

Все приборы, дающие поляризованный свет, носят название *поляризаторов*. В случае плоского зеркала мы видели, что те же приборы могут служить и для обнаружения поляризации света. В этом последнем случае их называют *анализаторами*.

### § 36. Двойное лучепреломление

Для получения поляризованного света пользуются также явлением двойного лучепреломления.

«Из Исландии, острова, находящегося в Северном море, на широте  $66^\circ$ , — писал Гюйгенс в 1678 г., — был привезен камень (исландский шпат), весьма замечательный по своей форме и другим качествам, но более всего по своим странностям преломляющим свойствам».

Если кусок исландского шпата положить на какую-либо надпись, то сквозь него мы увидим надпись sdвоенной (рис. 133).



Рис. 133. Двойное лучепреломление.

Раздваивание изображения происходит вследствие того, что каждому падающему на поверхность кристалла лучу соответствуют два преломленных луча. На рис. 134 изображен случай, когда падающий луч перпендикулярен к поверхности кристалла; тогда луч *o*, называемый *обыкновенным*, проходит сквозь кристалл непреломленным, а луч *e*, называемый *необыкновенным*, идет по ломаной, изображенной на рис. 134. Названия лучей понятны: обыкновенный луч ведет себя так, как мы этого могли ожидать на основании известных законов преломления. Необыкновенный же луч как бы нарушает эти зако-

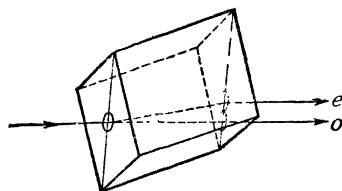


Рис. 134. Ход лучей при двойном лучепреломлении.

ны: он падает по нормали к поверхности, но испытывает преломление. Оба луча выходят из кристалла плоскополяризованными, причем они поляризованы во взаимно-перпендикулярных плоскостях. В этом легко убедиться весьма простым опытом. Возьмем какой-либо анализатор (например, стопу) и посмотрим сквозь него на раздвоенную картину, даваемую кристаллом. При определенном положении стопы мы увидим только одно из изображений, второе будет погашено. При повороте стопы вокруг луча зрения на  $90^\circ$

это второе изображение появится, но зато исчезнет первое. Таким образом, мы действительно убеждаемся в том, что оба изображения поляризованы и именно так, как это было только что указано.

Любопытно, что в 1808 г. Малюс совершенно случайно произвел сходный опыт и открыл поляризацию света при отражении от стекла. Посмотрев сквозь кусок исландского шпата на отражение заходящего солнца в окнах Люксембургского дворца в Париже, он с удивлением обнаружил, что два изображения, возникших в результате двойного преломления, имели различную яркость. Вращая кристалл, Малюс увидел, что изображения поочередно то делались ярче, то затухали. Малюс сначала решил, что здесь сказываются колебания солнечного света в атмосфере, но с наступлением ночи повторил опыт со светом свечи, отраженным от поверхности воды, а затем стекла. В обоих случаях, однако, эффект подтвердился. Малюсу принадлежит сам термин «поляризация» света.

Перейдем теперь к более детальному разбору явления двойного лучепреломления. Если мы будем изменять угол падения луча на поверхность кристалла, то при этом обнаружится новое замечательное свойство необыкновенного луча. Оказывается, что его показатель преломления не постоянен, а зависит от угла падения. Поскольку от угла падения зависит и направление преломленного луча в кристалле, можно сформулировать указанное свойство еще так: *показатель преломления необыкновенного луча зависит от его направления в кристалле*. Переходя, наконец, от показателя преломления к скорости распространения, можно сказать, что *скорость необыкновенного луча в кристалле зависит от направления его распространения*.

В этой окончательной формулировке оптические свойства кристалла совпадают с его остальными свойствами: диэлектрическая постоянная, теплопроводность и упругость кристалла также неодинаковы по разным направлениям. Соответствие между анизотропией оптических и электрических свойств кристалла становится вполне понятным, если вспомнить, что скорость света обратно пропорциональна корню квадратному из диэлектрической постоянной среды (§ 2). Поэтому, строго говоря, скорость распространения световой волны зависит не от направления распространения, а от направления электрического поля световой волны. Если даже по одному направлению в кристалле распространяются две поляризованные во взаимно-перпендикулярных плоскостях световые волны, то их скорости будут различны (за исключением некоторых специальных случаев). Примером двух таких волн являются необыкновенный и обыкновенный лучи.

Если от точки, лежащей на поверхности исландского шпата, провести внутри кристалла радиусы-векторы, величина которых пропорциональна скорости света по соответствующим направлениям, то концы их будут лежать на поверхности эллипсоида вращения. Это

эквивалентно тому, что волновая поверхность световых колебаний, распространяющихся от точки, имеет эллипсоидальную форму в отличие от сферической при распространении в аморфном теле. Все время речь, конечно, идет о необыкновенном луче. Обыкновенные же лучи, очевидно, образуют сферическую волновую поверхность. Таким образом, в кристалле мы имеем два типа волновых поверхностей: эллипсоиды и сферы. Эти эллипсоиды и сферы соприкасаются в точках, лежащих на прямых, называемых оптическими осями кристалла.

Ясно, что свет распространяется по направлению оптической оси со скоростью, совершенно не зависящей от состояния поляризации. В исландском шпате имеется только одно направление оптической оси — одноосный кристалл.

Пользуясь простым графическим методом, основанным на принципе Гюйгенса, построим преломленную волну как обыкновенного,

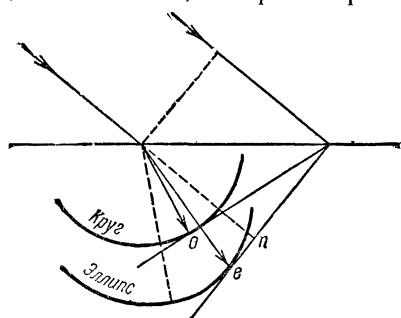


Рис. 135. Построение Гюйгенса в кристалле.

как волновой поверхности. На рис. 135  $o$  обозначает обыкновенный луч,  $e$  — необыкновенный и  $n$  — нормаль.

Однако есть и в кристалле исландского шпата такое направление, по которому и обыкновенный, и необыкновенный лучи идут с одинаковой скоростью, не разделяясь. Это направление носит название *оптической оси кристалла*. Очевидно, что на оптической оси лежат точки соприкосновения эллипсоида со сферой. В плоскости, перпендикулярной к оптической оси, лежат направления, по которым разность скоростей между обыкновенным и необыкновенным лучами максимальна. Обыкновенный и необыкновенный лучи идут при этом по одному направлению, но необыкновенный луч обгоняет обыкновенный.

Всякая плоскость, проходящая через оптическую ось, называется *главным сечением* или *главной плоскостью* кристалла.

Кроме исландского шпата к числу одноосных кристаллов принадлежат, например, кварц и турмалин. Есть кристаллы, в которых явления преломления подчиняются еще более слож-

так и необыкновенного лучей (§ 25). Одна волна является касательной к ряду элементарных сфер, другая будет касательной к ряду эллипсоидов (рис. 135). Мы видим, что образуется угол между этими двумя плоскими волнами, что соответствует образованию угла между преломленными лучами, т. е. двойному лучепреломлению.

В отличие от изотропной среды в кристалле луч (необыкновенный) уже не является нормалью

ным законам. В частности, для них существуют два направления, по которым оба луча идут с одинаковой скоростью, поэтому такие кристаллы называются *двуосными* (например, г и п с). В двуосных кристаллах оба луча необыкновенные, т. е. скорости распространения обоих лучей зависят от направления.

Турмалин обладает замечательной способностью поглощать один из лучей, получающихся при двойном лучепреломлении, благодаря чему кристалл турмалина служит как поляризатор, дающий сразу один поляризованный луч.

Еще в 1850 г. Герапат обнаружил, что искусственно изготовленные кристаллики сульфата иодистого хинина обладают такими же свойствами, как турмалин. Однако отдельные кристаллики были

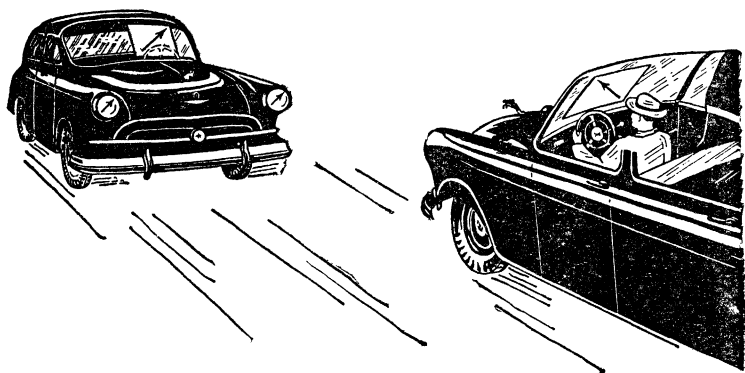


Рис. 136. Применение поляроидов.

слишком малы и быстро портились на воздухе. Лишь в самые последние годы научились изготовлять в промышленных масштабах целлулоидную пленку, в которую введено большое количество совершенно одинаково ориентированных кристалликов сульфата иодистого хинина. Эта пленка называется *поляроидом*.

Поляриод полностью поляризует свет, не только проходящий по нормали к его поверхности, но сохраняет свои свойства для лучей, образующих с нормалью углы до  $30^\circ$ . Таким образом, поляриод может поляризовать довольно широкий конус световых лучей.

Поляриод нашел себе широкое применение в самых разнообразных областях. Укажем на наиболее любопытное применение поляриода в автомобильном деле.

Пластинки из поляриода укрепляются на переднем стекле автомобиля (рис. 136) и на автомобильных фарах. Пластика поляриода на переднем стекле является анализатором, пластинки на фарах — поляризаторами. Плоскости поляризации пластинок составляют угол  $45^\circ$  с горизонтом и параллельны друг другу. Шофер, смотрящий на дорогу сквозь поляриод, видит отраженный свет *своих фар*,

т. е. видит освещенную ими дорогу, так как соответствующие плоскости поляризации параллельны, но не видит света от фар встречного автомобиля, снабженного также пластинками из поляроида. В последнем случае, как нетрудно убедиться из рис. 136, плоскости поляризации будут взаимно-перпендикулярны. Тем самым шофер защищен от слепящего действия фар встречного автомобиля.

Из поляроида изготавливаются очки, сквозь которые делаются незаметными блики света, отраженного от блестящих поверхностей. Объясняется это тем, что обычно блики частично или полностью поляризованы. Поляроидные очки весьма целесообразно применять в музеях и картинных галереях (поверхность картин, нарисованных масляными красками, часто дает блики, мешающие рассмотреть картины и искажающие оттенки красок).

Одним из наиболее распространенных поляризаторов является так называемая *призма Николя*, или просто *николь*. Призма Николя представляет собой кристалл исландского шпата, распиленный по диагонали и склеенный канадским бальзамом (рис. 137). В призме Николя один из лучей, возникающих в результате двойного лучепреломления, устраняется весьма остроумным способом. Обыкновенный луч, преломляющийся сильнее, падает на границу с канадским бальзамом под углом падения, большим, чем необыкновенный луч.

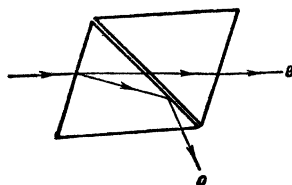


Рис. 137. Разрез призмы Николя.

Поскольку показатель преломления канадского бальзама меньше, чем исландского шпата, происходит полное внутреннее отражение и луч попадает на боковую грань. Боковая грань покрыта черной краской и поглощает падающий на нее луч. Из призмы выходит, таким образом, только один плоскополяризованный луч (необыкновенный). Плоскость поляризации этого луча носит название *главной плоскости николя*.

Два николя, расположенных друг за другом, с взаимно-перпендикулярными главными плоскостями, очевидно, совершенно не пропустят света. Если же главные плоскости будут параллельны, то сквозь николи пройдет максимальное количество света. Возникает вопрос, какое количество света пропустит такая комбинация николей при каком-либо промежуточном положении, когда угол  $\alpha$  между главными плоскостями больше нуля, но меньше  $90^\circ$ .

Поскольку каждый поляризатор, как мы уже говорили, можно сравнить со щелью, пропускающей лишь колебания, лежащие в ее плоскости, ход вычисления интенсивности света, прошедшего через два николя, ясен. Для этой цели изобразим главные плоскости николей в виде прямых  $I$  и  $II$  (рис. 138). Тогда выходящие из первого николя колебания совпадают с  $I$ , и если мы их разложим на две компоненты (одну, совпадающую с  $II$ , и вторую, к ней перпендикуляр-

ную), то первая компонента пройдет полностью, а вторая, очевидно, будет задержана никодем. Величина амплитуды, слагающей колебания по направлению  $II$ , как видно из чертежа, равна  $A \cos \alpha$ , где  $A$  — амплитуда колебаний, вышедших из первого николя. Эта компонента, как мы только что сказали, пройдет полностью; следовательно, это и будет амплитуда прошедшего через два николя колебания.

Энергия световой волны, как и всякого колебания, пропорциональна квадрату амплитуды; следовательно, окончательно для световой энергии, прошедшей сквозь два николя, мы имеем следующую формулу — закон Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha, \quad (1)$$

причем  $I$  меняется от  $I_0$  до 0 при изменении  $\alpha$  от 0 до  $\frac{\pi}{2}$ . Таким образом, вращая один из николей, мы можем ослаблять проходящий свет в любое число раз и получать свет любой интенсивности.

Закон Малюса, очевидно, применим для любого поляризатора и анализатора. В частности, тому же закону подчиняется интенсивность света, отраженного последовательно от двух стеклянных зеркал.

Если призма Николя служит для получения одного поляризованного луча, то *призма Волластона* дает два луча, поляризованных во взаимно-перпендикулярных плоскостях и расположенных симметрично по отношению к падающему лучу. Устройство призмы Волластона чрезвычайно остроумно и особенно отчетливо показывает, как скорость распространения лучей в кристалле зависит от направления их плоскости поляризации.

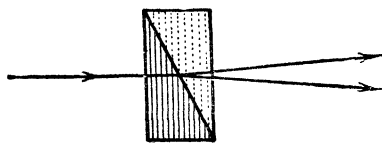


Рис. 139. Призма Волластона.

Призма Волластона состоит из двух кусков исландского шпата, вырезанных параллельно оптической оси и склеенных так, что оптическая ось одного куска перпендикулярна к оптической оси другого куска. На рис. 139 оптическая ось правого куска параллельна плоскости чертежа, а оптическая ось левого куска перпендикулярна к ней.

Пучок света, падающий нормально на верхнюю границу, разделится на два луча: обыкновенный с плоскостью поляризации, параллельной оптической оси, и необыкновенный, поляризованный в перпендикулярном направлении. Оба луча идут по одному направлению, но с разными скоростями, определяемыми показателями преломления  $n_o$  и  $n_e$ . Дойдя до границы раздела со вторым куском, оба

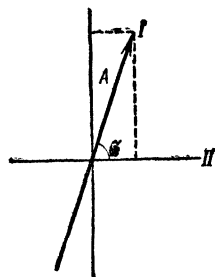


Рис. 138. К расчету энергии, прошедшей сквозь два николя.

луча меняются ролями. Плоскость поляризации обыкновенного (в первом куске) луча уже становится перпендикулярной к оптической оси (второго куска), следовательно, этот луч во втором куске будет распространяться как необыкновенный. Наоборот, необыкновенный в первом куске луч будет во втором куске уже обыкновенным, так как его плоскость поляризации параллельна оптической оси этого куска. Таким образом, один луч (обыкновенный в первом куске) переходит из среды с показателем преломления  $n_o$  в среду с показателем преломления  $n_e$  другой (необыкновенный в первом куске) — из среды  $n_e$  в среду с  $n_o$ . У исландского шпата  $n_o$  больше  $n_e$ . Следовательно, первый луч переходит из более плотной среды в менее плотную, второй — наоборот. В результате один луч преломится на границе влево, а другой настолько же вправо, и из призмы симметрично войдут два поляризованных луча.

### § 37. Интерференция поляризованного света

Как было сказано выше, в естественном луче все время происходят хаотические изменения направления плоскости электрического поля. Поэтому если представить естественный луч как сумму двух взаимно-перпендикулярных колебаний, то необходимо считать разность фаз этих колебаний также хаотически меняющейся со временем.

В § 16 было пояснено, что необходимым условием интерференции является когерентность складываемых колебаний. Из этого обстоятельства и из определения естественного луча следует один из основных законов интерференции поляризованных лучей, установленных Араго: если мы из одного и того же естественного луча получим два луча, взаимно-перпендикулярно поляризованных, то эти два луча оказываются некогерентными и в дальнейшем уже не могут интерферировать между собой.

В недавнее время С. И. Вавилов теоретически и экспериментально показал, что могут существовать два естественных казалось бы, когерентных луча, не интерферирующих между собой. Для этой цели в интерферометре на пути одного из лучей он помещал «активное» вещество, поворачивающее плоскость поляризации на  $90^\circ$  (о вращении плоскости поляризации сказано в § 39). Тогда вертикальная компонента колебаний естественного луча становится горизонтальной, а горизонтальная — вертикальной, и повернутые компоненты складываются с не когерентными с ними компонентами второго луча. Вследствие этого после введения вещества интерференция исчезла.

Перейдем к разбору явлений интерференции поляризованного света, наблюдаемых в кристаллах. Обычная схема для наблюдения интерференции в параллельных лучах состоит (рис. 140) из поляризатора  $P$ , кристалла  $K$  и анализатора  $A$ . Разберем для простоты случай, когда ось кристалла перпендикулярна к лучу. Тогда плоскопо-