

4310

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Методические указания
к самостоятельной работе

Рязань 2010

УДК 539

Поляризация света: методические указания к самостоятельной работе / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост. А.П. Соколов – Рязань, 2010 – 16 с.

Излагаются элементы теории, связанные с явлением поляризации света. Приведены вопросы для самоконтроля и список литературы.

Предназначены для студентов всех специальностей дневной и заочной форм обучения, изучающих курс физики.

Ил. 13. Библиогр.: 3 назв.

Поляризация, поляризатор, анализатор, поляроидная пленка, анизотропия, двойное лучепреломление

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра общей и экспериментальной физики РГРТУ
(зав. кафедрой проф. Б.И. Колотилин)

Поляризация света

Составитель С о к о л о в Александр Павлович

Редактор Н.А. Орлова

Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 15.03.10. Формат бумаги 60 × 84 1/16.

Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 200 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Система уравнений Максвелла полностью описывает свойства, возникновение и распространение электромагнитных волн. В частности, из этих уравнений вытекает, что электромагнитные волны поперечные, то есть векторы напряженностей электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей волны взаимно перпендикулярны и колеблются перпендикулярно к вектору скорости \vec{v} распространения волны (перпендикулярно к лучу). С поперечностью электромагнитных волн связана их важнейшая характеристика – **поляризация**. Для описания закономерностей поляризации света достаточно знать поведение лишь одного из векторов. Обычно все рассуждения ведутся относительно светового вектора – вектора напряженности \vec{E} электрического поля (это название обусловлено тем, что при действии света на вещество основное значение имеет электрическая составляющая поля волны, действующая на электроны в атомах вещества). Заметим, что поляризация присуща *только поперечным волнам*, но не продольным. В продольных волнах колебания совершаются только вдоль направления их распространения, и никакой поляризации быть не может.

Различают свет *неполяризованный*, *поляризованный* и *частично поляризованный*. Примером неполяризованного света является *естественный свет*, в котором колебания вектора \vec{E} в различных направлениях быстро и беспорядочно сменяют друг друга (рис. 1). Его испускают большинство тепловых источников (лампы накаливания, Солнце и др.). Свет, в котором направления колебаний вектора \vec{E} упорядочены каким-либо образом, получил название *поляризованного*. Если колебания вектора \vec{E} происходят только в одной проходящей через луч плоскости, то имеем дело с *плоско-* (или *линейно-*) *поляризованным светом*. Плоскость, проходящая через направление колебаний вектора \vec{E} плоскополяризованной волны и направление распространения этой волны, называется *плоскостью поляризации*.

Упорядоченность колебаний может заключаться в том, что вектор \vec{E} поворачивается вокруг луча, одновременно пульсируя по величине. В результате этого конец вектора \vec{E} описывает эллипс. Такой свет называется *эллиптически поляризованным*. Плоскополяризованный свет является предельным случаем эллиптически поляризованного, когда при разности фаз, равной нулю или π , эллипс поляризации вырождается в прямую. При разности фаз, равной $\pm \frac{\pi}{2}$, и равенстве амплитуд складываемых волн эллипс поляризации вырождается в окружность, и тогда имеем дело с *циркулярно поляризованным (поляризованным по кругу) светом*.

Получение поляризованного света из естественного возможно при разнообразных физических эффектах – прохождении света через анизотропные среды, отражении от диэлектриков и др. Устройства для получения поляризованного света называют *поляризаторами*. Те же устрой-

ства, применяемые для исследования поляризации света, называются *анализаторами*. Поляризаторы (анализаторы) пропускают колебания, параллельные плоскости, называемой *плоскостью поляризатора* (анали-

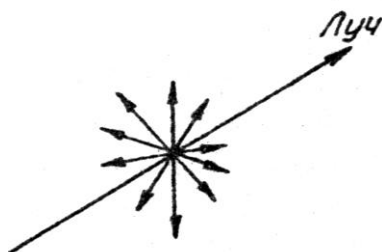


Рис. 1

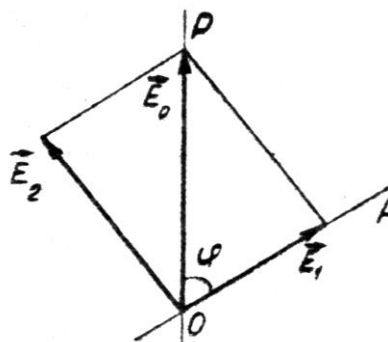


Рис. 2

затора), и задерживают колебания, перпендикулярные к этой плоскости.

Рассмотрим два поляризатора, поставленные друг за другом так, что их оси ОР и ОА образуют некоторый угол φ (рис. 2). Первый поляризатор пропустит свет, электрический вектор \vec{E}_0 которого параллелен его оси ОР. Положим интенсивность этого света равной I_0 . Второй поляризатор (анализатор) пропустит лишь часть этого света, а именно ту его составляющую, электрический вектор которой \vec{E}_1 параллелен оси ОА. Для нахождения этой составляющей разложим \vec{E}_0 на вектор \vec{E}_1 , параллельный оси ОА второго поляризатора (т.е. анализатора), и вектор \vec{E}_2 , перпендикулярный к ней. Составляющая \vec{E}_2 будет задержана анализатором. Через оба поляризатора пройдет свет с электрическим вектором $\vec{E} = \vec{E}_1$, длина которого $E = E_0 \cos \varphi$. Так как интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды, то интенсивность света, прошедшего через анализатор, равна

$$I = I_0 \cos^2 \varphi. \quad (1)$$

Это соотношение носит название **закона Малюса**.

Интенсивность света, прошедшего через анализатор (I), равна интенсивности света, прошедшего через поляризатор (I_0), умноженной на квадрат косинуса угла (φ) между анализатором и поляризатором.

Из формулы (1) следует, что закон Малюса можно использовать только для поляризованного излучения. При толстых пластинках в I_0 надо вносить поправку на частичное поглощение (и отражение) проходящего луча.

Этот закон был сформулирован Малюсом в 1810 году и подтвержден тщательными фотометрическими измерениями Араго, который построил на этом принципе фотометр. Интересно отметить, что Малюс вывел свой закон, основываясь на корпускулярных представлениях о свете,

а сам закон широко используется для расчета интенсивности света, прошедшего через поляризатор и анализатор в различных поляризационных приборах.

Естественные источники света содержат огромное число атомов и молекул, возбужденных в различной степени. Одинаково возбужденные атомы излучают свет одной и той же частоты, но с самыми разными начальными фазами и с различной ориентацией плоскости поляризации в пространстве. В результате в естественном монохроматическом луче вектор \mathbf{E} (и соответственно вектор \mathbf{H}) в каждой точке непрерывно и хаотически меняет свое направление в плоскости, перпендикулярной к лучу. Разлагая этот вектор на две взаимно перпендикулярные составляющие E_x и E_y , мы тем самым можем представить *естественный луч* как наложение двух лучей, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Однако фазы обоих лучей непрерывно и хаотически меняются и *не связаны друг с другом*. В этом принципиальное отличие естественного луча от лучей, поляризованных по какому-либо закону. Если к примеру, каким-либо образом разделить оба луча (с составляющими E_x и E_y), а затем свести их в одну плоскость, то интерферировать они не будут, так как являются некогерентными.

Общая интенсивность волны пропорциональна квадрату амплитуды. Из геометрических соображений следует, что:

$$E^2 = E_x^2 + E_y^2. \quad (2)$$

Ввиду хаотичности величины и направления вектора \mathbf{E} , интенсивность лучей, поляризованных в любых двух взаимно перпендикулярных плоскостях, в среднем одинакова и равна:

$$\langle E_x^2 \rangle = \langle E_y^2 \rangle = \frac{1}{2} \langle E^2 \rangle. \quad (3)$$

Итак, любой *естественный луч света не поляризован*.

Вернемся вновь к рассмотренному ранее случаю, когда на пути естественного луча помещались два поляризатора, плоскости которых образуют угол φ . Из первого поляризатора выйдет плоскополяризованный свет, интенсивность которого I_0 составит половину интенсивности естественного света I_e [см. выражение (3)]. Согласно закону Малюса из второго поляризатора выйдет свет интенсивности $I_0 \cos^2 \varphi$. Таким образом, интенсивность света, прошедшего через два поляризатора, будет равна

$$I = \frac{1}{2} I_e \cos^2 \varphi. \quad (4)$$

Максимальная интенсивность, равная $\frac{1}{2} I_e$, получается при $\varphi=0$ (поляризаторы параллельны). При $\varphi = \frac{\pi}{2}$ интенсивность света будет равна нулю (поляризаторы скрещены).

Свет, в котором колебания одного направления преобладают над колебаниями других направлений, называется частично поляризован-

ным. Такой свет можно рассматривать как смесь естественного и плоскополяризованного. При пропускании частично поляризованного света через анализатор и при вращении анализатора вокруг направления луча интенсивность прошедшего света будет изменяться в пределах от I_e^{max} до I_e^{min} . Переход от одного из этих значений к другому будет совершаться при повороте анализатора на угол $\varphi = \frac{\pi}{2}$ (за один полный оборот два раза будут достигаться максимальные I_e^{max} и два раза минимальные I_e^{min} значения интенсивности). Степенью поляризации называется выражение

$$P = \frac{I_e^{max} - I_e^{min}}{I_e^{max} + I_e^{min}}. \quad (5)$$

Для плоскополяризованного света $I_e^{min} = 0$, $P=1$; для естественного света $I_e^{min} = I_e^{max}$ и $P=0$.

Явление поляризации света имеет место и при отражении или преломлении света на границе двух диэлектриков. Для полной или частичной поляризации естественного луча необходима анизотропия условий распространения (анизотропия – зависимость физических свойств вещества от направления). В двоякопреломляющих кристаллах эта анизотропия имеется во всей толще кристалла. При отражении и преломлении света на границе двух сред, даже если обе среды оптически изотропны, наличие вполне определенного положения плоскости падения луча само по себе создает анизотропию условий распространения. Иными словами, условия отражения и преломления лучей, поляризованных в плоскости падения и перпендикулярно к последней, различны, а *отраженный и преломленный лучи всегда в той или иной степени поляризованы*.

Если угол падения света на границу раздела двух диэлектриков отличен от нуля, то отражённый и преломленный лучи (как было сказано выше) оказываются частично поляризованными. В отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные к плоскости падения, в преломленном луче – колебания, параллельные этой плоскости. Степень поляризации этих лучей зависит от угла падения и показателя преломления. Шотландский физик Д. Брюстер (1781-1868) установил закон, согласно которому *при угле падения α_B отраженный луч будет полностью поляризован, если тангенс угла падения равен относительному коэффициенту преломления n_{21} среды, от границы которой происходит отражение*:

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n_{21}. \quad (6)$$

Отражённый луч является плоскополяризованным (содержит только колебания, перпендикулярные к плоскости падения – на рис. 3 они обозначены точками).

Преломлённый же луч при этом поляризуется максимально, но не полностью (содержит не только колебания, перпендикулярные к плоско-

сти падения, но и колебания, параллельные этой плоскости – на рис.3 обозначаются двусторонними стрелками).

Примечательно, что если свет падает на границу раздела под углом Брюстера, то отраженный и преломленный лучи *взаимно перпендикулярны* (т.е. $\alpha_B + \beta = \frac{\pi}{2}$).

Степень поляризации отраженного и преломленного лучей при различных углах падения можно получить с помощью *формул Френеля*. Эти формулы вытекают из условий, налагаемых на электромагнитное поле на границе двух диэлектриков. К числу таких условий принадлежит равенство тангенциальных составляющих векторов \vec{E} и \vec{H} , а также равенство нормальных составляющих векторов \vec{D} и \vec{B} по обе стороны границы раздела.

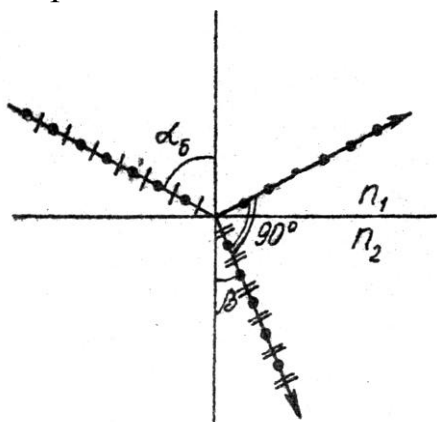


Рис. 3

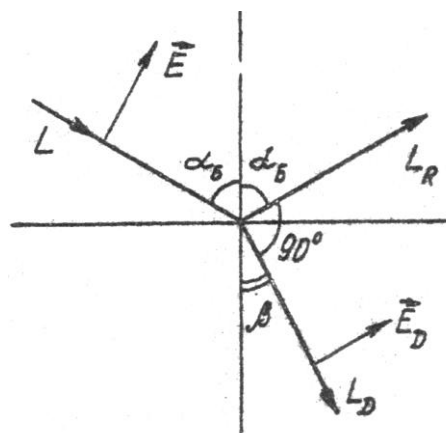


Рис. 4

Проанализируем возможность отражения плоскополяризованного света, в котором вектор \vec{E} лежит в плоскости падения. Ориентация лучей и векторов электрического поля для этого случая представлена на рис. 4, где L и L_D – падающий и преломленный лучи света, \vec{E}_D – вектор напряжённости электрического поля в веществе. Под действием электрического поля с напряженностью \vec{E}_D электрические заряды (электроны) вещества совершают колебания в направлении \vec{E}_D перпендикулярно к преломлённому лучу, а следовательно, и в направлении L_R , в котором должен распространяться отражённый под углом Брюстера луч. Но процесс отражения представляет собой вторичное излучение колеблющихся под действием электрического поля световой волны электронов в среде.

Эти электроны, однако, в направлении своего движения согласно законам электродинамики вторичных волн не излучают. Поэтому в этом направлении никакого отражения рассматриваемой плоскополяризованной волны не происходит. Отражаться может лишь волна с составляющей вектора \vec{E} , колебания в которой происходят перпендикулярно к плоскости падения (на рис. 3 эти колебания обозначены точками).

Отражение под углом Брюстера дает простейший способ получения поляризованного света. Недостаток этого способа—малая интенсивность отраженного света. Для его устранения применяют несколько стеклянных пластинок (см. рис.5), сложенных в стопу (стопу Столетова). Стопа может служить для анализа поляризованного света как при его отражении, так и при его преломлении. При большом числе пластинок отражается почти половина падающего света. Прошедший свет поляризован в плоскости падения, но при малом числе пластинок эта поляризация не совсем полная. Однако если использовать 8-10 наложенных друг на друга стеклянных пластинок (сложенных в стопу), то вышедший из такой системы свет будет практически полностью поляризованным. В настоящее время стопу для получения поляризованного света почти не употребляется, так как существуют более удобные и совершенные способы (поляризационные призмы, поляроиды).

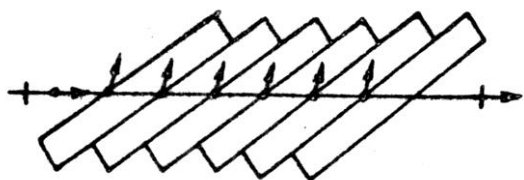


Рис. 5

Все прозрачные кристаллы (кроме кристаллов кубической системы, которые оптически изотропны) обладают способностью *двойного лучепреломления*, т. е. раздваивания каждого падающего на них светового пучка. Это явление, в 1669 г. впервые обнаруженное датским ученым Э. Бартолином (1625-1698) для исландского шпата

(разновидность кальцита CaCO_3), объясняется особенностями распространения света в анизотропных средах и непосредственно вытекает из уравнений Максвелла. Если на толстый кристалл исландского шпата направить узкий пучок света, то из кристалла выйдут два пространственно разделенных луча, параллельных друг другу и падающему лучу (рис. 6).

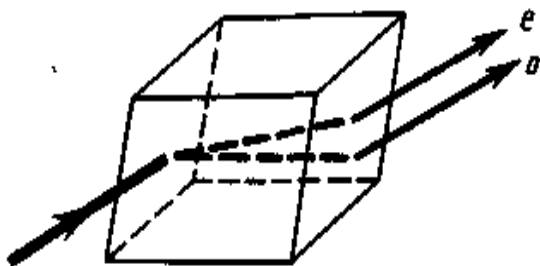


Рис. 6

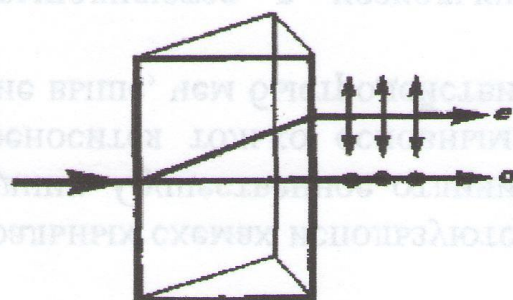


Рис. 7

Даже в том случае, когда первичный пучок падает на кристалл нормально, преломленный пучок разделяется на два, причем один из них является продолжением первичного, а второй отклоняется (рис. 7). Второй из этих лучей получил название необыкновенного (е), а первый — обыкновенного (о).

В кристалле исландского шпата имеется единственное направление, вдоль которого двойное лучепреломление не наблюдается. Направление в оптически анизотропном кристалле, по которому луч света распространяется, не испытывая двойного лучепреломления, называется *оптической осью* кристалла. В данном случае речь идет именно о направлении, а не о прямой линии, проходящей через какую-то точку кристалла. Любая прямая, проходящая параллельно данному направлению, является оптической осью кристалла. Кристаллы в зависимости от типа их симметрии бывают *одноосные* и *двуосные*, т. е. имеют одну или две оптические оси (к первым и относится исландский шпат).

Исследования показывают, что вышедшие из кристалла лучи плоскополяризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях. Плоскость, проходящая через направление луча света и оптическую ось кристалла, называется главной плоскостью (или главным сечением кристалла). Колебания светового вектора (вектора напряженности \mathbf{E} электрического поля) в обыкновенном луче происходят перпендикулярно к главной плоскости, в необыкновенном – в главной плоскости (рис. 7).

Неодинаковое преломление обыкновенного и необыкновенного лучей указывает на различие для них показателей преломления. Очевидно, что при любом направлении обыкновенного луча колебания светового вектора перпендикулярны к оптической оси кристалла, поэтому обыкновенный луч распространяется по всем направлениям с одинаковой скоростью и, следовательно, показатель преломления n_o для него есть величина постоянная. Для необыкновенного же луча угол между направлением колебаний светового вектора и оптической осью отличен от прямого и зависит от направления луча, поэтому необыкновенные лучи распространяются по различным направлениям с разными скоростями. Следовательно, показатель преломления n_e необыкновенного луча является переменной величиной, зависящей от направления луча. Таким образом, обыкновенный луч подчиняется закону преломления (отсюда и название «обыкновенный»), а для необыкновенного луча этот закон не выполняется. После выхода из кристалла, если не принимать во внимание поляризацию во взаимно перпендикулярных плоскостях, эти два луча ничем друг от друга не отличаются.

Как уже рассматривалось, обыкновенные лучи распространяются в кристалле по всем направлениям с одинаковой скоростью $v_o = c/n_o$, а необыкновенные – с разной скоростью $v_e = c/n_e$ (в зависимости от угла между вектором \mathbf{E} и оптической осью). Для луча, распространяющегося вдоль оптической оси, $n_o = n_e$, $v_o = v_e$, т. е. вдоль оптической оси существует только одна скорость распространения света. Различие в v_e и v_o для всех направлений, кроме направления оптической оси, и обуславливает явление двойного лучепреломления света в одноосных кристаллах.

Допустим, что в точке S внутри одноосного кристалла находится точечный источник света. На рис. 8 показано распространение обыкновенного и необыкновенного лучей в кристалле (главная плоскость совпадает с плоскостью чертежа, OO' – направление оптической оси). Волновой поверхностью обыкновенного луча является сфера, необыкновенного луча – эллипсоид вращения. Наибольшее расхождение волновых поверхностей обыкновенного и необыкновенного лучей наблюдается в направлении, перпендикулярном к оптической оси. Эллипсоид и сфера касаются друг друга в точках их пересечения с оптической осью OO' .

Если $v_e < v_o$ ($n_e > n_o$), то эллипсоид необыкновенного луча вписан в сферу обыкновенного луча (эллипсоид скоростей вытянут относительно оптической оси) и одноосный кристалл называется положительным (рис. 8, а). Если $v_e > v_o$ ($n_e < n_o$), то эллипсоид описан вокруг сферы (эллипсоид скоростей растянут в направлении, перпендикулярном к оптической оси) и одноосный кристалл называется отрицательным (рис. 8, б). Рассмотренный выше исландский шпат относится к отрицательным кристаллам.

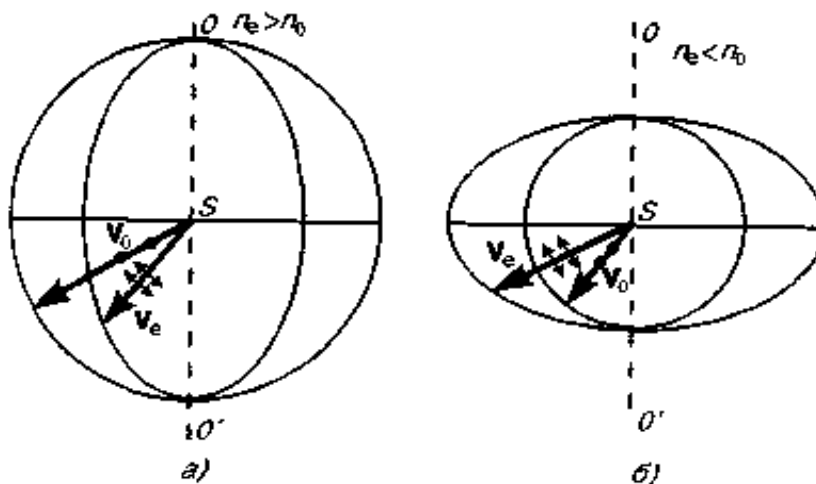


Рис. 8

В качестве примера построения обыкновенного и необыкновенного лучей рассмотрим преломление плоской волны на границе анизотропной среды, например положительной (рис. 9).

Пусть свет падает нормально к преломляющей грани кристалла, а оптическая ось OO' составляет с ней некоторый угол. С центрами в точках A и B построим сферические волновые поверхности, соответствующие обыкновенному лучу, и эллипсоидальные – необыкновенному лучу. В точке, лежащей на OO' , эти поверхности соприкасаются. Согласно принципу Гюйгенса, поверхность, касательная к сферам, будет фронтом (а-а) обыкновенной волны, поверхность, касательная к эллипсоидам, – фронтом (б-б) необыкновенной волны. Проведя к точкам касания прямые, получаем направления распространения обыкновенного (о) и необыкновенного (е) лучей. Таким образом, в данном случае обыкновенный луч пойдет вдоль первоначального направления, необыкновенный же отклонится от первоначального направления.

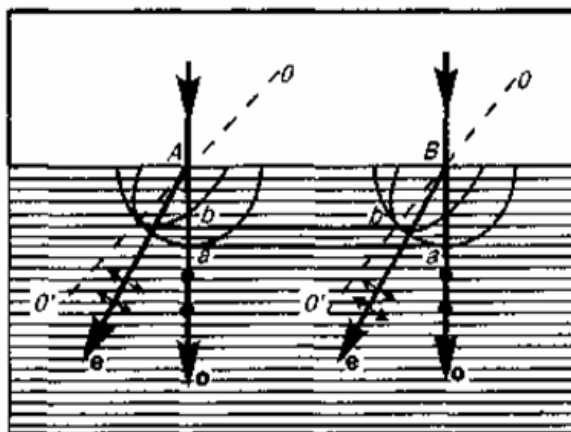


Рис. 9

В основе работы поляризационных приспособлений, служащих для получения поляризованного света, лежит явление двойного лучепреломления. Наиболее часто для этого применяются призмы и поляроиды. Призмы делятся на два класса:

- 1) *призмы, дающие только плоскополяризованный луч (поляризационные призмы);*
- 2) *призмы, дающие два поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях луча (двойкопреломляющие призмы).*

Поляризационные призмы построены по принципу полного отражения одного из лучей (например, обыкновенного) от границы раздела, в то время как другой луч с другим показателем преломления проходит через эту границу. Типичным представителем поляризационных призм является призма Николя, называемая часто нйколем. Призма Николя (рис. 10) представляет собой двойную призму из исландского шпата, склеенную вдоль линии АВ канадским бальзамом с $n = 1,55$. Оптическая ось $ОО'$ призмы составляет с входной гранью угол 48° . На передней грани призмы естественный луч, параллельный ребру СВ, раздваивается на два луча: обыкновенный ($n_o = 1,66$) и необыкновенный ($n_e = 1,51$).

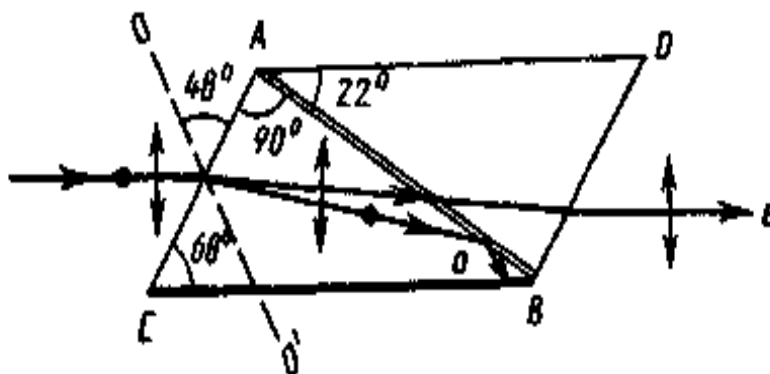


Рис. 10

При соответствующем подборе угла падения, равного или большего предельного, обыкновенный луч испытывает полное отражение (канадский бальзам для него является средой оптически менее плотной), а затем поглощается зачерненной боковой поверхностью СВ. Необыкновенный луч выходит из кристалла параллельно падающему лучу, незначительно смещенному относительно него (ввиду преломления на наклонных гранях АС и BD).

Двоякопреломляющие призмы используют различие в показателях преломления обыкновенного и необыкновенного лучей, чтобы развести их возможно дальше друг от друга. Примером двоякопреломляющих призм могут служить призмы из исландского шпата и стекла, призмы, составленные из двух призм из исландского шпата со взаимно

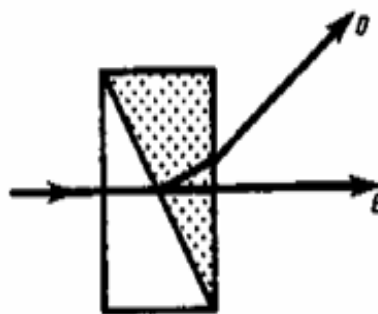


Рис. 11

перпендикулярными оптическими осями. Для первых призм (рис. 11) обыкновенный луч преломляется в шпате и стекле два раза и, следовательно, сильно отклоняется, необыкновенный же луч при соответствующем подборе показателя преломления стекла n ($n \gg n_e$) проходит призму почти без отклонения. Для вторых призм различие в ориентировке оптических осей влияет на угол расхождения между обыкновенным и необыкновенным лучами.

Двоякопреломляющие кристаллы обладают свойством дихроизма, т. е. различного поглощения света в зависимости от ориентации электрического вектора световой волны, и называются **дихроичными кристаллами**. Примером сильно дихроичного кристалла является турмалин, в котором из-за сильного селективного поглощения обыкновенного луча уже при толщине пластинки 1 мм из нее выходит только необыкновенный луч. Такое различие в поглощении, зависящее, кроме того, от длины волны, приводит к тому, что при освещении дихроичного кристалла белым светом кристалл по разным направлениям оказывается различно окрашенным.

Дихроичные кристаллы приобрели еще более важное значение в связи с изобретением **поляроидов**. Примером поляроида может служить тонкая пленка из целлулоида, в которую вкраплены кристаллики герапатита (сернокислого иод-хинина). Герапатит – двоякопреломляющее вещество с очень сильно выраженным дихроизмом в области видимого света. Установлено, что такая пленка уже при толщине $> 0,1$ мм полностью поглощает обыкновенные лучи видимой области спектра, являясь в таком тонком слое совершенным поляризатором. Преимущество поляроидов перед призмами – возможность изготавливать их с площадями по-

верхностей до нескольких квадратных метров. Однако их меньшая по сравнению с призмами прозрачность (приблизительно 30%) в сочетании с небольшой термостойкостью не позволяет использовать поляроиды в мощных световых потоках. Поляроиды применяются, например, для защиты от ослепляющего действия солнечных лучей и фар встречного автотранспорта.

Разные кристаллы создают различное по значению и направлению двойное лучепреломление, поэтому, пропуская через них поляризованный свет и измеряя изменение его интенсивности после прохождения кристаллов, можно определить их оптические характеристики и производить минералогический анализ. Для этой цели используются поляризационные микроскопы.

Двойное лучепреломление имеет место в естественных анизотропных средах. Существуют, однако, различные способы получения искусственной оптической анизотропии. Оптически изотропные вещества становятся оптически анизотропными под действием:

- 1) *одностороннего сжатия или растяжения (кристаллы кубической системы, стекла и др.);*
- 2) *электрического поля (эффект Керра; жидкости, аморфные тела, газы);*
- 3) *магнитного поля (жидкости, стекла, коллоиды).*

В перечисленных случаях вещество приобретает свойства одноосного кристалла, оптическая ось которого совпадает с направлением деформации, электрического или магнитного полей соответственно указанным выше воздействиям.

Мерой возникающей оптической анизотропии служит разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей в направлении, перпендикулярном к оптической оси:

$$n_0 - n_e = k_1 \sigma \quad (\text{в случае деформации}); \quad (7)$$

$$n_0 - n_e = k_2 E^2 \quad (\text{в случае электрического поля}); \quad (8)$$

$$n_0 - n_e = k_3 H^2 \quad (\text{в случае магнитного поля}), \quad (9)$$

где k_1 , k_2 , k_3 – постоянные, характеризующие вещество, σ – нормальное напряжение, E и H – соответственно напряженность электрического и магнитного полей. На рис. 12 приведена установка для наблюдения **эффекта Керра** в жидкостях (установки для изучения рассмотренных явлений однотипны). Ячейка Керра – кювета с жидкостью (например, нитробензолом), в которую введены пластины конденсатора, помещаемого между скрещенными поляризатором P и анализатором A . При отсутствии электрического поля свет через систему не проходит. При наложении электрического поля жидкость становится двоякопреломляющей; при изменении разности потенциалов между электродами меняется сте-

пень анизотропии вещества, а следовательно, и интенсивность света, прошедшего через анализатор.

Эффект Керра – оптическая анизотропия веществ под действием электрического поля – объясняется различной поляризуемостью молекул жидкости по разным направлениям. Это явление практически безынерционно, т.е. время перехода вещества из изотропного состояния в анизотропное при включении поля (и обратно) составляет приблизительно 10^{-10} с. Поэтому ячейка Керра служит идеальным световым затвором и применяется в быстропротекающих процессах (звукозапись, скоростная фото- и киносъемка воспроизводство звука, изучение скорости распространения света и т. д.), в оптической локации, в оптической телефонии и т. д.

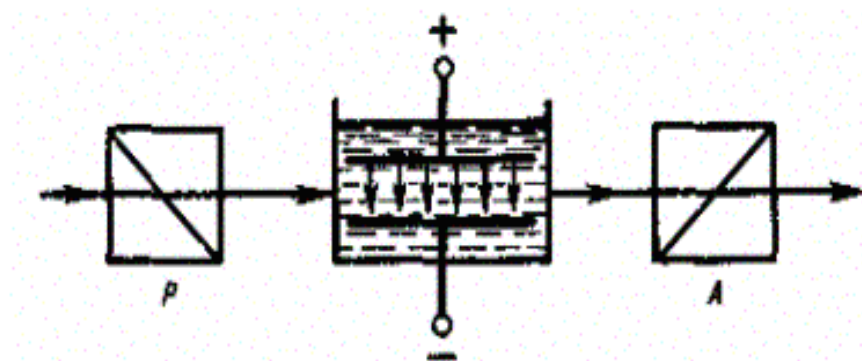


Рис. 12

Искусственная анизотропия под действием механических воздействий позволяет исследовать напряжения, возникающие в прозрачных телах. В данном случае о степени деформации отдельных участков изделия (например, остаточных деформаций в стекле при закалке) судят по распределению в нем окраски. Так как применяемые обычно в технике материалы (металлы) непрозрачны, то исследование напряжений производят на прозрачных моделях, а потом делают соответствующий пересчет на проектируемую конструкцию.

Некоторые вещества (например, из твердых тел – кварц, сахар, кинovarь, из жидкостей – водный раствор сахара, винная кислота, скипидар), называемые оптически активными, обладают способностью вращать плоскость поляризации.

Вращение плоскости поляризации можно наблюдать на следующем опыте (рис. 13). Если между скрещенными поляризатором Р и анализатором А, дающими темное поле зрения, поместить оптически активное вещество (например, кювету с раствором сахара), то поле зрения анализатора просветляется. При повороте анализатора на некоторый угол ϕ можно вновь получить темное поле зрения. Угол ϕ и есть угол, на который оптически активное вещество поворачивает плоскость поляризации света, прошедшего через поляризатор. Так как поворотом анализато-

ра можно получить темное поле зрения, то свет, прошедший через оптически активное вещество, является плоскополяризованным.

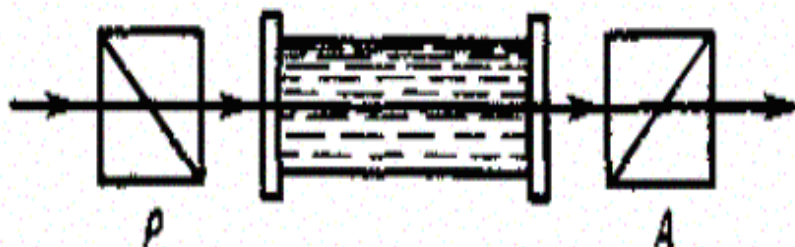


Рис. 13

Опыт показывает, что угол поворота плоскости поляризации для оптически активных кристаллов и чистых жидкостей

$$\varphi = \alpha d;$$

для оптически активных растворов

$$\varphi = [\alpha] C d ,$$

где d – расстояние, пройденное светом в оптически активном веществе, $[\alpha]$ – так называемое удельное вращение, численно равное углу поворота плоскости поляризации света слоем оптически активного вещества единичной толщины (единичной концентрации – для растворов), C – массовая концентрация оптически активного вещества в растворе, кг/м^3 . Удельное вращение зависит от природы вещества, температуры и длины волны света в вакууме.

Опыт показывает, что все вещества, оптически активные в жидком состоянии, обладают таким же свойством и в кристаллическом состоянии. Однако если вещества активны в кристаллическом состоянии, то не всегда активны в жидком (например, расплавленный кварц). Следовательно, оптическая активность обуславливается как строением молекул вещества (их асимметрией), так и особенностями расположения частиц в кристаллической решетке.

Оптически активные вещества в зависимости от направления вращения плоскости поляризации разделяются на право- и левовращающие. В первом случае плоскость поляризации, если смотреть навстречу лучу, вращается вправо (по часовой стрелке), во втором – влево (против часовой стрелки). Вращение плоскости поляризации объяснено О. Френелем (1817 г.). Согласно теории Френеля, скорость распространения света в оптически активных веществах различна для лучей, поляризованных по кругу вправо и влево. Явление вращения плоскости поляризации лежит в основе точного метода определения концентрации растворов оптически активных веществ, называемого *поляризацией* (*сахариметрией*). Для этого используется установка, показанная на рис. 13. По найденному уг-

лу поворота плоскости поляризации φ и известному значению $[a]$ находится концентрация растворенного вещества.

Впоследствии М. Фарадеем было обнаружено вращение плоскости поляризации в оптически неактивных телах, возникающее под действием магнитного поля. Это явление получило название **эффекта Фарадея** (или магнитного вращения плоскости поляризации). Оно имело огромное значение для науки, так как было первым явлением, в котором обнаружилась связь между оптическими и электромагнитными процессами. Для наблюдения эффекта Фарадея применяется установка, подобная той, что приведена на рис. 13. Только в последнем случае кювета с веществом должна быть помещена в магнитное поле.

В заключение рассмотрим решение нескольких типовых задач по данной теме.

Задача № 1. Пучок света, идущий в воздухе, падает на поверхность жидкости под углом $\theta_1 = 54^\circ$. Определить угол преломления θ_2 пучка, если отраженный пучок полностью поляризован.

Решение

Отраженный пучок света будет полностью поляризован, если свет падает на границу раздела двух сред под углом Брюстера. Угол падения Брюстера определяется условием: $\operatorname{tg} \theta_1 = n_2/n_1$, где n_1 и n_2 – показатели преломления сред, в которых распространяются, соответственно, падающий и преломленный лучи света. Угол преломления θ_2 можно определить с помощью закона преломления световых лучей на границе раздела двух сред:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Учитывая, что $\operatorname{tg} \theta_1 = \sin \theta_1 / \cos \theta_1$, получаем:

$$\frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Откуда следует, что $\cos \theta_1 = \sin \theta_2$ или $\sin(90^\circ - \theta_1) = \sin \theta_2$. Так как углы θ_1 и θ_2 оба меньше 90° , то последнее соотношение дает $90^\circ - \theta_1 = \theta_2$ или $\theta_1 + \theta_2 = 90^\circ$. Таким образом, мы доказали полезное утверждение: **если свет падает под углом Брюстера, то сумма углов падения и преломления равна 90°** . Поэтому в нашей задаче угол преломления равен $90^\circ - 54^\circ = 36^\circ$.

Ответ: $\theta_2 = 36^\circ$.

Задача № 2. Предельный угол полного внутреннего отражения пучка света на границе жидкости с воздухом равен $\theta = 43^\circ$. Определить угол Брюстера θ_b для падения луча из воздуха на поверхность этой жидкости.

Решение

Угол полного внутреннего отражения на границе раздела жидкости с показателем преломления n и воздуха с показателем преломления, равным единице, определяется из условия $\sin\theta = n^{-1}$. Следовательно, показатель преломления жидкости равен $n = (\sin 43^\circ)^{-1}$. Угол Брюстера в данном случае может быть определен из условия $\operatorname{tg}\theta_B = n$. Следовательно, получаем:

$$\theta_B = \operatorname{arctg}(n) = \operatorname{arctg}(1/\sin 43^\circ) = 55,75^\circ.$$

Ответ: $\theta_B = 55,75^\circ$.

Задача № 3. На пути частично поляризованного света, степень поляризации P которого равна 0,6, поставили анализатор так, что интенсивность света, прошедшего через него, стала максимальной. Во сколько раз уменьшится интенсивность света, если плоскость пропускания анализатора повернуть на угол 30° ?

Решение

Согласно закону Малюса, если на поляризатор падает плоскополяризованный свет с интенсивностью I_{op} , то интенсивность света на выходе поляризатора I_p будет равна $I_p = I_{op} \cos^2 \alpha$, где α – угол между плоскостью поляризации падающего света и плоскостью пропускания поляризатора. Если же на поляризатор падает естественный свет, то для определения интенсивности прошедшего света надо в соотношении Малюса произвести усреднение по всевозможным углам α . Учитывая, что среднее значение $\cos^2 \alpha$ равно $\langle \cos^2 \alpha \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2 \alpha d\alpha = \frac{1}{2}$, получаем *ослабление интенсивности падающего естественного света в два раза*. Зная теперь, как поляризованный и естественный свет проходят через поляризатор, представим частично поляризованный свет в виде смеси естественного света с интенсивностью I_{oe} и плоскополяризованного света с интенсивностью I_{op} . Если такую смесь пропустить через анализатор, то, как легко видеть с помощью закона Малюса, максимальная интенсивность прошедшего света будет равна $I_{\max} = I_{op} + \frac{1}{2} I_{oe}$, а минимальная интенсивность $I_{\min} = \frac{1}{2} I_{oe}$. Тогда степень поляризации этого света может быть определена следующим образом:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{I_{op}}{I_{op} + I_{oe}}.$$

По условию задачи сначала поляризатор установили так, что интенсивность прошедшего света оказалась максимальной, то есть $I_{\max} = I_{op} + \frac{1}{2} I_{oe}$. Плоскость поляризации поляризованной компоненты в этом случае совпадает с плоскостью пропускания поляризатора. Если теперь поляризатор повернуть на угол α , то интенсивность поляризованной компоненты света уменьшится в соответствии с законом Малюса, а ин-

тенсивность прошедшей естественной компоненты не изменится и будет по-прежнему равна $\frac{1}{2} I_{oe}$. В результате интенсивность прошедшего света станет равной $I_a = \frac{1}{2} I_{oe} + I_{op} \cos^2 \alpha$. Отношение интенсивностей I_{\max}/I_a , которое надо найти в задаче,

$$\frac{I_{\max}}{I_a} = \frac{I_{op} + \frac{1}{2} I_{oe}}{\frac{1}{2} I_{oe} + I_{op} \cos^2 \alpha}$$

выразим через отношение интенсивностей I_{op}/I_{oe} , поделив числитель и знаменатель одновременно на I_{oe} . Тогда получим:

$$\frac{I_{\max}}{I_a} = \frac{\frac{I_{op}}{I_{oe}} + \frac{1}{2}}{\frac{1}{2} + \frac{I_{op}}{I_{oe}} \cos^2 \alpha}.$$

Подставив последнее соотношение в выражение для отношения интенсивностей I_{op}/I_{oe} через степень поляризации P падающего света $I_{op}/I_{oe} = P/(1-P)$, получим искомое соотношение интенсивностей:

$$\frac{I_{\max}}{I_a} = \frac{\frac{P}{1-P} + \frac{1}{2}}{\frac{1}{2} + \frac{P}{1-P} \cos^2 \alpha}.$$

Используя численные значения данной задачи, получаем: $I_{\max}/I_a = 1,23$.

Ответ: $I_{\max}/I_a = 1,23$.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Дайте определение естественного и поляризованного света.
2. Сформулируйте закон Брюстера.
3. Что такое плоскость поляризации?
4. Чем отличается естественный свет от плоскополяризованного?
5. При каких условиях степень поляризации света, отраженного от диэлектрической пластинки, максимальна?
6. Сформулируйте закон Малюса.
7. Что такое вращение плоскости поляризации?
8. В чем заключаются эффект Керра и эффект Фарадея?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс физики М.: Наука, 1988. Т. 2. С. 428-451.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. С. 370-399.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 1985. С. 284-320.