

через комплексные коэффициенты любого полного набора волновых функций. Таким образом, мы можем выразить $\langle S \rangle$ не только через линейно-поляризованные колебания по направлениям \hat{x} и \hat{y} [см. формулы (28) — (33)], но и через колебания, поляризованные по кругу. Имеем

$$R = \frac{\langle S \rangle}{\hbar\omega} A\varepsilon, \quad (46)$$

где A — площадь (не амплитуда!), ε — эффективность и

$$\langle S \rangle = \frac{c}{4\pi} \langle \mathbf{E}^2 \rangle, \quad (47)$$

$$\langle \mathbf{E} \rangle^2 = 1/2 | \mathbf{E}_c |^2, \quad (48)$$

$$| \mathbf{E}_c |^2 = | A_+ \Psi_+ + A_- \Psi_- |^2 = | A_+ |^2 + | A_- |^2.$$

Мы редко будем пользоваться комплексными волновыми функциями и познакомились с ними, чтобы облегчить восприятие материала по квантовой физике, изложенного в томе IV.

8.3. Образование поляризованных поперечных волн

Рассмотрим несколько способов создания волны с желаемым состоянием поляризации. Если бы мы могли влиять на процесс излучения, то имели бы простейший способ получить нужную поляризацию. Однако чаще всего мы имеем дело с излучением, которое находится вне нашего контроля, например с излучением Солнца, лампы или антенны, и задача в том, чтобы иметь возможность каким-либо способом выделить желаемое состояние поляризации из сложной суперпозиции всевозможных поляризаций. Одним из способов устранения ненужных компонент поляризации является применение поляроида. Другой способ заключается в использовании отражения. В некоторых условиях компоненты с нежелательным состоянием поляризации не отражаются и отраженное излучение обогащено нужным состоянием поляризации.

Поляризация при излучении. Возбуждая волну в «пружинке», вы создаете нужное состояние поляризации, задавая направление встряхивания. Точно так же поляризация радиоволн или микроволн, испускаемых антенной, зависит от того, как движутся электроны в антенне. Если антенна представляет собой прямой отрезок провода, расположенный перпендикулярно оси \hat{z} , то колебание электронов вдоль провода приводит к колебанию электрических силовых линий в этом же направлении и электрическое поле в электромагнитной волне, распространяющееся вдоль \hat{z} , имеет линейную поляризацию, параллельную антенне. Излучение в других направлениях также линейно поляризовано: вектор электрического поля перпендикулярен направлению распространения излучения антенны и лежит в меридиональной плоскости, образованной этим направлением и антенной (см. п. 7.5). Если имеются две прямые антенны, одна из которых направлена вдоль \hat{x} и вторая — вдоль \hat{y} , и если они нахо-

дятся под действием равных токов, фазы которых одинаковы, то излучение, распространяющееся по $\pm \hat{z}$, будет линейно поляризовано в направлении, составляющем угол в 45° с осями \hat{x} и \hat{y} . Если токи в антеннах равны, но ток в x -антенне опережает ток в y -антенне на 90° , то электромагнитное излучение, испущенное в направлении $\pm \hat{z}$, будет поляризовано по кругу с моментом импульса, направленным по $+\hat{z}$. Излучение, испускаемое в направлении $+\hat{z}$, будет иметь правую спиральность, а в направлении $-\hat{z}$ — левую. Такое излучение будет неотлично (на достаточно больших расстояниях от антенны) от излучения эквивалентного точечного заряда, совершающего круговое движение:

$$\psi = A [\hat{x} \cos \omega t + \hat{y} \sin \omega t]. \quad (49)$$

Здесь амплитуда A кругового движения заряда q связана с поляризованным по кругу электрическим полем излучения равенством (6), п. 8.2. Поляризация излучения, испускаемого нашей системой из двух антенн в любом направлении, будет той же, что и поляризация излучения, возникающего при движении эквивалентного точечного заряда, определяемого выражением (49). В общем случае проекция кругового движения эквивалентного заряда будет движением по эллипсу. Поэтому для произвольного направления, не совпадающего с $+\hat{z}$, поляризация будет эллиптической. Излучение в направлении, перпендикулярном \hat{z} , имеет линейную поляризацию (это — случай вырождения эллипса). Все эти результаты прямо следуют из законов излучения точечного заряда (п. 7.5) при выполнении двух условий: 1) мы должны находиться достаточно далеко от антенны, чтобы можно было пренебречь полями «ближней зоны», и 2) длина антенны должна быть мала по сравнению с длиной волны. Последнее условие необходимо, чтобы движение всех электронов в антенне можно было заменить движением одного эквивалентного заряда. (Если длина антенны равна, например, нескольким длинам волн, то электроны в разных ее частях дают в излучение вклады с разными фазами. Модель такой антенны должна иметь несколько эквивалентных зарядов. Излучение, которое они создают, называется мультипольным излучением. Напомним, что излучение от одного гармонически колеблющегося заряда называется дипольным излучением.)

Поляризация при избирательном поглощении. Предположим, что мы хотим из волны с самым общим состоянием поляризации получить волну с заданным состоянием поляризации. Избавиться от ненужных компонент поляризации можно, заставив их совершать работу над некоторыми «движущимися элементами», в то время как нужная нам компонента такой работы совершать не будет. В качестве примера рассмотрим стоячие волны в «пружине». Направления осей выберем следующим образом: ось \hat{z} направим вдоль «пружины», \hat{y} — вертикально и \hat{x} — горизонтально. Далее,

имеется поршень опущенный в ведро с водой. (Поршень считаем невесомым.) Пусть на поршень при колебаниях «пружины» действует компонента колебаний, направленная по y . Если возбуждать в «пружине» стоячую волну, включающую в себя x - и y -компоненты равной величины, то колебания по y быстро прекратятся, поскольку их энергия будет переходить в работу, совершаемую над поршнем, т. е. в конечном счете в тепло.

Проволочная ограда. В случае микроволн селективное поглощение можно осуществить с помощью проволок, расположенных параллельно оси \hat{y} (рис. 8.4). Предположим, что электромагнитное излучение (микроволны) имеет x - и y -компоненты. Рассмотрим, какое действие оказывают на них проволочки. Начнем с y -компоненты. Электрическое поле в падающем излучении вызывает перемещение электронов вдоль проволок.

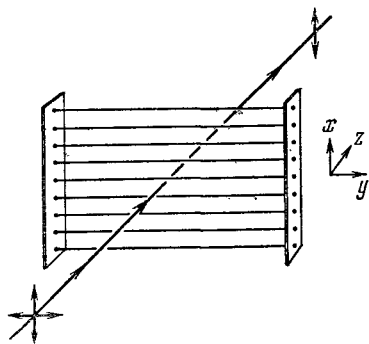


Рис. 8.4. Забор из проволок поглощает микроволны, у которых вектор \mathbf{E} направлен по \hat{y} .

Электронное поле в падающем излучении вызывает перемещение электронов вдоль проволок. Проволока (если она сделана из меди, или серебра, или любого хорошего металлического проводника) представляет для электронов активную нагрузку. Электроны в проводнике под действием электрического поля достигают установившейся скорости за время, меньшее периода микроволн (частота

микроволн может, например, равняться 1000 Мгц). Поле совершает работу над электронами. Они, во-первых, передают при столкновениях часть своей энергии кристаллической решетке проводника и, во-вторых, излучают энергию. Оказывается, что суперпозиция этого излучения в направлении $+\hat{z}$ с падающим излучением равна нулю, т. е. излучение электронов уничтожает падающее излучение. В направлении $-\hat{z}$ излучение, вызванное движением электронов вдоль \hat{y} , дает отраженную волну. (В тепло в проволоках превращается лишь небольшая часть энергии падающего излучения, для которого поле \mathbf{E} направлено вдоль \hat{y} . Большая часть излучения (энергии) отражается в направлении $-\hat{z}$.) Таким образом, ограда из проволок исключает y -компоненту в прошедшей волне.

Теперь посмотрим, что происходит вдоль направления \hat{x} . Электроны не могут свободно перемещаться вдоль этого направления, так как их движение ограничено размерами проволоки. Поэтому они не достигают определенной конечной скорости (как это было в случае движения вдоль \hat{y}), а образуют поверхностный заряд вдоль поверхностей проволок, обращенных к осям $+x$ и $-x$. Когда величина поля, образованного поверхностным зарядом, станет достаточной для компенсации внешнего поля (внутри проводника), электроны

перестанут двигаться. Такое состояние достигается за время, меньшее периода колебаний падающей волны. Таким образом, электроны всегда находятся в статическом равновесии и не имеют ни скорости, ни ускорения. Они не испускают и не поглощают энергию. Следовательно, от прохождения через проволочную ограду x -компонента излучения не меняется.

Можно возразить, что пространственный заряд будет возникать и на концах проводников в направлении $+y$ и $-y$. Однако при достаточной длине проволок результирующее поле в центральной части ограды, от концевых зарядов, можно сделать сколь угодно малым.

Для видимого света ($\lambda \sim 5 \cdot 10^{-5}$ см) не так-то просто сделать решетку из параллельных проводников, расстояние между которыми меньше λ . Но это все же возможно *).

Поляроид. В 1938 г. Ланд изобрел поляроид, который оказывает на излучение то же действие, что и рассматриваемая ограда из проводников. Чтобы изготовить поляроид, нужно вещество, молекулы которого состоят из длинных углеводородных цепей. Это вещество растягивают, так что в результате молекулы выстраиваются вдоль направления растяжения. После растяжения вещество опускают в раствор, содержащий йод. Молекулы йода «прикрепляются» к длинным углеводородным цепям, и возникают свободные электроны, которые могут двигаться вдоль цепей, но не перпендикулярно к ним. В результате получается решетка из «эффективных проводов», направленных вдоль углеводородных цепей. Компонента электрического поля, направленная вдоль «проводов», поглощается, компонента, перпендикулярная «проводам», передается с очень малым затуханием. Таким образом, поляроид поглощает компоненту электрического поля, направленную вдоль «проводов», а компоненту электрического поля, поперечную «проводам», пропускает с очень малым ослаблением.

Из сказанного следует, что в поляроиде существует ось, в направлении которой поглощение излучения практически отсутствует.

Эта ось называется осью *свободного пропускания*. Если электрическое поле E направлено вдоль этой оси, то электромагнитные волны проходят с очень малым поглощением. Если поле E перпендикулярно оси свободного пропускания, то свет практически полностью поглощается. Ось свободного пропускания перпендикулярна направлению, в котором растягиваются молекулы углеводорода, т. е. перпендикулярна «проводам».

Если смотреть на белую бумагу через поляроид, то бумага будет выглядеть серой. Это происходит потому, что половина света, отражающегося от бумаги, поглощается поляроидом. Если смотреть на бумагу через кусок чистого целлофана, который пропускает все

*) G. R. Bird, M. Parrish, Jr., J. Opt. Soc. Am. 50, 886 (1960). Авторы этой статьи испаряли золото (под скользящим углом) на дифракционную решетку из пластика, имевшую 50 000 параллельных царапин на дюйм. Золото, осажденное в царапинах, образовывало решетку из проводящих параллельных проводников.

падающее (от бумаги) излучение, то бумага будет казаться белой *). Определить, является ли поляроид круговым поляризатором, можно так: положите на стол кусочек металла с блестящей поверхностью (можно серебряную монету). На металл положите один из поляроидов и посмотрите на металл через поляроид. Теперь переверните поляроид и посмотрите на металл снова. Если он выглядит так же, то это не круговой поляроид. (Замечательное свойство асимметрии кругового поляроида будет рассмотрено позже.) Возьмите два поляроида, расположите их друг за другом и посмотрите через них на источник света. Вращайте один поляроид относительно другого. Говорят, что поляроиды скрещены, когда свет от источника практически не виден. В этом случае их оси свободного пропускания расположены перпендикулярно друг к другу. Когда эти оси параллельны, свет, прошедший через первый поляроид, проходит и через второй. Пусть свет, испускаемый источником, не поляризован. Это значит, что интенсивность линейно-поляризованных колебаний по \hat{x} и \hat{y} одинакова. В идеальном случае, если обе поверхности первого поляроида имеют неотражающее покрытие (т. е. если импедансы согласованы) и если все углеводородные цепочки строго параллельны и толщина поляроида такова, что в нем полностью поглощается нежелательная компонента, то через поляроид проходит 50% интенсивности падающего света. Однако в действительности на поляроидах нет неотражающего покрытия. Поэтому на каждой поверхности теряется около 4% падающей интенсивности. [Коэффициент преломления вещества, из которого сделан поляроид, примерно такой же, как и у стекла, т. е. близок к 1,5. Поэтому величина отраженной интенсивности от каждой поверхности составляет $[(n - 1)/(n + 1)]^2 \approx 0,04$ падающей интенсивности. При усреднении по видимой полосе длин волн можно пренебречь интерференцией внутри поляроида. С учетом сказанного полные потери составят 8%.] Если цепочки углеводородов выстроены (вытянуты) строго по линии, то других потерь интенсивности не будет. Поляроид, обозначаемый HN-46, пропускает 46% падающего неполяризованного света. Через поляроид HN-32 проходит около 32% начальной интенсивности падающей на поляроид волны или около 64% интенсивности, выделяемой поляроидом компоненты. (Поляроид пропускает меньше 10^{-4} интенсивности поглощаемой компоненты поляризации во всей видимой части спектра.) Если ось второго поляроида параллельна оси первого, то через второй поляроид пройдет 64% падающей на него интенсивности, поскольку свет после первого поляроида ли-

*) В приложенном к американскому изданию «оптическом наборе» есть пять серых кусков пластика. Четыре из них — поляроиды типа HN-32, пятый — поляризатор, создающий круговую поляризацию. Его устройство рассмотрено дальше. Для краткости будем называть его «круговой поляризатор». Имея поляроидные фотофильтры (их можно приобрести в фотомагазине, они представляют собой кусок поляроида, зажатый между стеклами и заключенный в оправу), читатель сможет выполнить все опыты, которые автор производит с «оптическим набором», и самостоятельно сделать «круговой поляризатор» (см. домашние опыты 8.10 и 8.11). (Прим. ред.)

нейно поляризован вдоль направления, совпадающего с осью свободного пропускания. Таким образом, интенсивность света, прошедшего через два параллельных линейных поляроида HN-32, равна

$$I_{\text{прош}} = I_{\text{пад}} \cdot 0,32 \cdot 0,64 = 0,21 I_{\text{пад}}, \quad (50)$$

где $I_{\text{пад}}$ — интенсивность падающего неполяризованного света.

Идеальный поляризатор. Закон Малюса. Идеальным поляризатором был бы поляроид HN-50 (такого поляроида не существует, но его удобно рассматривать в качестве примера). Мы пренебрегаем потерей интенсивности при отражении и считаем, что ненужная компонента полностью поглощается, а нужная компонента (с вектором \mathbf{E} , параллельным оси пропускания, т. е. перпендикулярным углеводородным цепочкам) полностью проходит.

Если линейно-поляризованный свет с амплитудой электрического поля \mathbf{E} , распространяющийся в направлении оси $\hat{\mathbf{z}}$, нормально падает на поляроид, и если $\hat{\mathbf{e}}$ — направление оси пропускания идеального поляроида, то через поляроид проходит только компонента $(\mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{e}}) \hat{\mathbf{e}}$. Прошедший поток энергии $I_{\text{прош}}$ меньше падающего потока $I_{\text{пад}}$ в $(\mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{e}})^2 / (E^2)$ раз:

$$I_{\text{прош}} = I_{\text{пад}} \cos^2 \theta \equiv I_{\text{пад}} (\hat{\mathbf{E}} \cdot \hat{\mathbf{e}})^2, \quad (51)$$

где $\hat{\mathbf{E}} \equiv \mathbf{E} / |\mathbf{E}|$ — единичный вектор вдоль направления \mathbf{E} . Уравнение (51) часто называют *законом Малюса* (см. рис. 8.5).

Мы знаем, что если два поляроида, оси пропускания которых $\hat{\mathbf{e}}_1$ и $\hat{\mathbf{e}}_2$ взаимно перпендикулярны, расположить друг за другом, то через такую систему свет не пройдет. Однако если между этими поляроидами вставить третий поляроид, направление оси которого не совпадает ни с $\hat{\mathbf{e}}_1$, ни с $\hat{\mathbf{e}}_2$, то поле, прошедшее через эту систему, не будет равно нулю. (См. задачу 8.3.) Вы убедитесь в этом, экспериментируя с поляроидами или с поляроидными фотофильтрами.

Поляризация при рассеянии. В солнечный день посмотрите на голубое небо через поляроид. Поднесите его близко к глазу, чтобы видеть через него большую часть неба. Вращая поляроид, вы увидите, как на небе возникают темные полосы. Это значит, что свет, приходящий от неба (солнечное излучение, рассеиваемое молекулами воздуха), поляризован. Измерьте (грубо) угол между линией, соединяющей вашу голову и область неба с наиболее ярко выраженной поляризацией, и линией соединяющей солнце с этой областью.

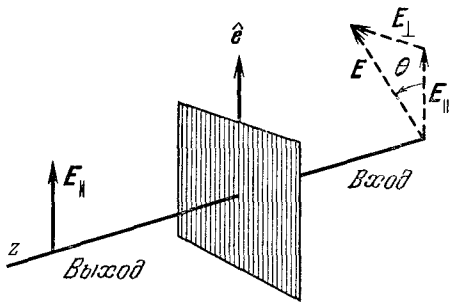


Рис. 8.5. Идеальный поляризатор.

Ось пропускания (для \mathbf{E}) направлена по $\hat{\mathbf{e}}$. E_{\parallel} -составляющая \mathbf{E} , параллельная $\hat{\mathbf{e}}$, проходит, вторая составляющая E_{\perp} полностью поглощается.

(Эта область при некоторых положениях поляроида будет наиболее темной.) Вы обнаружите, что указанный угол равен (примерно) 90° . Измерьте направление поляризации. (Ось пропускания поляроида можно найти, рассматривая через него источник с известной поляризацией, например, если смотреть на свет, отраженный от стекла, паркета или пластика, покрывающего пол. Мы покажем, что отраженный свет поляризован в направлении, параллельном плоской отражающей поверхности, т. е. перпендикулярном плоскости падения.)

Объяснение поляризации голубого неба заключается в следующем. Пусть \hat{z} — направление распространения света от солнца

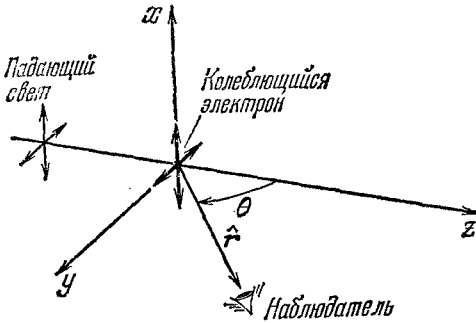


Рис. 8.6. Поляризация при рассеянии.

Ось \hat{y} лежит в плоскости осей \hat{z} и \hat{r} . Наблюдатель видит полную проекцию движения электрона на ось \hat{x} и лишь часть проекции движения на ось \hat{y} , пропорциональную $\cos \theta$. При $\theta = 90^\circ$ рассеянное излучение полностью (на 100%) поляризовано по оси \hat{x} .

ведут себя подобно осциллятору, находящемуся под действием падающего света. Поэтому их колебания представляют суперпозицию движений вдоль осей \hat{x} и \hat{y} . Колеблющиеся электроны излучают во всех направлениях, но их излучение неодинаково для разных направлений. Из п. 7.5 мы знаем, что амплитуда и направление поляризации электрического поля, излучаемого отдельным колеблющимся точечным зарядом, зависят от проекции амплитуды движения колеблющегося заряда. Под проекцией амплитуды мы подразумеваем амплитуду той компоненты движения электрона, которая перпендикулярна направлению распространения \hat{z} , т. е. направлению от электрона к наблюдателю. Если вектор \hat{r} направлен по \hat{y} , то наблюдатель видит только x -компоненту движения электрона. Поэтому наблюдаемое им излучение будет полностью линейно поляризованным по \hat{x} . В этом случае интенсивность излучения равна половине интенсивности излучения в направлении \hat{z} , когда наблюдателю «видны» обе компоненты движения электрона. (В нашем примере трудно смотреть в направлении — \hat{z} , так как мы должны смотреть прямо на солнце. Однако, наблюдая различные участки неба,

можно заметить, что свет от неба вблизи солнца не поляризован. Также не поляризован свет, попавший в ваш глаз после рассеяния на угол, близкий к 180° . Описанный процесс поляризации показан на рис. 8.6.

Интересно, что пчелы реагируют на поляризацию излучения. Информацию о поляризации неба они используют для ориентации *). Некоторые люди тоже могут чувствовать поляризацию, не прибегая к поляроидам; они видят пятна Гайдингера **).

Деполаризация при многократном рассеянии. Механизм поляризации луча прожектора, который при рассмотрении со стороны имеет синий оттенок, аналогичен механизму поляризации голубого неба. В тумане луч прожектора выглядит белым и теряет синий оттенок; в этом случае свет не поляризован. Точно так же солнечный свет не поляризуется при отражении от белых облаков, от сахара или от листа белой бумаги. Хотя единичное рассеяние под подходящим углом может дать строго линейно-поляризованный свет, это не означает, что большое число рассеяний улучшит дело. Свет, отраженный от стекла под соответствующим углом, будет полностью линейно поляризован. (Этот случай рассматривается в следующем пункте.) Если теперь из стекла сделать стеклянную пудру, то свет, падающий на слой такой пудры, прежде чем выйти из слоя, будет претерпевать многократное отражение. В результате вы будете наблюдать излучение от электронов, колеблющихся во всех направлениях. Действительно, помимо излучения от источника света, электроны возбуждаются излучением, приходящим из многих других направлений. (Это излучение вызвано отражением в соседних слоях стеклянной пудры.) Наглядный пример деполаризации при многократном рассеянии можно получить, поместив полупрозрачную восковую бумагу (кальку) между двумя скрещенными поляроидами. Восковая бумага почти полностью деполаризует свет, поляризованный первым поляроидом. Многократное рассеяние света восковой бумагой можно продемонстрировать следующим образом. Положите бумагу на страницу книги. При этом вы легко увидите черные буквы. Если бумагу приподнять над страницей на один-два сантиметра, то буквы расплывутся и станут практически неразличимы. Для понимания этого примера можно считать, что от буквы на ваш глаз падает «черный свет», который рассеивается восковой бумагой. Приведем еще один опыт, иллюстрирующий рассеяние света восковой бумагой. Возьмите фонарик и направьте его луч через восковую бумагу на какую-либо поверхность. Постепенно удаляя фонарик от бумаги, наблюдайте за размерами светового пятна, образованного светом, прошедшим через бумагу.

В прозрачном слое стекла или пластика падающий свет не претерпевает многократного рассеяния (вы можете читать через чистое

*) Karl von Frisch, Bees, Their Vision, Chemical Sense, and Language (Пчелы, их зрение, чувства и язык), Cornell University Press., Ithaca, N. Y., 1950.

**) М. Миннарт, Свет и цвет в природе, Физматгиз, 1958, стр. 312. Это великолепная книга с множеством простых опытов на свежем воздухе.

стекло независимо от расстояния от стекла до страницы) и не деполаризуется.

Поляризация при зеркальном отражении. Угол Брюстера. Посмотрите на отражение какого-либо предмета в обычном стекле или в гладкой поверхности воды. Воспользуйтесь поляридом для определения поляризации отраженного света. Вы обнаружите, что при углах падения, близких к 56° для стекла и к 53° для воды, отраженный свет полностью линейно поляризован в направлении, параллельном поверхности. Такой угол падения называется углом Брюстера. Вращая поляриод, вы можете полностью погасить отраженный свет при условии, что угол падения света на отражающую поверхность равен углу Брюстера.

Мы знаем, что угол падения и преломления связаны законом Снеллиуса (справедливым для любых углов падения):

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2. \quad (52)$$

Падающий и отраженный лучи образуют равные углы с нормалью к поверхности (закон зеркального отражения). При угле падения θ_1 , для которого $\theta_1 + \theta_2 = 90^\circ$, отраженный луч образует с преломленным (т. е. прошедшим в среду 2) лучом угол в 90° (рис. 8. 7).

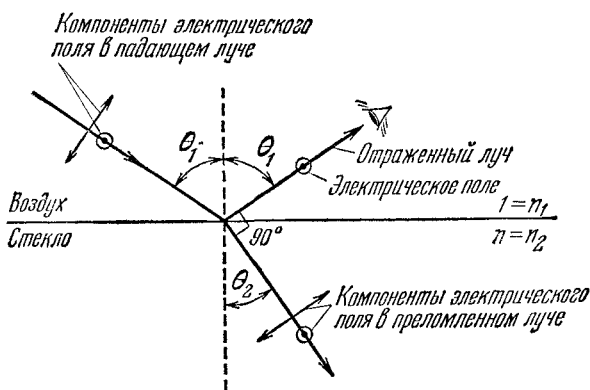


Рис. 8.7. Угол Брюстера.

Показанные углы соответствуют отражению от стекла ($n=1,5$). Отраженный свет полностью (на 100%) поляризован перпендикулярно плоскости падения. Это направление показано кружками.

Электроны в стекле находятся под действием преломленной волны. Они колеблются в направлениях, перпендикулярных преломленному лучу. При любом угле падения наблюдатель отраженного света (рис. 8.7), т. е. света, испускаемого электронами стекла, совершающими вынужденные колебания, будет полностью «видеть» лишь ту компоненту движения электронов, которая перпендикулярна плоскости падения (т. е. плоскости рис. 8.7). Действительно, именно эта компонента перпендикулярна отраженному лучу, и наблюдатель «видит» не ее проекцию, а всю компоненту. Но компонента движения электронов, лежащая в плоскости падения, не перпендикулярна от-

раженному лучу, а, как мы знаем, вклад в отраженное излучение дают лишь компоненты движения, перпендикулярные отраженному лучу. При угле падения Брюстера (см. рис. 8.7) компонента движения электронов, параллельная плоскости чертежа, направлена прямо на наблюдателя, и поэтому ее вклад в излучение в этом направлении равен нулю. Таким образом, отраженный свет полностью поляризован в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа. Из рис. 8.7 мы видим, что это происходит при $\theta_1 + \theta_2 = 90^\circ$. Для этого случая из уравнения (52) имеем [пусть $n_1 = 1$, $n_2 = n$, $\sin \theta_2 = \sin(90^\circ - \theta_1) = \cos \theta_1$]

$$\operatorname{tg} \theta_1 = n, \quad \theta_1 = \text{угол Брюстера.} \quad (53)$$

Фазовые соотношения для зеркально отраженного света. Интересно найти фазовые соотношения между падающим, отраженным и преломленным светом. Они показаны на рис. 8.8. Прощедшая (преломленная) волна всегда имеет ту же фазу, что и падающая. Это можно понять по аналогии с проходящей и проходящей волной в струне. Приходящая волна создает вынуждающую силу и образует проходящую волну. При этом коэффициент пропускания положителен, так как вынуждающая сила, созданная проходящей волной, подобна вынуждающей силе, явившейся источником проходящей волны. (Количественное рассмотрение отражения и прохождения при нормальном падении см. в п. 5.3.) Преломленная волна создана главным образом первичным источником света и лишь частично излучением электронов стекла, происходящим под действием вынуждающей силы. Отраженная волна образована излучением электронов, находящихся под действием преломленной волны. Известно также (п. 5.3), что при нормальном падении коэффициент

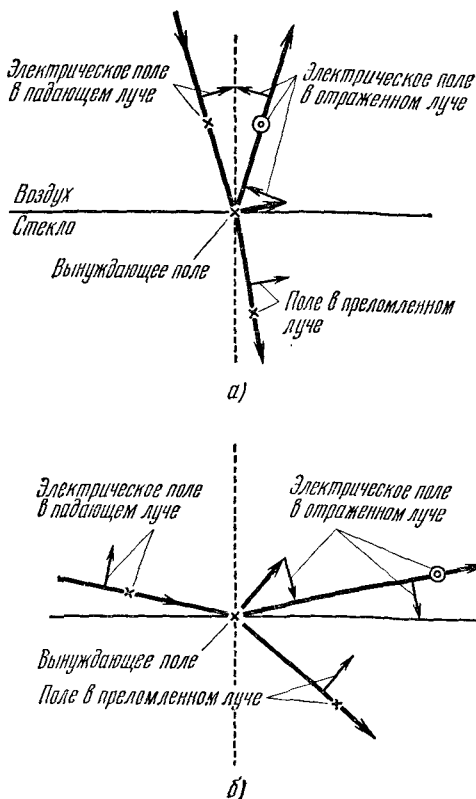


Рис. 8.8. Фазовые соотношения для света, отраженного от стекла. а) Угол θ_1 меньше угла Брюстера; б) θ_1 больше угла Брюстера. Кружками показана поляризация, перпендикулярная плоскости чертежа. Крест и точка означают, что вектор E направлен от нас или на нас соответственно. Стрелками показано направление E в плоскости рисунка.

отражения для электрического поля (при падении света из воздуха в стекло) отрицателен. Мы знаем также, что электрическое поле в отраженной волне будет суперпозицией вкладов, пропорциональных проекции амплитуды колебания электронов на направление, перпендикулярное лучу, проведенному к наблюдателю отраженного света. Таким образом, мы получим все фазовые соотношения при нормальном падении, если скажем, что при падении света из воздуха в стекло наблюдатель отраженного света «видит» амплитуду, обратную по знаку проекции амплитуды в прошедшей волне (последняя берется на то же направление, т. е. на перпендикуляр к лучу, проведенному к наблюдателю). Это утверждение справедливо не только для нормального падения, но и для всех углов падения. Из него можно получить значение угла Брюстера и фазовые соотношения для всех других углов падения.

Интенсивность света при зеркальном отражении. Мы не станем заниматься выводом формул для интенсивности отраженного света*). Используя поляриды и предметное стекло микроскопа, вы легко проверите, что интенсивность компоненты, линейно-поляризованной в направлении, перпендикулярном плоскости падения, увеличивается при изменении угла падения от 0° (нормальное падение) до 90° (скользящее падение). При нормальном падении от одной поверхности отражается около 4% интенсивности падающего света и около 8% от покровного стекла микроскопа, имеющего две поверхности. При скользящем падении отражается практически 100% падающего света. Интенсивность компоненты, поляризованной в плоскости падения, при отражении от обеих поверхностей предметного стекла составляет около 8% при нормальном падении, уменьшается до нуля при угле Брюстера (56°) и затем постепенно возрастает до 100% при скользящем падении (см. домашний опыт 8.26).

Окно Брюстера в лазере. Существование угла Брюстера можно использовать для получения стеклянного окна, пропускающего 100% света. Такое устройство называется *окном Брюстера*. Предположим, что у вас есть прибор, в котором луч света должен проходить через стеклянное окно. При нормальном падении через окно проходит 92% падающей интенсивности (около 4% теряется на каждой поверхности). Во многих случаях с такой потерей интенсивности можно примириться, но в газовом лазере, где отражающие зеркала расположены за окнами, свет будет около 100 раз проходить через окна, и 0,92 в сотой степени составит всего лишь 0,0003. Таким образом, в газовом лазере потеря в 8% на одно прохождение недопустима.

Остроумное решение проблемы можно получить, расположив окно так, чтобы свет падал под углом Брюстера. При этом компонента, поляризация которой перпендикулярна плоскости падения, ча-

*) Прекрасный вывод этих формул, называемых формулами Френеля, дан Р. Фейнманом. См. «Фейнмановские лекции по физике», выпуск 7, Москва, «Мир», 1966.

стично отражается и частично проходит. После большого числа проходов через окно она почти полностью удаляется из пучка благодаря отражениям. С другой стороны, компонента с поляризацией, параллельной плоскости падения, полностью проходит, так как при угле Брюстера коэффициент отражения для этой компоненты равен нулю. Поэтому даже после многих проходов окна потери этой компоненты пренебрежимо малы. В конечном итоге половина света пропадает, а вторая половина выходит из лазера полностью линейно-поляризованной. Недорогие газовые лазеры, обычные для учебных физических лабораторий, имеют окна Брюстера. Если у вас есть такой лазер, проверьте с помощью поляроида поляризацию испускаемого света. Действие окна Брюстера показано на рис. 8.9.

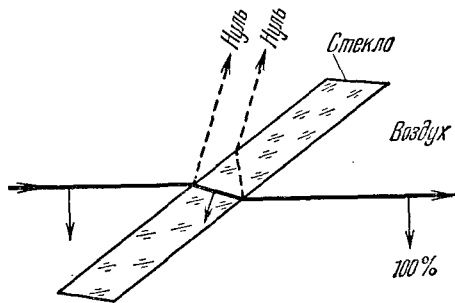


Рис. 8.9. Окно Брюстера.
Рисунок для случая $n=1,5$.

Поляризация радуги. Поляризация радуги — пример еще более эффектный, чем поляризация голубого неба. Постарайтесь предсказать, является ли поляризация радиальной или тангенциальной (относительно дуги радуги). Если вы не можете дождаться радуги, чтобы проверить свои предсказания, то получите искусственную радугу, воспользовавшись садовым шлангом или пульверизатором *).

8.4. Двойное лучепреломление

В п. 8.3 мы научились изменять поляризацию пучка электромагнитных волн с помощью избирательного поглощения или отражения. (Избирательность в данном случае означает, что одна компонента поляризации поглощается или отражается сильнее другой.) Здесь мы покажем, как можно изменить поляризацию излучения, меняя относительную фазу двух компонент.

Целлофан. Возьмите два поляроида и ориентируйте их относительно друг друга так, чтобы свет не проходил. Поместите между поляроидами кусок обычного чистого целлофана, который употребляется, например, для обертки пищевых продуктов. Вы увидите, что теперь свет через скрещенные поляроида проходит. Целлофан совершенно прозрачен и практически не поглощает свет. Чтобы объяснить изменение поляризации света с помощью целлофана,

*) Причина возникновения радуги и ее описание приведены в книге М. Мингарта «Свет и цвет в природе», Физматгиз, 1958.