

В гл. 36 и 37 мы занимались изучением двух явлений, обусловленных волновой природой света, — интерференции и дифракции. В этой главе мы рассмотрим еще одно важное и полезное свойство света, которое состоит в том, что свет может быть *поляризован*. Существование поляризации также можно объяснить, предположив, что свет представляет собой волну, или, точнее, поперечную волну.

38.1. Плоскость поляризации

Понять поляризацию света нам поможет более простое явление — поляризация волны, бегущей по веревке. Веревку можно заставить колебаться в вертикальной плоскости (рис. 38.1, *а*) или в горизонтальной плоскости (рис. 38.1, *б*). И в том и в другом случае волна оказывается *плоскополяризованной* (или линейно-поляризованной), т. е. все колебания происходят в одной плоскости.

Если на пути волны поставить какое-нибудь препятствие с вертикальной щелью (рис. 38.2), то вертикально поляризованная волна пройдет через него, а горизонтально поляризованная волна препятствие не преодолет. Если бы щель в препятствии была горизонтальной, то оно оказалось бы непреодолимым для вертикально поляризованных волн. Если на пути таких волн поставить оба препятствия, то через них не сможет пройти ни одна из поляризованных волн. Заметим, что поляризация может существовать *только у поперечных* волн, но не у продольных. В продольных волнах колебания совершаются только вдоль направления их распространения, и никакой ориентацией щели нельзя эти волны погасить.

О возможности поляризации света стало известно только в XIX в. Но еще современники Ньютона знали явление, связанное с поляризацией света: при преломлении света в некоторых кристаллах, например в исландском шпате, возникают два преломленных луча. Такие кристаллы получили название *двоюкпреломляющих* (разд. 38.4). Некоторые другие кристаллы, например турмалин, в зависимости от их ориентации не пропускают тот или иной из преломленных лучей. В настоящее время известно, что лучи в двоюкпреломляющем кристалле плоско

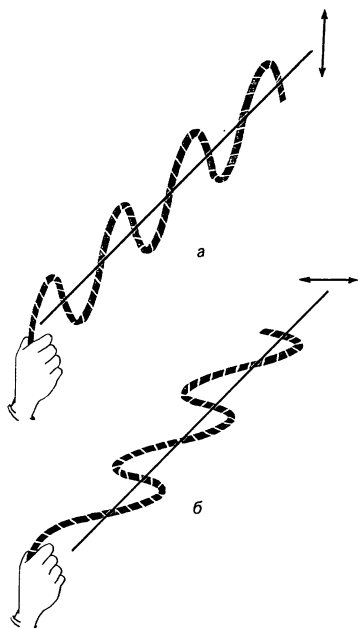


Рис. 38.1. Поперечные волны на веревке, поляризованные в вертикальной плоскости (*а*) и в горизонтальной плоскости (*б*).

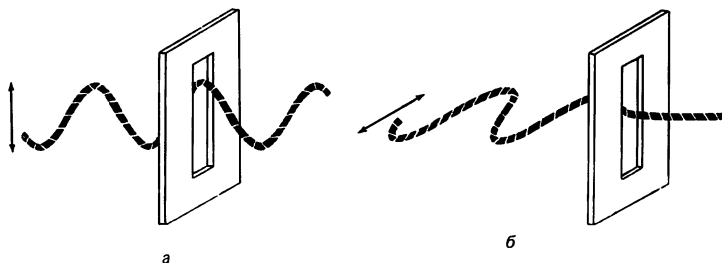


Рис. 38.2. Вертикально поляризованные волны проходят через вертикальную щель (а), а горизонтально поляризованные волны не проходят (б).

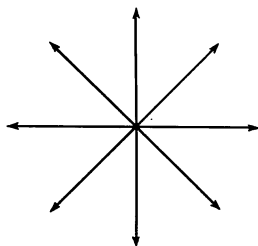


Рис. 38.3. Колебания вектора электрического поля в неполяризованном свете.

поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях и что турмалин действует подобно «щели», которая пропускает только луч с подходящей поляризацией. Но лишь после работ Юнга и Френеля, выполненных в начале XIX в., в этом явлении увидели доказательство того, что свет представляет собой поперечную волну. Спустя полвека развитая Максвеллом электромагнитная (ЭМ) теория света оказалась в полном соответствии с таким объяснением поляризации, так как ЭМ-волна является поперечной. Если ЭМ-волна плоско поляризована, то в качестве направления ее поляризации принято выбирать направление вектора напряженности электрического поля (рис. 33.7).

Свет не обязательно поляризован. Он может быть и *неполяризованным*. Это означает, что колебания источника происходят одновременно во многих плоскостях (рис. 38.3). Обычная лампа накаливания испускает, как и Солнце, неполяризованный свет.

Плоскополяризованный свет можно получить из неполяризованного с помощью некоторых кристаллов, например турмалина. В наши дни можно также воспользоваться *поляроидной пленкой*. (Поляроиды были изобретены в 1929 г. Эдвином Лэндом.) Эта пленка состоит из имеющих сложное строение длинных молекул с выстроенными параллельными осями. Такой поляроид действует как набор параллельных щелей, почти беспрепятственно (без потерь) пропуская свет одной поляризации (соответствующее направление называется *осью* поляроида) и почти полностью поглощая свет, поляризованный в пер-

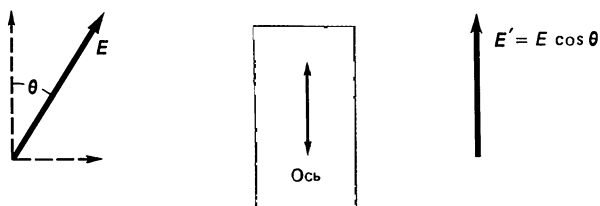


Рис. 38.4. Вертикальный поляроид пропускает только вертикальную составляющую падающей на него волны.

Падающий пучок поляризован под углом θ к вертикали и имеет амплитуду E

Вертикальный поляроид

Прошедшая волна

пендикулярной плоскости¹⁾. Если пучок плоскополяризованного света падает на поляроид, ось которого образует угол θ с направлением поляризации, то после поляроида он будет поляризован в плоскости, параллельной оси поляроида, и иметь амплитуду, ослабленную в $\cos \theta$ раз (рис. 38.4). Таким образом, через поляроид проходит только компонента поляризации (вектора напряженности электрического поля \mathbf{E}), параллельная его оси. Так как интенсивность света пропорциональна квадрату его амплитуды, интенсивность плоскополяризованного пучка, прошедшего через поляризатор, определяется выражением

$$I = I_0 \cos^2 \theta, \quad (38.1)$$

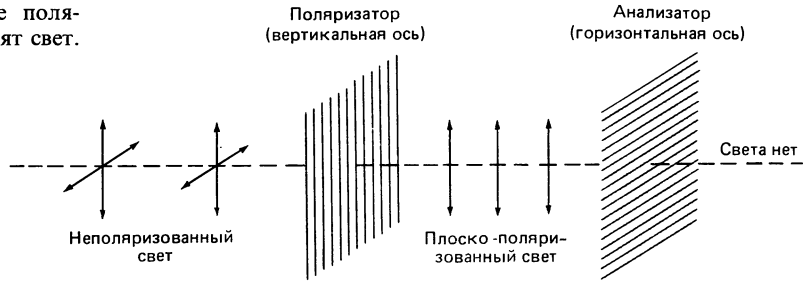
где θ – угол между осью поляризатора и плоскостью поляризации падающей волны, I_0 – интенсивность падающего света²⁾.

Поляроид можно использовать в качестве *поляризатора* для получения плоскополяризованного света из неполяризованного, так как поляроид пропускает только компоненту волны с поляризацией, параллельной его оси. Поляроид можно также использовать в качестве *анализатора*, когда требуется установить, 1) поляризован ли свет и 2) в какой плоскости он поляризован. Поляроид-анализатор пропускает одно и то же количество света независимо от ориентации своей оси, если свет не поляризован; чтобы убедиться в этом, попробуйте вращать одно из стекол поляроидных солнцезащитных очков, глядя сквозь него на обычную лампу накаливания. Но если свет поляризован, то при вращении поляроида интенсивность пропускаемого света максимальна, когда плоскость поляризации параллельна оси поляроида, и минимальна, когда она перпендикулярна оси поляроида. Если, вращая поляроид, посмотреть на небо преимущественно под прямыми углами к направлению на Солнце, то вы увидите, что дневной свет поляризован. (Прямой солнечный свет не поляризован, но мы настоятельно не рекомендуем смот-

¹⁾ Как это происходит, можно объяснить, рассматривая структуру молекул. Если напряженность электрического поля \mathbf{E} колеблется вдоль осей длинных молекул, то электроны будут перемещаться вдоль молекул, совершая тем самым работу и перенося энергию. Следовательно, если вектор \mathbf{E} параллелен «щелям», то волна будет поглощаться. Если напряженность электрического поля \mathbf{E} колеблется перпендикулярно осям длинных молекул (т. е. перпендикулярно «щелям»), то поле \mathbf{E} не будет совершать работу и поглощение отсутствует. Следовательно, рис. 38.2. не применим к колебаниям напряженности электрического поля в ЭМ-волне (хотя вполне отвечает случаю магнитного поля с индукцией \mathbf{B}). Под осью поляроида понимают направление, в котором отсутствует поглощение электрического поля \mathbf{E} ; следовательно, ось поляроида перпендикулярна длинным молекулам и «щелям» между ними.

²⁾ Формулу (38.1) часто называют законом Малюса в честь Этьена Малюса, современника Френеля.

Рис. 38.5. Скрещенные поляроиды полностью гасят свет.



реть на Солнце даже сквозь поляризатор, чтобы не испортить зрение.) Если при определенной ориентации интенсивность прошедшего сквозь поляроид-анализатор света падает до нуля, то такой свет полностью плоско поляризован. Если интенсивность света снижается просто до минимума, то такой свет *частично поляризован*.

Неполяризованный свет — это свет со случайными направлениями поляризации (вектора напряженности электрического поля). Каждую из этих поляризаций можно разложить на две взаимно перпендикулярные составляющие. Таким образом, неполяризованный свет можно рассматривать как смесь двух плоскополяризованных пучков света равной амплитуды со взаимно перпендикулярными плоскостями поляризации. Если два поляроида *скрещены*, т. е. их оси расположены под прямым углом, то неполяризованный свет не проходит сквозь них (либо почти не проходит, поскольку реальные поляроиды несовершенны). Как показано на рис. 38.5, неполяризованный свет после прохождения через первый поляроид (поляризатор) становится плоскополяризованным. Второй поляроид (анализатор) не пропускает эту компоненту, так как его ось перпендикулярна оси первого поляризатора. Вы можете убедиться в этом сами с помощью поляроидных солнцезащитных очков. Таким образом, благодаря своей способности поляризовать падающий свет поляроидные солнцезащитные очки на 50% ослабляют неполяризованный свет. В действительности они поглощают еще больше света из-за окраски.

Пример 38.1. Неполяризованный свет проходит через два поляроида. Ось одного из них вертикальна, а ось другого образует с вертикалью угол 60° . Каковы поляризация и интенсивность прошедшего света?

Решение. Первый поляроид исключает половину света, поэтому после него интенсивность света уменьшается наполовину: $I_1 = 1/2 I_0$. Свет, падающий на второй поляризатор, поляризован в вертикаль-

ной плоскости, поэтому после второго поляроида интенсивность света понижается [см. соотношение (38.1)] до

$$I_2 = I_1 (\cos 60^\circ)^2 = \frac{1}{4} I_1.$$

Следовательно, $I_2 = 1/8 I_0$, т. е. интенсивность прошедшего света составляет одну восьмую от интенсивности падающего света, а плоскость его поляризации образует с вертикалью угол 60° .

38.2. Поляризация при отражении

Получить поляризованный свет из неполяризованного можно еще одним способом – отражением. Когда свет падает на немаetalлическую поверхность под любым углом, кроме прямого, отраженный луч оказывается плоскополяризованным преимущественно параллельно отражающей поверхности (рис. 38.6). Иначе говоря, компонента с поляризацией в плоскости, перпендикулярной отражающей поверхности, почти полностью проходит или поглощается. В этом можно убедиться, поворачивая поляроидные очки, когда вы смотрите в них на поверхность озера или дороги. Поскольку большинство поверхностей под открытым небом горизонтальны, ось поляроидных очков направляют по вертикали, с тем чтобы погасить самую интенсивную компоненту света и тем самым ослабить отблески. Это хорошо знают рыбаки, использующие поляроидные очки, чтобы избавиться от бликов на поверхности озера или реки и тем самым лучше видеть, что происходит под водой.

Степень поляризации отраженного пучка зависит от угла: при нормальном падении свет полностью не поляризован, а при падении под углом, который называется *углом полной поляризации* θ_p , отраженный свет поляризован на 100%¹⁾. Угол полной поляризации связан с показателями преломления сред по обе стороны границы их раздела соотношением

$$\operatorname{tg} \theta_p = \frac{n_2}{n_1}, \quad (38.2a)$$

где n_1 – показатель преломления среды, в которой распро-

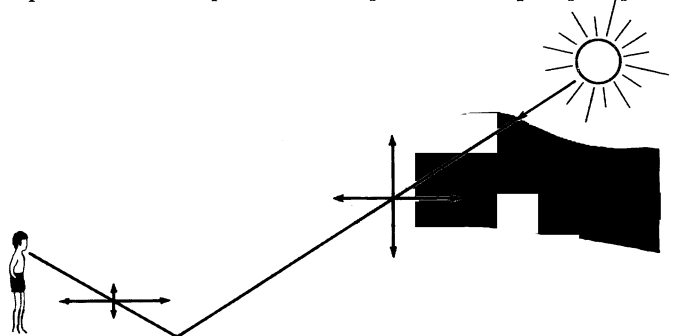


Рис. 38.6. Свет, отраженный от немаetalлической поверхности (например, от гладкой поверхности воды в этом озере), частично поляризован параллельно поверхности.

¹⁾ При таком угле падения одна компонента целиком проходит в прозрачную среду полностью, а другая – частично, поэтому прошедший свет *не имеет* 100%-ной поляризации.

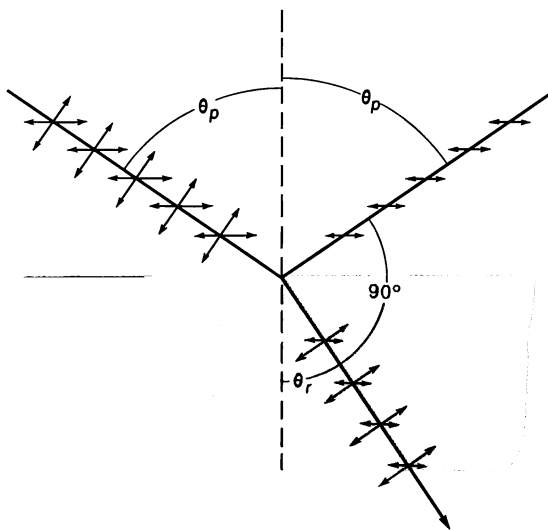


Рис. 38.7. Свет, отраженный под углом θ_p , плоско поляризован параллельно поверхности, и $\theta_p + \theta_r = 90^\circ$, где θ_r — угол преломления.

страняется луч, а n_2 — показатель преломления среды, лежащей по другую сторону отражающей границы. Если свет распространяется в воздухе, то $n_1 = 1$, и

$$\operatorname{tg} \theta_p = n. \quad (38.26)$$

Угол полной поляризации называют также *углом Брюстера*, а соотношение (38.2) — *законом Брюстера* в честь шотландского физика Дэвида Брюстера (1781–1868), открывшего его экспериментально в 1812 г. Формулы (38.2) могут быть получены на основе электромагнитной теории света. Интересно отметить, что при падении под углом Брюстера отраженный и преломленный лучи образуют угол 90° , т.е. $\theta_p + \theta_r = 90^\circ$ (рис. 38.7). В этом можно убедиться, подставив соотношение (38.2а) ($n_2 = n_1 \operatorname{tg} \theta_p = n_1 \sin \theta_p / \cos \theta_p$) в выражение для закона Снелля $n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin \theta_r$ и получив равенство $\cos \theta_p = \sin \theta_r$, которое справедливо только для $\theta_p = 90^\circ - \theta_r$.

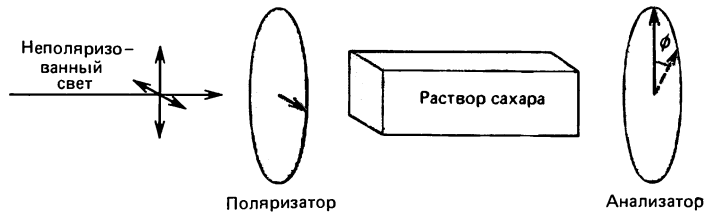
Пример 38.2. а) При каком угле падения солнечный свет отражается от поверхности озера плоскополяризованным? б) Чему равен угол преломления?

Решение. а) Воспользуемся соотношением (38.2б) при $n = 1,33$; тогда $\operatorname{tg} \theta_p = 1,33$ и $\theta_p = 53,1^\circ$. б) $\theta_r = 90,0^\circ - \theta_p = 36,9^\circ$.

38.3. Оптическая активность

Было обнаружено, что при прохождении плоскополяризованного света через кристаллы и растворы плоскость поляризации поворачивается на некоторый угол. Например, на рис. 38.8 свет проходит через поляризатор, а затем через сахарный раствор. Поляризатор-анализатор за кюветой с раствором не целиком гасит свет, когда его ось образует с осью поляризатора угол 90° . Однако если

Рис. 38.8. Сахарный раствор поворачивает плоскость поляризации падающего света: после прохождения кюветы свет поляризован не горизонтально, а под углом ϕ к горизонтали, поэтому анализатор, повернутый под углом ϕ к вертикали, гасит свет.



анализатор повернуть на угол ϕ , то он перестает пропускать свет. Это свидетельствует о том, что вещество в кювете поворачивает плоскость поляризации света на угол ϕ . Такие вещества называются *оптически активными*. Оптическая активность обусловлена асимметрией молекул, которые могут иметь форму спиралей, как, например, молекулы некоторых белков. Вещества, поворачивающие плоскость поляризации вправо по ходу луча (как на рис. 38.8), называются *правовращающими*. Вещества, поворачивающие плоскость поляризации влево по ходу луча, называются *левовращающими*. Обычный сахар, декстроза, или D-глюкоза, принадлежит к числу правовращающих веществ. Большинство аминокислот и белков — левовращающие вещества.

Угол вращения ϕ зависит от длины пути l (м) света в веществе и от концентрации c (кг/м³), если речь идет о растворе. Для разбавленных растворов эта зависимость линейна, и угол ϕ (рад) определяется выражением

$$\phi = \alpha lc.$$

Постоянная α характеризует свойства вещества и называется *удельным вращением (постоянной вращения)* или *удельной оптической активностью* (α зависит от температуры и длины волны используемого света).

Так как угол вращения ϕ пропорционален концентрации, оптическая активность служит стандартным методом измерения концентраций растворов таких веществ, как сахар. Оптическая активность полезна также при определении пространственной структуры больших молекул (например, белков) или ее изменений в различных условиях.

Стекло и пластмасса приобретают оптическую активность в деформированном состоянии. Вращение плоскости поляризации максимально в местах с максимальным напряжением. Модели костей или деталей машин, выполненные из прозрачной пластмассы и помещенные между скрещенными поляроидами, можно использовать для визуального наблюдения точек наибольшего напряжения. Такой метод называется поляризационно-оптическим анализом напряжений.

* 38.4. Оптическая анизотропия: двойное лучепреломление и дихроизм

Во многих прозрачных средах скорость света одинакова по всем направлениям. Такие среды называются *изотропными*. Но в некоторых кристаллах и растворах скорость света в различных направлениях неодинакова. Такие среды называются *анизотропными*. О них также говорят как о *двоюкопреломляющих*, так как при этом наблюдается необычное явление.

В двоюкопреломляющих кристаллах, таких, как кальцит, существует выделенное направление, называемое *оптической осью* кристалла (подчеркнем, что речь идет не об отдельной линии, а о направлении в кристалле). Если обычный свет входит в кристалл вдоль оптической оси, то ничего аномального при этом не происходит. Но если неполяризованный свет падает под углом к оптической оси, как на рис. 38.9, то наблюдается необычное явление: в кристалле возникают два преломленных луча. На рис. 38.9 луч падает по нормали к поверхности и оптическая ось находится в плоскости рисунка. Один преломленный луч, называемый *обыкновенным лучом* (o), проходит сквозь кристалл обычным образом. Другой луч, называемый *необыкновенным лучом* (e), преломляется, отклоняясь на некоторый угол.

Нетрудно видеть, что закон Снелля для луча e не выполняется, однако он справедлив для луча o .

Лучи e и o плоскополяризованы во взаимно перпендикулярных направлениях. На рис. 38.9 точки на луче o указывают на то, что колебания в этом случае происходят в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка. Поляризация луча e указана стрелками.

Явление двойного лучепреломления можно объяснить, приняв следующее допущение: скорость света зависит от ориентации вектора поляризации относительно оптической оси кристалла. Как видно из рис. 38.9, луч o поляризован перпендикулярно оптической оси, поэтому его скорость одинакова по всем направлениям, коль скоро поляризация остается перпендикулярной оптической оси. С другой стороны, у луча e имеются компоненты поляризации как параллельные, так и перпендикулярные оптиче-

Рис. 38.9. неполяризованный свет, падающий нормально на двоюкопреломляющий кристалл (например, на кристалл исландского шпата), разделяется на два преломленных пучка. Штриховыми линиями показано направление оптической оси.

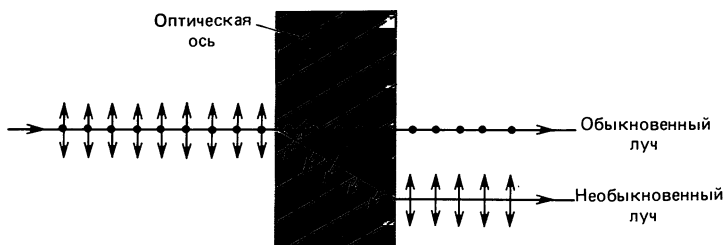


Таблица 38.1. Главные значения показателей преломления для некоторых двоякопреломляющих кристаллов ($\lambda = 589$ нм)

Кристалл	n_o	n_e
Лед	1,309	1,313
Кварц	1,544	1,553
Кальцит	1,658	1,486
Доломит	1,681	1,500

ской оси, и поэтому его скорость распространения неодинакова в различных направлениях: луч e распространяется со скоростью луча o , если его вектор поляризации перпендикулярен оптической оси. В других случаях скорость распространения луча e будет больше (у некоторых кристаллов меньше), чем скорость распространения луча o , и достигает максимума (минимума) при поляризации, параллельной оптической оси. (В дальнейшем мы будем предполагать, что скорость распространения луча e в кристалле больше, чем луча o .) Следовательно, показатель преломления n_o обыкновенного луча одинаков по всем направлениям, тогда как показатель преломления n_e необыкновенного луча зависит от угла. Обычно приводят значение n_e для луча e , распространяющегося перпендикулярно оптической оси с направлением поляризации, параллельным оптической оси. Эти главные значения показателей преломления n_o и n_e приведены в табл. 38.1 для нескольких кристаллов.

Для объяснения двойного лучепреломления используем эти предположения и принцип Гюйгенса. Рассмотрим обыкновенную волну, изображенную на рис. 38.10, *а*. Центры двух элементарных волн Гюйгенса показаны на волновом фронте в момент входа в кристалл. Так как эти элементарные волны распространяются с одинаковой скоростью по всем направлениям, они остаются сферическими внутри кристалла и распространяются в прямом направлении. В случае луча e (рис. 38.10, *б*) волновой фронт элементарных волн Гюйгенса имеет форму эллипсоида, так как скорость распространения этого луча зависит от направления. Луч 1 элементарной волны поляризован перпендикулярно оптической оси и поэтому распространяется с такой же скоростью, как и луч o . Лучи 2, 3 и 4 распространяются быстрее обыкновенного луча, причем скорость распространения луча 4 максимальна. (Так обстоит дело в случае кальцита. В таких кристаллах, как лед или кварц, лучи 2, 3 и 4 распространялись бы медленнее,

Рис. 38.10. Объяснение двойного лучепреломления на основе принципа Гюйгенса.

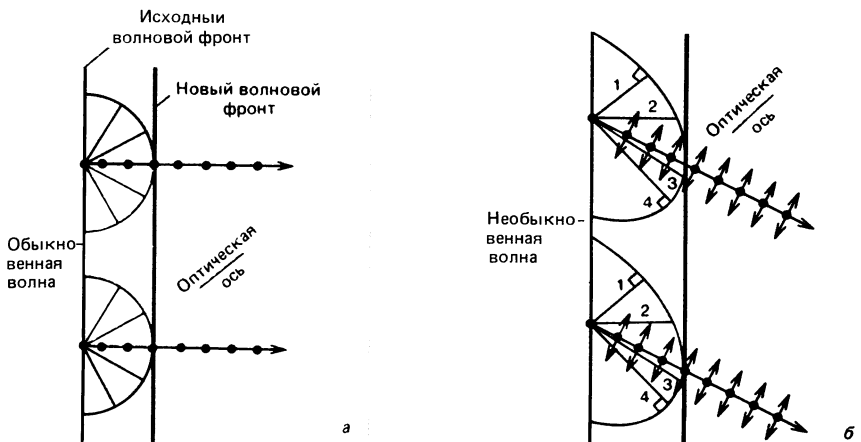
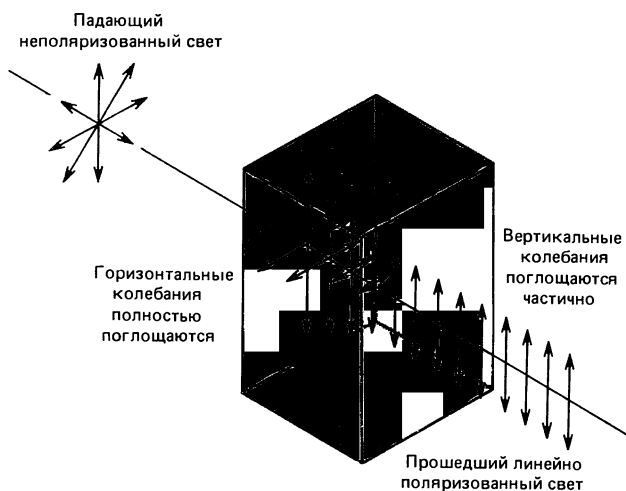


Рис. 38.11. Дихроичный кристалл поглощает одну поляризованную составляющую сильнее, чем другую. Если кристалл достаточно толстый, то прошедший свет плоско поляризован.



чем луч o ; см. табл. 38.1.) Поэтому волновой фронт (огibaющая элементарных волн Гюйгенса) оказывается смещенным в сторону. В соответствующем направлении и будет распространяться луч e .

Некоторые двоякопреломляющие кристаллы, например турмалин, поглощают одну из поляризованных компонент сильнее, чем другую (рис. 38.11). О таких кристаллах принято говорить, что они обладают *дихроизмом*. Если толщина дихроичного кристалла достаточно велика, то одна из компонент неполяризованного света полностью поглотится и прошедший через кристалл свет окажется плоскополяризованным. Именно на явлении дихроизма основано действие поляроидных пленок.

* 38.5. Круговая и эллиптическая поляризация

Предположим, что пучок плоско-поляризованного света падает на двоякопреломляющий кристалл (например, на кристалл кальцита), оптическая ось которого параллельна грани кристалла и образует угол 45° с плоскостью поляризации света (рис. 38.12). Вектор напряженности электрического поля E падающей волны можно разложить на две составляющие — параллельную и перпендикулярную оптической оси, которые будут соответствовать волнам e и o . Эти волны имеют одинаковые амплитуды и распространяются в кристалле по одному направлению. (Обратите внимание на то, что волна e не преломляется, как на рис. 38.9, поскольку колебания в ней происходят параллельно оптической оси.) Однако волны o и e распространяются с различными скоростями (так как направлены перпендикулярно оптической оси) и выходят из кристалла с различными фазами. Если разность фаз равна 90° , то кристалл называется *четвертьволновой пластинкой* (по-

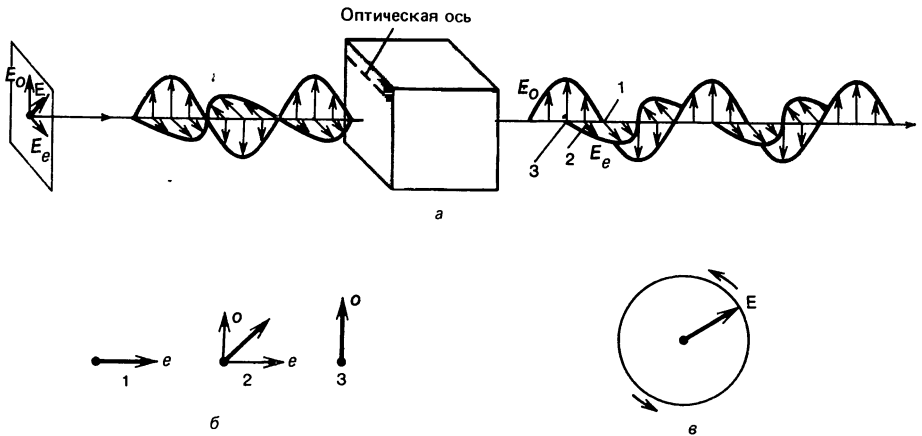


Рис. 38.12. *a* – волна, поляризованная под углом 45° к оптической оси, падает на дwoякопреломляющую четвертьволновую пластинку нормально к поверхности и к оптической оси. Обыкновенная волна E_o после прохождения пластинки отстает на четверть длины волны от необыкновенной волны E_e . Вектор поляризации прошедшей волны E вращается во времени, в чем можно убедиться, рассматривая его составляющие в точках 1, 2 и 3; *b* – те же компоненты, если на них смотреть в направлении распространения волны; *в* – свет циркулярно поляризован.

сколько одна волна будет сдвинута относительно другой на четверть длины волны). Это случай изображен на рис. 38.12. Интересно отметить, что вектор поляризации (полная напряженность электрического поля E , равная суммарной напряженности электрических полей двух волн) вращается по окружности постоянного радиуса, как показано на рис. 38.12, *b* и *в*. Такой свет называется поляризованным по кругу, или *циркулярно поляризованным*.

Пример 38.3. Какую толщину должна иметь четвертьволновая пластинка из кальцита для света с длиной волны 589 нм?

Решение. Согласно табл. 38.1, $n_e = 1,486$ и $n_o = 1,658$. Число длин волн необыкновенного луча, укладывающихся на толщине t кристалла, равно

$$N_e = \frac{t}{\lambda_e} = \frac{tn_e}{\lambda},$$

где λ – длина волны в воздухе и $\lambda_e = \lambda/n_e$ – длина волны в кристалле. В случае обыкновенного луча число длин волн N_o , укладывающихся на толщине кристалла, равно

но

$$N_o = \frac{tn_o}{\lambda}.$$

Так как мы хотим, чтобы разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами составляла четверть длины волны, положим $N_o - N_e = 1/4$, или

$$\frac{1}{4} = N_o - N_e = \frac{t}{\lambda}(n_o - n_e).$$

Разрешив это соотношение относительно t и подставив численные значения входящих в него величин, получим

$$t = \frac{\lambda}{4(n_o - n_e)} = \frac{589 \text{ нм}}{4(1,658 - 1,486)} = 856 \text{ нм}.$$

Если двоякопреломляющий кристалл приводит к сдвигу фаз 180° (*полуволновая пластинка*), то, как показывает чертёж, аналогичный приведенному на рис. 38.12, выходящая волна будет плоско поляризована. Действительно, если толщина кристалла такова, что разность фаз равна 0 , π , 2π или любому целому, кратному π , то выходящая волна плоско поляризована. Если же разность фаз равна $\pi/2$, $3\pi/2$, $5\pi/2$ и т. д., то свет циркулярно поляризован. При других разностях фаз выходящий свет имеет *эллиптическую поляризацию*. Это означает, что вектор напряженности (вектор поляризации) вращается, как показано на рис. 38.12, в, но длина его (амплитуда E) изменяется так, что конец вектора описывает эллипс.

До сих пор мы предполагали, что в падающей волне вектор E образует угол 45° с оптической осью. Но если вектор поляризации падающего луча образует с оптической осью угол, отличный от 45° (а также от 0 и 90°), то свет, выходящий из четвертьволновой пластинки (разность фаз 90°), будет эллиптически поляризованным. В этом нетрудно убедиться, так как амплитуды компонент e и o не одинаковы.

* 38.6. Рассеяние света в атмосфере

Почему Солнце на закате красное, небо в ясный день голубое, а дневной свет (по крайней мере частично) поляризован? Все эти явления можно объяснить *рассеянием* света на молекулах атмосферы. На рис. 38.13 мы видим солнечный свет, падающий на молекулу земной атмосферы. Электрическое поле ЭМ-волны приводит в движение электрические заряды внутри молекулы, и молекула частично поглощает падающее на нее излучение.

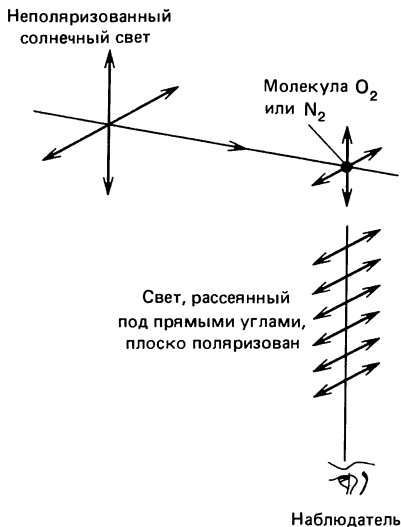


Рис. 38.13. Неполаризованный солнечный свет рассеивается молекулами воздуха.

Поглощенное излучение быстро высвечивается, так как заряды внутри молекулы совершают колебания. Как было показано в разд. 33.4, колебание электрических зарядов порождает ЭМ-волны, электрическое поле которых лежит в плоскости колебаний электрических зарядов. Интенсивность излучения максимальна в направлении, перпендикулярном направлению колебаний, и уменьшается до нуля в направлении колебаний (рис. 33.6). На рис. 38.13 представлено разложение движения зарядов на две составляющие. Под прямым углом к направлению падения солнечного света наблюдатель будет видеть плоскополяризованный свет, так как вдоль направления колебаний другой составляющей свет не испускается. (В этом можно убедиться и иначе, заметив, что при наблюдении в направлении колебаний сами колебания, а следовательно, и возбуждаемые ими волны не видны.) При наблюдении под другими углами присутствуют обе составляющие, причем одна из них оказывается более интенсивной, поэтому свет частично поляризован. Так процесс рассеяния света молекулами атмосферы позволяет объяснить поляризацию дневного света. [Рассеяние позволяет также объяснить полную поляризацию, возникающую при отражении (рис. 38.7). При падении под углом Брюстера, как мы знаем, угол, образованный отраженным и преломленным лучами, будет прямым. Если представить себе, что молекулы среды колеблются в направлении, перпендикулярном преломленному лучу, то легко видеть, что под углом 90° к этому направлению (т. е. у преломленного луча) будет только одна компонента поляризации (рис. 38.7), как и при рассеянии (рис. 38.13).]

Рассеяние света земной атмосферой зависит от длины световой волны λ . Частицы, размеры которых гораздо меньше длины волны света (например, молекулы газов, входящих в состав воздуха), слабее рассеивают длинные волны и сильнее – короткие. С увеличением длины волны, рассеяние ослабевает пропорционально $1/\lambda^4$. Следовательно, красный и оранжевый свет рассеивается гораздо слабее, чем голубой и фиолетовый, и поэтому небо выглядит голубым. На закате солнечные лучи проходят максимальный слой атмосферы. Значительная часть голубого излучения рассеивается. Свет, достигающий поверхности Земли и отражающийся от облаков и атмосферной дымки, лишается голубой составляющей и поэтому кажется красноватым.

Пропорциональность рассеяния $1/\lambda^4$ имеет место только в случае, когда рассеивающие объекты оказываются меньше длины световой волны. Это условие выполняется для молекул кислорода и азота, имеющих размеры около 0,2 нм. Но облака содержат капельки воды и кристаллы льда, размеры которых значительно превышают λ . Такие частицы рассеивают свет почти равномерно на всех частотах, поэтому облака кажутся белыми (или серыми в тени).

Заключение

В неполяризованном свете колебания вектора напряженности электрического поля происходят в любых направлениях. Если вектор напряженности электрического поля колеблется только в одной плоскости, то свет называется *плоскополяризованным* (или *линейно-поляризованным*). Свет может быть также частично поляризован. Если неполяризованный свет падает на поляроид или двойкопреломляющий кристалл, то выходящий световой пучок будет плоскополяризован. Существование поляризации светового пучка можно установить экспериментально: если свет направить на поляроид, то при вращении поляроида интенсивность света за ним должна изменяться. Поляроид может использоваться и как поляризатор, и как анализатор. При отражении свет поляризуется либо частично, либо полностью. Если свет, распространяющийся в воздухе, отражается от среды с показателем преломления n , то он будет полностью поляризован, когда угол падения θ_p удовлетворяет соотношению $\operatorname{tg} \theta_p = n$. Существование поляризации света свидетельствует о том, что свет представляет собой поперечные волны.

Вопросы

1. Какой вывод о природе света можно сделать на основании поляризации?
2. Чем поляризатор отличается от анализатора?
3. Как определить, обладают ли стекла солнцезащитных очков поляризующим действием?
4. Солнечный свет не проходит через два поляроида, если их оси скрещены под прямыми углами. Что произойдет, если между этими поляроидами поместить третий, ось которого образует с осями двух других поляроидов угол 45° ?
5. Для какого из веществ, приведенных в табл. 38.1, скорость необыкновенного луча оказывается меньше, когда он поляризован параллельно оптической оси, чем в случае поляризации, перпендикулярной оптической оси?
6. Какой цвет имело бы небо, если бы у Земли не было атмосферы?
7. Останется солнечный свет белым или приобретает окраску, если земная атмосфера окажется в 50 раз плотнее?
- *8. Всегда ли в двойкопреломляющей среде необыкновенный луч e распространяется со скоростью c/n_e ?
- *9. Если из материалов, перечисленных в табл. 38.1, изготовить четвертьволновые пластинки, то из каких материалов получились бы самая толстая и самая тонкая пластинки?
- *10. Как определить направление оптической оси у четвертьволновой пластинки?

*11. Как определить, не обладает ли пучок света циркулярной поляризацией?

*12. Может ли быть циркулярно-поляризованной звуковая волна? А плоско-поляризованной? Что можно сказать о пучке СВЧ?

Задачи**Раздел 38.1**

1. (I) Два поляризатора ориентированы под углом 45° относительно друг друга. На них падает неполяризованный свет. Какая доля интенсивности света пройдет через оба поляризатора?
2. (I) Два поляроида ориентированы так, что пропускают максимум света. На какой угол следует повернуть один из них, чтобы интенсивность прошедшего света уменьшилась наполовину?
3. (II) Под каким углом следует расположить оси двух поляроидов, чтобы интенсивность падающего неполяризованного света уменьшилась до а) $1/3$; б) $1/10$?
4. (II) Неполяризованный свет проходит через пять расположенных последовательно поляроидов. Ось каждого поляроида (начиная со второго) образует угол 45° с осью предыдущего. Какова интенсивность прошедшего света?
5. (II) Два поляризатора ориентированы под углом $34,0^\circ$ относительно друг друга. Свет, поляризованный под углом $17,0^\circ$ относительно

каждого поляризатора, проходит через оба поляризатора. Насколько ослабляется интенсивность света?

6. (II) Докажите, что если два источника света одинаковой интенсивности испускают плоскополяризованный свет, причем их плоскости поляризации взаимно перпендикулярны, то они не смогут создать интерференционную картину даже при условии, что разность фаз постоянно равна нулю.

7. (II) Неполаризованный свет падает на два поляроида, оси которых расположены под прямыми углами. а) Какая часть интенсивности падающего света проходит через них? б) Какая часть света пройдет, если между этими двумя поляроидами поместить третий, ось которого образует с осями других поляроидов угол 45° ? в) Что произойдет, если третий поляроид поместить перед первыми двумя?

8. (II) Имеется пучок плоскополяризованного света и «идеальные» поляризаторы. Как повернуть плоскость поляризации света на 90° , утратив при этом лишь 10% интенсивности?

9. (II) Выраженная в процентах поляризация P частично поляризованного света по определению равна

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} 100,$$

где I_{\max} и I_{\min} – максимальная и минимальная интенсивности света, прошедшего через поляризатор. Такой свет можно рассматривать как суперпозицию двух плоскополяризованных пучков неодинаковой интенсивности I_{\max} и I_{\min} с взаимно перпендикулярными плоскостями поляризации. Докажите, что свет, прошедший через поляризатор с направлением оси, образующим угол ϕ с направлением, которому отвечает I_{\max} , имеет интенсивность

$$\frac{1 + p \cos 2\phi}{1 + p} I_{\max},$$

где $p = P/100$ – «доля поляризации».

Раздел 38.2

10. (I) Чему равен угол Брюстера для границы воздух – стекло ($n = 1,56$)?

11. (I) Чему равен угол Брюстера для стекла ($n = 1,56$), погруженного в воду?

12. (I) Под каким углом над горизонтом стоит Солнце, когда свет, отражающийся от гладкой поверхности озера, поляризован особенно сильно?

13. (II) Чему равен угол Брюстера при отражении от поверхности воды снизу (из-под воды)? Сравните этот угол с углом полного внутреннего отражения и с углом Брюстера при отражении от поверхности воды сверху.

* Раздел 38.5

*14. (II) Двоюкпреломляющий биологический образец толщиной $1,65 \cdot 10^{-3}$ см имеет показатели преломления 1,322 и 1,331 для света с длиной волны 580 нм. Какая разность фаз между необыкновенным и обыкновенным лучами возникает после прохождения через этот образец?

*15. (II) Узкий пучок неполяризованного света падает под углом $44,5^\circ$ к грани плоского кристалла кварца толщиной 2,00 см. Оптическая ось параллельна грани и перпендикулярна лучу. а) Вычислите расстояние между обыкновенным и необыкновенным лучами на выходе из кристалла. (Закон Снелля выполняется для обоих лучей, так как лучи распространяются в плоскости, перпендикулярной оптической оси.) б) Как будут поляризованы оба луча после выхода из кристалла?

* Раздел 38.5

*16. (I) Какова минимальная толщина четвертьволновой пластинки кварца для света с длиной волны 660 нм?

*17. (II) Пучок циркулярнополяризованного света интенсивности I падает на поляроид. Охарактеризуйте природу выходящего света и вычислите его интенсивность.

*18. (II) Опишите поляризацию прошедшего света, если свет, падающий на полуволновую пластинку, а) неполяризован; б) плоскополяризован; в) циркулярнополяризован. Ответы обоснуйте.

*19. (II) Плоскополяризованный свет с длиной волны 650 нм падает по нормали на одну грань тонкого плоского кристалла кальцита. Какова минимальная толщина такого кристалла, если по выходе из другой грани свет остался плоскополяризованным? Оптическая ось параллельна граням кристалла.

*20. (II) Покажите, что плоскополяризованный пучок света можно представить как сумму двух циркулярнополяризованных компонент.

*21. (II) Покажите с помощью диаграммы, что если в изображенной на рис. 38.12, а экспериментальной установке разность фаз прошедших волн составляет четное кратное π (т.е. равна $0, 2\pi, 4\pi$ и т.д.), то плоскость поляризации прошедшего света совпадает с плоскостью поляризации падающего света. Если разность фаз равна нечетному числу π (т.е. $\pi, 3\pi, 5\pi$ и т.д.), то плоскость поляризации прошедшего света будет перпендикулярна плоскости поляризации падающего света.

*22. (III) а) Покажите с помощью диаграммы, что если разность фаз прошедших через кристалл волн на рис. 38.12, а не равна целому

кратному $\pi/2$, то свет будет эллиптически-поляризован. б) Какой угол образует главная ось с направлением поляризации падающего света?

*23. (III) Предположим, что вектор поляризации падающей волны на рис. 38.12, а образует с

оптической осью угол, отличный от 45° (например, угол 60°). Как будет поляризован свет, прошедший через а) четвертьволновую пластинку; б) полуволновую пластинку?