показателей преломления были скрещены. Тогда «нормальный» хроматизм ацетата целлюлозы компенсируется «аномальным» хроматизмом нитрата целлюлозы. Другой способ достижения ахроматичности — комбинация нескольких кристаллических пластинок (например, трех слюдяных) с различной ориентацией, специально подобранной так, чтобы максимально скомпенсировать хроматизм (в указанном примере удалось добиться почти полного ахроматизма в широкой спектральной области от 4000 до 7800 Å, охватывающей весь видимый свет). Наконец, применяются вместо одной пластинки специальные ахроматические наборы пластинок, позволяющие добиться ахроматизма для ряда дискретных длин волн.

До сих пор мы говорили о линейном двойном преломлении, когда с разной скоростью в данной среде распространяются лучи с разной линейной поляризацией. Кроме него возможно также циркулярное (и эллиптическое) двойное преломление. В этом случае с разной скоростью в среде распространяется правоциркулярно и левоциркулярно поляризованный свет и между ними воз-

никает определенная разность хода. Оказалось, что этим свойством обладают не только кристаллы, но и некоторые жидкости, и физическая причина явления может лежать не только в структуре кристаллической решетки, но и в особенностях строения молекул таких веществ. Об этой стороне дела подробнее будет речь ниже. Сейчас же постараемся понять, в чем будет состоять результат двойного циркулярного преломления.

Пусть на обладающую интересующим нас свойством среду падает линейно поляризованный свет. Мы знаем (см. главу III), что его можно представить как суперпозицию двух циркулярно поляризованных волн — правой и левой, совпадающих по фазе. Пройдя определенный путь в циркулярно двупреломляющей среде, эти две волны наберут определенную разность хода. Следовательно, по выходе из среды их суперпозиция даст линейно поляризованный свет с иным азимутом электрического вектора, чем был у входящего света. Таким образом, окончательным результатом является поворот направления поляризации линейно поляризованного света. Поэтому явление и получило название вращения плоскости поляризации. Среды, обладающие этим свойством, называют оптически активными.

Аналогично линейным фазовым пластинкам из таких сред могут быть сконструированы циркулярные и эллиптические фазовые пластинки. Например, пластинка, вырезанная из кристалла кварца параллельно оптической оси, является линейной, перпендикулярно оси — циркулярной, наклонно к оси — эллиптической. Циркулярные и эллиптические фазовые пластинки можно делать из многих других кристаллов, вырезая их соответствующим образом.

Можно экспериментально убедиться, что комбинация двух линейных фазовых пластинок в $1/2$ волны, ориентированных так, что их оси составляют друг с другом угол в 45° , действует как циркулярная пластинка в $1/4$ волны. Эта комбинация носит название трансцендентной пластинки.

Для оценки действия фазовых пластинок удобным и полезным является метод, основанный на использовании сферы Пуанкаре (см. главу III). В принципе этот метод прост. Прежде всего на сфере нужно найти точку P , определяющую поляризацию луча, падающего на пластинку

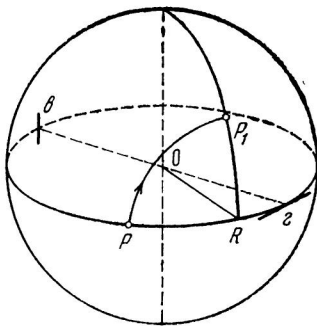


Рис. 38. Применение сферы Пуанкаре

(рис. 38). Затем нужно определить ось поворота сферы и угол поворота, адекватного действию фазовой пластинки на луч. Осью вращения является радиус-вектор, проведенный из центра сферы в точку R на экваторе, в которой направление линейной поляризации совпадает с направлением оси наибольшей скорости (т. е. наименьшего коэффициента преломления) пластинки. Угол поворота сферы должен быть равен сдвигу фазы в пластинке. Сфера вращается по часовой стрелке для наблюдателя, находящегося на продолжении радиуса-вектора. Новое положение точки P (P_1), отнесенное к начальному положению сферы, определяет поляризацию выходящего луча.

Вращение можно осуществлять с помощью трехмерной модели или стереографических проекций. Часто для качественного решения задачи достаточно схематического рисунка.

Рассмотрим знакомый уже нам пример. Электрический вектор линейно поляризованного падающего света направлен под 45° к оси наибольшей скорости линейной пластинки в $1/4$ волны. Это значит, что по экватору угловое расстояние между точками P и R составляет 90° . Угол поворота сферы также должен равняться 90° ($\pi/2$, что соответствует $\lambda/4$). Легко сообразить, что после поворота точка P_1 совпадет с полюсом. Следовательно, пластинка превращает линейно поляризованный свет в циркулярно поляризованный.

Особенно удобен метод сфeры Пуанкаре, когда нужно оценить результат последовательного действия на луч нескольких фазовых пластинок. Например, в случае трех пластинок надо последовательно совершить повороты сфeры вокруг трех радиусов-векторов R_1 , R_2 , R_3 , что даст возможность определить поляризацию выходящего луча P_3 , не рассматривая детально промежуточных лучей P_1 и P_2 .

С другой стороны, сфeра Пуанкаре помогает решать обратные задачи — определять, какими пластинками можно превратить одну заданную поляризацию луча в другую, тоже заданную.

Выше шла речь о естественном двойном преломлении — о явлении, которое определяется природными свойствами используемых веществ. Однако двойное преломление можно вызывать и искусственно. Действительно, причина двойного преломления кристаллов лежит в их анизотропии. Поэтому следует ожидать, что и некристаллические тела (жидкие или аморфные), в которых анизотропные свойства искусственно созданы, также должны в той или иной степени быть двупреломляющими. Выше уже приводился пример растянутых полимерных пленок. Вообще по своим свойствам такие среды вполне аналогичны тем веществам, в которых наблюдается поляризованная люминесценция при изотропном возбуждении.

Анизотропия прозрачных аморфных тел (например, стекол) может быть создана механической деформацией (сжатие, растяжение и т. д.). Действительно, такие стекла, помещенные между скрещенными николями, просветляют поле, причем наблюдаемая картина однозначно связана с распределением деформаций в стекле.

В потоке жидкости оптическая анизотропия возникает вследствие двух причин: ориентации частиц и их растяжения. При этом скорость потока должна быть неоднородной, иначе жидкость будет перемещаться, как целое, и никакой деформации в ней не будет. Двойное преломление света в потоке жидкости называется эффектом Максвелла. Ему посвящены многочисленные экспериментальные и теоретические исследования. Относительная роль ориентации и растяжения частиц различна в разных жидкостях и зависит от свойств и структуры молекул. Так, в случае длинных палочкообразных молекул главную роль играет эффект ориентации. Напротив, для глобуляр-

ных частиц большее значение имеет растяжение (фотоэластический эффект).

Квазикристаллическими свойствами, упорядоченным и ориентированным расположением молекул обладают многие элементарные биологические объекты: волокна, отдельные части клеток, хлоропласты и т. д. По-видимому, это одно из фундаментальных свойств живого. Структура их сложнее кристаллической, дело здесь не сводится к простой периодичности. Существуют структуры, включающие в себя другие структуры как элементы. Как правило, следствием этого является сложная анизотропия и, следовательно, сложная картина двойного преломления, меняющегося в процессе деятельности структур и различного в разных частях этих структур.

Оптическая анизотропия в прозрачных изотропных веществах (например, жидкостях) может быть создана также с помощью электрического и магнитного полей. Электрическое поле ориентирует молекулы, обладающие собственным дипольным моментом, в преимущественном направлении. Полной ориентации не достигается потому, что всегда существует противодействующий фактор — хаотичное тепловое движение. По этой причине эффект сильно зависит от температуры. Двойное преломление жидкостей в электрическом поле называется эффектом Керра. Он весьма различен в разных жидкостях, очень многие вообще им не обладают. Одной из самых эффективных является нитробензол.

Если стеклянную кювету K , наполненную нитробензолом, поместить между скрещенными николями N_1 и N_2 (рис. 39) и с помощью электродов наложить на нее электрическое поле, то наступит просветление. Оно будет наибольшим, когда направление напряженности поля составляет угол 45° с главными плоскостями николей. При выключении поля затемнение восстанавливается. Нитробензол в электрическом поле ведет себя как фазовая пластинка, потому что в нем вследствие возникающей анизотропии световые волны с электрическими векторами, параллельными напряженности наложенного поля и перпендикулярными ему, распространяются с разной скоростью. Между ними возникает разность хода, величина которой пропорциональна квадрату напряженности поля (следовательно, не зависит от направления последнего) $\Delta n = kE^2$ (k — постоянная Керра). Поэтому линейно по-

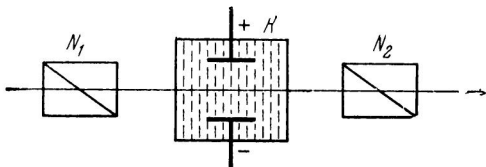


Рис. 39. Схема наблюдения эффекта Керра

ляризованный луч после прохождения через кювету становится в общем случае эллиптически поляризованным и частично проходит через второй николю — анализатор.

Очень важной особенностью эффекта является его практическая безынерционность — возникновение и исчезновение двойного преломления при включении и выключении поля происходит за время 10^{-9} — 10^{-10} секунд. На этом основаны его важные научные и технические применения, о которых будет сказано в главе X.

Аналогичный эффект наблюдается и в кристаллах, например, в электрическом поле кубический кристалл может стать двупреломляющим, а в одноосном может возникнуть двупреломление вдоль оптической оси. В одних кристаллах возникающая разность хода, так же как в жидкостях, пропорциональна квадрату напряженности поля (в этих случаях явление по-прежнему называют эффектом Керра), в других она пропорциональна просто напряженности поля (эффект Покельса) — это зависит от строения решетки кристалла. Для практических применений эффекта кристаллы удобнее, чем жидкости, ибо в них меньше сказывается влияние температуры и они стабильнее в работе.

Аналогичным образом возможно создание искусственной анизотропии и с помощью магнитного поля. Если анизотропные молекулы (хаотически расположенные в среде) имеют постоянный магнитный момент, то наложение сильного магнитного поля ориентирует их определенным образом относительно этого внешнего поля. Среда становится двоякопреломляющей. Явление носит название эффекта Коттона — Мутона, по именам его первооткрывателей.

Возникающая разность хода пропорциональна квадрату напряженности магнитного поля.

Этот эффект много слабее, чем эффект Керра, и поэтому гораздо реже применяется в научно-технических целях.

3. ДИХРОИЗМ И ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Термин «дихроизм» означает зависимость поглощения света данным телом от поляризации света. Происхождение термина связано с тем, что само явление зависит от длины волны поглощаемого света (т. е. обладает дисперсией), поэтому тело по разным направлениям оказывается различно окрашенным. Легко понять, что зависимость поглощения от поляризации влечет за собой зависимость и от направления света. С этой точки зрения больше подходит реже употребляемый термин «плеохроизм» (многоцветность), чем «дихроизм» (двухцветность).

Оба термина не особенно удачны потому, что, во-первых, никак не отражают физической сущности явления, а во-вторых, неоднозначны, ибо такие, не имеющие никакого отношения к поляризации, но связанные с изменением цвета факты, как, например, зависимость цвета раствора от его концентрации и т. п., тоже называют дихроизмом или дихроматизмом.

Однако из песни слова не выкинешь — термин «дихроизм» в указанном вначале смысле укоренился в литературе глубоко и, по-видимому, окончательно.

Дихроизм — анизотропия поглощения — имеет причиной анизотропное строение поглощающего тела. Следует поэтому ожидать, что этим свойством должны в той или иной степени обладать те среды, которым свойственно и двойное преломление света. Опыт показывает, что так оно и есть. Впервые дихроизм был открыт в начале XIX века на монокристаллах полудрагоценного минерала турмалина. Одноосный турмалин обладает двойным преломлением, а кроме того, очень сильно поглощает один из преломленных лучей (обыкновенный). В результате этого даже тонкая пластинка турмалина, когда на нее падает луч естественного света, пропускает линейно поляризованный луч.

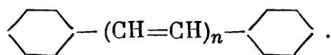
Формально дихроизм кристаллов можно описывать (в полной аналогии с двойным преломлением) с помощью индикатрис анизотропного поглощения. Они представля-

ют собой в общем случае трехосные эллипсоиды. Ось любого эллиптического сечения выражает коэффициент поглощения света, распространяющегося нормально к этому сечению и поляризованного параллельно этой оси. Очевидно, будут два круговых сечения, по нормальям к которым дихроизм отсутствует. По аналогии с оптическими осями эти направления называют монохричными осями.

Если индикатриса представляет собой эллипсоид вращения, то два круговых сечения сливаются в одно. Таким образом, в отношении дихроизма, как и в отношении двойного преломления, кристаллы могут быть двуосными или одноосными.

Дихроизм обнаруживают не только кристаллы, но и многочисленные некристаллические тела, обладающие естественной или искусственно созданной анизотропией. Отдельные молекулы вещества, особенно сложные молекулы, как правило, анизотропны в отличие от атомов, в которых электронные оболочки имеют приблизительно сферическую форму. Поэтому атомы изотропны, следовательно, их невозможно ориентировать. Анизотропное тело (кристаллическое) из них можно составить, только располагая с различной периодичностью по разным кристаллографическим направлениям. Такой порядок и характеризует все системы атомных и ионных кристаллов, кроме изотропных кубических.

В молекулах же электроны обладают различной способностью смещаться в разных направлениях под действием электрического поля поглощаемой световой волны. Например, в случае органических молекул с длинными цепочками конъюгированных π -электронов (о которых уже была речь в связи с поляризованной люминесценцией) световая волна, поляризованная вдоль линии сопряженных связей, будет поглощаться гораздо сильнее, чем волна, поляризованная в перпендикулярном направлении. Типичным примером таких соединений могут служить дифенилполиены



Таким образом, можно сказать, что осциллятор поглощения ориентирован в молекуле вдоль направления цепочки π -электронов.

Если молекула обладает способностью к флуоресценции, то так же будет направлен и ее осциллятор излучения. Очевидно, однако, что среда, состоящая из таких молекул, не будет в целом обладать дихроизмом, если молекулы в ней не ориентированы, а их осцилляторы хаотично направлены в разные стороны. Таковы жидкости, молекулярные пары, аморфные стеклообразные тела.

Дихроизм появится, если каким-либо образом ориентировать в каком-то избранном направлении все или значительную часть молекул. Для этого пригодны те же способы, что и для возникновения спонтанной поляризации люминесценции (молекулярные кристаллы, растянутые пленки, ориентация в потоке и др.). Это и понятно, ибо речь идет о весьма сходных по своему физическому механизму явлениях. Эти способы уже описаны в главе IV. Здесь мы не будем повторяться, отметим только некоторые специфические явления, а также такие методы ориентации, которые нашли практические применения.

Молекулярные кристаллы обладают как частично поляризованной люминесценцией, так и некоторой степенью дихроизма. Степенью дихроизма называют величину $D = (k_{\parallel} - k_{\perp}) / (k_{\parallel} + k_{\perp})$, где k_{\parallel} и k_{\perp} — коэффициенты поглощения света, поляризованного во взаимно перпендикулярных направлениях (обычно k_{\parallel} — максимальный, а k_{\perp} — минимальный).

Частичный (а не полный) дихроизм молекулярных кристаллов объясняется, как и частичная поляризация люминесценции, тем, что молекулы в молекулярных кристаллах не все ориентированы одинаково, а имеют несколько (часто 2) типов ориентации. Однако в спектре поглощения молекулярных кристаллов обнаружены и такие полосы, которые обладают полным 100%-ным дихроизмом, причем электрический вектор поглощаемого света направлен по одной из кристаллографических осей. Таких полос немного, и они свойственны только кристаллам; их не бывает у тех же молекул ни в растворах, ни в парах. Это полосы поглощения принадлежат не отдельным молекулам, а кристаллу в целом, потому-то их поляризация и определяется симметрией всего кристалла, а уже не ориентацией молекул в его решетке. Это очень интересный результат, наглядно показывающий возникновение в кристаллической фазе принципиально новых свойств, которых нет у отдельных элементов (молекул),

из которых кристалл образован. Коллективные возбужденные состояния кристалла, возникающие при таком поглощении света, получили название экситонов. Они представляют большой интерес для современных исследований по физике твердого тела.

Экситонный дихроизм кристаллов представляет собой, таким образом, специфический тип дихроизма. Он встречается также в пленках некоторых полимеризующихся красителей (псевдоизоцианиновых), которые можно рассматривать как одномерные (линейные) молекулярные кристаллы. В таких полимерах поглощается свет, поляризованный вдоль оси полимеризации.

Явлению частичной поляризации люминесценции изотропных сред (например, жидких растворов) при возбуждении поляризованным светом до некоторой степени аналогично явление, называемое фотодихроизмом. Оно состоит в возникновении в изотропной среде дихроизма в результате предварительного воздействия на эту среду поляризованного света, вызывающего некоторые фотохимические превращения молекул вещества и связанные с этим изменения их коэффициента поглощения. Этот поляризованный свет будет преимущественно «выводить из строя» молекулы определенной ориентации, что и приведет к появлению анизотропии относительно последующего поглощения света.

Очевидно, что дихроизм может быть использован на практике для получения линейно поляризованного света из естественного.

Примером дихроичных поляризаторов могут служить монокристаллические пластинки уже упоминавшегося турмалина. В прошлом веке именно они часто применялись во многих исследованиях и сыграли свою роль при открытии ряда поляризационных явлений. Однако широкого применения, особенно в практике, такие монокристаллы найти не смогли вследствие их редкости и дороговизны, а также некоторых недостатков, таких, как узкая спектральная область пропускания и некоторые другие.

Тем не менее именно дихроичные поляризаторы «пробили дорогу» поляризованному свету в практику и в широкие экспериментальные исследования. Но это были не монокристаллы, а анизотропные пленки, активированные (пропитанные) анизотропными же молекулами или

микрористаллами, — так называемые пленочные поляроиды, впервые изобретенные в 20-х годах нашего столетия.

Если полимерную пленку, состоящую из весьма длинных, линейных, вытянутых макромолекул полимера, в нагретом и размягченном состоянии подвергнуть сильному механическому растяжению в определенном направлении, то полимерные молекулы ориентируются своими длинными осями вдоль направления растяжения и пленка, таким образом, становится анизотропной. Таким способом удастся получать очень высокую, близкую к 100%, анизотропию. Если при этом в полимере растворено вещество, молекулы которого анизотропны по форме (лучше всего, если они тоже линейны) и обладают высоким дихроизмом, то упорядоченная, ориентированная матрица макромолекул полимера, образующаяся при растяжении, ориентирует и эти примесные молекулы. Тогда они образуют дихроичную макроскопическую систему. Пленка станет поляризатором света.

Таким путем изготавливаются поляроиды высокого качества (до 99,99 % поляризации прошедшего света) и достаточно большого размера, что особенно важно для многочисленных практических применений, о которых будет речь в главе X.

Направление осциллятора поглощения может не совпадать с длинной осью молекулы. В ряде случаев эти направления взаимно перпендикулярны. Соответственно электрический вектор пропускаемого света может быть ориентирован вдоль оси растяжения пленки или перпендикулярно ей в зависимости от структуры и свойств молекул активатора.

Чаще всего для изготовления поляроидов применяют полимер, называемый поливиниловым спиртом. Растяжение осуществляется, например, с помощью тянущих валов, вращающихся с разной скоростью. Для активирования применяются различные вещества и разные методы активации. Кратко расскажем о некоторых конкретных типах поляроидов.

Поляроиды, обозначаемые символом П, делаются из растянутой пленки поливинилового спирта, прокрашенной йодом, в насыщенном водном растворе последнего. В пленке образуются длинные цепочки полимерных дихроичных молекул комплексного соединения поливи-

ниловый спирт — йод. Эти поляроиды обладают хорошим пропусканием и высоким поляризующим действием в области спектра 5000—7000 Å, однако в коротковолновой части видимого спектра степень поляризации пропускаемого света уменьшается. Причина этого — уменьшение в этой области дихроизма комплексов. Следует иметь в виду, что каждое дихроичное вещество обладает собственным спектром дихроизма и для поляроидов, предназначенных для работы в определенной области спектра, необходимо подбирать активаторы с подходящим спектром.

Способ приготовления поляроидов К-типа состоит не в присоединении, а наоборот, в отщеплении от поливинилового спирта некоторых атомов методом каталитической гидратации. В результате часть поливинилового спирта превращается в дихроичный поливинилен, обладающий поглощением не только в видимой, но и в ультрафиолетовой области. Соответственно широкой является и спектральная область, в которой он может работать как поляроид.

Для сохранности и удобства в работе полимерные поляроидные пленки помещаются обычно между двумя защитными пластинками из стекла или изотропной пластмассы.

Широко применяются для создания поляроидов также различные органические красители, дихроичные молекулы которых ориентируются в растянутых пленках поливинилового спирта, целлофана и в других полимерных материалах. Это поляроиды L-типа. Их качество, однако, обычно ниже, чем у II- и К-поляроидов. Во-первых, они не дают столь высокой поляризации пропускаемого света, во-вторых, не всегда обладают достаточной светостойкостью. Но, с другой стороны, дихроичные красители, и в особенности их сочетания предоставляют большие возможности для создания хроматических поляроидов для заданных, даже достаточно узких участков спектра.

Вместо дихроичных молекул для ориентации в поляроидных пленках могут быть использованы и дихроичные анизотропные микрокристаллы. Дело в том, что выращивание больших однородных и высококачественных кристаллов представляет собой сложную и трудоемкую задачу. Микрокристаллы же многих веществ

легко получать, например, обычным осаждением из раствора. Удлиненной формы игольчатые микрокристаллики, обладающие дихроизмом, могут также с успехом ориентироваться в полимерных пленках при механическом растягивании. Наиболее применяемым для этой цели веществом является герпатит (периодидсульфат хинина). Его кристаллики имеют игольчатую форму, их ось наибольшего поглощения совпадает с осью иглы. При ориентации их в растягиваемой пленке, например, ацетата целлюлозы происходит ориентация игл вдоль оси растяжения пленки, следовательно, электрический вектор пропускаемого поляридом света будет перпендикулярен направлению растяжения. Такие поляриды обозначаются символом J. Кроме герпатита применяются микрокристаллы и некоторых других веществ, например дибензакридина.

Растягивание полимерных пленок — не единственный метод ориентации дихроичных молекул или микрокристаллов. На практике применяются также, например, метод анизотропной адсорбции на поверхности стекла или пластмассы. Преимущественное направление на поверхности создается путем предварительного трения бумагой или тканью.

Несомненно, что дальнейшие поиски приведут и к созданию новых типов поляридов с заданными специальными свойствами.

Повторяем, что только поляриды являются дешевым и массовым типом поляризаторов и в основном им обязаны многие практические применения поляризации света.

До сих пор речь шла о линейном дихроизме, т. е. о различном поглощении света с различной линейной поляризацией. Существуют также среды, обладающие циркулярным дихроизмом, т. е. по-разному поглощающие правоциркулярно и левоциркулярно поляризованный свет. Явление это было впервые открыто Коттоном.

Подобно тому, как линейное двойное преломление света и линейный дихроизм свойственны одним и тем же средам, вещества, обладающие циркулярным двойным преломлением, способны и к циркулярному дихроизму. Но в предыдущем параграфе было показано, что двойное циркулярное преломление по своим результатам тождественно вращению плоскости поляризации. Таким

образом, циркулярный дихроизм — это свойство веществ, обладающих одновременно естественной оптической активностью.

Поворот плоскости поляризации — это тоже изменение формы поляризации света при прохождении через вещество, и поэтому явление это непосредственно относится к предмету данной главы.

Естественной оптической активностью обладают очень многие тела: кристаллы (например, кварц), чистые жидкости (скипидар), растворы (широко известный пример — водный раствор сахара). Особенно много естественно активных веществ среди органических соединений. Вещества, вращающие плоскость поляризации в растворах и аморфных средах, всегда сохраняют эту способность и в кристаллическом состоянии. Более интересен такой случай, когда активность появляется только в кристалле, а молекулы того же соединения, но, например, в растворе ею не обладают. Здесь активность является специфическим коллективным свойством кристалла.

Величина угла поворота плоскости поляризации зависит от длины волны света; иными словами, вращение обладает дисперсией. Кроме того, как и следует ожидать, этот угол прямо пропорционален толщине слоя вещества, а в случае растворов — и их концентрации.

Если активность не слишком мала, то угол поворота легко измерить на простейшей установке (рис. 40). Если между скрещенными николями N_1 и N_2 поместить активное вещество A , то это вызовет просветление поля. Чтобы восстановить темноту, надо, очевидно, повернуть анализатор N_2 на угол φ , равный углу поворота плоскости поляризации P веществом A . Таким способом легко, например, убедиться, что пластинка кристалли-

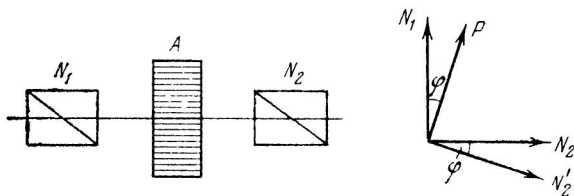


Рис. 40. Простейшая установка для измерения угла поворота плоскости поляризации

ческого кварца толщиной в один мм, вырезанная перпендикулярно оптической оси (так, что луч идет вдоль оптической оси и линейное двойное преломление исключено), вращает плоскость поляризации красного света на 15° , зеленого — на 27° , фиолетового — на 51° . Однако маленькие углы поворота таким простейшим способом измерить невозможно. Существует специальная чувствительная разнообразная аппаратура, с помощью которой можно измерять угол поворота с огромной точностью — до $0,001^\circ$.

Направление вращения меняется при изменении направления луча света. Направление вращения принято определять для наблюдателя, смотрящего навстречу лучу: правое вращение — по часовой стрелке, левое — против. Опыты с кварцем показали, что существуют две разновидности кварца — правовращающий и левовращающий. Далее было установлено, что это справедливо для всех естественно активных кристаллов и вообще естественно активных сред. Для кристаллов при этом непосредственно было наблюдеено, что правому и левому вращению соответствуют энантиоморфные формы монокристаллов, т. е. такие, которые преобразуются одно в другое путем зеркального отражения. Естественно то же предположить относительно молекул веществ, обладающих активностью в аморфном или жидком состоянии. Отсюда следует, что дисимметрия молекул и кристаллов играет важнейшую роль в причинах естественной активности. Следует отметить, что если составить среду (например, жидкую) на 50 % из правовращающей формы и на 50 % из левовращающей, то полученная смесь не способна вращать плоскость поляризации. Такие смеси называются рацематами.

Строгое рассмотрение влияния дисимметрии молекул на оптическую активность показало, что молекула может вращать плоскость поляризации только в том случае, если она не имеет ни центра, ни плоскости симметрии. Она может иметь только оси симметрии. Далее, молекула может по-разному отзываться на правоциркулярную и левоциркулярную поляризацию только с помощью какого-то механизма, улавливающего различные фазы волны в разных точках молекулы. Заметим, что в подавляющем большинстве оптических явлений размерами атомов и молекул можно пренебречь, так как они состав-

ляют примерно $0,001$ длины волны света. В случае же оптической активности такое пренебрежение невозможно. Это показывает, какой необычайно чувствительной к структуре молекул является естественная активность — гораздо чувствительнее всех других оптических явлений.

Оптическую активность можно довольно наглядно описать с помощью так называемой двухосцилляторной модели молекулы (рис. 41). Эта модель состоит из двух связанных, находящихся на некотором расстоянии d друг от друга и взаимно перпендикулярных электронных осцилляторов O_1 и O_2 . Пра-

вая и левая круговые волны будут действовать на такую модель по-разному. Например, правая будет смещать оба электрона в положительных направлениях, в то время как левая — один электрон в положительном, а второй — в отрицательном направлении.

Из-за наличия связи между электронами эти волны будут затрачивать разную энергию и распространяться в среде, образованной такими молекулами, с различной скоростью. Таким образом, возникает двойное циркулярное преломление, результатом которого и является поворот исходной плоскости поляризации.

В кристаллах, обладающих естественной оптической активностью, но построенных из неактивных молекул, подобная, но достаточно длинная система связанных осцилляторов может быть образована из линейных осцилляторов отдельных молекул. Соседние молекулы в решетке молекулярного кристалла имеют, как правило, различную ориентацию (см. главу IV) и между ними существует определенное взаимодействие (силы этого взаимодействия и обеспечивают само существование кристалла).

Особенности строения кристаллов, приводящие к появлению оптической активности, иллюстрируются следующим наглядным опытом. Если наложить друг на друга большое число тонких пластинок слюды так, чтобы у каждой следующей пластинки главное сечение было повернуто на определенный угол (каждый раз вправо

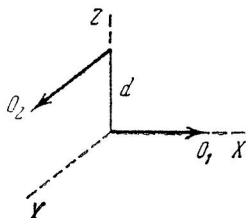


Рис. 41. Двухосцилляторная модель

или, наоборот, каждый раз влево) по сравнению с предыдущей, то такая стопа будет вращать плоскость поляризации соответственно вправо или влево.

Естественная оптическая активность служит тонким методом исследования строения молекул и кристаллов (см. главу VIII), а также находит важные практические применения (глава X).

Еще в середине XIX в. Фарадей открыл интересное явление, названное его именем, — вращение плоскости поляризации в неактивных телах, помещенных в магнитное поле. Направление луча при этом должно совпадать с направлением магнитного поля. Угол поворота пропорционален напряженности магнитного поля и длине пути света в веществе. Направление вращения, в отличие от естественной активности, не зависит от направления распространения света. Величина вращения очень различна в разных телах: весьма велика в ферромагнитных материалах (в которых опыты можно вести только в очень тонких прозрачных слоях) и, напротив, очень невелика в газах. Независимость направления вращения от направления света позволяет увеличить угол поворота путем многократного отражения от внутренних граней вещества, при этом результат равноценен значительному удлинению толщины слоя.

Сущность явления Фарадея тесно связана с явлением Зеемана (см. главу IV). Под действием магнитного поля частоты собственных колебаний в веществе, соответствующие правокруговой и левокруговой поляризациям (σ -компоненты), расщепляются, становятся различными. Это приводит к различию в коэффициентах преломления, т. е. к двойному циркулярному преломлению, в результате которого и возникает вращение плоскости поляризации в магнитном поле.

4. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ПРИ РАССЕЯНИИ СВЕТА

Для оптически однородной среды характерно прямолинейное распространение света, для идеальной плоской границы между двумя однородными средами — явления отражения и преломления. Если же среда неоднородна, то распространение света в ней будет сопровождаться его рассеянием. Под оптической одно-

родностью следует понимать одинаковое значение коэффициента преломления в разных точках среды, точнее говоря, в различных (очень малых) элементах объема вещества. Различия коэффициентов преломления могут создаваться как наличием посторонних частиц большего или меньшего размера, так и разным числом молекул чистого вещества в данном элементе объема (статистической локальной флуктуацией плотности). Последний случай называется молекулярным рассеянием света, а первый — рассеянием в мутных средах.

Отличие мутной среды от прозрачной можно пояснить следующим примером. Если в жидкость поместить мелкие осколки стекла, то свет будет отражаться в разные стороны на многочисленных поверхностях жидкость — стекло. Но если жидкость выбрать такую, чтобы ее коэффициент преломления был равен коэффициенту преломления стекла (хорошо подходит для этой цели, например, определенная смесь бензола и сероуглерода), то система будет оптически однородной. На упомянутых поверхностях рассеяния отраженного света не будет, потому что в оптическом смысле не будет самих этих поверхностей. Кстати, этот метод успешно применяется для определения коэффициентов преломления бесформенных кусочков прозрачных тел, в частности минералов.

Примеров природных мутных сред очень много: взвеси, суспензии, эмульсии — дым, туман, молоко и др. Их непрозрачность определяется рассеянием света в стороны.

Часто встречающимся примером молекулярного рассеяния света может служить критическая опалесценция — появление интенсивного рассеяния света, резкое помутнение однородной среды вблизи критической точки. Причина ее в резком возрастании числа локальных флуктуаций плотности вблизи этой точки.

В отличие от люминесценции рассеяние света представляет собой безынерционный процесс, оно не связано с возбуждением собственных колебаний (на квантовом языке — собственных уровней) атомов и молекул и не приводит к изменению длины волны и фазы рассеянного света.

Интенсивность рассеянного света сильно зависит от длины волны. Это можно объяснить следующим образом. Рассеянный свет — это вторичные электромагнитные волны, излучаемые в результате вынужденных коле-

баний электронов вещества, раскаченных электромагнитным полем падающего света. Амплитуда этих вторичных волн a пропорциональна изменению скорости вынужденного движения электрона (т. е. его ускорению). Чтобы лучше понять это, следует вспомнить, что неизменная скорость электрона соответствует постоянному току, а излучение волн дают только переменные электромагнитные поля. Скорость электрона пропорциональна частоте его колебаний (т. е. частоте вынуждающего света) — чем выше частота, тем быстрее должен двигаться электрон. А ускорение пропорционально квадрату частоты. Следовательно, $a \sim \omega^2$, а интенсивность рассеянного света $I \sim \omega^4$. Иными словами, она обратно пропорциональна λ^4 — зависимость очень резкая. Коротковолновый свет (сине-фиолетовый) рассеивается гораздо сильнее, чем длинноволновый (красный). Последний же по этой причине преимущественно проходит сквозь рассеивающую среду.

Именно этим объясняются голубой цвет неба и алые зори.

Рассеяние света может служить методом его поляризации. Если естественный свет падает на рассеивающую среду по направлению OY (рис. 42), то при наблюдении рассеянного света в перпендикулярном направлении OX будет обнаружена вертикальная линейная поляризация, так как компонента E_x является для данного направления продольной и не может вдоль него распространяться. Аналогично обстоит дело и для направления OZ . Если же падает линейно вертикально поляризованный свет, то в направлении OX по-прежнему будет рассеиваться вертикально линейно поляризованный свет, а в направлении OZ рассеянного света не будет.

Это можно продемонстрировать с помощью простого и убедительного опыта, схема которого показана на рис. 43. Призма николя N_1 поляризует свет от источника L линейно вертикально (a). Цилиндрическая стеклянная трубка T со стеклянными же торцами содержит мутную рассеивающую жидкость (например, воду со взвесью мелких частиц смолы). По направлению OX можно наблюдать рассеянный свет и с помощью анализатора N_2 убедиться в его линейной вертикальной поляризации, по направлению OZ рассеянного света увидеть не удастся. Легко сообразить, как изменится результат

Рис. 42. Поляризация
рассеянного света

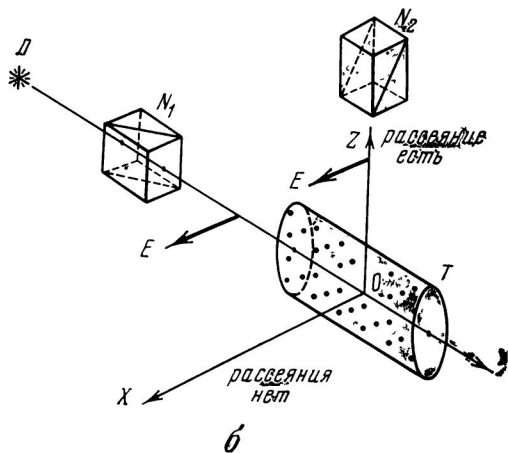
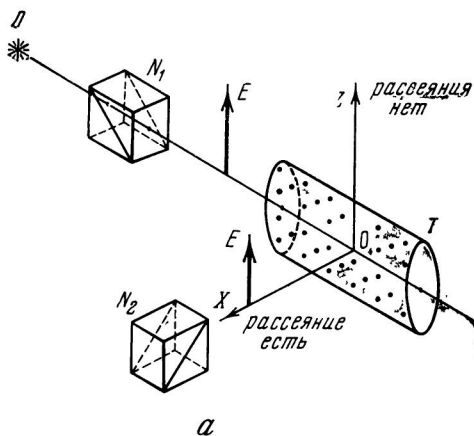
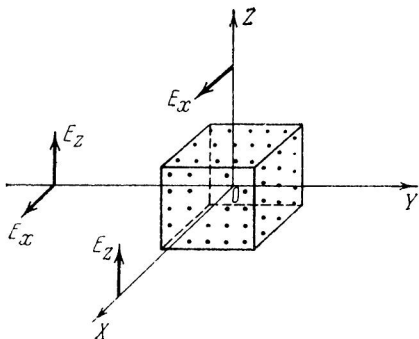


Рис. 43. Схема демонстрационного опыта по поляризации рассеянного света

опыта, если николь N_1 повернуть на 90° вокруг оси установки (б).

Гораздо эффективнее будет выглядеть этот опыт, если в сосуде добавочно растворить некоторое количество сахара. Сахар в растворе сильно вращает плоскость поляризации. Вертикально поляризованный при входе в трубку свет на некоторой глубине становится поляризованным горизонтально и, следовательно, не будет здесь рассеиваться вдоль OX . Светлые полосы будут для этого наблюдателя чередоваться вдоль трубки с темными. Поскольку же вращение плоскости поляризации обладает дисперсией, то светлые полосы для разных цветов будут получаться на различной глубине. Трубка будет казаться наполненной различными яркими, насыщенными красками.

Однако многочисленные экспериментальные работы показали, что поляризация рассеянного света обычно не бывает полной. Степень поляризации $P = (I_z - I_y) / (I_z + I_y)$ не достигает 100% иногда значительно. Величину $\Delta = 1 - P = 2I_y / (I_z + I_y)$ называют обычно деполяризацией рассеянного света. Для газов эта величина обычно по порядку величины составляет 10%, для жидкостей она значительно больше, в отдельных случаях достигает 80%. Объяснение этих фактов связано, конечно, с оптической анизотропией рассеивающих молекул, т. е. с тем обстоятельством, что электроны в молекулах смещаются с разной вероятностью по разным направлениям под действием электрического поля световой волны. Однако при рассеянии света, роль анизотропии молекул в известном смысле обратна той, которую она играет, например, в явлениях поляризованной люминесценции или дихроизма. Полная поляризация рассеянного света ($\Delta = 0$) будет иметь место только в случае полностью изотропных, сферически симметричных атомов или молекул (рис. 44, а). Ибо в отличие от дихроизма и поляризованной люминесценции причиной полной поляризации рассеянного под углом 90° света является природа самой электромагнитной поперечной световой волны (как и при поляризации при отражении под углом Брюстера), а вовсе не анизотропия и ориентация молекул. Именно поэтому анизотропия может приводить только к деполяризации, создавая в рассеянном свете компоненту I_y (рис. 44, б). Чем выше анизотропия

молекул, тем больше деполаризация. Поэтому явление можно использовать для исследования структуры молекул наряду с другими поляризационными методами. В среднем в растворе анизотропные молекулы создают изотропный хаос, но флуктуации анизотропии так же возможны, как и флуктуации плотности. Что касается прошедшего сквозь рассеивающую среду света, то очевидно, что в общем случае он частично поляризован и его интенсивность зависит от поляризации падающего света. По аналогии с дихроизмом это явление называют дитиндализмом (потому что рассеяние света в некоторых случаях носило название эффекта Тиндаля). Наряду с дихроизмом оно может применяться для исследования анизотропии различных сред. Например, с его помощью можно легко различить потоки жидкости, в которых взвешены изотропные или анизотропные частицы.

Более сложными законами, в том числе и поляризационными соотношениями, характеризуются некоторые специальные случаи рассеяния света. К ним относится, например, рассеяние на крупных частицах в коллоидных растворах.

Так, максимальная степень поляризации в этом случае наблюдается при углах, отличных от 90° . Своеобразны также свойства поляризации света, рас-

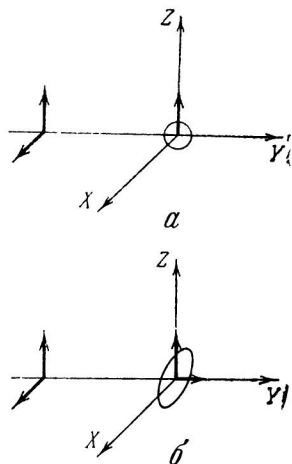


Рис. 44. Поляризация при рассеянии изотропными и анизотропными частицами

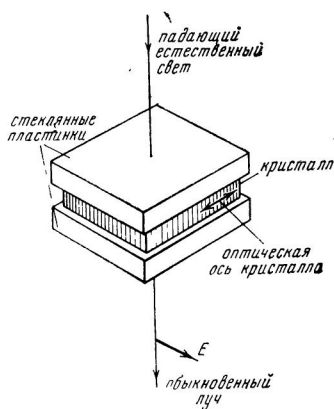


Рис. 45. Поляризатор Ямагути

сеянного неоднородной поверхностью. Законы рассеяния в этом случае вообще сильно отличаются от случая объемного рассеяния. Достаточно сказать, что интенсивность поверхностного рассеяния обратно пропорциональна не четвертой, а лишь второй степени длины волны.

Поляризация при рассеянии имеет фундаментальное значение в рентгеновской области спектра. Рентгеновское излучение можно поляризовать только с помощью рассеяния.

Все другие способы здесь неприменимы.

Не только поляризация рассеянного света, но и само рассеяние может применяться в поляризационных приборах. В некоторых двупреломляющих поляризаторах одна из компонент устраняется путем рассеяния ее в подходящей среде. Примером такого рассеивающе-двупреломляющего поляризатора является поляризатор Ямагути (рис. 45), в котором монокристалл нитрата натрия помещается (точнее говоря, выращивается) между двумя стеклянными пластинками, показатель преломления которых равен показателю преломления обыкновенного луча в кристалле.

Внутренние поверхности пластин, прилегающие к кристаллу, заматированы, наружные — отполированы. Если на такую трехслойную систему падает естественный свет, то обыкновенный луч проходит через нее без преломления, как сквозь однородную среду. Показатель же преломления необыкновенного луча в кристалле очень сильно отличается от показателя преломления стекла, поэтому необыкновенный луч практически полностью рассеивается во всех направлениях на внутренних заматированных поверхностях.

Кроме обычного рассеяния света, о котором до сих пор шла речь и при котором не происходит изменения частоты рассеиваемого света, существует и другой тип рассеяния, называемый комбинационным рассеянием света. В этом случае к частоте рассеиваемого света добавляются или вычитаются определенные частоты колебаний молекул или кристаллов, очень часто проявляющиеся и в инфракрасных спектрах поглощения.

В результате в спектре комбинационного рассеяния появляются новые линии (сателлиты), частоты которых представляют собой определенную комбинацию падаю-

щей частоты и колебательных частот. Линии комбинационного рассеяния часто поляризованы, причем поляризация определяется симметрией соответствующих колебаний в молекуле или кристалле.

Комбинационное рассеяние света является одним из самых важных методов исследования колебательных процессов в молекулах и структуры молекул. Изучение поляризации его линий также дает много важной информации о тонких деталях строения молекул и кристаллов.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ И ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

1. РОЛЬ ПОЛЯРИЗАЦИИ КОГЕРЕНТНЫХ ЛУЧЕЙ

Обычно если перекрываются несколько разных световых пучков, то в области перекрытия создаваемые ими освещенности аддитивно складываются. Если в комнате зажечь несколько ламп вместо одной, то освещение страницы книги, которую вы читаете, станет во столько же раз лучше. Но, с другой стороны, хорошо известно, что световые волны, как и всякие волны, могут интерферировать, т. е. усиливать или гасить друг друга в зависимости от соотношения их фаз. Почему же обычно интерференции не возникает? Дело в том, что для этого фазовое соотношение между волнами должно оставаться постоянным во времени в течение интервала, необходимого для наблюдения, т. е. достаточно длительного. А это условие никогда не выполняется для двух разных источников. Возбужденные атомы или молекулы испускают отдельные элементарные «порции» света за очень короткие интервалы времени — миллиардные доли секунды. Начальные моменты этих отдельных актов испускания в обычных источниках света (кроме лазеров) между собой никак не согласованы. Поэтому не только между лучами от разных источников, но и от разных точек одного источника света не может быть постоянной, не меняющейся со временем разности фаз. В каждый момент времени, где-то, в какой-то точке освещенного экрана волны совпадают по фазе, усиливают друг друга и дают большую освещенность. В каких то других точках, где они встречаются в противоположных фазах (т. е. со сдвигом фаз на половину периода), они друг друга ослабят (или даже полностью погасят, если их амплитуды равны) и дадут минимальную освещенность. Следовательно, в данный момент на экране будет определен-

ная интерференционная картина распределения ярко и слабо освещенных мест (определяемая геометрическим расположением экрана и источников). Но уже в следующий момент (через миллиардную долю секунды) картина будет совсем другой, а еще через мгновение — опять иной и так далее. Поэтому при любом способе наблюдения (визуальном, фотографическом, фотоэлектрическом) мы зафиксируем в этом случае равномерную освещенность всего экрана.

Стабильную интерференционную картину можно получить, если один пучок света от одной светящейся точки разделить на два (с помощью зеркала, призмы и т. п.), а затем вновь свести эти лучи на один экран.

Пройдя разные пути, эти лучи наберут определенную разность фаз. Она и будет определять интерференционную картину. Лучи, разность фаз между которыми постоянна, называются когерентными. Очевидно, что для того чтобы это условие могло соблюдаться, их длины волн должны быть одинаковы. На рис. 46 приведен пример: получение интерференционной картины на участке AB экрана \mathcal{E} от когерентных мнимых источников S_1 и S_2 , образованных с помощью двойного зеркала Z_1Z_2 , из единого реального источника S . Светлые и темные интерференционные полосы на экране будут, очевидно, геометрическими местами точек, разность расстояний от которых до S_1 и S_2 составляет целое число волн $n\lambda$ (для светлых полос) и нечетное число полуволн $n\lambda + \lambda/2$ (для темных полос). Следовательно, все эти полосы будут гиперболами. Светлые полосы для разных

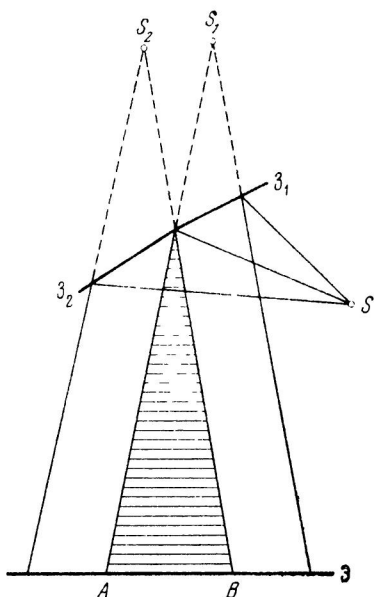


Рис. 46. Экспериментальное получение интерференционной картины

λ будут смещены одна относительно другой — интерференционная картина состоит из окрашенных полос. Исключением будет только, как легко понять, центральная полоса — прямая и белая.

Существует много способов получения когерентных лучей от одного источника. Очень часто встречается в природе, например, интерференционная картина, образованная лучами, отраженными от верхней и нижней поверхностей тонких пленок. Всем известные радужные полосы по поверхности луж, покрытых пленкой мазута, нефти или керосина, представляют собой именно такие интерференционные картины.

Когерентными, конечно, являются также лучи, образованные расщеплением падающего луча в кристаллах. Однако здесь-то мы и переходим к особенно интересующему нас вопросу.

Кроме когерентности очень важно и состояние поляризации интерферирующих лучей. Мы по существу молчаливо предполагали, что они линейно поляризованы в одной плоскости. Действительно, в общем случае это условие в когерентных лучах выполняется. Как мы уже знаем (см. главу IV), в каждом элементарном акте излучается поляризованный свет. Поскольку интерферируют лучи от одного источника, излученные в одних и тех же элементарных актах, то они в каждый момент и поляризованы одинаково и могут давать интерференционную картину. То, что в следующий момент оба они будут поляризованы в другой плоскости, не имеет значения. Конечно, интерференционная картина сохранится и в том случае, если оба когерентных естественных луча поляризовать в одной плоскости с помощью, например, николей или любым другим способом.

Если же два когерентных луча линейно поляризовать во взаимно перпендикулярных плоскостях, то они при встрече не создадут интерференционной картины. Именно этот случай мы имеем в результате двойного преломления луча в кристаллической пластинке. И в одноосных и в двуосных кристаллах расщепленные лучи будут поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях. Это, конечно, не единственный способ получения когерентных и взаимно перпендикулярно поляризованных колебаний. Достаточно поставить на пути любой пары когерентных лучей два николя, ориенти-

рованные друг относительно друга под углом 90° , чтобы получить тот же результат — отсутствие интерференционной картины и аддитивное сложение освещенностей. Стоит повернуть один из николей на 90° , как интерференционная картина восстанавливается. Впервые эти закономерности установили в начале XIX в. Араго и Френель. Принципиальное значение этих опытов состояло тогда в том, что они однозначно доказывали строгую поперечность световых волн и полное отсутствие продольной компоненты. В самом деле, если при взаимно перпендикулярных николях амплитуда результирующего колебания x , а амплитуды слагающих колебаний y и z , то установленное на опыте условие $x^2 = y^2 + z^2$ может выполняться только в том случае (на основании теоремы Пифагора), если колебания строго перпендикулярны к направлению их распространения.

Каков будет результат сложения когерентных и взаимно перпендикулярно поляризованных световых волн, мы уже знаем. В зависимости от величины сдвига фаз между ними мы получим циркулярно или эллиптически поляризованный свет (см. главы III, V).

2. АНАЛИЗ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА

Здесь уместно отметить, что при обычном анализе поляризованного света с помощью одного николя-анализатора невозможно отличить свет, поляризованный по кругу, от естественного, так же как эллиптически поляризованный от частично линейно поляризованного. В обоих вариантах первого случая интенсивность света при вращении николя-анализатора не будет меняться. Точно так же наличие двух максимумов и двух минимумов интенсивности за один полный оборот николя-анализатора будет одинаково иметь место в обоих вариантах второго случая.

Для того чтобы различать эти варианты, необходимо дополнительно пользоваться теми же устройствами, с помощью которых получается свет, циркулярно или эллиптически поляризованный, т. е. фазовыми пластинками. Легко показать, что для полного анализа поляризованного света достаточно использования кроме николя-анализатора одной пластинки в четверть волны.

Суть дела в том, что пластинка $\lambda/4$ превращает циркулярный свет в линейный так же, как линейный — в циркулярный (очевидно, что две пластинки $\lambda/4$ тождественны одной пластинке $\lambda/2$). Легко определяемое на опыте различие между циркулярным и естественным светом состоит в том, что первый может быть преобразован в линейный с помощью пластинки $\lambda/4$, а второй не может. Частично же линейно поляризованный свет от эллиптически поляризованного света отличается на опыте тем, что в первом случае при введении перед никодем-анализатором пластинки $\lambda/4$ не будет никаких изменений углов ориентации анализатора, при которых получаются максимум и минимум интенсивности. Во втором же случае максимуму и минимуму интенсивности соответствуют различные положения анализатора в присутствии и в отсутствие пластинки $\lambda/4$. Чтобы это ясно понять, следует вспомнить (глава III), что любая эллиптическая поляризация может быть получена из двух линейных когерентных компонент двумя способами: за счет изменения разности фаз при равных амплитудах компонент или за счет изменения разницы амплитуд при постоянном сдвиге фаз $\pi/2$ (что, следовательно, может быть обнаружено с помощью той же фазовой пластинки $\lambda/4$ при соответствующей ее ориентации).

На этих общих соображениях построен излагаемый ниже последовательный метод, используемый на практике для общего анализа любого поляризованного света.

На пути исследуемого светового пучка помещается и медленно вращается николь-анализатор. Далее необходимо последовательно проделать следующие операции, результаты которых дадут однозначные выводы:

I. Если интенсивность не изменяется ни в отсутствие, ни в присутствии пластинки $\lambda/4$, свет естественный.

II. Если без пластинки $\lambda/4$ интенсивность не меняется, а при наличии пластинки появляются максимумы и минимумы, то свет поляризован по кругу. При этом если в минимуме интенсивность равна нулю, то свет полностью поляризован по кругу, а если не равна нулю, то он частично поляризован по кругу, т. е. его следует (подобно частично линейно поляризованному) считать наложением двух пучков — естественного и поляризованного по кругу.

III. Если в отсутствие пластинки $\lambda/4$ интенсивность меняется от нуля до некоторого максимума, свет полностью линейно поляризованный.

IV. Если же при этом в минимуме интенсивность не нуль, то могут быть два случая:

1) помещение перед анализатором пластинки $\lambda/4$, ориентированной так, чтобы ее главные направления¹ совпали с азимутами максимума и минимума интенсивности, приводит к тому, что при вращении анализатора в некотором положении последнего, не совпадающем с азимутом прежнего минимума, интенсивность становится нулем. В этом случае мы имеем полностью эллиптически поляризованный свет;

2) если же при таком введении пластинки $\lambda/4$ интенсивность не становится нулем ни при каком азимуте анализатора, то тут снова могут быть два случая: а) введение пластинки $\lambda/4$ не вносит никаких изменений в азимуты анализатора, соответствующие максимуму и минимуму; это значит, что свет частично линейно поляризован; б) если же введение пластинки $\lambda/4$ приводит к изменениям в положениях анализатора, при которых получаются максимум и минимум, то свет частично эллиптически поляризован.

Перечисленные результаты исчерпывают все возможные случаи поляризации светового пучка и поэтому в совокупности дают метод полного качественного анализа состояния поляризации.

3. ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ МИКРОСТРУКТУРА ЕСТЕСТВЕННОГО СВЕТА

Обратимся теперь вновь к опыту, в котором мы с помощью одноосной кристаллической пластинки получали циркулярно или эллиптически поляризованный свет (рис. 47). Пластика П вырезана параллельно оптической оси, направленной в нашем опыте вертикально. Николь N_1 ориентирован под углом 45° к вертикали. Следовательно, обыкновенная и необыкновенная волны в пластинке будут иметь равные амплитуды. Разность

¹ Т. е. направления поляризации обыкновенного и необыкновенного лучей в пластинке.

фаз между ними зависит от материала и толщины пластинки. В зависимости от величины этой разности мы получим на выходе из пластинки эллиптически или циркулярно поляризованную волну, анализ которой можно провести по только что изложенному способу.

Если же после пластинки поставить николю-анализатор N_2 , который сведет поляризацию обыкновенного и необыкновенного лучей в одну плоскость, то мы получим

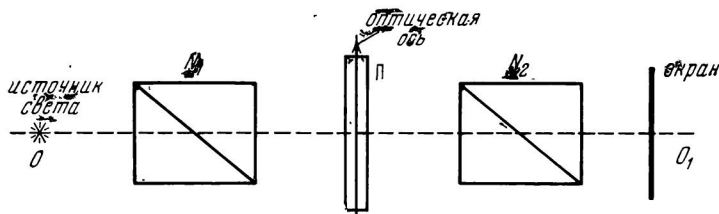


Рис. 47. Схема установки для исследования роли поляризации в интерференции

сложение когерентных и одинаково поляризованных лучей, т. е. все условия для возникновения интерференционной картины. О характере этой картины мы поговорим немного позже, а сейчас займемся анализом роли николя-поляризатора N_1 .

Опыт, впервые проведенный тем же Френелем, показывает, что если убрать николю N_1 , то в отличие от предыдущего на экране после N_2 не получается интерференционной картины. На первый взгляд это кажется парадоксальным: лучи когерентны (ибо происходят из одного источника), поляризованы в одной плоскости, а интерференционной картины не дают.

При отсутствии николя-анализатора N_2 в этом случае на выходе из пластинки свет не становится циркулярно или эллиптически поляризованным, но остается естественным.

В основе объяснения этих фактов лежит то обстоятельство, что любые взаимно перпендикулярно поляризованные компоненты, совокупностью которых мы представляем естественный свет (см. главу III), между собой некогерентны. В самом деле, пусть OA (рис. 48) — мгновенное направление вектора E в пучке естественного света. В результате двойного преломления этот

вектор оказывается разложенным по двум взаимно перпендикулярным направлениям OX и OY . Так как направление OA в естественном свете хаотически меняется (OA_1 , OA_2 и т.д.), то так же беспорядочно меняются и компоненты OX и OY , принимая любые положительные и отрицательные значения. В результате они утрачивают постоянство разницы фаз и становятся некогерентными. Если же направление OA постоянно (свет до падения на кристаллическую пластинку поляризуется николем N_1), то обе компоненты OX и OY при любых фазовых изменениях вектора E меняются синхронно, никакого добавочного изменения фазы между ними не возникает и они остаются когерентными.

Теперь становится понятным смысл экспериментальных результатов, полученных для когерентных лучей, сформулированных Френелем и носящих название законов его имени.

1) Два луча, поляризованные в одной плоскости, дают интерференционную картину так же, как естественный свет.

2) Два луча, взаимно перпендикулярно поляризованные, не дают интерференционной картины.

3) Два луча, поляризованные взаимно перпендикулярно и полученные из естественного света, после приведения к одной и той же плоскости поляризации не дают интерференционной картины.

4) Два луча, поляризованные взаимно перпендикулярно, но полученные из линейно поляризованного света, дают интерференционную картину после приведения к одной и той же плоскости поляризации.

Наиболее интересен и поучителен третий закон. Можно сказать, что он как бы дает способ вскрыть с помощью интерференции внутреннюю поляризационную микроструктуру световых пучков.

Еще своеобразнее в этом же отношении следующие опы-

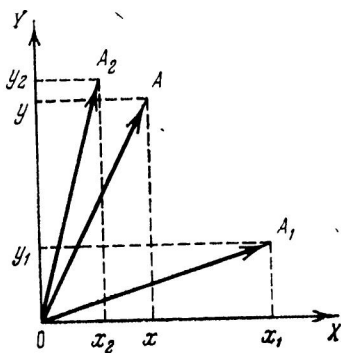


Рис. 48. Схема разложения электрического вектора естественного света

ты, показывающие наличие различных поляризованных составляющих в естественном неполяризованном свете.

Поместим на пути двух когерентных естественных пучков, которые давали интерференционную картину, две среды с одинаковым коэффициентом преломления, но одну вращающую плоскость поляризации, другую неактивную. Для простоты предположим, что в обеих средах создается одинаковый сдвиг фаз, а оптически активная среда поворачивает плоскость поляризации на 90° .

Сохранится ли интерференционная картина? На первый взгляд должна сохраниться. Оба пучка ведь останутся естественными и когерентными и ничего не должно измениться. Однако опыт показывает, что интерференционной картины в этом случае нет. Стоит немного пристальнее вдуматься, чтобы понять почему. Дело в том, что каждому мгновенному положению электрического вектора в первом пучке будет соответствовать мгновенное же положение во втором пучке, отличное на 90° . Эти два взаимно перпендикулярных вектора, как мы уже знаем, не могут дать интерференционной картины. Если увеличить толщину или концентрацию вращающей среды так, чтобы угол поворота возрос до 180° , то интерференционные полосы вновь появятся (только на месте прежних минимумов будут находиться максимумы и наоборот). Аналогичные результаты можно получить, если на пути обоих лучей помещать среды соответственно с левым и правым вращением (дающие поворот в первом случае $+45^\circ$ и -45° ; во втором $+90^\circ$ и -90° и т. д.).

Результаты подобных опытов кажутся поначалу совершенно необычными и даже внутренне противоречивыми, ибо они позволяют определить вращение плоскости поляризации неполяризованного света. Но на самом деле тут нет ничего противоречивого — просто поляризация и интерференция света являются очень тонкими инструментами, позволяющими экспериментально прощупывать изменения его микроструктуры.

Еще один аналогичный эксперимент можно проделать, помещая на пути одного из интерферирующих естественных лучей фазовую пластинку $\lambda/2$, которая создает разность фаз между перпендикулярно поляризованными компонентами в полпериода, т. е. в 180° . Каждое мгновенное направление E можно разложить

на две компоненты (например, вертикальную и горизонтальную). Наличие пластинки $\lambda/2$ в одном из лучей вызовет добавочный сдвиг по фазе на 180° между этими компонентами. При этом, если, например, вертикальная компонента останется прежней, то горизонтальная должна изменить свое направление на прямо противоположное (рис. 49). Теперь

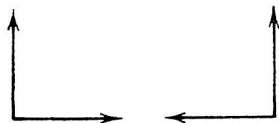


Рис. 49. Изменение направления одной из компонент на 180° при введении пластинки $\lambda/2$

можно сообразить, что станет с интерференционной картиной на экране. В тех точках, где вертикальные компоненты будут, складываясь, усиливать друг друга, горизонтальные будут взаимно гаситься и наоборот. Интерференционные минимумы первых совпадут с максимумами вторых, а максимумы первых — с минимумами вторых. Следовательно, в целом экран будет освещен равномерно. Если, однако, смотреть на экран не простым глазом, а через николю-анализатор, то, меняя его ориентацию, можно последовательно наблюдать интерференционные полосы, соответствующие компонентам с разной поляризацией (минимумы и максимумы соответствующих картин будут дополнительными).

Эти эксперименты, как и предыдущие (с вращающей средой), столь же парадоксальны с привычной точки зрения — они обнаруживают поляризацию в естественном свете, иными словами, дают способ заменить изменения его внутренней микроструктуры.

4. ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ КАРТИНЫ, ПОЛУЧАЕМЫЕ С ПОМОЩЬЮ КРИСТАЛЛОВ

Как уже было сказано выше, если между двумя николями — поляризатором и анализатором — помещен кристалл, то при прохождении света через эту систему возникают весьма своеобразные интерференционные картины. Общий вид и специфические свойства этих картин определяются в первую очередь строением, оптическими свойствами и ориентацией кристалла, и поэтому они играют большую роль в изучении кристаллов оптическими методами — в оптической кристаллографии.

Принципиальная схема установки для подобного рода исследований изображена на рис. 47. Первый николю N_1 , как разъяснено выше, обеспечивает когерентность компонент расщепления в кристаллах, второй N_2 — сводит их поляризацию в одну плоскость, в результате чего и возникает интерференционная картина. Разность фаз создается в кристаллической пластинке П. Если удалить один из николей, то интерференционная картина полностью исчезнет. При этом важно отчетливо представлять себе различие причин этого в случае, если удаляется николю N_1 или николю N_2 . Об этом различии подробно говорилось в разделе 3 данной главы. Рассмотрим сначала плоскопараллельную пластинку и параллельный пучок лучей. В такой пластинке разность фаз будет одинакова во всех ее точках. Следовательно, по всей пластинке будет интерференционный максимум для какой-то определенной длины волны, т. е. пластинка, помещенная между скрещенными николями, просветлит поле и окрасит его в определенный цвет.

Если пластинку вращать между николями вокруг оси OO_1 (независимо от того, скрещены николи или нет), то при совпадении любого из главных направлений пластинки с главным направлением любого из николей интерференционная картина исчезает. Это легко объяснить. Если осуществляется совпадение главного направления пластинки с главным направлением николя N_1 , то имеет место унирадиальный азимут, и в пластинке распространяется только одна волна. При совпадении с N_2 из пластинки через анализатор выходит тоже только одна волна. В обоих случаях об интерференции говорить бессмысленно. Таким способом можно очень просто определять главные направления кристаллической пластинки. Если же кристаллическая пластинка имеет неравномерную толщину, то вместо однородно окрашенного поля будет наблюдаться интерференционная картина. Она представляет собой некоторое распределение светлых и темных полос и пятен в монохроматическом свете и разноцветных полос и пятен в белом свете. Эти полосы будут, очевидно, геометрическими местами одинаковой толщины пластинки. Например, в случае клиновидной пластинки прямые интерференционные полосы будут параллельны ребру клина.

Рис. 50. Пластика Савара

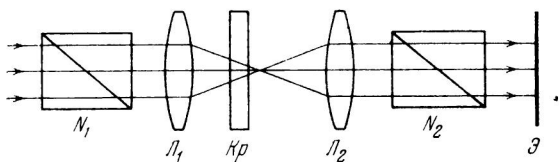
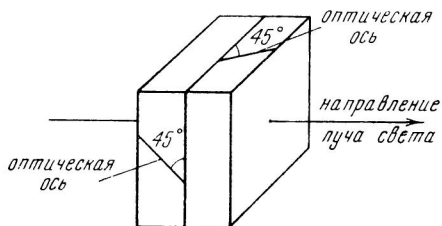


Рис. 51. Схема получения коноскопической картины

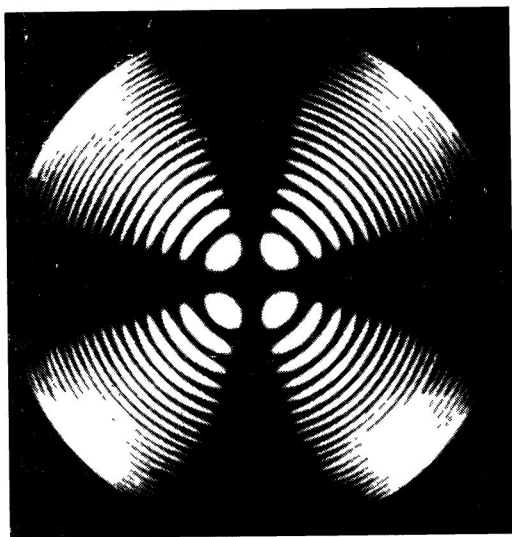


Рис. 52. Коноскопическая фигура одноосного кристалла (ось конуса лучей совпадает с оптической осью)

Просветление поля или появление интерференционной картины при внесении анизотропного вещества между скрещенными николями представляет собой очень чувствительный метод обнаружения и изучения двойного преломления и, следовательно, анизотропии данного материала. Он широко используется для различных практических целей; например, для изучения искусственных деформаций твердых тел и т. п. Об этих практических применениях будет речь в главе X.

Как уже говорилось, если в нашей системе убрать николю N_1 и посылать на пластинку естественный свет, то интерференционная картина совершенно исчезнет. Если же на пластинку будет падать частично поляризованный свет, то через николю N_2 будет наблюдаться интерференционная картина, хотя и не такая контрастная, как при падении линейно поляризованного света. Таким образом, совокупность кристаллической пластинки и николя-анализатора представляет собой прибор, позволяющий по появлению интерференционной картины обнаруживать наличие даже небольшой частичной поляризации в падающем пучке света. Такие приборы называются полярископами. Чувствительность такого прибора зависит в первую очередь от конструкции и ориентации кристаллической пластинки. Вместо одной пластинки может применяться и система пластинок. Наиболее известен полярископ Савара, в котором используются две кварцевые пластинки равной толщины, вырезанные под 45° к оптической оси и сложенные так, чтобы их оптические оси были в скрещенном положении (рис. 50). При достаточной яркости исследуемого света с помощью полярископа Савара можно обнаружить даже небольшую степень поляризации, до $P = 2\%$. Очевидно, что полярископом можно только обнаружить поляризацию. Для измерения же ее нужно еще какое-нибудь специально градуированное компенсирующее устройство (например, стопа стеклянных пластинок, поворотом которой подбирается такая же степень поляризации противоположного знака).

Перейдем теперь к более сложным интерференционным картинам, возникающим не в параллельных, а в сходящихся лучах (они носят название коноскопических фигур).

Конус световых лучей, например, сфокусированных

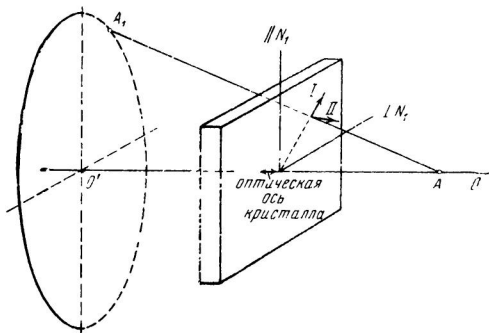


Рис. 53. К объяснению темного (или светлого) креста

после поляризатора N_1 линзой L_1 , проходит через кристаллическую пластинку Kp , а затем собирается другой линзой L_2 и после анализатора N_2 дает на экране \mathcal{E} интерференционную картину (рис. 51). Рассмотрим вначале пластинку одноосного кристалла, в которой оптическая ось совпадает с осью конуса лучей. Легко сообразить, что геометрическими местами одинаковой разности фаз будут концентрические окружности с центрами на оптической оси. Интерференционная картина получится в виде системы темных и светлых (или цветных)

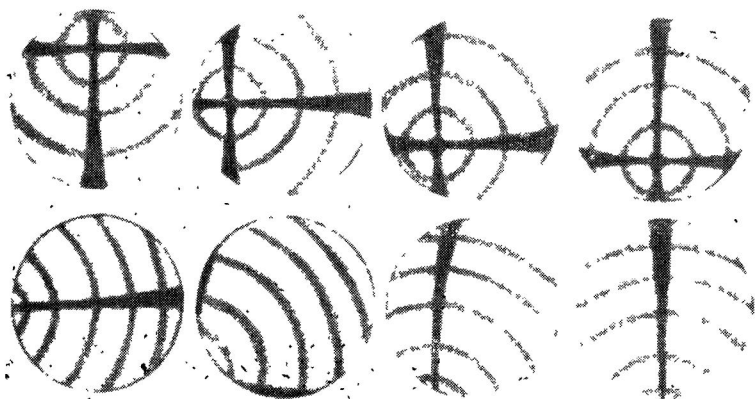


Рис. 54. Коноскопические фигуры пластинок одноосного кристалла, вырезанных под различными углами к оптической оси

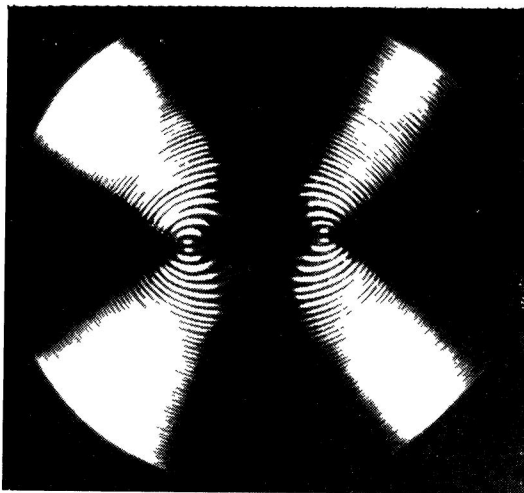


Рис. 55. Пример коноскопической картины двуосного кристалла. Видны выходы оптических осей

концентрических колец (рис. 52). Характерной чертой картины является также темный или светлый крест, рассекающий эти кольца по двум взаимно перпендикулярным направлениям, одно из которых совпадает с главным направлением поляризатора N_1 . Темный крест получается при скрещенных николях, светлый — при параллельных. Появление креста связано с унирадиальными азимутами (рис. 53). Произвольному лучу света в нашем конусе, имеющему направление AA' , соответствуют главные сечения кристалла — плоскость $O'AA'$ (содержащая луч и оптическую ось) и плоскость, перпендикулярная ей (их следы на пластинке — I и II). Когда главное сечение $O'AA'$ совпадает с N_1 или перпендикулярно N_1 , мы имеем унирадиальные азимуты. В обоих этих случаях в кристалле распространяется только одна волна — плоско поляризованная по направлению поляризатора N_1 . В случае скрещенных николей она будет погашена анализатором (темный крест), в случае параллельных — пропущена.

Если ось конуса лучей не совпадает с оптической осью пластинки, то геометрические места одинаковой

разности фаз будут, очевидно, не окружностями, а более сложными кривыми. На рис. 54 изображены коноскопические фигуры для одноосных пластинок, вырезанных под различными углами к оптической оси. Столь характерные различия фигур служат во многих работах и исследованиях (в кристаллографии, минералогии и т. п.) для быстрого качественного определения ориентации кристаллов.

Еще более сложный вид имеют коноскопические фигуры для пластинок из двуосных кристаллов. В качестве наглядного примера на рис. 55 приведена картина для пластинки, вырезанной перпендикулярно биссектрисе острого угла между оптическими осями. Отчетливо видны выходы оптических осей.

Наилучшими объектами для качественного обследования оптических свойств кристалла являются кристаллические шарики. Достаточно рассматривать их в рассеянном свете между скрещенными николями или поляроидами, чтобы увидеть коноскопическую картину, локализованную на поверхности шарика. Шарик при этом как бы одновременно служит и кристаллом и линзой (рис. 56). Если угол между оптическими осями двуосного шарика невелик, то одновременно видны выходы обеих оптических осей. При вращении шарика коноскопическая картина вращается вместе с ним. Если угол между осями значителен, то можно, вращая шарик, последовательно найти и пометить чернилами или тушью на поверхности шарика выходы оптических осей. Это быстрые и наглядные методы оптической ориентации кристаллов.

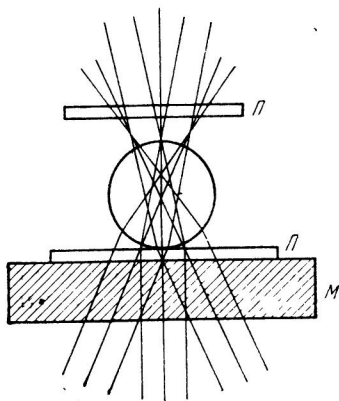


Рис. 56. Образование коноскопической картины на поверхности кристаллического шарика М — матовое стекло, П, П — скрещенные поляроиды

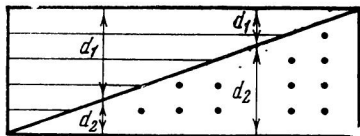


Рис. 57. Компенсатор Бабиня

В заключение этого параграфа следует рассказать о фазовых компенсаторах, с помощью которых можно управлять сдвигом фаз, что очень важно в исследованиях и измерениях.

Если, например, скрестить две одинаковые фазовые пластинки, т. е. ориентировать их так, чтобы направление колебаний обыкновенного луча в одной совпадало с направлением колебаний необыкновенного луча в другой, то волны, идущие в первой пластинке с меньшей скоростью, во второй будут идти с большей скоростью и наоборот. В результате разность хода, полученная в первой пластинке, скомпенсируется до нуля во второй пластинке.

Приборы, с помощью которых можно скомпенсировать до нуля любую разность фаз, называются компенсаторами. Простейшим примером компенсатора является кристаллический клин. Он создаст компенсацию по отношению к произвольной кристаллической пластинке в том месте, где у него будет подходящая толщина. С достаточной точностью соответствующее двупреломление в клине можно определить просто по цвету интерференционной окраски клина.

Весьма распространен компенсатор Берека, в котором изменение разности хода создается наклоном плоскопараллельной кальцитовой пластинки.

Другой известный компенсатор Бабине состоит из двух кварцевых клиньев (рис. 57), оси которых ориентированы взаимно перпендикулярно. Разность толщин клиньев определяет разность фаз в данной точке. От точки к точке она плавно меняется. Для того чтобы плавно менять разность фаз в данной точке, можно сдвигать клинья друг относительно друга. Комбинация двух клиньев предпочтительнее, чем один клин, потому что не вызывает изменения направления луча.

КВАНТОВАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

1. ФОТОНЫ

Как уже было упомянуто в главе II, первое представление о поляризации света как его особом изначальном свойстве было введено Ньютоном в рамках корпускулярной оптики. Сам термин «поляризация», впервые примененный Малюсом, корпускулярного происхождения. Для волновой оптики, строившейся в то время на представлении о продольных световых волнах, было совершенно недоступно понятие поляризации.

В корпускулярной же оптике для введения этого понятия было достаточно предположения о приращенной анизотропии и возможной в определенных условиях ориентации световых частиц.

Положение существенно изменилось в период господства поперечно-волновой оптики и особенно электромагнитной теории света. Понятие поляризации, все ее формы и свойства прекрасно описывались этой теорией и наряду с явлениями интерференции и дифракции составляли ее, казалось, незыблемую основу.

Однако в конце XIX — начале XX в. начали накапливаться новые экспериментальные данные, объяснение которых оказалось не под силу волновой теории света и потребовало введения новых, квантовых, представлений. Эти экспериментальные данные относились в основном к явлениям взаимодействия света с веществом, таким, как, например, поглощение и излучение света, фотоэффект (вырывание электронов из металлов под действием света), фотохимические явления и многие другие.

Из этих данных с несомненностью следовало, что поглощение и излучение происходит только вполне определенными, очень маленькими порциями энергии — квантами. Распространение квантов света в пространстве

представляет собой поток своеобразных световых частиц, которые во многом похожи на другие элементарные частицы, но обладают и некоторыми удивительными новыми свойствами. Эти световые частицы получили название **фотонов**.

Таким образом в какой-то мере произошло возрождение корпускулярной оптики. Но это было возрождение на совершенно новом уровне. Главное отличие фотонной оптики от ньютоновской в том, что фотонам свойственна дуалистическая (двойственная) природа. В одних явлениях они ведут себя как частицы, в других — как волны. Позже было установлено, что такая двойственность присуща и элементарным частицам материи — электронам, нейтронам и др. Эта ситуация получила название корпускулярно-волнового дуализма.

Перед нами возникает вопрос, как описать явление поляризации света с квантовой, фотонной точки зрения.

Прежде всего надо поближе познакомиться со свойствами фотонов.

Как уже было рассказано в главе IV, квант света излучается при переходе атома из одного дискретного состояния, обладающего большей энергией E_1 , в другое — с меньшей энергией E_2 . Разница этих энергий равна энергии кванта $E = E_1 - E_2$. Энергия кванта связана с частотой света ν следующим образом:

$$E = h\nu, \quad (1)$$

где h — универсальная постоянная природы, одинаковая для любых квантов. Она названа постоянной Планка (в честь автора первых квантовых идей) и равна $6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг·сек. Отсюда видно, что отдельные кванты — это чрезвычайно малые, но конечные порции энергии. Меньших же порций света с данной частотой быть не может.

Выражение (1) по существу дуалистично, оно связывает квантовые (E) и волновые (ν) характеристики света. Из этого выражения следует, что квантам большей частоты соответствует большая энергия. Частоты электромагнитных волн имеют, как известно, очень широкую шкалу — от радиоволн через инфракрасные, видимые, ультрафиолетовые и рентгеновские до γ -волн, излучаемых атомными ядрами и имеющих наибольшую частоту (порядка 10^{19} герц). Энергии γ -квантов в колоссальное число раз превосходят энергию квантов, соответствующую

щих радиочастотам (примерно в 10^{14} раз). Отсюда понятно, почему квантовые свойства излучения сказываются гораздо сильнее в случае больших частот. Они практически не имеют значения для радиоволн, заметны в оптическом диапазоне и играют главную роль в γ -излучении.

Дискретные состояния атома, переход между которыми сопровождается излучением кванта света, характеризуются каждое четырьмя квантовыми числами (см. главу IV). Допустимые изменения этих чисел определяются правилами отбора. Соответствующие переходы являются разрешенными. Другие переходы невозможны. В частности, правила отбора для магнитного квантового числа m ($\Delta m = 0, \pm 1$) являются основой для квантовой теории поляризации излучения. При $\Delta m = 0$ излучается или поглощается линейно поляризованный свет. При $\Delta m = +1$ — свет с правой циркулярной поляризацией, при $\Delta m = -1$ — с левой циркулярной поляризацией.

Чтобы понять физический смысл этих правил, продолжим знакомство с фотонами. Излученная световая частица (фотон) обладает квантом энергии E и движется в пустоте со скоростью света c . С помощью известной формулы Эйнштейна, связывающей энергию и массу любого объекта $E = mc^2$, мы можем определить массу фотона $m = E/c^2$.

Как и всякая движущаяся частица, фотон обладает импульсом, т. е. количеством движения $p = mc = Ec/c^2 = hv/c = h/\lambda$. Импульс — величина векторная, его направление совпадает с направлением движения фотона.

Итак, обладая энергией, массой, импульсом, фотон, казалось бы, ничем принципиально не отличается от любой другой частицы. Однако фотон — частица особая. В некоторых отношениях он резко отличается от остальных частиц. Достаточно упомянуть следующий факт. Согласно теории относительности масса любого тела зависит от скорости его движения

$$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2},$$

где v — скорость тела, c — скорость света, а m_0 — масса того же тела в состоянии покоя. Для всех случаев, с которыми мы имеем дело в обыденной практике, v чрезвычайно мало по сравнению с c , отношение v/c практически равно нулю и $m = m_0$. Но для фотона $v = c$. Следо-

вательно, знаменатель в правой части равен нулю. Величина же m , вычисленная выше, — величина конечная. Следовательно, $m_0 = 0$. Масса покоя фотона равна нулю. В отличие от большинства других частиц фотон не обладает массой покоя. Иными словами, фотон не может находиться в состоянии покоя. Он может только двигаться со скоростью света.

2. СПИН ФОТОНА

Кроме энергии, массы и импульса фотон обладает еще моментом количества движения (спином). В этом отношении он похож на другие элементарные частицы. Момент количества движения — величина, характеризующая вращательное движение. Это — вектор, направленный по оси вращения в соответствии с правилом правого винта. Если направление вращения совпадает с круговым движением головки винта, то направление хода самого винта (ввинчивание или вывинчивание) совпадает с направлением момента.

Вращательное движение в высокой степени присуще природе. Вращение галактик, вращение планет вокруг своих солнц и вокруг собственных осей, вращение атомов в молекулах и электронов вокруг ядер атомов — этих примеров более чем достаточно. Оказалось, что и элементарные частицы следует считать вращающимися вокруг собственных осей, т. е. обладающими моментом количества движения. Этот момент в случае элементарных частиц получил название спина. Спин является одним из фундаментальных, изначально присущих свойств частиц наряду с такими свойствами, как масса, электрический заряд и др. Спин принято измерять в единицах $\hbar/2\pi$, где \hbar — уже известная нам постоянная Планка. Почти все элементарные частицы имеют спин, равный 0, $1/2$ или 1. При этом имеются важные различия в свойствах и поведении частиц с целым и полуцелым спином. Примером полуцелого спина может служить спин электрона. Он равен $1/2$.

Спин фотона равен единице. Спин частицы — очень маленькая величина (вспомните, как мало \hbar). Как и все квантовые характеристики, он играет важную роль только в явлениях микромира. Следует еще раз под-

черкнуть, что спин по своей природе является изначальной квантовой характеристикой частицы и, строго говоря, не может быть выведен из классических представлений. Образ вращающейся вокруг своей оси частицы, которым мы пользовались выше, не более чем наглядный прием. Квантовая природа спина проявляется в том, что он может иметь не любые, а только определенные дискретные направления в пространстве.

Таким образом, наличие у фотона спина приводит к представлению об анизотропии фотона.

Вот оказывается, где «зарыта» анизотропия ньютоновых световых корпускул, наличие у них «различных сторон с различными изначальными свойствами».

Несомненно, что только с помощью представлений об ориентации спина фотонов можно попытаться понять, что означает поляризация света с квантовой точки зрения — поляризация фотонов.

3. МОМЕНТ КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ ЦИРКУЛЯРНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА

Даже не обращаясь к квантовым представлениям и оставаясь целиком в рамках классической теории, можно показать, что свет с круговой поляризацией обладает моментом количества движения, направление которого совпадает с направлением распространения света.

Действительно, что произойдет, если такой свет встретит на своем пути атомы вещества, в каждом из которых имеются электроны, способные колебаться в любом направлении под действием электрического поля световой волны? Электрон будет смещаться по некоторому направлению X под действием компоненты поля E_x и, кроме того, по оси Y со сдвигом фазы на 90° под действием компоненты E_y . Следовательно, электрон под действием поля станет совершать вращательное круговое движение. Такому движению будет соответствовать момент количества движения.

Из законов сохранения следует, что этот момент количества движения, так же как и энергия, затраченная на работу по раскручиванию электрона, получены атомом от поглощенного света. Следовательно, циркулярно поляризованный свет должен переносить момент коли-

чества движения. Очевидно при этом, что моменты право- и левоциркулярно поляризованного света должны быть противоположны по знаку. Линейно поляризованный свет не может иметь момента количества движения.

Экспериментально момент количества движения света с круговой поляризацией был обнаружен и измерен в 30-х годах нашего столетия. Для этого были поставлены простые по замыслу, но тонкие по выполнению опыты.

На пути циркулярно поляризованного пучка света, идущего по вертикали, помещалась горизонтальная фазовая пластинка $\lambda/2$, подвешенная на тонкой кварцевой нити. Пластинка, закручивая нить, поворачивалась на малый угол, который измерялся с большой точностью. Торсионная константа (константа кручения) нити измерялась независимо также с большой точностью. Из этих данных вычислялся момент количества движения, полученный пластинкой. Легко понять, почему для опыта была выбрана пластинка $\lambda/2$, а не пластинка $\lambda/4$. Первая представляет из себя как бы удвоенную вторую. Пластинка $\lambda/2$ превращает правоциркулярный свет в левоциркулярный (или наоборот). Поэтому отобранный ею у света момент количества движения будет вдвое больше, чем для пластинки $\lambda/4$.

Измерив энергию светового пучка и зная частоту света, можно подсчитать число фотонов, прошедших сквозь пластинку, и отсюда вычислить момент одного фотона. Он оказался равным $h/2\pi$, т. е. совпал с величиной спина фотона.

4. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ФОТОНОВ

Дискретность возможных ориентаций спина фотона выражается в том, что спин фотона может иметь только два направления — либо совпадающее с направлением движения фотона (параллельное), либо противоположное (антипараллельное). В первом случае мы будем иметь дело с фотоном правоциркулярно поляризованного света, а во втором — с фотоном левоциркулярно поляризованного света.

В этом месте следует только отметить одно исторически сложившееся терминологическое неудобство. Определения направления циркулярности (правое и левое)

В классической и квантовой оптике оказались противоположными. В классике правоциркулярным называют свет, в котором наблюдатель, смотрящий навстречу лучу, видит вращение вектора E по часовой стрелке (рис. 58, *a*). По квантовому же определению (согласно правилу правого винта) направление вращения в правоциркулярном свете является противоположным (рис. 58, *б*). Это обстоятельство следует иметь в виду, чтобы избежать недоразумений.

Поток света, в котором все фотоны правоциркулярные, будет поляризован, таким образом, по левому кругу (вот оно неудобство двух определений!), и наоборот.

А как же представить свет, линейно поляризованный? Один фотон не может быть поляризован линейно. Но комбинация или, точнее говоря, суперпозиция двух фотонов — правого и левого — будет соответствовать фотону линейной поляризации. Вспомним, как раньше в главе III мы убедились, что сложение двух циркулярно поляризованных лучей — левого и правого, обладающих одинаковой интенсивностью, дает в сумме линейно поляризованный луч. Теперь на квантовом языке мы можем сказать, что если световой поток содержит одинаковое число когерентных лево- и правокруговых фотонов, то этот поток линейно поляризован. При этом каждый фотон линейно поляризованного света является суперпозицией двух противоположно циркулярных.

На квантовом языке можно описать все формы поляризации света. Обозначим через N_1 число левоциркулярных фотонов в световом потоке, а через N_2 — число правоциркулярных фотонов.

Если $N_1 = 0$, а $N_2 \neq 0$, или $N_1 \neq 0$, а $N_2 = 0$, то поток поляризован циркулярно (соответственно по правому или левому кругу).

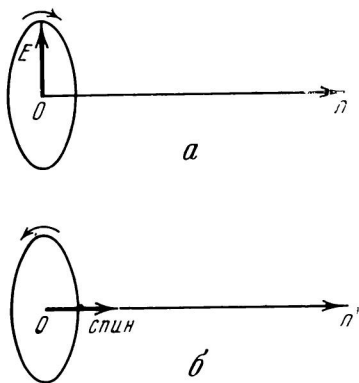


Рис. 58. Определение правой циркулярной поляризации по классической (*a*) и квантовой (*б*) теориям. OO' — направление распространения света

Если $N_1 = N_2$ и фотоны когерентны, то поляризация светового потока линейная.

Если $N_1 \neq N_2$ (но ни N_1 , ни N_2 не равно нулю) и фотоны по-прежнему когерентны, то мы имеем эллиптическую поляризацию.

Если $N_1 \neq N_2$, но фотоны некогерентны, то поляризация частичная, линейная.

Если, наконец, $N_1 = N_2$, но фотоны некогерентны, то свет неполяризованный, естественный.

Здесь, конечно, режет глаз наша «непоследовательность»: с одной стороны, мы говорим о частицах — фотонах, а с другой — об их когерентности. В то же время в предыдущей главе мы выяснили, что когерентность — понятие, специфически присущее волнам. Но тут уж ничего не поделаешь! Это и есть корпускулярно-волновой дуализм.

Теперь, наконец, мы можем понять смысл правил отбора для магнитного квантового числа m , определяющих поляризацию излучаемого атомом света.

Они могут быть выведены из закона сохранения момента количества движения. Квантовое число m определяет дискретные значения проекции момента количества движения электрона в атоме на направление внешнего магнитного поля.

Как мы знаем, для этого квантового числа допустимы лишь следующие изменения: $\Delta m = 0$ или ± 1 .

Если $\Delta m = 0$, то это означает, что момент электрона в атоме при излучении света не изменился. Следовательно, излученный свет должен иметь линейную поляризацию, потому что, как мы теперь знаем, только в нем точно скомпенсированы параллельные и антипараллельные спины фотонов.

При $\Delta m = +1$ или -1 излученный свет уносит с собой момент количества движения (спин) того или другого направления.

Следовательно, при $\Delta m = +1$ излучается свет, правоциркулярно поляризованный, а при $\Delta m = -1$ — левоциркулярно поляризованный.

Как уже отмечалось, квантовые эффекты, квантовые стороны поведения особенно отчетливо проявляются у γ -фотонов. Это касается и их поляризационных свойств. Поэтому поляризацию γ -фотонов обычно принято описывать на квантовом языке. При этом пользуются терми-

ном «спиральность». Гамма-фотон, у которого спин параллелен импульсу (правая круговая поляризация), обладает по этой терминологии положительной спиральностью. В случае же гамма-фотона с антипараллельным спином (левая круговая поляризация) говорят, что он обладает отрицательной спиральностью.

Фотоны видимого и ультрафиолетового света излучаются при переходах электронов в атомах между наружными, внешними орбитами. Рентгеновские лучи испускаются, когда электроны переходят с одной близко расположенной к ядру атома внутренней орбиты на другую, тоже внутреннюю.

Гамма-фотоны излучаются в результате процессов, происходящих внутри атомных ядер. Поэтому изучение поляризации гамма-фотонов даст ценную информацию о строении и свойствах атомных ядер. В качестве примеров достаточно назвать такие фундаментальные успехи, как доказательство несохранения четности при β -распаде или установление знака спиральности нейтрино.

Конечно, обычные экспериментальные методы исследования поляризации, которые изложены в предыдущих главах этой книги, для гамма-лучей непригодны. Гамма-лучи обладают высокой проникающей способностью и практически ни в каких средах не преломляются.

Основной эффект взаимодействия гамма-квантов с веществом, используемый для обнаружения и изучения их поляризации, — это рассеяние. Наиболее широко используется эффект Комптона — рассеяние гамма-фотонов на электронах.

Физическая сущность поляризации при рассеянии одинакова как для видимого света, так и для гамма-лучей, ибо основана на фундаментальном свойстве, одинаковом для тех и других, — на их поперечности (см. главу V). Суть сводится к тому, что при наблюдении рассеянного естественного света под углом 90° к первичному лучу получается свет, линейно поляризованный.

Если же падающий свет линейно поляризован, то рассеяние происходит преимущественно в плоскости, перпендикулярной вектору поляризации. Это и дает в принципе возможность определить направление полной или преимущественной поляризации и измерить степень поляризации. Схема эксперимента показана на рис. 59. Простейший комптоновский поляриметр состоит из коллиматора

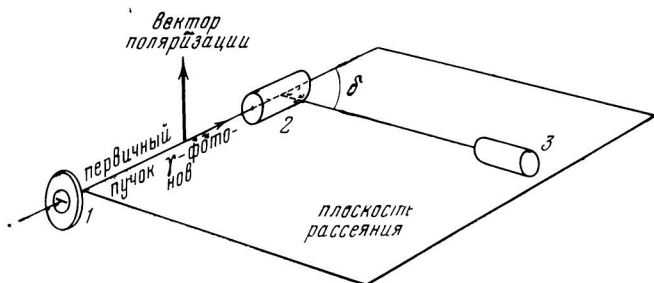


Рис. 59. Схема комптоновского поляриметра γ -фотонов
 1 — коллиматор, 2 — рассеиватель, 3 — счетчик

гамма-квантов (из свинца или вольфрама), рассеивателя (это может быть, например, свинец или медь) и счетчика гамма-фотонов (например, гейгеровского или сцинтилляционного).

Измерение круговой поляризации гамма-фотонов сложнее, но также возможно. С помощью круговой поляризации также удастся получить важные данные. В частности, она позволяет судить об ориентации атомных ядер и определять знак магнитного момента возбужденного уровня ядра.

Другим методом обнаружения поляризации гамма-лучей может служить фотоэффект, ибо свойства вырываемых электронов зависят от поляризации падающих гамма-фотонов. Это обстоятельство непосредственно подводит нас к теме следующего параграфа.

5. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Корпускулярно-волновой дуализм пронизывает описание не только света, но и вещества. Подобно тому как частицы-фотоны в некоторых явлениях ведут себя как электромагнитные волны, элементарные частицы (электроны, позитроны, нейтроны и другие) в аналогичных явлениях также проявляют волновые свойства.

Наиболее широко известное и наглядное среди таких явлений — дифракция частиц (например, электронов) на кристаллических решетках. Оно совершенно аналогично дифракции электромагнитных волн рентгеновского диапазона (с длинами волн порядка нескольких ангстрем)

также на решетках кристаллов или дифракции видимого света на оптических решетках. Мы не будем здесь подробно на этом останавливаться. Явления эти детально описаны во многих книжках об элементарных частицах. Для нас сейчас важно только то обстоятельство, что если элементарные частицы в определенном аспекте являются волнами, то для них можно ввести и рассмотреть понятие поляризации.

И уж если даже для гамма-фотонов (которые все же являются «привычными» электромагнитными волнами) оказалось сподручнее квантовое описание поляризации, то тем более следует этого ожидать для элементарных частиц. Этому способствует еще одно обстоятельство. Волны, адекватные элементарным частицам, вовсе не обязаны быть строго поперечными, как электромагнитные волны, адекватные фотонам. Ясно, что это затруднит «волновое» описание их поляризации, аналогичное описанию поляризации света.

В общем виде под поляризацией частиц понимается наличие у них различных возможных состояний, связанных с различной ориентацией спина. Есть большое формальное сходство в квантовом описании поляризации частиц и фотонов, но есть и существенные отличия.

Спин фотона может быть направлен либо вдоль импульса, либо против него. Иные ориентации абсолютно запрещены. В этой квантовой формулировке заключен тот смысл, что волны, соответствующие фотону, строго поперечны. Продольная составляющая у них абсолютно невозможна.

Спин электрона равен $\frac{1}{2}$ (в тех же единицах, в которых спин фотона равен 1). Так же как и в случае фотонов, возможны только два квантовых дискретных спиновых состояния, только две ориентации спина по отношению к некоторому выбранному направлению — совпадающая с этим направлением и противоположная ему. Однако в отличие от фотонов это выбранное направление вовсе не связано обязательно с направлением импульса.

Физическую сущность этого различия можно пояснить следующим образом. Частица с нулевой массой (фотон) не может покоиться. Поэтому ее собственный момент количества движения (спин) имеет смысл лишь по отношению к оси движения. Спин же электрона может быть направлен как коллинеарно импульсу (параллельно или антипараллельно), так и перпендикулярно ему. В первом

случае мы имеем дело с продольной поляризацией, во втором — с поперечной. В соответствии с такой терминологией нам следовало бы называть поляризацию фотонов строго продольной. В отношении фотонов этот термин в литературе не принят. Но если бы он и применялся, он не должен смущать. Речь ведь идет отнюдь не о продольных волнах (которые для фотонов как были, так и останутся невозможными), а лишь об условном термине «продольная поляризация». В качестве общего термина взамен продольной поляризации как для фотонов, так и для электронов часто употребляется спиральность (положительная при параллельности спина и импульса, отрицательная при антипараллельности). Очень важным является то обстоятельство, что в различных взаимных превращениях фотонов и электронов спиральность сохраняется. К таким превращениям относятся, например, тормозное излучение фотонов электронами, рождение пар, фотоэффект и др. Эта взаимосвязь имеет большое значение как в отношении общего описания явлений, так и особенно в эксперименте, ибо в разных случаях проще измерить поляризацию фотонов, а не электронов, или наоборот. Продольная и поперечная поляризации электронов представляют собой не единственные возможности поляризации. В качестве оси квантования может быть выбрано и любое другое направление.

Методы создания, изменения и обнаружения поляризации электронов основаны на взаимодействии их с веществом (главным образом разные виды рассеяния) либо с электрическим или магнитным полем.

Однородные электрическое и магнитное поля не создают ориентации спинов электронов. Их влияние сводится к вращению (прецессии) вектора спина вокруг некоторой оси. Поэтому неполяризованный пучок, проходя через такое поле, так и остается неполяризованным.

Однако как электрическое, так и магнитное поле может изменить имеющуюся поляризацию пучка.

Рассмотрим в качестве наглядного примера влияние поперечного радиального электрического поля на пучок электронов с продольной поляризацией. На рис. 60 силовые линии электрического поля изображены пунктиром. Короткие сплошные стрелки показывают ориентацию спина. Длинная сплошная линия — траектория электронов.

Суть воздействия электрического поля сводится к тому, что пучок электронов отклоняется, а направление спина остается неизменным. Вследствие этого поляризация пучка преобразуется из продольной в поперечную. Из рис. 60 ясно видно, что входящий пучок *A* поляризован продольно, а выходящий пучок *B* — поперечно.

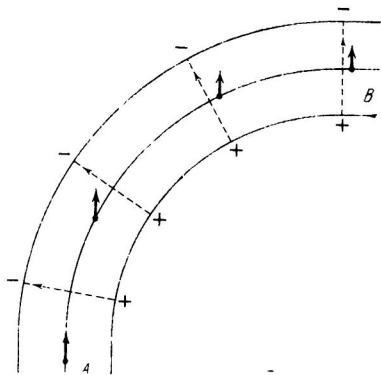


Рис. 60. Изменение поляризации пучка электронов с продольной на поперечную в электрическом поле

Это можно сравнить с преобразованием круговой поляризации света в линейную, осуществляемым с помощью пластинок $\lambda/4$.

В качестве другого любопытного примера влияния полей на поляризацию электронов упомянем действие продольного магнитного поля. Спин электрона в этом случае прецессирует, как волчок, вокруг направления магнитного поля. Этот случай представляет собой аналогию вращения плоскости поляризации света в оптически активной среде.

Основными методами получения поляризованных электронных пучков являются рассеяние на тяжелых атомных ядрах, фотоэффект при облучении циркулярно поляризованным светом, излучение электронов ориентированными ядрами и некоторые другие виды взаимодействия электронных потоков с веществом.

В свою очередь интенсивность рассеянных пучков зависит от их поляризации и может служить методом ее обнаружения. Вторая задача, однако, на практике оказывается много сложнее первой. Физики считают, что значительно легче создать поляризацию электронов, чем придумать опыт для ее обнаружения.

При двукратном последовательном рассеянии (или каком-нибудь ином поляризующем пучок электронов процессе) вся система опыта подобна совокупности поляризатора и анализатора в обычной оптике.

Аналогичным образом описывается и изучается поля-

ризация и других элементарных частиц — позитронов, нейтронов и т. п.

В каждом случае при этом имеются свои индивидуальные особенности. Например, рассеяние на тяжелых атомных ядрах является средством создания и обнаружения поляризации как электронов, так и позитронов, однако эффект для позитронов значительно меньше, чем для электронов. Это объясняется тем, что в основном поляризационные явления разыгрываются вблизи ядер, а в эту область атомов позитроны вследствие своего положительного заряда проникают в гораздо меньшей степени, нежели электроны.

Разработанные в последнее время методы поляризации нейтронов основаны для быстрых нейтронов главным образом на ядерном рассеянии, для медленных — на магнитном взаимодействии нейтронов с атомными электронами. Впервые поляризованные пучки медленных нейтронов были получены при пропускании нейтронов через намагниченный ферромагнетик. Имеется и ряд других способов поляризации нейтронных пучков; например, дифракционное отражение нейтронов от монокристаллов. Поляризованные пучки медленных нейтронов нашли ряд ценных применений в ядерной физике.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА — ТОПКИЙ ИНСТРУМЕНТ
НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Все свойства поляризованного света, с которыми мы познакомились в предшествующих главах, указывают на то, что поляризованный свет следует использовать для изучения анизотропии веществ. Взаимодействие поляризованного света с любой анизотропной средой содержит в своих результатах информацию об этой анизотропии. Надо только уметь с наибольшим эффектом извлекать эту информацию.

Свойство анизотропии очень широко распространено среди самых разнообразных веществ и сред как природного, так и искусственного происхождения. Можно назвать следующие типы анизотропии. Крайний случай — полная анизотропия: среда состоит из анизотропных молекул и все они ориентированы одинаково. Если же все молекулы ориентированы, но ориентация одинакова не у всех молекул, а имеется несколько видов ориентации (типичным примером таких сред являются молекулярные монокристаллы), то такую среду уже нельзя считать полностью анизотропной. Другой крайний случай — полная изотропия среды, построенной из изотропных частичек, например атомный газ. Казалось бы, также полностью изотропной должна быть и среда, состоящая из анизотропных молекул, но либо расположенных совершенно беспорядочно, хаотично (например, жидкий раствор), либо расположенных и ориентированных так, что оптические свойства среды по всем направлениям окажутся одинаковыми (например, кубический кристалл). Действительно, макроскопически такая среда изотропна. Но то, что она состоит из анизотропных элементов, позволяет говорить о ее скрытой анизотропии. Эта внутренняя анизотропия может быть вскрыта, «проявлена» различными экспериментальными

способами. Часто удобно это сделать с помощью поляризованного света.

Между полной анизотропией и полной изотропией существуют, конечно, промежуточные случаи частичной, или неполной, анизотропии. В такой среде нет полной ориентации анизотропных частиц, а только преимущественная ориентация. Такую среду можно представить как совокупность полностью анизотропной и полностью изотропной сред, взятых в той или иной пропорции. Примеров частично анизотропных сред можно много найти среди различных пленок, волокон и нитей, как естественных, так и искусственных. Частичная ориентация возникает также в изотропных средах (например, жидких растворах) под внешними воздействиями, например в электрических и магнитных полях. Возможна также частичная ориентация в потоке жидкости (динамо-оптический эффект).

При механическом растяжении полимерных пленок достигается тот же эффект. Однако при этом ориентируются не отдельные макромолекулы полимера, а целые «пачки» таких макромолекул, которые можно назвать доменами или областями спонтанной ориентации. Эта спонтанная ориентация молекул внутри таких областей происходит за счет взаимодействия молекул. Таким образом, в нерастянутых, макроскопически изотропных пленках имеется «пачечная», или доменная, скрытая анизотропия.

Еще одним примером скрытой анизотропии могут служить поликристаллические порошкообразные вещества. Каждый отдельный микроскопический монокристаллик обладает полной или частичной анизотропией, но друг относительно друга они ориентируются обычно совершенно хаотически.

Очень большое число разнообразных, интересных и весьма важных и с познавательной, и с практической точки зрения примеров как скрытой, так и частичной анизотропии можно найти среди элементарных биологических объектов. Современные методы исследования таких объектов (в частности, с помощью электронных микроскопов) показывают, что все или почти все они имеют высоко упорядоченную, сложную структуру, весьма далекую даже от намека на хаос. Нервные волокна, хлоропласты, различные элементы клетки — митохондрии,

рибосомы и т. д. — всему присуща молекулярная упорядоченность, структурность. Но эта структура много сложнее кристаллической. Здесь нет простой повторяемости элементарной ячейки. Зато имеет место как бы иерархия структур — элементарные структуры являются субъединицами вторичных структур, а те в свою очередь — более сложных третичных и т. д. Нет сомнений в высокой биологической целесообразности и важности всех этих структур, что определяет и необходимость их изучения.

Весьма распространенными среди биологически важных молекул являются асимметричные соединения, т. е. такие, которые существуют в виде левой и правой форм. Их важнейшее свойство — вращение плоскости поляризации. Соответственно оно служит и самым эффективным методом их изучения. Кроме биохимии и биологии эти исследования имеют большое значение в стереохимии и кристаллографии.

Главными методами исследования анизотропии вещества, основанными на поляризации света, следует считать поляризованную люминесценцию, дихроизм, оптическую активность и двойное преломление.

Не ставя задачи сколько-нибудь подробно осветить эту обширную и разнообразную область исследований, мы в следующих разделах приведем лишь ряд примеров, иллюстрирующих плодотворность указанных методов.

Здесь следует рассказать об экспериментальных методах и приборах для измерения поляризационных характеристик света.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СТЕПЕНИ ПОЛЯРИЗАЦИИ И ПОВОРОТА ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Подробное изложение экспериментальной стороны дела не входит в задачу этой книги. Интересующиеся могут найти технические подробности и описание разнообразных конкретных приборов в специальной литературе¹. Ограничимся здесь изложением только общих идей и физических принципов экспериментальных методик измерения основных поляризационных характеристик.

¹ Например, в кн.: *Б. И. Васильев*. Оптика поляризационных приборов. М., изд-во. «Машиностроение», 1969 г.

Все основные приборы для измерения поляризации света называют поляриметрами. Нельзя считать удачным, что одним и тем же названием именуют приборы для измерения разных характеристик, но так уж сложилось исторически. Основным недостатком термина заключается в его двусмысленности. Физики обычно называют поляриметрами устройства для измерения степени поляризации света. Химики — приборы для измерения угла поворота плоскости поляризации. В этом случае поляриметры иногда называют еще сахариметрами (потому что в практическом отношении сахар — одно из важнейших оптически активных веществ). Если измерения проводятся не интегрально, а по спектру, отдельно для разных длин волн, то приборы называют опять же в обоих случаях спектрополяриметрами.

Сначала речь пойдет о поляриметрах для измерения степени поляризации.

В главе VI уже говорилось о том, что комбинация кристаллической пластинки и николя-анализатора способна обнаруживать наличие поляризации света по появлению интерференционной картины. Такое устройство можно сделать поляриметром, добавив к нему компенсатор (рис. 61). Им чаще всего служит стопа стеклянных пластинок, частично поляризующая проходящий через нее свет (см. главу V).

Эта поляризация, вносимая стопой, зависит от ориентации стопы относительно направления луча и преимущественного направления электрического вектора. Можно так расположить стопу, чтобы создаваемая ею поляризация была равна по абсолютной величине и противоположна по знаку поляризации самого измеряемого светового потока. Тогда наблюдатель зафиксирует исчезновение интерференционной картины. Легко понять, что для нахождения компенсирующего положения стопу надо поворачивать вокруг оси, совпадающей с направлением преимущественных световых колебаний. Тогда они станут «глядеющей» компонентой и будут сильнее ослабляться за счет отражения. Конечно, перед измерениями стопа должна быть предварительно проградирована по источникам света с известной поляризацией. Это обстоятельство наряду с другими ограничивает точность измерений.

Другой широко известный визуальный поляриметр Корню основан на разделении взаимно перпендикулярных

компонент с помощью поляризационной призмы Волластона. На пути этих двух потоков помещается анализатор, с помощью которого можно уравнивать освещенность полей в обоих потоках. Рис. 62 поясняет сказанное. Освещенность обоих полей будет одинакова при такой ориентации николя, когда проекции компонент A_1 и A_2 на пропускемое им направление NN сравняются. Из чертежа легко видеть, что $\operatorname{tg} \varphi = A_2/A_1$, отношение интенсивностей $I_2/I_1 = \operatorname{tg}^2 \varphi$, а степень поляризации $P = (I_1 - I_2)/(I_1 + I_2) = (1 - \operatorname{tg}^2 \varphi)/(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) = \cos 2\varphi$. Именно угол 2φ удобно измерять на опыте — это угол поворота анализатора между двумя положениями с равной освещенностью обоих полей. Никакого компенсатора в этом случае не требуется. Поэтому поляриметр Корню очень портативен и удобен в работе.

Точность визуальных методов измерения степени поляризации ограничена, однако, контрастной чувствительностью глаза человека, т. е. пределом его способности различать разную освещенность. При достаточно малом различии глаз его не ощущает. Это приводит к ошибкам в измерении степени поляризации. Особенно большими становятся эти ошибки,

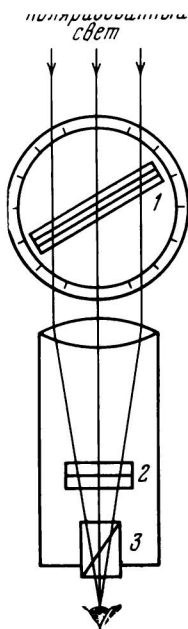


Рис. 61. Схема поляриметра с полярископом Савара и компенсирующей стопой

1 — компенсирующая стопа на лимбе, 2 — пластинка Савара, 3 — николю

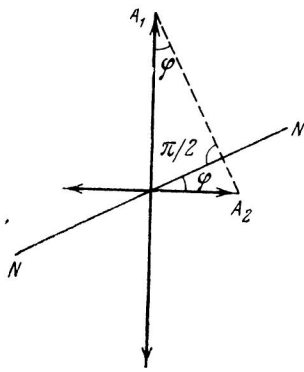


Рис. 62. Схема, поясняющая принцип действия поляриметра Корню

если невелика сама степень поляризации и слаба интенсивность измеряемого светового потока, а в научных и практических задачах такие случаи как раз очень часты.

В фотоэлектрических приемниках света (современных фотоэлектронных умножителях — ФЭУ) может быть достигнута весьма высокая чувствительность, а следовательно, и «контрастная чувствительность» при измерении двух потоков разной интенсивности одновременно двумя разными ФЭУ или последовательно одним и тем же. Техника изготовления ФЭУ непрерывно совершенствуется, чувствительность неуклонно повышается и уже сейчас очень высока.

Поэтому в последние годы с успехом разрабатываются фотоэлектрические установки для измерения степени поляризации света. Эти установки бывают двух типов. Один тип можно назвать модуляционным, другой — статическим. В первом случае модулируется (т. е. периодически меняется со временем) интенсивность поляризованного света. Для этого, например (простейший способ), на пути пучка ставят вращающийся поляризатор. На ФЭУ будет подан переменный световой сигнал, а с ФЭУ снят переменный электрический сигнал, глубина модуляции которого (т. е. относительные изменения со временем) однозначно связана со степенью поляризации, что и дает возможность ее измерить.

Статический способ основан на отдельном измерении компонент с взаимно перпендикулярной поляризацией, на которые световой поток разделяется, например, с помощью поляризационных призм с большим углом расхождения (типа призмы Аббе).

Современные фотоэлектрические поляриметры обладают высокой чувствительностью и точностью.

Перейдем теперь к поляриметрам второго типа — приборам для измерения вращения плоскости поляризации.

Простейшей установкой для этой цели может служить пара скрещенных николей. Если между ними поместить оптически активную среду, то наступит просветление. Погасить его можно, повернув анализатор на угол, равный искомому углу вращения плоскости поляризации. Однако точность такого примитивного метода невысока. Широкое применение нашли так называемые полутеневые устройства, в которых установка производится не на темноту, а на равное освещение двух половин поля, что приводит к

большей точности измерений. Это достигается следующим образом. Поляризатор заменяется парой поляризаторов, разделяющих поле зрения на две части. Направления пропускаемых ими колебаний составляют малый угол. Обе половины будут одинаково освещены, если анализатор ориентировать по биссектрисе угла между этими направлениями. Если теперь поместить между поляризатором (двойным) и анализатором оптически активное вещество, то равенство освещенностей нарушится. Оно восстановится, если анализатор повернуть на угол, равный углу вращения плоскости поляризации в активном веществе.

Для точных измерений и в этой области в последнее время применяются фотоэлектрические устройства. В них используется установка на минимум интенсивности света (т. е. «на темноту»), прошедшего через поляризатор, активное вещество и анализатор. Поворотом анализатора компенсируется вращение плоскости поляризации в веществе. Таким образом, схема установки простейшая. Однако фотоэлектрическая регистрация сигнала намного повышает точность. Для того чтобы еще увеличить чувствительность и точность, сигнал превращают в переменный, модулируют. Один из лучших способов модуляции основан на эффекте Фарадея в переменном магнитном поле, создающем качания плоскости поляризации около нулевого положения. Модулированный сигнал с известной частотой с ФЭУ подается на специальное радиотехническое устройство. При скрещенных николях в отсутствие оптически активного вещества сигнал на выходе этого устройства равен нулю (или минимален). При введении активного вещества появляется сигнал, который компенсируется до нуля (или до минимума) точным поворотом анализатора. Точность измерений вращения плоскости поляризации в таких установках составляет несколько угловых секунд.

2. ПОЛЯРИЗОВАННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И ДИХРОИЗМ

Начнем с рассказа о том, как с помощью поляризации люминесценции удастся исследовать взаимодействие между молекулами в жидких и твердых телах.

Одним из важных и весьма распространенных в живой и неживой природе видов межмолекулярного взаимодействия является обмен энергией возбуждения. Если моле-

кула, поглотив квант энергии (за счет внешнего возбуждения любого типа — светового, химического и др.), перешла в возбужденное, неустойчивое состояние, то через очень короткий интервал времени (доли секунды) она этот избыток энергии вновь отдает в окружающую среду, либо излучив квант света, либо увеличив температуру этой среды. Но, оказывается, возможен еще один процесс — возбужденная молекула может безызлучательно передать энергию возбуждения другой молекуле, до этого невозбужденной. Конечно, для этого вторая молекула должна быть расположена не слишком далеко. Этот процесс называют миграцией энергии или переносом энергии возбуждения. Это очень интересный процесс хотя бы уже потому, что он представляет собой новый тип распространения энергии в пространстве. Интерес к миграции энергии очень велик еще и потому, что несомненна ее огромная роль в важнейших биологических процессах (в частности, в фотосинтезе), а также во многих явлениях, относящихся к фотохимии, радиационной химии, физике твердого тела и ряду других областей науки.

И вот оказывается, что поляризованная люминесценция является тончайшим методом исследования этого процесса. Начнем с растворов. Как мы знаем (см. главу IV), люминесценция растворов частично поляризована, если ее возбуждать линейно поляризованным светом. Степень поляризации люминесценции P различна для разных растворенных веществ, так как она зависит от анизотропии их молекул. Кроме того, P зависит от температуры и вязкости раствора. Но сейчас мы займемся совсем другой зависимостью.

Выберем какое-то одно люминесцирующее вещество, например самый ярко светящийся краситель — флуоресцеин (само название вещества говорит об этом). В качестве растворителя лучше всего подходит из-за большой вязкости глицерин. Предусмотрим в опыте постоянство температуры и вязкости раствора. Будем измерять степень поляризации люминесценции в зависимости от концентрации раствора. Иными словами, приготовим серию стандартных по всем параметрам растворов, но с разной концентрацией, и в строго одинаковых условиях для всех них произведем нужное измерение. Результат серии таких измерений приведен на рис. 63. Сначала, пока концентрации невелики (от миллионных до тысячных долей про-

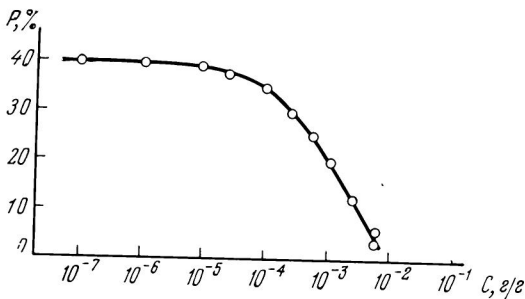


Рис. 63. Концентрационная деполяризация люминесценции растворов флуоресцеина

цента), степень поляризации остается постоянной. Но в области, где концентрации становятся равными сотым и десятым долям процента, степень поляризации резко уменьшается и падает до нуля при концентрации порядка процента. Таковы экспериментальные факты. Единственное возможное их истолкование состоит в следующем. При относительно больших концентрациях средние расстояния между растворенными молекулами становятся сравнительно маленькими (несколько десятков ангстрем). На такие расстояния возможен перенос энергии возбуждения от одной молекулы к другой. Но вспомним, что флуоресценция раствора поляризована только потому, что она возбуждается линейно поляризованным светом. Возбуждаются преимущественно те молекулы, осциллятор поглощения которых имеет направление, близкое к направлению электрического вектора возбуждающего света. Если же за время возбужденного состояния произойдет перенос энергии к другой молекуле, то эта вторая молекула в общем случае оказывается ориентированной иначе, чем первая. Произойдет, следовательно, утрата анизотропии, созданной в растворе при возбуждении. Другими словами, произойдет деполяризация люминесценции. Достаточно сравнительно небольшого числа актов переноса, чтобы деполяризация была полной.

Таким образом, с помощью этого простого явления можно легко обнаруживать и исследовать очень тонкий процесс, идущий на молекулярном уровне. Информация, получаемая из концентрационной деполяризации, весьма детальна. Достаточно сказать, что из хода графика $P(C)$

(см. рис. 63) можно определить концентрации, а следовательно, и межмолекулярные расстояния, при которых происходит перенос энергии.

Этот метод нашел успешное применение в молекулярной биологии. Ограничимся двумя примерами. Сравнение поляризации люминесценции хлорофилла в жидких растворах малой концентрации и в суспензиях хлоропластов показало, что во втором случае степень поляризации значительно меньше. Этот факт рассматривается как прямое экспериментальное доказательство миграции энергии между молекулами хлорофилла в гранах хлоропластов. Несомненна существенная роль этой миграции в сложном процессе фотосинтеза. Столь же несомненна и полезность простого и эффективного поляризационного метода, позволяющего на молекулярном уровне изучать это явление.

Другой пример относится к изучению белков. Некоторые аминокислоты (важнейшие элементы в структуре белка), например триптофан, обладают интенсивной ультрафиолетовой люминесценцией. Сравнение поляризации люминесценции свободного триптофана в растворе и люминесценции белков, содержащих триптофан, показало, что во втором случае степень поляризации значительно меньше. Не исключено, что определенную роль здесь играет структура белка, характер и ориентация триптофановых групп в макромолекуле белка и влияние соседних групп. Но подробный и всесторонний анализ экспериментов позволил исследователям прийти к выводу, что главной причиной деполяризации является миграция энергии между триптофановыми группами. Это дало возможность использовать деполяризацию люминесценции триптофана как тонкий инструмент исследования энергетических процессов, происходящих внутри белковой молекулы. По величине деполяризации удалось рассчитать эффективность миграции в различных белках, а также в ядрах и митохондриях клеток. Оказалось, что эффективность миграции весьма различна в разных белках. В некоторых она очень велика. Вряд ли следует доказывать важность полученных результатов для дальнейшего углубленного изучения белков.

С помощью поляризации люминесценции можно также исследовать миграцию энергии в кристаллах. Только метод здесь применяется иной. Ведь описанный выше метод

концентрационной деполаризации в растворах основана на хаотичной ориентации молекул растворенного вещества в жидкости, а в кристаллах все молекулы находятся в упорядоченном, ориентированном состоянии. Кроме того, в кристалле невозможно менять концентрацию молекул, как в растворе. Она задана строением решетки.

В применении к кристаллам метод основан на следующих соображениях. Как уже упоминалось (см. главу IV), в молекулярных кристаллах молекулы ориентированы несколькими способами, чаще всего двумя (см. рис. 11, кристалл антрацена). Разберем вопрос о поляризации люминесценции такого кристалла при возбуждении линейно поляризованным светом. Пусть на рис. 64 штриховые линии a и b схематически обозначают кристаллографические оси, а стрелки O_1 и O_2 — направления осцилляторов излучения молекул соответственно одного и другого вида ориентации. Будем изменять направление электрического вектора E возбуждающего света и измерять соответствующую каждому его положению степень поляризации люминесценции $P = (I_1 - I_2) / (I_1 + I_2)$, где I_1 и I_2 — компоненты интенсивности по осям a и b . Вероятность возбуждения осцилляторов O_1 и O_2

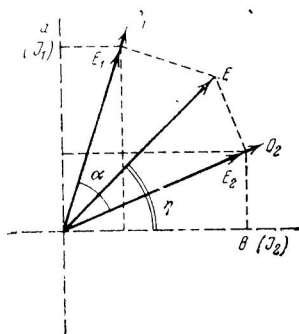


Рис. 64. Схема возбуждения люминесценции молекулярного кристалла линейно поляризованным светом

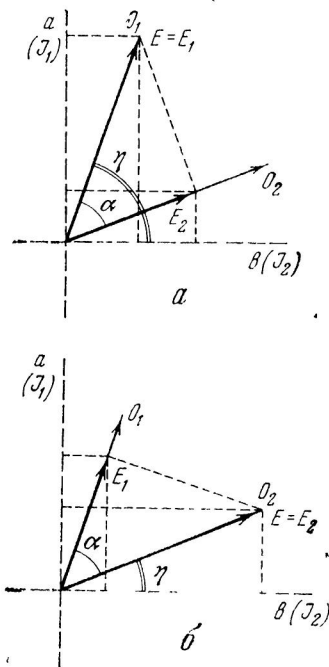


Рис. 65. Два частных случая предыдущей схемы

определяется проекциями электрического вектора E на их направления (E_1 и E_2). В свою очередь I_1 и I_2 определяются суммами проекций возбужденных осцилляторов $O_1(E_1)$ и $O_2(E_2)$ на оси a и b .

Отсюда нетрудно понять, что степень поляризации люминесценции должна зависеть от ориентации вектора E , т. е. от угла η . Для того чтобы это стало вполне ясно, рассмотрим два случая, когда E совпадает с O_1 (рис. 65, *a*) и когда E совпадает с O_2 (рис. 65, *б*). В первом случае O_1 возбуждается сильнее, чем O_2 , во втором случае — наоборот. С другой стороны, осциллятор O_1 имеет большую вертикальную компоненту, чем горизонтальную, следовательно, излучение осциллятора O_1 имеет положительную степень поляризации. Степень поляризации излучения осциллятора O_2 будет, наоборот, отрицательной. Степень поляризации суммарной люминесценции кристалла будет зависеть от соотношения интенсивностей излучения осцилляторов O_1 и O_2 . Ясно, что при переходе от случая *a* к случаю *б* степень поляризации должна уменьшиться. Изменение это в свою очередь должно зависеть от угла α между осцилляторами. На рис. 66 приведена для примера рассчитанная кривая I (для кристалла стильбена), показывающая, какова должна быть зависимость степени поляризации люминесценции P от угла η , определяющего положение вектора E . Зависимость получается очень сильная и характерная. Однако на том же рисунке приведены и экспериментальные результаты (прямая 2), и они показывают совсем иную картину — полную независимость P от η . Дальнейшие исследования показали, что этот, на первый взгляд парадоксальный, результат может быть объяснен только одним способом — он свидетельствует о миграции энергии между молекулами в кристалле. В результате этого энергия возбуждения перераспределяется между молекулами и осцилляторы разной ориентации оказываются возбужденными в равной степени независимо от положения электрического вектора возбуждающего света.

Этим способом оказалось возможным исследовать также миграцию энергии между молекулами примеси, введенной в инородный кристалл. В этом случае расстояния между молекулами зависят от концентрации примеси и могут быть сделаны много большими, чем постоянная кристаллической решетки.

Наконец, приведем еще один пример — как исследо-

вание миграции энергии с помощью поляризованной люминесценции позволяет изучать внутреннюю структуру пленок полимеров.

Для этой цели используется сенсibilизированная люминесценция. В пленку вводятся молекулы двух веществ — *D* (донор) и *A* (акцептор), свойства которых подобраны так, чтобы осуществлялась миграция энергии от *D* к *A*. Возбуждаются линейно поляризованным светом только молекулы *D* (для этого соответствующим образом подобраны спектры поглощения *D* и *A*), а наблюдается поляризация люминесценции вещества *A*, молекулы которого возбуждаются только за счет миграции энергии от молекул *D*. Очевидно, что если опыт производится в вязком, жидком растворе, то люминесценция акцептора *A* оказывается неполяризованной, так как молекулы *A* ориентированы хаотично относительно молекул *D*. Казалось бы,

в пленках полимера, изготовленных без какого-либо механического растяжения и в целом изотропных (в этом легко убедиться, исследуя их между скрещенными николями), естественно ожидать такого же результата, как в жидком растворе. Однако в пленках люминесценция акцептора оказывается частично поляризованной.

Этот факт объясняется особенностями структуры полимерных пленок. Эти пленки обладают своеобразной внутренней скрытой анизотропией. Не все длинные полимерные макромолекулы в пленке расположены и ориентированы хаотично относительно друг друга. Определенные группы этих длинных молекул образуют так называемые

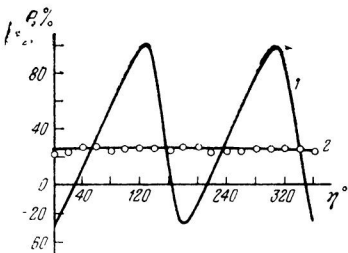


Рис. 66. Зависимость поляризации люминесценции от поляризации возбуждающего излучения для кристалла стильбена
1 — теоретический расчет; 2 — экспериментальные данные

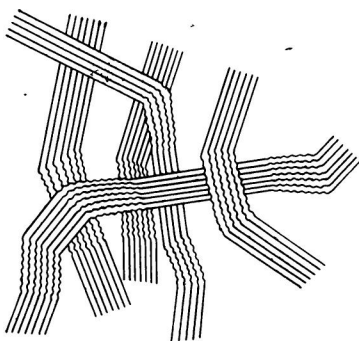


Рис. 67. Схема пачечной структуры полимера

пачки, внутри которых они располагаются параллельно (рис. 67). Ориентация эта осуществляется за счет взаимодействия между молекулами. Пачки же друг относительно друга ориентированы произвольно, так что в целом пленка изотропна. Поперечный размер пачек — от нескольких сотен до тысячи ангстрем. Этот размер больше того расстояния, на которое происходит миграция энергии между молекулами D и A , внедренными в пленку. Поэтому перенос энергии между молекулами, находящимися в одной пачке, имеет большую вероятность. Но эти молекулы ориентированы примерно одинаково — их положение определяется параллельными полимерными макромолекулами одной и той же пачки, следовательно, перенос энергии от D к A в этом случае не приводит к деполяризации люминесценции.

С помощью поляризованного света можно также исследовать анизотропию полимерных пленок, подвергнутых механическим деформациям. (Например, растяжению — это важный и распространенный технологический процесс в производстве полимеров и пластмасс.) Для этой цели могут служить двойное преломление, дихроизм и опять же поляризованная люминесценция. В последнем случае можно воспользоваться как собственной люминесценцией полимера (если таковая имеется), так и люминесценцией специально введенного в полимер красителя с анизотропными молекулами, которые ориентируются своей длинной осью вдоль направления растяжения пленки. Ориентация, конечно, получается неполной и зависит от степени растяжения. Мерой ориентации и может служить степень поляризации люминесценции, возбуждаемой естественным светом и наблюдаемой в направлении возбуждения.

Немного более сложными приемами можно исследовать и более сложные деформации пленки, например двумерное плоское растяжение, которое также важно в технологическом отношении. Аналогичную информацию о частичной ориентации пленок можно получать независимым путем, измеряя степень дихроизма пленки. Наличие двух разных способов экспериментального исследования повышает достоверность выводов. С помощью этих довольно простых методов можно, например, осуществлять технологический контроль в производстве полимеров.

Поляризация люминесценции молекулярных кристал-

лов позволяет определять ориентацию молекул в их решетке. Особенно полную информацию дает измерение поляризационных диаграмм (зависимость поляризации от направления наблюдения по отношению к осям кристаллов).

Одним из наиболее ценных результатов, полученных при этом, является определение ориентации молекул посторонней примеси в основной решетке при малой концентрации примеси. Дело в том, что чувствительности других методов (например, рентгеноструктурного анализа) хватает только до концентраций порядка процента. Поляризационно-люминесцентный метод вследствие своей очень высокой чувствительности может применяться до концентраций порядка десятитысячных долей процента.

А теперь вернемся к жидким растворам. В них поляризованная люминесценция позволяет получать ценные сведения также и об объемах, и форме люминесцирующих молекул. Будем теперь иметь дело с растворами малых концентраций, когда миграция энергии отсутствует и концентрационной деполяризации не происходит. Но остается другой тип деполяризации, которую называют ротационной и которая связана с броуновским вращением молекул. Это беспорядочное вращение приводит к частичной или даже полной утрате анизотропии, созданной линейной поляризацией возбуждающего света. В жидкостях с большой вязкостью (например, глицерине), а также при низких температурах ротационная деполяризация не столь велика, чтобы свести поляризацию к нулю. В маловязких же растворах (например, водных или спиртовых) поляризацию люминесценции по этой причине почти никогда не удается наблюдать. Ротационная деполяризация зависит не только от общих параметров раствора (температуры и вязкости), но и от свойств самих люминесцирующих молекул — размеров, формы, моментов инерции относительно различных осей, а также от времени жизни возбужденного состояния. Разработана математическая теория для молекул различной формы (сферической и эллипсоидальной), связывающая температурную зависимость поляризации люминесценции раствора с перечисленными выше параметрами. По формулам этой теории из экспериментальных данных можно вычислять непосредственно объемы молекул. Если эти объемы получаются различными в разных растворителях, то отсюда можно судить о так называемых сольватных оболочках, упрощенно говоря, о

слоях молекул растворителя, налипающих на молекулу растворенного вещества. Эти данные позволяют также судить о микроскопической природе вязкости и вообще имеют большое значение для изучения природы жидкого состояния и теории растворов.

На первый взгляд кажется, что эти методы применимы только к ограниченному кругу люминесцирующих молекул. Однако его можно чрезвычайно расширить, используя простой, но эффективный прием: присоединяя к нелюминесцирующим молекулам, которые нужно изучить, небольшие люминесцирующие группы или радикалы. Присоединение может осуществляться химическими связями, адсорбцией и т. д.

Этот способ можно назвать методом меченых молекул (по аналогии с методом меченых атомов), только метка здесь не радиоактивная, а люминесцентная. Очевидно, что ротационная деполяризация будет определяться объемом и формой всего комплекса (носитель + метка), а если метка очень мала по сравнению с носителем, то из полученных данных можно судить о параметрах самой молекулы-носителя.

Этот метод широко применяется для исследования белковых молекул и их вторичных структур (глобулярных и иных). При этом вследствие очень большого их размера удается получить поляризованную люминесценцию меченых белковых молекул даже в водных растворах. Это обстоятельство во многом упрощает экспериментальную сторону дела.

Применяется эта методика также и в области технологии полимеров; например, для изучения укрупнения молекул в процессе полимеризации, а также для изучения коллоидов и других объектов.

Можно привести в качестве еще одного примера различие истинной и «ложной» вязкости систем с помощью поляризации люминесценции. Казалось бы, желатиновые растворы имеют огромную вязкость, но поляризация люминесценции красителей в этих растворах почему-то отсутствует. Это обстоятельство сыграло важную роль в установлении природы «ложной» вязкости желатины и других сходных веществ. Они в набухшем состоянии представляют собой решетку регулярных ячеек, наполненных водой. В этой воде и растворен краситель, так что истинная молекулярная вязкость раствора действительно очень

мала, что и приводит к полной деполяризации люминесценции.

И еще одно очень интересное и важное применение нашел поляризационный метод в биологии. Имеющиеся в настоящее время экспериментальные работы, на которых мы здесь останавливаться не будем, показывают, что этот метод полезен при изучении вязкости различных биологических микроробъектов, например плазмы клеток.

3. ОПТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ

Как мы уже знаем (см. главу V), оптической активностью, или способностью вращать плоскость поляризации, обладают только асимметричные среды — растворы дисимметричных молекул, а также энантиоморфные кристаллы. Асимметрией называется способность вещества (молекул, кристаллов) существовать в двух формах — правой и левой, являющихся зеркальными отражениями друг друга (подобно правой и левой рукам). Понятия правого и левого — очень принципиальные и глубокие свойства пространства. Об этом свидетельствуют, в частности, и современные данные физики элементарных частиц.

Наиболее привычный образ, связанный с понятием асимметрии, — это образ правого и левого винта. И это не случайно. Винтообразность, спиральность структуры внутренне присуща асимметричным веществам. Асимметричные молекулы не имеют плоскости и центра симметрии. Подавляющая часть асимметричных молекул органических веществ содержит асимметричный элемент структуры — атом углерода, связанный четырьмя валентными связями с различными радикалами. На рис. 68 приведен один из примеров. Пространственная структура этой группы представляет собой тетраэдр, вершинами которого являются радикалы R_1, R_2, R_3, R_4 , а в центре находится атом углерода. Нетрудно видеть (рис. 69), что структура такого тетраэдра образуется как бы винтовым движением — преобразованием линии $R_3 - R_4$ в линию $R_1 - R_2$ содержит в себе поступательное движение и поворот (шаг винта).

Таким образом, углеродный тетраэдр можно считать как бы элементарной ячейкой винтовой структуры. Очень существенно, что радикалы R должны быть различны.

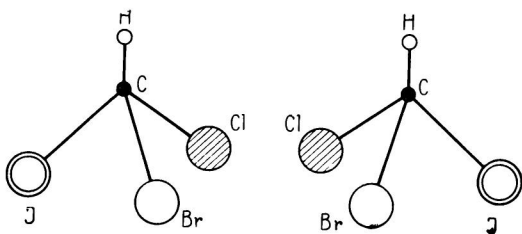


Рис. 68. Зеркальные изомеры асимметричной молекулы с центральным атомом углерода

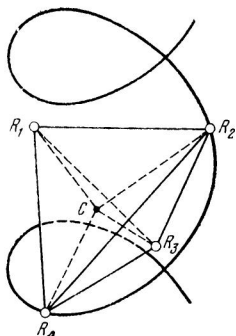


Рис. 69. Винтовой характер структуры тетраэдра

Если бы они были одинаковы, то такая структура в одинаковой степени могла бы описываться и правым и левым винтом, следовательно, не обладала бы асимметрией.

Асимметричные молекулы существуют в виде двух форм — правой и левой, которые не превращаются друг в друга. Зеркальные изомеры вещества имеют, как правило, одинаковые химические свойства, одинаковую плотность, температуру плавления и т. д. Основное и важнейшее их специфическое свойство — оптическая активность, причем левые и правые формы вращают плоскость поляризации в разном направлении. Это единственный надежный и точный метод дифференцировки и исследования разных форм асимметричных веществ. Отсюда понятна его исключительная роль в изучении асимметрии.

Кристаллические структуры, построенные из дисимметричных молекул, как правило, тоже обладают оптической активностью. Но есть и довольно много кристаллов, построенных из неактивных молекул, но вращающих плоскость поляризации. В этом случае винтовые структуры образуются в решетке кристалла, как целом, и представляют его коллективное свойство. При растворении или расплавлении такого кристалла оптическая активность вновь утрачивается.

Рассмотрим сходство и различие анизотропии систем (например, твердых и жидких растворов), состоящих из анизотропных молекул, и асимметрии жидкостей и растворов, состоящих из дисимметричных молекул (часто для

различения, о молекулярных или макроскопических параметрах идет речь, применяют именно такую терминологию).

Раствор анизотропных молекул изотропен, если молекулы никаким внешним воздействием не ориентированы и расположены хаотично. Это понятно, ибо в такой системе будет в среднем равное число молекул с противоположной ориентацией и анизотропия одних будет «погашаться» анизотропией других. В целом раствор будет изотропен.

В случае же раствора дисимметричных молекул одного сорта (например, левых) не требуется никакой ориентации, чтобы среда в целом была асимметричной и обладала оптической активностью. Если все молекулы одного сорта, то все они и будут вращать плоскость поляризации в одну и ту же сторону (хотя, вообще говоря, и в разной степени в зависимости от ориентации), но никогда в другую сторону.

Если искать аналогию между анизотропией и асимметрией растворов, то неориентированному изотропному раствору аналогичен рацемат, или рацемическая смесь, в котором содержится равное число молекул правой и левой формы и который поэтому в целом не дает поворота плоскости поляризации.

В неживой природе асимметричные вещества встречаются только в виде рацематов. Такое состояние наиболее вероятно, оно обладает максимальной энтропией. В обычных реакциях химического синтеза также всегда получается рацемическая смесь.

Совершенно иная картина в живой природе. Важнейшие биологические вещества — аминокислоты, белки, нуклеиновые кислоты, углеводы — присутствуют во всех живых организмах в виде чистых дисимметричных форм, чистых антиподов. Это свойство живого открыто уже давно, оно несомненно имеет очень большое общепологическое значение, но суть этого значения до сих пор не вполне понятна. С общей точки зрения важно отметить, что в этом проявляется отклонение энтропии данной системы от максимально возможного значения. Это отличительное свойство живых организмов выражает общий закон упорядоченности живой материи.

Очевидно, асимметрия является по каким-то причинам «выгодной» для жизни, поэтому это свойство, раз возникнув, и было закреплено в процессе эволюции.

Вопрос о причинах первичного возникновения асимметрии живого вещества не имеет пока однозначного ответа. Для нас сейчас представляет наибольший интерес следующая гипотеза. Установлено экспериментально, что свет, поляризованный по кругу, действует на рацематы избирательно. Например, он преимущественно разлагает левые, а не правые антиподы или способствует синтезу одних форм сильнее, чем других.

С другой стороны, есть основания полагать, что в солнечном свете, рассеянном в земной атмосфере, имеется некоторое преобладание правоциркулярно поляризованной компоненты над левоциркулярной. Причина этого лежит во вращении плоскости поляризации магнитным полем земли (см. главу IX).

Преобладание этой компоненты вызвало направленные химические процессы и создало первые чистые асимметричные системы, а затем естественный отбор сделал свое дело.

Вопрос о причинах биологической целесообразности чистых асимметричных форм по сравнению с рацематами также до конца не ясен. Однако ряд экспериментальных данных убедительно говорит о чрезвычайной важности асимметрии для жизненных процессов. Достаточно привести следующие факты. Важнейшие для организмов вещества — белки, липиды, углеводы, нуклеиновые кислоты, — существуют в живых системах только в виде чистых антиподов. В то же время вещества, менее важные для жизни — продукты частичной и полной переработки, резервные вещества и т. п. — встречаются и в виде обоих антиподов и даже частично в виде рацематов. Второй факт, свидетельствующий о том же, — это обнаруженный процесс рацемизации при старении живого вещества. Имеются данные, полученные биологами, о преимуществах оптически активных живых систем по сравнению с рацемическими в таких важнейших биологических процессах, как, например, явления роста. В общем не вызывает сомнения, что асимметрия приводит к существенному повышению ряда специфических функций протоплазмы. Трудно переоценить значение исследования относящихся сюда вопросов для решения таких общих и широких проблем, как проблема специфики живого и проблема происхождения жизни. И основной экспериментальный метод здесь — вращение плоскости поляризации. Поэтому распространенное мнение

о том, что этот метод среди всех других оптических методов для биологии является важнейшим, нельзя назвать переоценкой. Интересно отметить, что асимметрия широко свойственна не только биологически важным молекулам, но и организмам в целом на морфологическом уровне (винтовые структуры колоний бактерий, правые и левые спирали раковин, винтовое строение вьющихся растений). Первые исследования и велись на этом уровне. Важным шагом было установление того факта, что в основе макроскопической асимметрии лежит дисимметрия молекулярная. Как и вообще в биологии, переход на молекулярный уровень исследования был здесь очень плодотворен.

Кроме чисто научного, познавательного это направление исследований имеет также большое значение и для ряда конкретных научных проблем. Ограничимся несколькими примерами. Широко известно, что существуют две теории происхождения нефти — неорганическая и органическая. Каждая из этих теорий имеет ряд веских доводов. Обнаруженная экспериментально оптическая активность нефти является важнейшим доказательством ее органического происхождения. Если бы нефть была по происхождению минеральным продуктом, она бы представляла собой рацемат.

Асимметрия может быть использована как метод изучения определенных биологических объектов. Дело в том, что если действовать на асимметричную протоплазму левыми и правыми изомерами различных органических веществ, то относительная эффективность действия этих изомеров зависит от химического состава плазмы.

Следовательно, этот метод, получивший название асимметрического анализа, дает возможность изучать состав и строение живых систем.

Оптическая активность и ее дисперсия (зависимость от длины волны) служат ценным методом исследования структуры и свойств биополимеров — белков, нуклеиновых кислот. Они, как правило, имеют спиральные структуры и сильно вращают плоскость поляризации. При этом оптическая активность, например, вдоль и поперек спирали существенно различна. Сильные изменения активности происходят при различных важных структурных изменениях биополимеров, например при сворачивании спиралей в клубки.

Ценным новым методом является исследование дисперсии оптической активности красителей, связанных с нуклеиновыми кислотами. Это тоже метод меченых молекул (см. предыдущий раздел). В свободном состоянии эти красители неактивны, но приобретают это свойство при посадке, например, на ДНК. При этом приобретенная оптическая активность зависит от места и характера посадки — от того, например, садятся ли молекулы поодиночке или связанными парами (димерами). Все это дает широкие возможности получать детальную информацию о свойствах изучаемых структур.

Молекулярной биологией и биохимией не исчерпывается, конечно, область применения метода вращения плоскости поляризации. Он имеет важное значение в исследованиях структуры и свойств различных молекул и в особенности в стереохимии — учении о пространственном строении молекул. Именно с помощью оптической активности примерно сто лет назад Л. Пастером были заложены основы этого учения. В органической химии с помощью этого метода также решаются важные задачи — исследуется влияние заместителей, сопряженных связей в молекулах и т. д.

Чрезвычайно высокая чувствительность метода, сама по себе очень ценная, приводит к значительным экспериментальным трудностям. Явление очень сильно зависит от температуры, природы растворителя и т. п. и требует точного учета всех факторов.

В неорганической химии метод вращения плоскости поляризации также находит ценные применения, в частности для исследований комплексных соединений. С его помощью удалось расшифровать пространственную структуру ряда комплексных ионов.

Широко применяется оптическая активность и в исследовании кристаллов. Кристаллы, способные вращать плоскость поляризации, обязательно энантиоморфны, т. е. существуют в виде правых и левых форм. Эти формы определяются зеркальным соответствием строения их решеток, что проявляется наглядно в геометрической форме соответствующих монокристаллов. Оптически активных кристаллов довольно много среди различных сингоний и классов. Один из типичных примеров — кристалл кварца, зеркальные антиподы которого изображены на рис. 70.

Если кристалл не имеет естественной огранки, то определить, какой аптипод он собой представляет, можно лишь единственным, но зато надежным и простым методом — по направлению вращения плоскости поляризации. В ряде случаев этот метод позволяет получить и важные данные о деталях строения кристаллической решетки.

Однако следует сказать, что в исследовании кристаллов основной оптический метод — это двойное преломление.

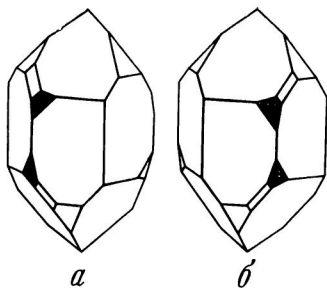


Рис. 70. Энантиоморфные формы левого (а) и правого (б) кварца

4. ДВОЙНОЕ ПРЕЛОМЛЕНИЕ

Распространенность кристаллов в неорганической природе огромна. Большинство минералов — это кристаллы. Многочисленны кристаллы органических соединений. С каждым годом все больше выращивается различных синтетических кристаллов. Кристаллы находят широчайшее применение в технике.

Отсюда ясна важность эффективных и тонких методов исследования и анализа кристаллов, в том числе оптических.

Двойное преломление света — одно из самых общих свойств кристаллов (см. главу V), естественно, что оно нашло широкое применение в их изучении.

Крупные и высококачественные монокристаллы сравнительно редко встречаются в природе, и искусственно вырастить их непростое дело. Гораздо чаще приходится иметь дело с поликристаллическими материалами, т. е. с порошками, состоящими из микроскопических монокристаллов или с кристаллическими конгломератами.

Поэтому главным инструментом в кристаллооптических исследованиях является, как правило, поляризационный микроскоп. Он отличается от обычного наличием поляризатора под предметным столиком и анализатора над ним, так что исследуемый объект расположен между

ними. Поляризатор и анализатор расположены на оси микроскопа и могут вращаться вокруг этой оси независимо друг от друга, так что им можно придавать скрещенное, параллельное и любое другое положение. Вокруг этой же оси может вращаться и предметный столик с образцом.

Исследуемые кристаллики помещаются непосредственно на предметный столик. При исследовании горных пород, минералов, шлаков и др. с помощью специальной методики шлифования изготавливаются тонкие препараты — так называемые петрографические шлифы. Их толщина обычно не превышает 0,02—0,03 мм.

Шлиф на столике расположен перпендикулярно оси микроскопа. Но так как в общем случае шлиф сделан не по заданной кристаллографической плоскости, а по случайной, то эта ориентация шлифа далеко не всегда является наилучшей для исследования. Поэтому необходимо иметь возможность менять ориентацию плоскости шлифа в пространстве.

Замечательным приспособлением для этой цели служит универсальный столик Федорова, изобретенный знаменитым русским кристаллографом (рис. 71). Столик Федорова привинчивается непосредственно на предметный столик микроскопа и позволяет вращать препарат вокруг не одной, а нескольких осей (четырех или пяти), пере-

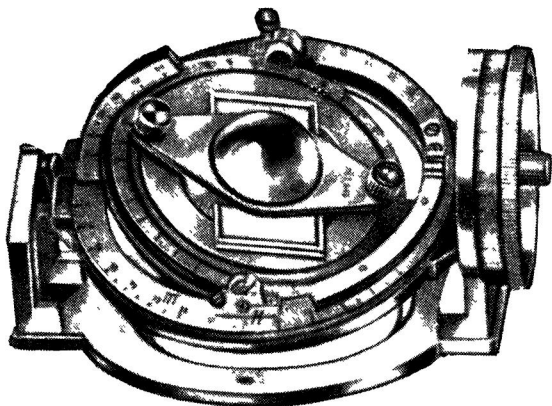


Рис. 71. Четырехосный столик Федорова

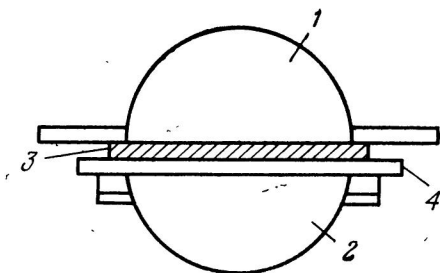


Рис. 72. Стекланные полушаровые сегменты
столика Федорова

1, 2 — верхний и нижний сегменты, 3 — шлиф,
4 — стеклянный кружок столика Федорова

секающихся в одной точке, в центре универсального столика.

Кроме этой системы осей важной деталью столика Федорова являются два стеклянных полушария, между которыми и помещается шлиф (рис. 72). Исследуемая часть шлифа должна попасть в центр образуемой таким образом стеклянной сферы. Коэффициенты преломления кристаллов обычно гораздо ближе к коэффициенту преломления стекла, чем к коэффициенту преломления воздуха. Поэтому преломление на границе шлиф — стекло очень мало, а далее нужные лучи распространяются по радиусам сферы, следовательно, падают на ее поверхность нормально и выходят в воздух, практически не преломляясь. Если бы не было сферы, то такую удобную ситуацию мы имели бы только по направлению, перпендикулярному шлифу. По всем остальным направлениям (а для этого и существует столик Федорова) преломление лучей по выходе из шлифа в воздух затрудняло бы наблюдения и искажало их результаты.

Имея в распоряжении такой универсальный манипулятор для работы с микрокристаллами, исследователь может по их кристаллооптическим свойствам определить симметрию кристалла, сингонию и класс, к которым он относится, и другие данные, которых в большинстве случаев достаточно для однозначного определения вещества кристалла. Особенно широкое применение находят эти исследования в геологии и минералогии.

Важные результаты при этом можно получить из простейших наблюдений. Так, условия погасания в монохроматическом свете между скрещенными николями позволяют определить, как ориентирован срез шлифа по отношению к кристаллографическим плоскостям и какова сингония кристалла. Так же легко обнаруживать между скрещенными николями двойниковое строение кристаллов по различию погасания отдельных монокристаллических зерен в массе конгломерата. Для более точных количественных исследований широко применяются компенсаторы, которые предварительно градуируются. С их помощью можно измерять величину двупреломления в исследуемых образцах, а следовательно, толщину последних. Качественное суждение о толщине и природе шлифов (часто вполне достаточное для проводимого анализа) можно сделать по видимой глазом интерференционной окраске пластинки. Существуют подробные цветовые номограммы, позволяющие для большинства известных минералов определять по интерференционному цвету толщину образца. Наоборот, если толщина (или двупреломление) измерена с помощью компенсатора, то номограмма поможет определить природу минерала. Это особенно важно в минералогическом экспресс-анализе.

Важным методом может служить изучение коноскопических фигур одноосных и двуосных кристаллов в сходящемся пучке света (см. главу VI). Так как коноскопические картины очень специфичны и характерны для кристаллов с разным двупреломлением и разной ориентацией, то с их помощью можно определять ориентацию и судить о природе образцов.

Двойное преломление позволяет также судить о степени совершенства кристаллических решеток по изменениям двупреломления, интерференции, коноскопических картин и т. д., которые наступают при всяких искажениях и нарушениях совершенства решетки, связанных, например, с механической деформацией кристаллов или с иными внешними воздействиями.

Кристаллы — важнейший и самый многочисленный класс веществ, обладающих двойным преломлением света, но ими не исчерпывается область применения этого метода. Все ориентированные среды, частично или полностью анизотропные, обладающие дихроизмом и спонтанной поляризацией люминесценции, в той или иной степе-

ни обладают и двойным преломлением. Поэтому наряду с другими и этот метод используется для изучения таких сред.

Значительным двойным преломлением обладают, например, хлоропласты некоторых высших растений. Именно с помощью этого свойства впервые было установлено анизотропное, пластинчатое строение хлоропластов. Примечательно, что дихроизм хлоропластов очень мал и с его помощью этих результатов получить не удалось.

Широко применяется исследование двупреломления при искусственной ориентации сред, в частности, ориентации частиц в потоке жидкости. В качестве характерного примера можно привести исследование методом двойного преломления в потоке структуры фagosых частиц, в частности, упаковки ДНК в фaгах.

ИНТЕРЕСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРИРОДЕ, СВЯЗАННЫЕ С ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ СВЕТА

1. ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИКА.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГЛАЗА К ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

Каждый по собственному опыту (не всегда достаточно осознанному) знает, насколько чувствительным оптическим инструментом является глаз. Он способен воспринимать и различать интенсивность света, изменяющуюся в чрезвычайно широких пределах (примерно в миллиард раз, вплоть до потоков всего в несколько десятков квантов). Он различает сотни разных оттенков цвета. С его помощью мы получаем информацию о форме и пространственном, трехмерном расположении объектов.

Гораздо менее известно, что невооруженный глаз человека способен непосредственно реагировать и на поляризацию света. И это не удивительно, ибо поляризационная чувствительность глаза не идет ни в какое сравнение по своей «квалификации» с его спектральной или яркостной чувствительностью. Глаз человека реагирует на поляризацию, прямо скажем, плохо, однако все же реагирует, и об этом интересном обстоятельстве стоит рассказать. Да и сам вопрос, почему такой прекрасный оптический инструмент, как человеческий глаз, обладает плохой поляризационной чувствительностью, не лишен интереса.

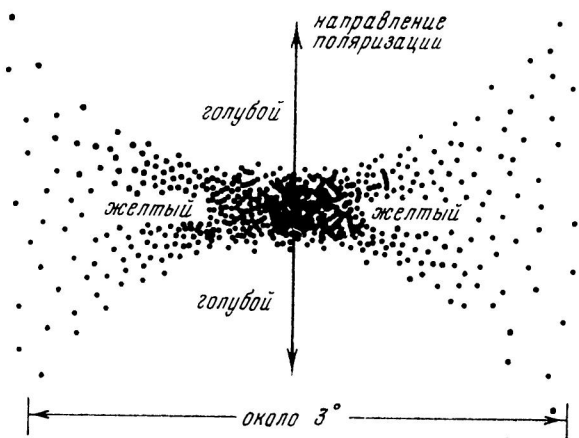
Первым открыл возможность обнаружения поляризации света невооруженным глазом Хайдингер в 1844 г. Прежде всего следует сказать, что этим свойством обладают глаза не всех людей. Сколь часто или редко оно встречается, до сих пор подробно не исследовано, и мнения по этому поводу различны. Наблюдатель, одаренный этим свойством, глядя на однородное поле, освещенное линейно поляризованным белым светом, в течение нескольких секунд видит своеобразную слабо выраженную бледно-желтую фигуру на голубоватом фоне (рис. 73). По своим очертаниям фигура напоминает сноп с расши-

рящимися концами. Ее принято называть фигурой Хайдингера. Ось фигуры перпендикулярна направлению поляризации. Если изменить на 90° направление электрического вектора, то наблюдатель вновь видит фигуру, но ее положение оказывается повернутым на тот же угол. Если поле освещено синим светом, то контрастность фигуры увеличивается.

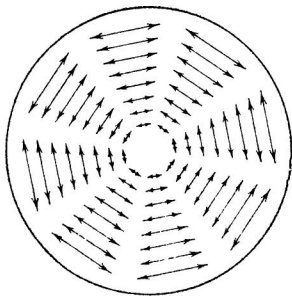
Фигура бывает видна даже в частично поляризованном свете, например на фоне голубого неба.

Аналогичное по своей природе явление открыл в 1940 г. Нейбергер, наблюдавший через поляризатор и пластинку Савара (без анализатора!) слабую систему интерференционных полос. При этом оси симметрии интерференционной картины совпадают с осями фигуры Хайдингера, а контуры фигуры соответствуют местам перехода одной системы полос в другую, дополнительную.

Это говорит о том, что оба явления имеют общую причину. Уже из сказанного ясно, что причина эта — некий анализатор, расположенный в самом глазу. Еще Гельмгольц высказал предположение, что этот анализатор связан с дихроизмом радиальных волокон (так называемых мюллеровых нитей), покрывающих сетчатку глаза вблизи желтого пятна. Этот дихроизм, по-видимому,



Фиг. 73. Фигура Хайдингера



Фиг. 74. Схема радиального поляроида

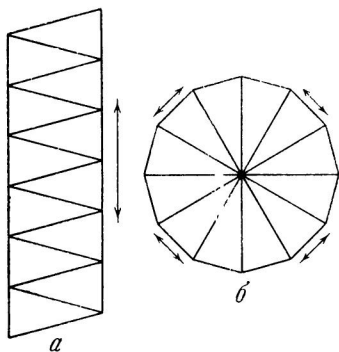


Рис. 75. Изготовление модели радиального поляроида

роны надо разрезать на сектора — равнобедренные треугольники, как показано на рисунке (рис. 75, а). Затем, сложив их как сектора многоугольника (рис. 75, б), получим подобие радиального поляроида. Для вполне хорошего воспроизведения его свойств достаточно 12 секторов. Можно уничтожить резкие границы между секторами, если быстро вращать наш многоугольник вокруг оси, проходящей через его центр. С помощью этого устройства можно объективно воспроизвести и продемонстрировать поляризационные явления в сетчатке. Если поместить радиальный поляроид между проектором и экраном и перед проектором ввести линейный поляризатор, то на экране возникает фигура

объясняется закономерным, а не хаотическим расположением анизотропных молекул желтого пигмента на упомянутых радиальных волокнах. Анализ фигуры Хайдингера показывает, что молекулярные осцилляторы поглощения пигмента должны быть направлены перпендикулярно радиальным волокнам. Таким образом, желтое пятно представляет собой своеобразный «радиальный поляроид», схема которого изображена на рис. 74.

Такой анализатор в различной степени ослабляет разные участки линейно (или частично линейно) поляризованного поля. Это различие имеет свои пространственные закономерности. Они и определяют форму фигуры Хайдингера.

Весьма просто можно изготовить модель радиального поляроида (рис. 75). Для этого полосу поляроида с направлением пропускаемых колебаний вдоль длинной сто-

Хайдингера. Если добавочно ввести после линейного поляризатора пластинку Савара, на экране будут видны интерференционные фигуры Нейбергера. И та и другая картины в общих чертах хорошо воспроизводят соответствующие субъективные ощущения в сетчатке.

Желтую окраску фигуры Хайдингера естественно связать со спектром поглощения желтого пигмента. Именно поэтому поляризационные эптоптические¹ явления имеют место только в синей области спектра. Экспериментально определенные спектральные границы видимости фигуры Хайдингера составляют интервал 400—510 нм, наиболее отчетливо картина видна при освещении светом с длиной волны около 490 нм. Происхождение голубого фона, на котором виден сноп, объясняют явлением цветового контраста.

Впрочем, в ряде новых работ содержатся веские возражения против гипотезы Гельмгольца, связанной с мюллеровыми нитями и желтым пигментом. Указывают, что желтый пигмент не обладает дихроизмом, что он не связан с мюллеровыми нитями, что голубая окраска фона значительно превосходит ожидаемую по явлению контраста и т. д.

Предлагается новая анатомическая гипотеза о природе радиального поляризатора. Предполагается, что его структура связана с самой сетчаткой, находится непосредственно внутри нее среди палочек и колбочек, а может быть, и связана с ними. Кроме того, показано, что все свойства (форма, окраска и пр.) фигуры Хайдингера удается объяснить (и продемонстрировать на модельной установке) точнее и детальнее, если предположить, что анализатор глаза кроме радиального поляроида содержит еще и радиальную фазовую пластинку. Гипотетически связывают эту пластинку с так называемыми волокнами Хенле, которые обладают двойным преломлением, но не обладают дихроизмом.

Очевидно, что оптическая сущность гипотезы Гельмгольца о радиальном анализаторе глаза сохраняет свою силу и несомненно соответствует действительности. Понимание же анатомического строения анализатора, по видимому, пока еще несовершенно и неоднозначно.

¹ Эптоптическими называются оптические явления в самом глазу, связанные с теми или иными свойствами глазных систем и структур.

Фигура Хайдингера наблюдается также в том случае, когда поле освещено циркулярно поляризованным светом. Удивительно, что это было открыто сравнительно недавно, лет сто спустя после открытия Хайдингера, хотя фигура проявляется одинаково отчетливо и в циркулярно и в линейно поляризованном свете.

Если, например, смотреть через правоциркулярный поляроид на ясное или облачное небо, то наблюдатель видит типичную фигуру Хайдингера, ориентированную справа сверху — налево вниз. Вращение поляризатора в его собственной плоскости, как и следовало ожидать, не меняет ориентации фигуры. Левоциркулярный поляроид дает фигуру Хайдингера иной ориентации: слева сверху — вниз направо.

Таким образом, наблюдатель невооруженным глазом может отличить левую циркулярную поляризацию от правой.

Появление фигуры Хайдингера в свете с круговой поляризацией детально еще не изучено и не объяснено. В общих словах смысл явления сводится, по-видимому, к следующему. Некоторые среды глаза обладают двойным преломлением. Следовательно, они превращают циркулярный свет в эллиптически поляризованный. Далее же радиальный анализатор реагирует на него так же, как и на свет, частично линейно поляризованный, в зависимости от азимута поляризации.

Явление Хайдингера находит применение в офтальмологии. С его помощью можно дифференцировать поражение, заболевание самой сетчатки и глазных сред. Если, например, при общем ослаблении зрения сохраняется способность видеть фигуру Хайдингера, то, по-видимому, причина болезни не в сетчатке, а в помутнении или ином изменении глазных сред. Ибо эта способность непосредственно связана с самой сетчаткой, так как непосредственно на ней или даже внутри нее находится радиальный анализатор.

Описанные любопытные явления не могут, очевидно, изменить вывода о том, что поляризационная чувствительность глаза человека если и существует, то в каком-то зачаточном состоянии. Возникает вопрос, почему в процессе эволюции глазу не понадобилось выработать настоящей, «серьезной» поляризационной чувствительности. Казалось бы, она могла, например, очень пригодиться

для ориентации в пространстве в земных условиях, где свет от разных участков неба поляризован различно (см. ниже).

Быть может, дело в том, что этот способ оказался неэффективен из-за недостаточной стабильности поляризации света в условиях непостоянства земной атмосферы. Гораздо более надежными и помехоустойчивыми оказались другие методы, например бинокулярность зрения.

Можно в шутку предположить, что если бы на острове, встреченном Одиссеем в своих странствиях, действительно жили одноглазые великаны — циклопы, такие, как Полифем, то они, может быть, обладали бы поляризационной чувствительностью.

Впрочем, и на самом деле есть существа, в высокой степени обладающие такой чувствительностью. Это насекомые, и прежде всего пчелы.

О зрительных впечатлениях насекомых можно судить либо по их поведению (например, по анизотропии их движения), либо по электроретинограммам (ЭРГ). Второй способ основан на том, что на изменение освещения светочувствительный орган (сетчатка) реагирует изменением электрического потенциала. Если один электрод, соединенный с усилителем постоянного тока и осциллографом, ввести внутрь глаза, а второй электрод фиксировать на какой-нибудь другой части тела, то эти изменения потенциала могут быть зарегистрированы на экране осциллографа в виде так называемой электроретинограммы. Метод ЭРГ широко используется при исследовании зрения как человека, так и различных животных, в том числе членистоногих. Но все же большая часть сведений о поляризационной чувствительности насекомых получена путем наблюдений за их поведением под влиянием поляризованного света.

Давно известно явление, называемое танцем пчел. С помощью танца пчела-разведчица оповещает остальных пчел об обнаруженном ею месте взятка. Танец состоит в том, что пчела, принеся корм, пробегает по прямой несколько ячеек сот, затем возвращается по дуге и повторяет это несколько раз. Если танец происходит на горизонтальной поверхности, то направление прямого пробега и показывает непосредственно направление полета за кормом. Если же танец исполняется на вертикальных сотах, то пчела производит своеобразное преобразование

системы координат: угол пробега по отношению к направлению на Солнце преобразуется в угол по отношению к направлению вертикально вверх (противоположно силе тяжести). Многочисленные наблюдения показали, что видимость Солнца не обязательна для танцующей пчелы. Изучение же зависимости направления прямого пробега от различных внешних условий привело к выводу, что определяющим условием является поляризация света голубого неба. Пчела правильно ориентирует свой танец только в том случае, если видит хотя бы небольшой участок голубого неба. В различных участках неба различны и направление и степень поляризации (от 0 до 70—80%) (см. раздел 2 этой главы). Это распределение поляризации по небосводу закономерно связано с положением Солнца. Следовательно, в принципе по поляризации отдельного участка синего неба можно определить направление на Солнце (главную ось «пчелиной системы координат»). Предположение о поляризационном механизме навигации пчел подтверждено довольно убедительными опытами. Вот краткие сведения о некоторых из них. Горизонтальные соты помещаются в темную кабинку. В стенке ее имеется окошко, направленное на северную часть безоблачного небосклона. Прямые пробеги направлены на запад (корм к западу от улья). Если же зеркалом направить через окошко на соты свет от южной стороны небосклона, то ориентация танца меняется на 180° и прямые пробеги указывают на восток. Если небо закрыто облаками, то пробеги хаотичны. Далее окошко покрывалось поляроидом. Если направление колебаний, пропускаемых поляроидом, совпадает с преимущественным направлением поляризации света неба, то прямые пробеги танцев пчел остаются ориентированными так же, как и до введения поляроида. Если же поляроид повернуть на некоторый угол, то прямые пробеги отклоняются на такой же угол. Если поворот поляроида в одну сторону неизменно отклоняет пробеги, например, вправо, то поворот в другую сторону дает всегда отклонение пробегов влево. Таким образом можно получить отклонение пробегов на любой угол, но не более $50\text{—}60^\circ$. После этого предела пробеги становятся хаотичными. Оценка экспериментальных ошибок показала статистическую достоверность опытов. Подобные опыты несомненно доказывают наличие высокой поляризацион-

ной чувствительности органов зрения пчел. Позже было показано, что пчелы чувствуют поляризацию только в коротковолновой части спектра ($\lambda < 500$ нм), а сильнее всего — в ультрафиолетовой области ($\lambda < 400$ нм).

Теперь известно, что кроме пчел чувствительностью к поляризации света обладают очень многие членистоногие (насекомые, пауки, ракообразные и др.). Список видов, у которых обнаружена и описана эта способность, насчитывает десятки названий.

Только у пчел имеется столь четкий элемент поведения — направленный танец, позволяющий ставить указанные эксперименты. У большинства остальных видов экспериментальное доказательство наличия поляризационной чувствительности сводится к тому, что поворот поляроида над движущимся животным вызывает отклонение его пути в ту же сторону. Кроме того, у многих членистоногих (пчелы, мухи, мечехвосты, клопы др.) способность чувствовать поляризацию независимо подтверждена методом электроретинограмм. Электроответ зрительной клетки при повороте плоскости поляризации на 90° меняется обычно на 15—20%, что примерно соответствует изменению, которое можно получить, меняя интенсивность вдвое, т. е. вполне ощутимый результат.

Столь широко распространенная в мире членистоногих способность, конечно, не может быть случайностью. Она несет важную биологическую функцию, играя в зрительной ориентации насекомых не меньшую роль, чем их способность ориентироваться непосредственно по Солнцу или по Луне.

Сейчас считается доказанным, что навигационная ориентация членистоногих основана именно на этих трех элементах небесного компаса — Солнце, поляризации неба и Луне. Здесь следует заметить, что поскольку этот «компас» непостоянен во времени, необходимы достаточно точные внутренние часы. Оказалось, что членистоногие обладают такими часами, причем разных систем. Однако этот интересный вопрос уже выходит за рамки нашей темы.

Каковы возможные механизмы анализа поляризации света насекомыми?

Прежде всего можно предположить, что их глаза реагируют не собственно на поляризацию, а на те специфические вариации интенсивности, которые возникают при отражении, преломлении и рассеянии поляризованного

света в окружающей среде. Эта косвенная реакция на поляризацию, по-видимому, играет свою роль, однако совокупность всех известных фактов не может быть сведена только к ней.

Несомненно существуют внутриглазные (интраокулярные) устройства, реагирующие на состояние поляризации света.

Имеются гипотезы о двух типах этого механизма.

Первая гипотеза сводится тоже к косвенному восприятию поляризации, но уже непосредственно в глазных средах. Преломление и отражение на многочисленных границах, разделяющих разные участки и слои этих сред, кроме угла падения и показателя преломления существенно зависят также и от состояния поляризации. Следовательно, при прохождении различно поляризованного света через многослойные среды глаза освещение сетчатки будет, вообще говоря, различным. Несомненно, этот тип реакции также имеет место, но и с его помощью невозможно объяснить большинство сложных форм поведения насекомых под действием поляризации света (в частности, их навигационные способности).

Вторая гипотеза по существу похожа на гипотезу Гельмгольца, объясняющую фигуру Хайдингера.

Важнейшей особенностью, отличающей глаза членистоногих от глаз позвоночных, является их фасеточное строение. Их глаза являются не единообъемным, но сложным образованием, составленным из очень мелких шестигранников — фасеток (рис. 76). Число фасеток в глазу у разных насекомых колеблется от сотен до десятков тысяч. Каждая фасетка служит линзой (хрусталиком) для отдельной светочувствительной единицы — омматидия. В каждой омматидии имеется пучок нескольких зрительных клеток, главной функциональной частью которых является особая сложная структура, называемая рабдомером. Рабдомеры зрительных клеток омматидия объединены в образование — рабдом, занимающий в омматидии центральное положение (в прямом и переносном смысле).

Оставим в стороне сложный вопрос о степени самостоятельности рабдомов в процессе зрительной реакции и о законах их взаимодействия. Нам сейчас важно только то, что рабдом представляет собой центральносимметричную структуру, построенную из сложных молекул, о которых

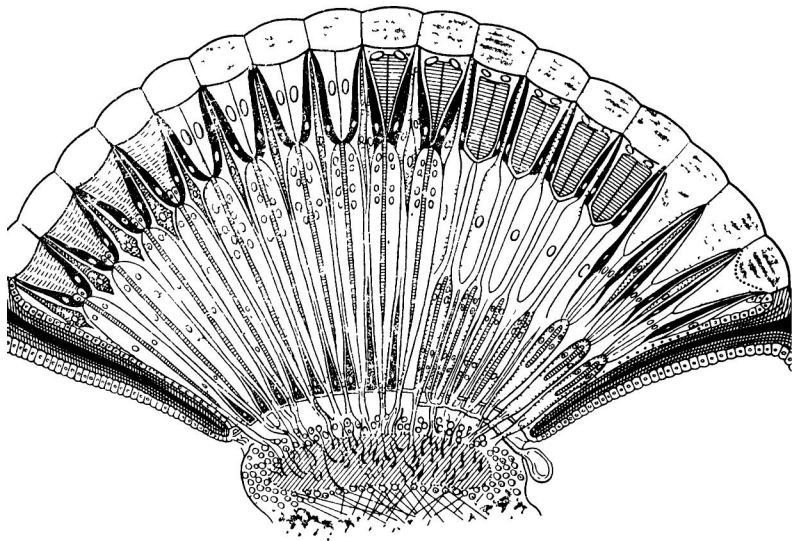


Рис. 76. Схема строения фасеточного глаза членистоногих

с уверенностью можно сказать, что они анизотропны. Поэтому естественно предположение, что рабдом (розетка рабдомеров) ведет себя, как радиальный поляроид. Число зрительных клеток в омматидии, например, пчелы равно восьми. Следовательно, для модели соответствующего радиального поляроида, описанного выше, достаточно восьми секторов. Если смотреть на разные участки голубого небосвода через такой поляроид, то видны разные, легко отличимые друг от друга фигуры.

Это предположение подтверждается данными электро-ретинограмм, причем из этих данных удастся извлечь важную информацию и о физиологии зрения насекомых. Например, при освещении одного омматидия вспышками поляризованного света с разным направлением поляризации ЭРГ омматидия дает одинаковый ответ, но на естественный свет ответ отличен. Отсюда следует вывод, что сигнал о состоянии поляризации дает не омматидий в целом, но отдельная зрительная клетка по своему собственному нервному волокну.

При отведении сигнала ЭРГ непосредственно от отдельных зрительных клеток оказалось, что лишь 50% их реагирует на поляризацию. Есть основания полагать, что это клетки, чувствительные к коротковолновому излучению. Поэтому глаз насекомого и не реагирует на поляризацию длинноволновых лучей. Таким образом, оказываются тесно связанными поляризационная чувствительность и цветное зрение насекомых.

2. АТМОСФЕРНАЯ ОПТИКА

Существует яркий пример поляризации света в естественных природных условиях. Это поляризация дневного света неба. Причина этого явления нам известна — поляризация при молекулярном рассеянии (см. главу V, раздел 4). Вследствие поперечности световых волн свет, рассеянный изотропными молекулами в направлении, перпендикулярном первоначальному, должен быть линейно поляризован. Степень поляризации света голубого неба весьма различна в разных точках небосвода (от 0 примерно до 80%). Если Солнце находится вблизи горизонта (на восходе или на закате), то наибольшая степень поляризации света синего неба будет на большом круге, плоскость которого проходит через зенит и перпендикулярна к направлению на Солнце. Направление электрического вектора рассеянного света всегда нормально к плоскости: Солнце — наблюдатель — точка рассеяния. Следовательно, он горизонтален в зените и вертикален вблизи горизонта.

Наименьшая поляризация, грубо говоря, соответствует направлению на Солнце и противоположному направлению. Очевидно, что состояние поляризации в различных точках небосвода зависит от положения Солнца, т. е. от времени дня. Качественное исследование этого распределения поляризации по ясному небосводу можно произвести с помощью поляроида или любого другого анализатора. Для более точных измерений наиболее часто применяют полярископ Савара, фотоэлектрические поляриметры, иногда компенсатор Бабине.

На рис. 77 показан график азимутального распределения степени поляризации по большому кругу небосвода, проходящему через зенит и Солнце. За положитель-

ную принята поляризация с горизонтальным преимущественным направлением колебаний. Максимум поляризации соответствует примерно углу 90° от Солнца. Вблизи направления на Солнце поляризация дважды меняет знак, проходя через нулевые значения. Это так называемые нейтральные точки. Выше Солнца расположена нейтральная точка Бабине, а ниже него — нейтральная точка Брюстера.

Если Солнце очень близко к горизонту, то нижней нейтральной точки не видно, но зато появляется другая нейтральная точка Араго на противоположной стороне небосвода. В направлении прямо на Солнце поляризация очень невелика, но имеет другой знак — преимущественное направление колебаний вертикально. Как правило, поляризация света неба частичная линейная. Однако иногда удается обнаружить с помощью компенсатора Бабине небольшую эллиптическую поляризацию.

Эта азимутальная зависимость получена для ясного неба экспериментально и хорошо совпадает с расчетной для молекулярного рассеяния. Если на опыте обнаруживаются отступления от этой зависимости, то они указывают на присутствие рассеяния на облаках водяного пара, аэрозолях и других включениях, создающих мутность атмосферы. Поляризация рассеянного света является вообще очень хорошим индикатором процесса рассеяния и методом его детального изучения. Например, поляризация света, рассеянного облаками, всегда много меньше (или он даже совсем не поляризован), чем рассеянного ясным небом. Этим пользуются, например, в фотографии, с помощью поляроида усиливая контрастность облаков. Для цветной фотографии это единственный способ, так как желтыми и оранжевыми фильтрами пользоваться нельзя. Точно так же дым не поляризует рассеянный свет, что можно использовать для обнаружения на фоне неба лесных пожаров с больших расстояний. С помощью детальных поляризационных измерений можно исследовать

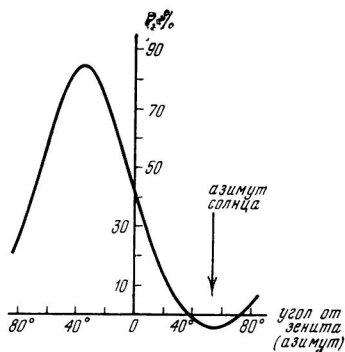


Рис. 77. Азимутальная зависимость поляризации небосвода

загрязненность атмосферы аэрозолями и т. п. Большое влияние на поляризацию оказывает и состояние земной поверхности. Например, снежный покров заметно ослабляет поляризацию небесного света. Поляризация может служить тонким методом изучения чистоты атмосферы, турбулентности воздушных масс и т. п. и поэтому наряду с традиционными методами синоптики привлекаться для прогнозирования погоды. Если, например, в ясную погоду замечается уменьшение поляризации, то это показывает, что по небу уже идут облака, но столь слабые, что они еще незаметны глазу. Таким образом можно заранее предсказать изменение ясной погоды на пасмурную. В ряде случаев этим способом можно сделать прогноз значительно раньше, чем с помощью других методов. Есть сведения, что этот метод, например, может служить для предсказания приближения тайфунов. Признаками приближения определенных изменений погоды являются также своеобразные изменения положения на небе нейтральных точек. Так, удаление их от Солнца является признаком устойчивой хорошей погоды, а приближение к Солнцу предвещает перемену погоды.

Поляризация рассеянного света неба была использована также для создания поляризационного небесного компаса. Он полезен на территориях, расположенных вблизи магнитных полюсов Земли, где непригодны обычные магнитные компасы. Поляризационный компас применяется в дневное время, но в таких случаях, когда невозможно прямое наблюдение Солнца, например, когда имеется значительная (но не сплошная) облачность или когда Солнце за горизонтом (незадолго перед восходом или вскоре после заката). Поскольку распределение поляризации по небосводу однозначно для данного времени дня, то ясно, что, найдя направление преимущественных колебаний в некоторой точке (например, в зените), можно определить истинное направление на север. Точность прибора порядка 2° .

Имеются экспериментальные данные о своеобразии поляризационных явлений в сумерках. Поляризация света неба в зените при низком положении Солнца немонотонно зависит от его высоты. Она то возрастает, то убывает, причем по-разному в разные дни. Кроме того, с уменьшением высоты Солнца наблюдается «блуждание» нейтральных точек. Причина этих явлений лежит, по-

видимому, в том, что во время сумерек происходит интенсивное перераспределение плотности в атмосфере, возникают потоки воздуха, меняется состояние ионосферы и т. д. Большое значение начинают играть и процессы многократного рассеяния света, не учитываемые в простейшей теории.

Не менее любопытны сведения об обнаружении вращения плоскости поляризации на больших высотах, а также во время солнечного затмения. Эти наблюдения относятся к области вблизи нейтральных точек, где особенно велика роль многократного рассеяния и различных вторичных эффектов. К сожалению, экспериментальные данные здесь пока очень немногочисленны и неполны.

Экспериментальные наблюдения показали, что ночью при лунном свете поляризация рассеянного небом света по своему распределению и свойствам аналогична поляризации дневного неба (разумеется, аналогична по отношению к ночному светилу).

Свет, рассеянный в толще морской воды, также сильно поляризован, подобно рассеянному в атмосфере. Наилучшие условия для наблюдения этого явления имеются, по-видимому, в глубоких тропических морях, отличающихся чистотой воды. Наблюдая морскую глубину через поляризатор, можно заметить различие цвета в направлении, перпендикулярном солнечным лучам и вдоль них. В первом случае это темный цвет индиго, во втором — ярко-голубой. Дело в том, что во втором случае рассеянный свет почти не поляризован и не срезается поляризатором.

Однако эти наблюдения осложняются тем обстоятельством, что кроме света, рассеянного в водной толще, мы наблюдаем также и свет, отраженный от водной поверхности и также сильно поляризованный (см. главу V). Чтобы избавиться от этого и исследовать только поляризацию рассеянного в воде света, надо, очевидно, проводить такие опыты под водой. Современное оборудование аквалангистов позволило это сделать. Эксперименты по измерению поляризации света, рассеянного в морской воде на разных глубинах и по разным направлениям, проводились в нескольких морях, в частности в Атлантическом океане и в Средиземном море. Как и следовало ожидать, степень поляризации максимальна в направ-

лении, перпендикулярном видимому под водой направлению на Солнце. В основном рассеяние света в море это не молекулярное рассеяние, а рассеяние на частицах суспензий, взвешенных в морской воде. Как показали результаты опытов, поляризация является чувствительным индикатором для дифференцировки различных водных масс и течений.

Не менее часто встречается в природе поляризация света, отраженного от водных поверхностей. неполяризованный луч, отражаясь от поверхности воды, приобретает частичную линейную (а при падении под углом Брюстера и полную линейную) поляризацию. Преимущественная компонента (глядящая) при этом горизонтальна. С помощью поляроида, ориентируя вертикально его ось пропускания, легко погасить эти отраженные блики. Этим часто пользуются на практике при различного рода работах, так как блики мешают видеть расположенные под водой предметы. Очень полезен поляризационный фильтр при работе с навигационным прибором секстантом. С его помощью достигается гораздо лучшая видимость горизонта на море. Вообще-то в секстанте полезно иметь пару поляроидов; например, при наводке на Солнце, частично скрещивая их, можно ослабить яркость до желательной.

Очень эффектно наблюдение поверхности моря с помощью поляроида в ветреную погоду. Если его ось вертикальна, то море кажется гораздо более бурным, чем после поворота поляроида на 90° . В первом случае гасится отраженный свет, поверхность моря кажется темнее, а пена гораздо эффектнее (ее свет почти неполяризован).

Как уже было сказано в главе V, при отражении света может возникать некоторая разность фаз между компонентой, поляризованной в плоскости падения и перпендикулярной. Величина этой разности фаз зависит от угла падения и коэффициентов преломления сред, а также от состояния поверхности раздела (наличие пленок на поверхности жидкостей и пр.). В результате этого отраженный свет иногда может быть частично эллиптически поляризован, если падающий свет поляризован частично линейно. Иногда это происходит, когда рассеянный свет ясного неба отражается от больших водных поверхностей (например, поверхности моря). Тончайшие, но обширные жировые пленки растительного, животного или техни-

ческого происхождения на поверхности моря — обычное явление. Таким образом, в естественных условиях в природе есть возможности возникновения эллиптически (и в частности, циркулярно) поляризованного света. Представим себе два таких отраженных, частично эллиптически поляризованных луча, симметричных относительно плоскости наблюдатель — зенит — Солнце. Они будут также полностью симметричны и в отношении эллиптичности, если не учитывать влияния магнитного поля Земли. Учет же его приводит к тому, что вследствие поворота плоскости поляризации падающих, рассеянных небом лучей в магнитном поле Земли (в одну и ту же сторону) нарушится симметрия относительно указанной выше плоскости и в данном месте земного шара возникнет преобладание одной из циркулярных (или эллиптических) форм поляризации. Более подробный анализ показывает, что эта форма правая. Это преобладание будет устойчивым, меняясь только с изменением магнитного поля Земли (в течение интервалов времени, соизмеримых с геологическими эпохами). Возможно, это и было первопричиной преимущественного образования правых форм оптически активных веществ, играющих столь важную роль в живой природе (см. главу VIII).

Далее следует упомянуть еще об одном интересном природном поляризационном явлении — о поляризации света радуги. Радуга обязана своим происхождением преломлению и отражению света в дождевых каплях. Как мы знаем, тот и другой процессы связаны с поляризацией света. В итоге свет радуги оказывается довольно сильно поляризованным. Преимущественное направление световых колебаний параллельно кольцу радуги. Расчет на основе теории отражения дает различное поляризационное отношение параллельной и перпендикулярной компонент для радуг разных порядков. Для первой оно составляет 21 (поляризация очень высока), для второй 8, для последующих еще меньше. Экспериментальные данные полностью подтвердили эти расчеты.

Аналогично радуге образуется другое распространенное световое небесное явление — солнечное гало. Это световые кольца вокруг Солнца, возникающие вследствие преломления света в мелких кристалликах льда. Свет гало также поляризован. В отличие от радуги световые колебания здесь сильнее в направлении, перпендику-

лярном кольцу, чем в параллельном. Причина этого в том, что главный физический процесс в радуге — отражение, а в гало — преломление света. Степень поляризации у гало значительно меньше, чем у радуги.

Поляризация света обнаружена и в одном из грандиознейших и красивейших оптических явлений природы — в северных сияниях, а также в свечении ночного неба.

Поляризацию в северных сияниях можно ожидать потому, что, во-первых, первичные возбуждающие частицы (электроны) имеют преимущественное выделенное направление и, во-вторых, спектральные линии испытывают расщепление на поляризованные компоненты вследствие эффекта Зеемана (см. главу IV) в магнитном поле Земли. Поэтому наблюдаемая поляризация должна зависеть от взаимной ориентации направления наблюдения, направления движения возбуждающих электронов и направления земного магнитного поля. Подробно теория явления еще не разработана, но имеются соображения, что среди важнейших спектральных линий северных сияний зеленая линия атомарного кислорода ($\lambda = 5577 \text{ \AA}$) не должна быть поляризована, красная же линия ($\lambda = 6300 \text{ \AA}$) может обладать некоторой степенью поляризации. Экспериментально удалось обнаружить довольно высокую степень поляризации (30%) низкоширотного красного сияния. Поляризация в коротковолновой области спектра, несмотря на специальные поиски, не была обнаружена. Экспериментальных данных по этому вопросу пока мало, но надо надеяться, что поляризация поможет разобраться в сложном механизме полярных сияний.

Немногочисленны также (и к тому же противоречивы) наблюдения поляризации свечения ночного неба, а от них можно было бы ожидать помощи в решении ряда вопросов — разделения в этом свечении атмосферной и внеатмосферной компонент и др. Пока можно считать установленным, что это свечение частично поляризовано, причем преимущественное направление поляризации в течение ночи следует за движением Солнца под горизонтом, оставаясь примерно перпендикулярным к плоскости Солнце — полюс мира — наблюдатель.

3. АСТРОНОМИЯ

Свет различных небесных светил и космических объектов во многих случаях оказывается поляризованным. Исследование этой поляризации дает существенную информацию о свойствах планет, звезд, туманностей, межпланетной и межзвездной среды и т. д. Поляриметрия — важный раздел астрофизики.

Степенью поляризации света в астрофизике обычно называют отношение интенсивности поляризованной компоненты к интенсивности всего исследуемого светового потока. Для экспериментальных исследований в последнее время характерна (как и в других областях применения поляризации света) замена визуальных полярископов и поляриметров на фотоэлектрические. Разумеется, поляризационные исследования в астрономии представляют смысл и ценность только во взаимодействии с другими астрофизическими методами — фотометрическим, спектроскопическим, радиоастрономическим и другими. Сопоставление данных разных методов, взаимное дополнение и контроль результатов дают возможность более серьезной и надежной проверки различных гипотез.

В полном согласии с тем фактом, что Луна светит отраженным светом Солнца, свет Луны частично поляризован, причем преимущественное направление колебаний перпендикулярно плоскости, проходящей через Луну, Солнце и Землю. Такую поляризацию лунного света принято считать положительной. Разные исследователи измеряли поляризацию света, отражаемого Луной в целом и ее отдельными образованиями («морями» и «материками»), а также зависимость поляризации от фазы Луны и от длины волны света. Наибольшая поляризация соответствует фазе в одну четверть, наименьшая — полнолунию. Максимальные значения в квадратуре у разных исследователей получались довольно разными, доходя до 47% у «морей» и до 17% у «материков». Около полнолуния (при фазах порядка 10°) поляризация становится отрицательной и имеет малые значения. Причина изменения знака поляризации не совсем понятна, ее приписывают влиянию многократных отражений на неровностях лунной поверхности. Сравнение поляризации разных областей Луны с поляризацией света, диффузно отраженного различными земными породами, привело некоторых экспериментаторов к выводу, что поверхность лунных «морей» покрыта

породами, похожими на лаву, а поверхность «материков» — глинистыми песками. Спектральная зависимость поляризации лунного света такова: степень поляризации меньше всего в инфракрасной области, больше в видимой (например, в зеленой), еще больше в ультрафиолетовой. С помощью исследования поляризации света на участках неосвещенной части лунного диска, непосредственно прилегающих к освещенной, делались попытки обнаружить лунную атмосферу, хотя бы и очень разреженную. Эти опыты, однако, очень осложнены эффектами земного происхождения (поляризация рассеяния в атмосфере земли и пр.). С учетом или устранением этих помех был получен результат, что плотность атмосферы у поверхности Луны по крайней мере в 10^9 раз меньше, чем у поверхности Земли.

Поляризация света планет позволяет решать в основном те же задачи, что и в отношении Луны — исследование поверхности планет и их атмосферы.

Зависимость поляризации от фазы для Меркурия оказалась такой же, как и для Луны. Поскольку он и фотометрически сходен с Луной, то предполагают, что структура их поверхностей аналогична. Поверхность Меркурия, по-видимому, представляет собой гористую, сильно изрытую, каменистую пустыню. Различие поляризации в зеленой и красной областях спектра и возрастание поляризации от центра диска к краям объясняют наличием у Меркурия очень разреженной атмосферы (1 мм ртутного столба у поверхности), рассеивающей зеленые лучи сильнее, чем красные.

Исследование поляризации света, рассеянного в атмосфере Венеры (в частности, сравнение с земными облачными образованиями) привело к выводу, что рассеяние происходит на сравнительно крупных частицах (типа водяных капель в земных облаках). Природа этих частиц (капли — это кристаллики или пылинки) пока неизвестна. Спектральная зависимость поляризации оказалась такой же, как у Луны, наибольшая поляризация наблюдается в ультрафиолетовой области. Особое и интересное свойство Венеры состоит в том, что преимущественное направление колебаний в ультрафиолетовой области отличается на 90° от направления в видимой области. Это породило гипотезу о наличии двух типов рассеивающих частиц.

Фазовая зависимость поляризации Марса также похожа на лунную. Поляризация определяется двумя факторами — поверхностью Марса и его атмосферой. Поляризация светлых областей («материков») и темных пятен («морей») сопоставлялась с поляризацией различных наземных образований. Светлым областям оказались аналогичны вулканические пеплы, в то время как глины, пески и скалы не дали похожих результатов. Темные же области в ряде случаев оказались похожими по своим поляризационным свойствам на поверхность, покрытую растительностью. Более детальные исследования позволили установить существенные различия экваториальных и северных «морей». Свет от полярных шапок Марса оказался поляризован сильнее, чем от земных снежных покровов.

Наличие атмосферы вносит в поляризацию определенные изменения. Например, появление облаков и помутнений в атмосфере Марса вызывает отличия поляризации Марса от лунной. По поляризации наличие таких образований можно обнаружить даже тогда, когда они не видны в телескопы. Существенную деполяризацию вносят так называемые желтые вуали (одно из предположений: это — пыльные бури). Из этих эффектов разные исследователи получали оценки плотности и давления марсианской атмосферы, сопоставляя их с данными других методов. Результаты разных авторов довольно сильно различаются (от 18 до 60 мм ртутного столба¹), но более или менее согласуются с данными фотометрии, рассеяния, определения яркости и контрастности и другими. Среднее значение из всех методов — 65 мм ртутного столба. Спектральная зависимость поляризации Марса имеет тот же характер, что у Луны и Венеры.

Поляризация диска Юпитера различна в разных местах. Она больше у краев, чем в центре диска, и различна у восточного и западного краев планеты. Отмечается постоянство поляризации полярных областей. Ряд авторов считает, что значение степени поляризации и ее распределение по диску планеты говорят в пользу того, что под облачным слоем Юпитера атмосфера очень разрежена. У Юпитера также обнаружено радиоизлучение, одна из компонент которого поляризована. С ее помощью

¹ Данные с учетом ускорения силы тяжести.

получены интересные данные о физических процессах в ионосфере Юпитера.

На диске Сатурна поляризация полярных областей также отличается от поляризации других частей планеты, но в отличие от Юпитера она непостоянна и подвержена сильным изменениям. Поляризованы также оба ярких кольца Сатурна, разделенных темным промежутком Кассини. Интересно, что поляризация обоих колец различна. У внутреннего кольца она сходна с поляризацией земных пород, а у внешнего имеет некоторые пока непонятные особенности.

Поляризация света обнаружена в хвостах комет. С ее помощью показано, что непрерывный спектр хвостов обусловлен рассеянием солнечного света пылевыми частицами.

Плодотворным методом изучения пятен на Солнце оказался эффект Зеемана — расщепление спектральных линий в магнитном поле пятен (см. главу IV). При этом важнейшим признаком, подтверждающим зеемановскую природу расщепления, является поляризация компонент. Методически очень важен выбор спектральных линий для работы. Удобнее всего линии с наиболее простой собственной формой и наибольшим расщеплением простого типа (триплетным). Этот метод широко используется для топографии, систематизации и изучения магнитных полей солнечных пятен, для определения направления и напряженности магнитных полей. В большинстве пятен на солнечном диске обнаруживается продольный эффект Зеемана, откуда следует, что направление магнитного поля перпендикулярно солнечной поверхности. В соответствии с этим у пятен на краю диска ожидался и был обнаружен поперечный эффект. Данные этого эффективного метода несомненно сыграют большую роль в решении вопроса о происхождении магнитных полей пятен, который пока не имеет удовлетворительного ответа.

Поляризован свет солнечной короны — самой внешней оболочки Солнца, которая тянется до расстояний в несколько диаметров Солнца. Свечение солнечной короны постепенно переходит в зодиакальный свет. Видеть солнечную корону можно только во время полных солнечных затмений. Однако с помощью специальных приборов — коронографов — удается изучать ее и вне затме-

ний. Свечение с непрерывным спектром, составляющее 90% всего излучения солнечной короны, представляет собой свет фотосферы, рассеянный быстрыми свободными электронами короны. Это свечение частично поляризовано, причем у края солнечного диска степень поляризации около 15%, при удалении от края она быстро увеличивается (примерно до 40%), а затем, по мере дальнейшего удаления, медленно спадает, постепенно переходя к значениям, характерным для зодиакального света. Структура короны, прихотливо изменяющаяся со временем, сильно влияет на поляризацию, так как последняя зависит от пространственной ориентации корональных образований по отношению к лучу зрения наблюдателя. Поэтому приведенные выше цифры лишь ориентировочны.

Зодиакальный свет — это солнечный свет, рассеянный твердыми пылевыми частицами околосолнечной среды. Наблюдается ночью вдоль пояса Зодиака (отсюда и название) в виде полосы, расширяющейся к горизонту. По видимой яркости раза в два-три превосходит яркость ночного неба. Зодиакальный свет частично поляризован, причем степень поляризации зависит от углового расстояния от Солнца. На расстоянии 80° от Солнца степень поляризации составляет 12%, доходит до 15% при 60° и почти падает до нуля при 90° .

Что касается объектов, находящихся за пределами солнечной системы, то поляризация света туманностей исследуется с самого начала нашего века, а поляризацию света звезд начали исследовать совсем недавно — с конца сороковых годов.

При изучении поляризации туманностей и звезд есть две стороны вопроса — собственная поляризация света, излучаемого звездой или туманностью, и та поляризация, которую приобретает свет, проходя огромные расстояния через космическое пространство и взаимодействуя с разреженной межзвездной средой (так называемая межзвездная поляризация света по терминологии, принятой в астрономической литературе). Первая может дать важнейшую информацию о механизме испускания света объектом, а вторая — о свойствах межзвездного вещества, структуре магнитных полей галактики и т. п. Трудность заключается в разделении этих двух сторон эффекта. Для преодоления этой трудности очень важно, что при рассеянии света на изотропных пылинках межзвездной

среды он поляризуется по известным правилам (см. главу V). Такую поляризацию звезд и туманностей в астрофизике называют радиальной. Она действительно обнаружена во многих случаях. Однако это обстоятельство не полностью снимает трудности. Нерадиальная поляризация может возникнуть не только в результате собственного механизма излучения света туманностью или звездой, но и вследствие рассеяния на анизотропных, а тем более ориентированных частицах галактической среды.

Таким образом, исследование поляризации света туманностей и звезд — непростая задача.

Свет внегалактических туманностей сам по себе неполяризован, этот вывод из анализа данных наблюдений согласуется с ожидаемым, ибо этот свет есть интегральное излучение огромного количества различных звезд, представляющих типичный случай источника естественного света. Следовательно, эти источники представляют большой интерес как эталон, позволяющий судить о поляризующем действии диффузной материи в нашей Галактике.

Галактические туманности представляют собой облака разреженного газа с пылевыми частицами, существующие в межзвездном пространстве нашей Галактики. Существующая классификация галактических туманностей делит их на несколько типов — планетарные, диффузные, отражательные и др.

Излучение планетарных туманностей в большинстве случаев не поляризовано. Только относительно одной из них имеются данные о наличии небольшой поляризации порядка 5%, еще нуждающиеся в подтверждении. Диффузные туманности дают поляризацию целиком радиальную, что согласуется с их газовой-пылевой моделью. Степень поляризации обычно при этом составляет от 1—2 до 10—15%.

Особый интерес представляют некоторые отдельные туманности, прежде всего Крабовидная. Поляризация свечения ее аморфной части оказалась нерадиальной. Отсюда следует, что она может быть обусловлена не рассеянием, а каким-то особым типом излучения света. Ряд фактов заставил принять гипотезу о синхротронном механизме излучения (тормозное излучение релятивистских электронов в магнитном поле, т. е. электронов с очень большими скоростями, приближающимися к

скорости света). Важным методическим приемом в этих исследованиях было сопоставление поляризации туманности и соседних звезд, которое помогло учесть «межзвездную поляризацию» и выделить собственную поляризацию туманности.

Пространственное распределение поляризации позволило построить ход силовых линий магнитного поля туманности и оценить его напряженность (она оказалась порядка 10^{-3} гаусс). В средних областях туманности магнитное поле является в высокой степени однородным, причем силовые линии примерно нормальны к плоскости Галактики, на краях же силовые линии огибают облака черной материи, определяющие границы туманности. Эти выводы подтверждаются независимыми исследованиями структуры туманностей. Синхротронный механизм излучения Крабовидной туманности подтверждается также данными по поляризации ее радиоизлучения.

Очень похожие результаты получены для Омега-туманности. В ее поляризованном излучении направление преимущественных колебаний также примерно постоянно для всех участков туманности (что исключает объяснение на основе рассеяния). Направление преимущественных колебаний составляет около 30° с плоскостью галактического экватора. При этом поляризовано лишь излучение со сплошным спектром. Считают, что механизм излучения Омега-туманности также синхротронный. Подобные результаты получены и еще для нескольких туманностей.

Таким образом, поляриметрические исследования туманностей дают материал, весьма важный для понимания их природы.

Сравнение спектральной зависимости поляризации одной из отражательных туманностей с уже упоминавшимся выше спектральным ходом поляризации планет было использовано для сравнительной оценки частиц межзвездной и межпланетной материи. Поляризация туманности в противоположность планетам несколько возрастает с увеличением длины волны. Произведенная оценка размеров частиц показала, что они крупнее в межзвездном пространстве.

Хотя поляриметрическое исследование звезд начато и недавно, уже получен большой материал. Анализ результатов основан на наблюдении поляризации нескольких тысяч звезд. Для подавляющего большинства звезд ус-

тановлены следующие основные закономерности. Поляризован свет только достаточно удаленных звезд. Степень поляризации обычно не более 8—10%. Поляризация мало меняется с длиной волны в видимой области спектра и быстро уменьшается в инфракрасной. В пространственном распределении преимущественных направлений поляризации звезд есть тенденция, проявляющаяся только при анализе большого числа звезд, — преимущественное направление электрических векторов близко к плоскости Галактики. Более подробный анализ зависимости этого эффекта от галактической долготы показал, однако, что векторы поляризации параллельны не галактической плоскости, а большому кругу, наклоненному к ней под углом 17—18°. Он получил название большого круга оляризации.

Из всех этих данных следует вывод, что, как правило, свет звезд сам по себе естественный, а поляризация в него вносится межзвездной средой. Только в отдельных случаях поляризация может быть связана с самими звездами (например, у горячих сверхгигантов свет, выходящий из атмосферы звезды, может быть заметно поляризован благодаря рассеянию на свободных электронах). Изучение же поляризации большинства звезд дает важную информацию о межзвездной среде. Нерадиальную межзвездную поляризацию света можно объяснить, предположив, что рассеяние света звезд в пространстве Галактики происходит на пылинках удлинённой формы, ориентированных в межзвездном магнитном поле. Существование в межзвездном пространстве магнитных полей подтверждается независимыми исследованиями космических лучей. Пылинки имеют размеры порядка длины волны видимого света. При поляризации около 10% все или почти все пылинки должны быть ориентированы. Чтобы частицы ориентировались во внешнем магнитном поле, они должны иметь собственный магнитный момент. По этому поводу сейчас считается наиболее вероятной гипотеза, что в межзвездной пыли в небольшом количестве содержатся ферромагнитные вещества, придающие пылинкам не ферромагнитные, а парамагнитные свойства. Таким образом, межзвездная поляризация является методом изучения структуры межзвездных магнитных полей.

Межзвездная поляризация обнаружена также и во внегалактических туманностях.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

Применения поляризации света для нужд практики очень разнообразны. Некоторые из них разработаны давно и детально и широко используются. Другие только еще пробивают себе дорогу. В методическом отношении всем им свойственна следующая черта — они либо позволяют решить задачи, вовсе недоступные для других методов, либо решают их совершенно оригинальным путем, кратким и эффективным.

Отнюдь не претендуя на полноту описания всех практических применений поляризации света, мы ограничимся только примерами из разных областей деятельности, иллюстрирующими широту применения и полезность этих методов.

1. СВЕТОТЕХНИКА

Одной из важных повседневных задач светотехники является плавное изменение и регулировка интенсивности световых потоков. Решение этой задачи с помощью пары поляризаторов (например, поляроидов) имеет ряд преимуществ перед другими методами регулировки. Интенсивность может плавно изменяться от максимальной (при параллельных поляроидах) практически до темноты (при скрещенных). При этом интенсивность меняется одинаково по всему сечению пучка и само сечение остается постоянным. Поляроиды могут быть изготовлены большого размера, поэтому такие пары употребляются не только в лабораторных установках, фотометрах, в секстантах или солнечных очках, но и в иллюминаторах парходов, окнах железнодорожных вагонов и т. п.

Поляроиды могут использоваться также в системах световой блокировки, т. е. в таких системах, которые пропускают свет там, где нужно, и не пропускают там, где не нужно. Пример — светоблокировка автомобильных фар. Если на фары и смотровые стекла автомобилей поставить поляроиды, ориентированные под 45° вправо к вертикали, то поляроиды на фарах и смотровом стекле данного автомобиля будут параллельны. Следовательно, шофер будет хорошо видеть дорогу и встречные машины, освещаемые собственными фарами. Но поляроиды фар встречных автомобилей будут скрещены с поляроидом смотрового стекла данного автомобиля. Поэтому слепящий свет фар встречного автомобиля будет погашен. Несомненно, это сделало бы ночную работу шоферов значительно проще и безопаснее.

Другой пример поляризационной светоблокировки — световое оборудование рабочего места оператора, который должен одновременно видеть, например, экран осциллографа и какие-нибудь таблицы, графики или карты. Свет ламп, освещающих таблицы, попадая на экран осциллографа, ухудшает контрастность изображения на экране. Можно избежать этого, оборудовав осветитель и экран поляроидами с взаимно перпендикулярной ориентацией.

Поляроиды могут быть полезны тем, кто работает на воде (морьякам, рыбакам и т. п.), для гашения зеркально отраженных от воды бликов, которые, как мы знаем, частично поляризованы. Поляризаторы широко применяются в фотографии для устранения бликов от фотографируемых объектов (картин, стеклянных и фарфоровых изделий и пр.). При этом можно помещать поляризаторы между источником и отражающей поверхностью, это помогает вовсе погасить блики. Такой метод полезен при освещении фотостудий, картинных галерей, при фотографировании хирургических операций и в ряде других случаев.

Погашение отраженного света при нормальном или близком к нормальному падении может осуществляться с помощью циркулярных поляризаторов. В конце первого раздела главы IV было показано, что при этом правоциркулярный свет превращается в левоциркулярный (и наоборот). Следовательно, тот же самый поляризатор, который создает циркулярную поляризацию падающего света, будет гасить отраженный свет.

В спектроскопии, астрофизике и светотехнике находят широкое применение поляризационные фильтры, позволяющие выделять из исследуемого спектра узкие полосы, а также изменять нужным образом насыщенность или оттенок цвета. Действие их основано на том, что основные параметры поляризаторов и фазовых пластинок (например, дихроизм поляроидов) зависят от длины волны. Поэтому различные комбинации этих устройств могут использоваться для изменения спектрального распределения энергии в световых потоках. Например, пара хроматических поляроидов, обладающих дихроизмом только в видимой области с $\lambda < 600$ нм, в скрещенном положении будет пропускать красный свет, а в параллельном — белый. Это простейшее устройство удобно для освещения фотолабораторий.

Применяемые для астрофизических исследований поляризационные фильтры содержат довольно большое число элементов (например, шесть поляризаторов и пять чередующихся с ними фазовых пластинок с определенной ориентацией) и позволяют получать достаточно узкие полосы пропускания шириной в 1—5 Å.

2. МОДУЛЯЦИЯ СВЕТОВЫХ ПОТОКОВ

Модуляция, т. е. изменение во времени интенсивности светового потока, очень важный и широко применяемый на практике технический прием.

В очень многих фотометрических и иных устройствах модуляция света осуществляется с помощью поляризаторов. Простейшая модуляционная поляризационная установка состоит из двух поляроидов, из которых один вращается. Интенсивность прошедшего потока света изменяется от минимальной (практически нулевой) до максимальной с частотой, вдвое большей частоты вращения. Существует целый ряд модуляционных устройств такого типа, но все они дают, конечно, не очень высокочастотную модуляцию.

В современной технике, особенно таких ее новых областях, как оптические счетные машины (на несколько порядков более быстродействующие, чем электронные), или голография (безлинзовые методы получения изображений), велика потребность в весьма быстрой, высоко-

частотной модуляции (до частот порядка миллиардов герц), что невозможно осуществить никакими механическими методами. На помощь приходят поляризационные методы, основанные на возникновении искусственной анизотропии среды во внешнем электрическом или магнитном поле — эффектах Керра, Покельса, Фарадея и Коттон — Мутона (см. главу V). Чаще всего на практике используется эффект Керра. Время релаксации (исчезновения) анизотропии в ячейке Керра имеет порядок 10^{-10} сек, а для некоторых веществ даже еще меньше. Следовательно, подавая на конденсатор ячейки, расположенной между скрещенными николями, напряжение высокой частоты, можно получить оптический затвор, прерывающий световой поток до 10^9 раз в секунду. Такой быстродействующий фотозатвор давно уже нашел широкое поле применения — телевидение, звуковое кино, исследование быстро протекающих процессов. Достаточно сказать, что с его помощью производится точное определение скорости света на очень малом базисе — около трех метров, который может поместиться на лабораторном столе. Прежним методам измерения скорости света, основанным на механических способах модуляции, требовался базис по крайней мере в несколько километров, что существенно снижало точность измерений. В последнее время затворы Керра находят все новые применения, например, в области оптической обработки информации и др. Для использования эффекта Фарадея найден ряд весьма эффективных веществ, например железо-иттриевый гранат, в котором возникает значительное вращение плоскости поляризации в магнитном поле.

Так же широко используются поляризационные методы и для пространственной модуляции световых лучей т. е. для быстрого изменения их направления в пространстве (отклонения, расщепления и т. п.). Для примера опишем одно из новых быстродействующих устройств для отклонения луча света. Оно состоит из двух частей — двупреломляющего кристалла и электрооптического переключателя. Линейно поляризованный луч, падающий нормально на кристалл и поляризованный под унирадиальным азимутом, становится в кристалле либо только «необыкновенным», либо только «обыкновенным» лучом, т. е. либо отклоняется, либо нет. Управление направлением поляризации падающего луча осуществляется с

помощью кристалла дигидрофосфата калия, работающего на основе продольного электрооптического эффекта По-кельса. На пластинку этого кристалла, вырезанную перпендикулярно оптической оси, накладывается элект-рическое поле, совпадающее по направлению с лучом све-та. Это поле вызывает в кристалле дополнительное двой-ное преломление. Изменением напряженности поля и толщины кристалла можно добиться того, чтобы в резуль-тате сложения компонент этого добавочного двупреломле-ния направление поляризации выходящего из этого электрооптического переключателя луча составляло угол в 90° с направлением поляризации падающего луча. Ком-бинация двупреломляющего кристалла исландского шпат-а и электрооптического переключателя составляет один каскад отклоняющего устройства. Если переключатель создает унирадиальный азимут обыкновенного луча, то свет проходит через шпат без отклонения. При изменении азимута на 90° луч отклоняется. Подавая на переключа-тель высокочастотное переменное поле, можно сделать это отклоняющее устройство быстродействующим. Соединяя несколько каскадов, можно создать устройства, позво-ляющие получать большое отклонение, а также набор разных отклонений и т. д. Такие и аналогичные устрой-ства находят широкое применение в ряде областей новой техники.

В оптических счетно-решающих машинах открывает-ся также возможность использовать поляризацию света для выполнения логических операций. Взаимодействие двух циркулярно поляризованных лучей одинаковой ин-тенсивности может осуществляться четырьмя способами, в зависимости от направления поляризации, и приводить к следующей различной результирующей поляризации:

Поляризация первого луча	Поляризация второго луча	Поляризация результирующего луча
Левая	Левая	Левциркулярная
Левая	Правая	Линейная
Правая	Левая	Линейная
Правая	Правая	Правциркулярная

Эта схема может быть использована как таблица двоичной системы логических решений. Если один из взаимодействующих лучей линейно поляризован, то он не может влиять на результат логического решения. Поэтому он представляет собой нейтральное состояние. Легко сообразить, что на этом принципе можно построить также тройчную логическую систему с принятием решения по принципу большинства при одновременном взаимодействии более чем двух лучей.

3. КОДИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ И СИГНАЛОВ

Кодирование и декодирование оптических изображений и сигналов необходимо для решения многих практических задач. Для кода могут использоваться различные свойства света, например его длина волны. Но в ряде случаев наилучшие возможности для этого дает поляризация. Яркий пример — использование поляризационного кодирования и декодирования для стереоскопического видения плоских изображений.

В основе физиологического эффекта стереоскопического видения реальных предметов лежит различие их изображений на сетчатке левого и правого глаза. С помощью специальных стереоскопических фото- и киноаппаратов получают пары изображений (соответственно для левого и правого глаза), снятых под различными углами, соответствующими углам зрения левого и правого глаза. При рассматривании таких пар изображений необходимо, чтобы правый глаз видел только предназначенное для него изображение и не видел второе, а левый соответственно наоборот. В старых индивидуальных стереоскопах это осуществлялось простейшим способом — с помощью маленькой перегородки, локализирующей поле зрения обоих глаз. Этот метод, однако, неприменим в том случае, если изображения проектируются на экран и предназначены для большой аудитории. Здесь необходимо применить кодирование самих изображений. Поляризация дает для этого хорошие возможности. Изображение для левого глаза проектируется сквозь поляризатор с вертикальным направлением пропускания, а для правого — с горизонтальным (на тот же экран и с точным совмещением изображений). Если зритель наденет поляро-

идные очки (ось левого поляроида вертикальна, правого - горизонтальна), то его левый глаз будет видеть только «левое» изображение, правый — только «правое». В результате возникнет стереоскопическая иллюзия. При условии синхронизации изображений этот метод годится и для стереоскопического кино. Впрочем, в связи с разработкой растрового стереокино, имеющего ряд практических преимуществ, поляризационный метод для этой цели не получил развития. Однако поляризационно-стереоскопический метод может быть полезен для рассматривания и изучения стереоскопических пар рентгенограмм, чертежей и технических эскизов, географических и геологических карт и т. п. Наилучшим из способов, пригодных для этой цели, является так называемый вектографический метод. В этом способе «левое» и «правое» диапозитивные изображения располагаются друг за другом так, что один и тот же пучок света проходит через оба изображения. При этом достаточно только одного проектора и отпадают трудности, связанные с обеспечением совпадения изображений, уравнивания их яркости и др. Кодирование же изображений осуществляется поляризационным методом. Суть его состоит в том, что изображение на пленке создается не изотропными частицами металлического серебра, как в обычной фотографии, а дихроичными молекулами, ориентированными взаимно перпендикулярно в изображениях для левого и правого глаза. Глаза наблюдателя вооружаются соответственно ориентированными поляроидами. Основная трудность состоит в подборе веществ с высоким дихроизмом молекул и разработке методов, позволяющих достигать высокой степени ориентации. Можно делать даже цветные вектографические системы, подбирая анизотропные красители нужных цветов. Делаются также и вектографические системы отражательного типа.

Разрабатываются поляризационные схемы для стереоскопического телевидения, стереоскопической микроскопии и др.

Поляризационное кодирование простых световых сигналов может дать полезные методы для целей световой сигнализации, опознавания и дифференцировки световых индикаторов — маяков, бакенов, фонарей и т. п. Например, различные углы плоскости поляризации посылаемого линейно поляризованного светового сигнала

могут служить простейшим кодом, легко и быстро расшифровываемым в приемном устройстве с помощью поляроида-анализатора.

4. ФОТОУПРУГИЙ АНАЛИЗ

В главе V уже говорилось о том, что изотропные тела под воздействием внешних механических воздействий (сжатие, растяжение и пр.) могут становиться оптически анизотропными. Это явление может быть использовано для практических целей в таких областях, как сопротивление материалов, конструирование механизмов, строительное дело, стекольная промышленность, производство полимеров и пластмасс и др. Само явление получило название фотопругости, а фотопругим анализом называют поляризационно-оптический метод исследования механических напряжений.

При одностороннем сжатии (или растяжении) его направление является выделенным и играет роль оптической оси. Возникающая анизотропия соответствует одноосному кристаллу. При более сложных деформациях, например, двустороннем растяжении, образец становится оптически двуосным. Физическая причина фотопругости заключается в деформации электронных оболочек атомов и молекул, ориентации оптически анизотропных молекул, раскручивании и ориентировании значительных участков полимерных цепей, ориентации кристаллических участков (кристаллитов) и т. п.

Для не слишком больших напряжений разность показателей преломления Δn лучей с разной поляризацией, служащая мерой анизотропии, пропорциональна напряжению (т. е. силе, приходящейся на единицу площади). Коэффициент пропорциональности называют коэффициентом фотопругости. Если он для данного вещества известен, то по возникающей оптической анизотропии можно судить о распределении напряжений в веществе. Экспериментальным методом обнаружения и изучения этой анизотропии может служить даже простейшая установка со скрещенными николями, в которой образец вызывает просветление в монохроматическом свете. Однако значительно более чувствителен хроматический эффект. Двойное преломление обладает дисперсией, Δn зависит от

длины волны света. Возникновение окрашенных полей — более чувствительный признак возникающей анизотропии, чем простое просветление в монохроматическом свете. Кроме того, распределение окраски в возникающей интерференционной картине служит качественным признаком распределения напряжений. Что касается количественных теоретических расчетов возникающих картин, то они во многих случаях довольно сложны и не всегда оправданы. Зато качественные методы обладают драгоценными свойствами простоты и быстроты. В первую очередь они удобны для прозрачных тел. Так, фотоэластический эффект в полимерных пленках и волокнах является одним из самых чувствительных методов изучения структуры полимерных цепей. Метод искусственной анизотропии с успехом применяют для обнаружения напряжений в паяных и прессованных стеклянных изделиях. Эти напряжения (часто вредные) устранить в стекле достаточно трудно. Для этого надо нагревать изделия почти до точки плавления и затем очень медленно охлаждать. Достаточно показателен такой пример: стеклянные отливки для больших астрономических линз охлаждаются в течение многих месяцев. Роль простого и эффективного метода контроля при этом трудно переоценить.

Однако технически важные материалы (прежде всего металлы) в большинстве своем непрозрачны. В этом случае изготавливаются модели исследуемых изделий из прозрачных материалов (целлулоид, пластмассы и др.) и исследуется их оптическая анизотропия под влиянием тех же воздействий. Однако, во-первых, изготовление таких моделей значительно осложняет методику анализа, а во-вторых, всегда имеются сомнения, насколько выводы, полученные на модели, справедливы для самого изделия. Поэтому в последние годы стали применять метод косвенного анализа с помощью нанесенных пленок. Изделие покрывается отражающей краской, затем на него наносится прозрачная пленка из вещества с большим коэффициентом фотоупругости. Образец освещается через поляризатор. Отраженный, дважды прошедший через пленку свет исследуется с помощью анализатора. Оценивая напряжение в пленке, можно судить и о напряжениях в поверхностных слоях самого изделия. Сползание пленки, как и ряд других факторов, конечно, могут быть источниками ошибок.

Для трехмерного исследования напряжений используют вещества, способные сохранять анизотропию после снятия нагрузки. Такими являются, например, фенолформальдегидные пластмассы. Напряжение прикладывается к нагретой до $80-120^\circ$ модели, после чего она остывает под нагрузкой до комнатной температуры. Тогда деформация в модели остается и после снятия нагрузки. Такую модель можно распилить на тонкие срезы и в них изучать двумерную деформацию на разной глубине вдоль третьего измерения. Существуют и другие способы трехмерного анализа.

Даже качественные результаты фотоупругого анализа дают ценную информацию. Метод этот находит широкое применение.

Аналогичен ему и поляризационный метод исследования жидких потоков, основанный на ориентационном эффекте Максвелла. Он применяется, например, в гидротехнических лотках для того, чтобы фиксировать момент перехода потока от ламинарного к турбулентному, и в других аналогичных задачах.

5. САХАРИМЕТРИЯ

Угол поворота φ плоскости поляризации в растворах естественно активных веществ при постоянной температуре и длине волны света пропорционален концентрации и толщине слоя раствора $\varphi = [\alpha] Cd$. Иначе и быть не могло, потому что поворот определяется числом молекул, которые свет встречает по пути. Следовательно, с помощью этого свойства вещества и света можно определять концентрации активных растворов. Коэффициент пропорциональности обозначают $[\alpha]$ и называют удельным вращением. Зная этот коэффициент для данного вещества и измеряя угол поворота растворов с неизвестной концентрацией, можно эту концентрацию быстро и точно определить.

Большая практическая ценность метода заключается в его очень высокой точности (наибольшей из всех методов определения концентрации растворов, потому что современным полутеневым и модуляционным установкам доступны сотые и тысячные доли градуса), а также простоте и скорости.

Важнейшим естественно активным веществом в практике является сахар, поэтому эта отрасль поляриметрии и получила такое «кондитерское» название. Метод широко применяется в сахарной промышленности. Он позволяет проводить необходимый технологический контроль на различных стадиях производственного процесса. При этом, стандартизовав условия измерения, шкалы сахариметров градуируют так, чтобы непосредственно отсчитывать концентрацию сахара в процентах. Диапазон наиболее часто измеряемых углов поворота плоскости поляризации таков, что обычные угловые меры оказались не самыми удобными. Существует специальная международная сахарная шкала, в которой 100° — это угол поворота водным раствором 26,000 г чистой сахарозы в 100 мл раствора (при 20°C , в трубке длиной 200 мм, в белом свете со стандартизованным фильтром). 100° этой шкалы соответствуют $34,620^\circ$ круговых. Ранее применялись другие стандартизованные шкалы.

Методы сахариметрии используются также в фармацевтической промышленности при производстве таких веществ, как камфара, кокаин, никотин и другие.

6. ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ АНАЛИЗ В ГЕОЛОГИИ

Любопытный метод использован на основе поляризации люминесценции битуминозных пород для поисков залежей нефти. Геолог-разведчик по битуминозности пород определяет направление, в котором надлежит вести поиск нефти. Концентрация битумов в породе очень мала, для надежных выводов требуется исследовать очень много образцов. Определение битумов по их люминесценции в растворах (в бензоле, ацетоне и др.), экстрагированных из пород, является очень целесообразным методом вследствие быстроты и чувствительности люминесцентного анализа. Очевидно, что образцы для исследований много проще получать с поверхности почвы или из неглубоких слоев, чем с больших глубин. Однако образцы, взятые из поверхностных слоев почвы, могут содержать два различных типа битумов совершенно разного происхождения. Одни образуются из паров нефти, залегающей под данной поверхностью, которые диффундируют сквозь земную толщу на поверхность. Другие возникают из различных орга-

нических веществ непосредственно в поверхностных слоях. Цвет и даже спектры люминесценции недостаточно специфичны для различения этих типов битумов. На помощь приходит поляризация люминесценции. Можно предполагать, что сквозь земную толщу успешнее будут диффундировать симметричные молекулы. А это свойство снижает анизотропию и способствует уменьшению поляризации люминесценции. Битумы же поверхностного происхождения от этого условия свободны — в них не происходит отбора симметричных соединений, следовательно, у них можно ожидать более высокой степени поляризации люминесценции.

Проведенные полевые исследования подтвердили эти предположения. Так, при контрольном обследовании площади в 60 км^2 с известной нефтеносностью образцы, взятые с мест, заведомо расположенных над залежами нефти, обнаружили полное отсутствие поляризации люминесценции. В то же время у образцов с тех участков, под которыми нефть отсутствовала, была найдена заметная степень поляризации люминесценции.

Этот метод может быть очень полезным вспомогательным средством поисков, если использовать его в комплексе с другими классическими геологическими методами (включая обычные флуоресцентные методы).

7. ДЕКОРАТИВНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Того, кто хоть раз видел интерференционную картину поляризованных лучей в кристаллах, не могли не поразить яркость и многообразие этих картин, а также их изменчивость в зависимости от направления взгляда и от расположения элементов оптической системы.

Такие богатые возможности просто сами просятся для использования в художественно-прикладных, декоративных целях. К сожалению, широкого распространения они пока не получили, несмотря на ряд имеющихся изобретений и предложений в этой области.

Если кристаллическую (или иную прозрачную анизотропную пластинку) поместить между линейными поляризаторами, то лучи, входящие под разными углами, выйдут различно окрашенными, так как сдвиг фаз зависит от угла падения. Такого типа устройства очень эффект-

ны в светящихся рекламах. Эффект еще усиливается, если пластинка мозаична и разные ее части имеют разную толщину, а один из поляризаторов медленно и плавно вращается. Цвета разных участков мозаики при этом меняются по-разному и создается непрерывно меняющаяся яркая, цветовая картина.

Не только в рекламных, но и в декоративных целях могут применяться мозаики такого типа, называемые иногда сияющими мозаиками. Эти мозаики могут изготавливаться путем наклеивания ^м кусочков кристаллической смальты (слюды, прозрачного гипса, целлофана и др.) на стекло или плексиглас. Составленный из элементов смальты (как и в обычной мозаике)¹ рисунок, узор или орнамент становится разноцветным, если заклеить его с обеих сторон поляроидными пленками. Цвет каждого элемента различен для разных направлений, поэтому мозаика засияет переливающимися радужными цветами.

Можно изготавливать и гравюры, действующие по аналогичному принципу. Для этого на целом листе двупреломляющего материала (например, на пластинке прозрачного кристаллического гипса) необходимо с помощью той или иной гравировальной техники (травление, частичное растворение, процарапывание и пр.) создать изображение с разной толщиной материала в различных его частях. Такая гравюра будет не просто цветной, а изменчиво-цветной. Динамика цвета таких мозаик и гравюр — новый момент в изобразительном искусстве, отличающий такие устройства, например, от простых витражей. Быть может, он поможет художникам-декораторам получать эффекты сильного и тонкого эстетического воздействия. Динамику цвета может быть в какой-то степени удастся превратить и в динамику самого изображения, например создать пейзаж, на котором «происходит» восход солнца и т. п.

Внутреннее и внешнее украшение общественных зданий, световые аттракционы, светозвуковые представления и многое другое могут предъявить большой спрос на устройства такого типа.

Читателю, желающему более глубоко и детально познакомиться с природой и свойствами поляризованного света и методами его применения в науке и практике, рекомендуем следующие книги:

- Г. С. Ландсберг.* Оптика. М., 1952.
- Р. В. Поль.* Оптика и атомная физика. М., Изд-во «Наука», 1966.
- С. И. Вавилов.* Собрание сочинений. М., Изд-во АН СССР, т. I, 1954; т. II, 1952; т. III, 1956.
- О. Френель.* Избранные труды по оптике. М., 1955.
- Р. Вуд.* Физическая оптика. Л., 1936.
- М. В. Волькенштейн.* Молекулярная оптика. М. — Л., 1951.
- У. Шерклифф.* Поляризованный свет. М., Изд-во «Мир», 1965.
- П. П. Феофилов.* Поляризованная люминесценция атомов, молекул и кристаллов. М., Физматгиз, 1959.
- Б. И. Васильев.* Оптика поляризационных приборов. М., Изд-во «Машиностроение», 1969.
- А. А. Шишловский.* Прикладная физическая оптика. М., Физматгиз, 1961.

Г л а в а I	
С В Е Т	5
Г л а в а II	
П О Л Я Р И З А Ц И Я С В Е Т А	12
Г л а в а III	
Р А З Л И Ч Н Ы Е Т И П Ы П О Л Я Р И З А Ц И И С В Е Т А	16
Г л а в а IV	
Н Е П О С Р Е Д С Т В Е Н Н О Е П О Л У Ч Е Н И Е П О Л Я Р И З О В А Н Н О Г О С В Е Т А	25
1. Поляризованная люминесценция	25
2. Эффект Зеемана	39
3. Явление Вавилова — Черенкова	42
4. Поляризация излучения лазеров	43
5. Некоторые другие случаи излучения поляризованно- го света	47
Г л а в а V	
М Е Т О Д Ы Э К С П Е Р И М Е Н Т А Л Ь Н О Г О П Р Е В Р А Щ Е Н И Я Е С Т Е С Т - В Е Н Н О Г О С В Е Т А В П О Л Я Р И З О В А Н Н Ы Й И И З М Е Н Е Н И Я Т И П А П О Л Я Р И З А Ц И И	48
1. Поляризация света при отражении и преломлении на границе изотропных диэлектриков	48
2. Двойное преломление света в кристаллах	56
3. Дихроизм и вращение плоскости поляризации	76
4. Поляризация при рассеянии света	86
Г л а в а VI	
П О Л Я Р И З А Ц И Я И И Н Т Е Р Ф Е Р Е Н Ц И Я	94
1. Роль поляризации когерентных лучей	94
2. Анализ поляризованного света	97

3. Поляризационная микроструктура естественного света	99
4. Интерференционные картины, получаемые с помощью кристаллов	103

Г л а в а VII

КВАНТОВАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА	111
1. Фотоны	111
2. Спин фотона	114
3. Момент количества движения циркулярно поляризованного света	115
4. Поляризация фотонов	116
5. Поляризация элементарных частиц	120

Г л а в а VIII

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА — ТОНКИЙ ИНСТРУМЕНТ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	125
1. Экспериментальные методы измерения степени поляризации и поворота плоскости поляризации	127
2. Поляризованная люминесценция и дихроизм	131
3. Оптическая активность	141
4. Двойное преломление	147

Г л а в а IX

ИНТЕРЕСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРИРОДЕ, СВЯЗАННЫЕ С ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ СВЕТА	152
1. Физиологическая оптика. Чувствительность глаза к поляризации света	152
2. Атмосферная оптика	162
3. Астрономия	169

Г л а в а X

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА	177
1. Светотехника	177
2. Модуляция световых потоков	179
3. Кодирование изображений и сигналов	182
4. Фотоупругий анализ	184
5. Сахариметрия	186
6. Люминесцентный анализ в геологии	187
7. Декоративное] применение	188
Литература	190