

А. Г. Андреев, И. Н. Фетисов

Поляризация света

Методические указания к лабораторной работе О-25 по курсу общей физики
Москва, 2000

Цель работы - получение поляризованного света и изучение его свойств.

ВВЕДЕНИЕ

В бегущей плоской электромагнитной волне векторы напряженности \vec{E} электрического поля и индукции \vec{B} магнитного поля в каждой точке и в каждый момент времени образуют с волновым вектором \vec{k} (совпадает с направлением распространения волны) правую тройку векторов (рис. 1) В этом заключается свойство поперечности электромагнитных волн.

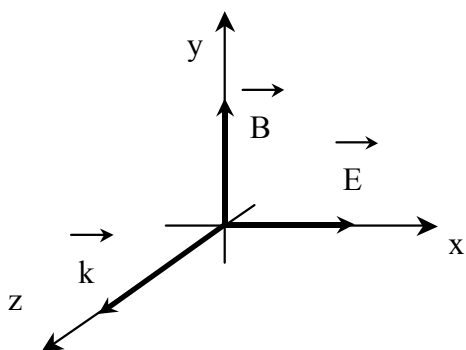


Рис. 1

Поперечность электромагнитной волны лишает ее осевой симметрии относительно направления ее распространения из-за наличия выделенных направлений (векторов \vec{E} и \vec{B}).

Обычные источники света представляют собой совокупность огромного числа атомов или молекул, испускающих свет в течение $10^{-10} - 10^{-8}$ с, независимо друг от друга, с разными фазами и с разными ориентациями векторов \vec{E} и \vec{B} . Ориентация векторов \vec{E} и \vec{B} в результирующей волне поэтому хаотически изменяется со временем, так что в плоскости, перпендикулярной волновому вектору \vec{k} , все направления колебаний оказываются равноправными. Такой свет называют естественным или неполяризованным. При помощи специальных устройств, называемых поляризаторами, направление колебаний векторов \vec{E} и \vec{B} может быть упорядочено; такой свет называют поляризованным [1,2]. Различают несколько видов поляризации. В линейно поляризованной (плоскополяризованной) световой волне пара

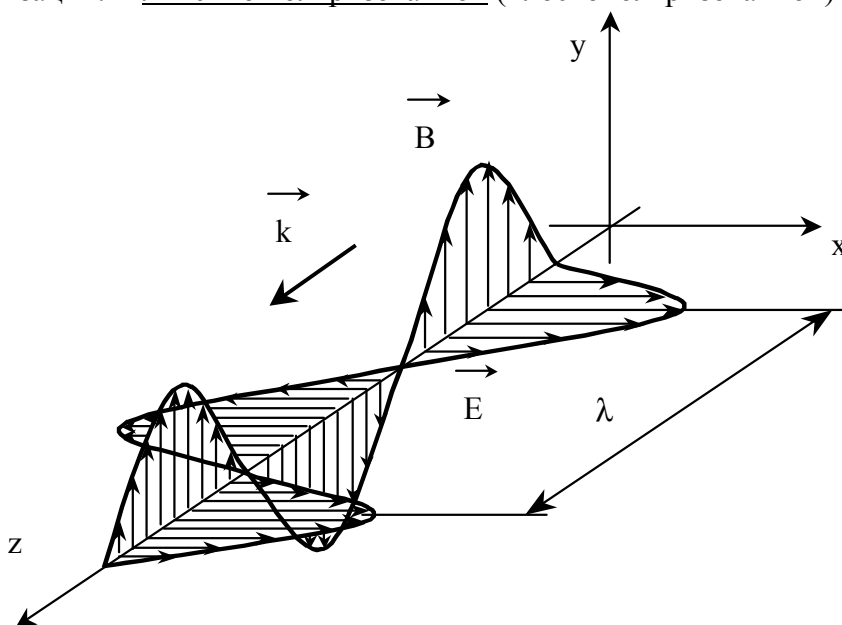


Рис. 2

векторов \vec{E} и \vec{B} не изменяет с течением времени своей ориентации. Мгновенный "снимок" такой волны, показывающий векторы \vec{E} и \vec{B} в разных точках оси z (вдоль нее распространяется волна) в один момент времени, приведен на рис. 2.

Плоскость, в которой лежит вектор напряженности \vec{E} электрического поля и волновой вектор \vec{k} , называют плоскостью поляризации или плоскостью колебаний. (Такая терминология не вполне общепринята. В некоторых книгах, особенно старых, плоскостью поляризации называют плоскость, содержащую магнитный вектор \vec{B} .) Поскольку векторы \vec{E} и \vec{B} электромагнитной волны перпендикулярны один другому, для полного описания состояния поляризации светового пучка требуется знать поведение одного из них. Обычно выбирают для этой цели вектор \vec{E} , так как действия света на вещество (фотоэлектрическое, физиологическое и др.) вызываются колебаниями электрического вектора, называемого световым вектором. Наиболее общим типом поляризации является эллиптическая поляризация. В такой волне

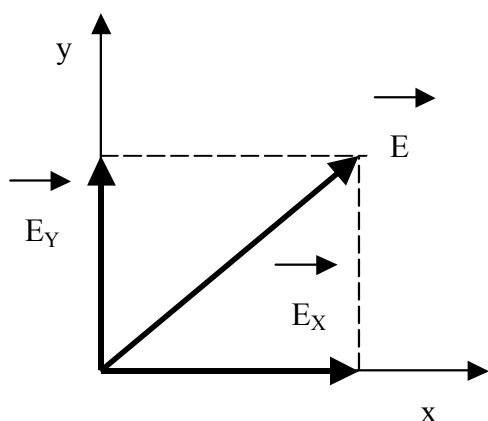


Рис. 3

проекция траектории конца вектора \vec{E} на плоскость, перпендикулярную лучу, имеет вид эллипса. Наибольший интерес представляют предельные случаи эллиптической поляризации - линейная, когда эллипс поляризации вырождается в отрезок прямой линии, определяющей положение плоскости поляризации, и циркулярная (или круговая), когда эллипс поляризации представляет собой окружность. В первом случае свет будет линейно поляризованным, а во втором - право- или левоциркулярно поляризованным в зависимости от направления обхода эллипса поляризации.

При теоретическом рассмотрении различных типов поляризации часто бывает удобно проектировать вектор \vec{E} в некоторой точке пространства на два взаимно перпендикулярных направления (рис.3). Каждый из

векторов \vec{E}_x и \vec{E}_y описывает линейно поляризованную волну. В том случае, когда исходная волна была поляризованной, E_x и E_y когерентны между собой и могут быть записаны в виде

$$E_x = E_{0x} \cos \omega t; \quad E_y = E_{0y} \cos(\omega t + \delta), \quad (1)$$

где амплитуды E_{0x} и E_{0y} , частота ω и разность фаз δ не зависят от времени.

В результате сложения двух ортогональных когерентных волн \vec{E}_x и \vec{E}_y в общем случае получается волна эллиптической поляризации. Отношение длин осей эллипса поляризации и его ориентация на плоскости xy определяются разностью фаз δ и отношением амплитуд E_{0y}/E_{0x} ; от разности фаз зависит также направление вращения светового вектора.

На рис. 4 приведены примеры поляризационных состояний светового луча при одинаковых амплитудах и различных разностях фаз δ ортогональных компонент. При $\delta=0$ поляризация линейная (рис.4,а). При $\delta=\pi$ поляризация также линейная, но электрический вектор имеет другое направление (рис.4,д). При $\delta=\pi/2$ и $\delta=-\pi/2$ поляризация циркулярная с разным направлением вращения (рис.4, в,е). При промежуточных значениях δ световой вектор описывает эллипс (рис.4,б,г).

Электрический вектор циркулярно поляризованной волны в разных точках оси z в один и тот же момент времени показан на рис.5. Концы векторов \vec{E} для разных значений z лежат на винтовой линии.

При изучении эллиптической поляризации полезна аналогия с фигурами Лиссажу на экране осциллографа.

Неполяризованный свет также может быть разложен на две линейно поляризованные ортогональные компоненты. Однако в этом случае разность фаз δ испытывает быстрые хао-

тические изменения, так что колебания E_x и E_y оказываются некогерентными.

1. ПОЛУЧЕНИЕ И АНАЛИЗ ЛИНЕЙНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА (Задания 1 - 5)

Для получения полностью или частично линейно поляризованного света служат оп-

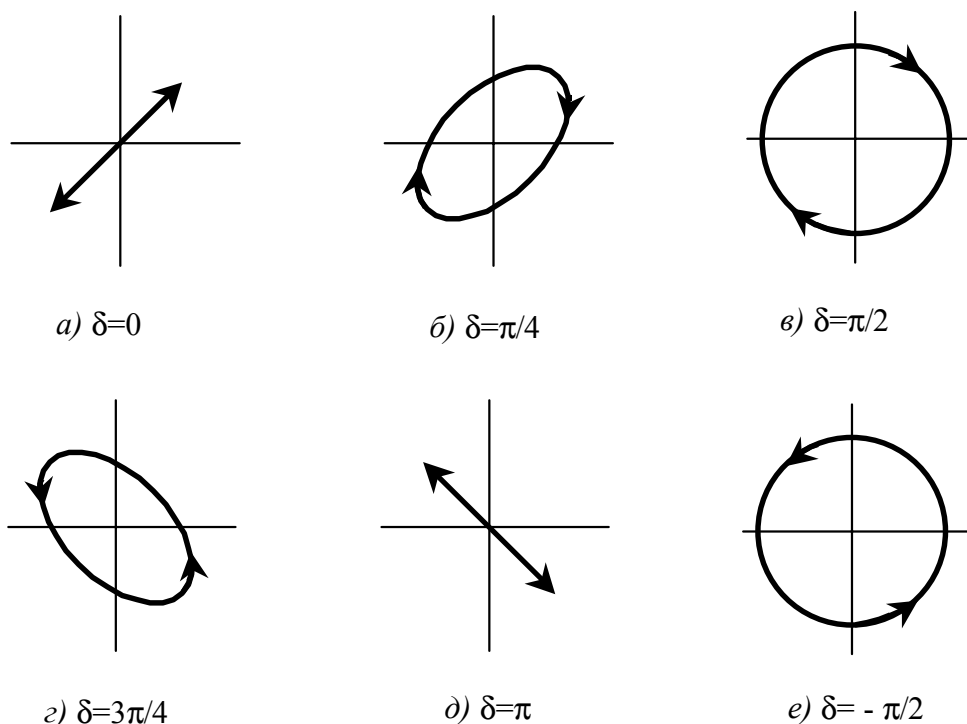


Рис. 4

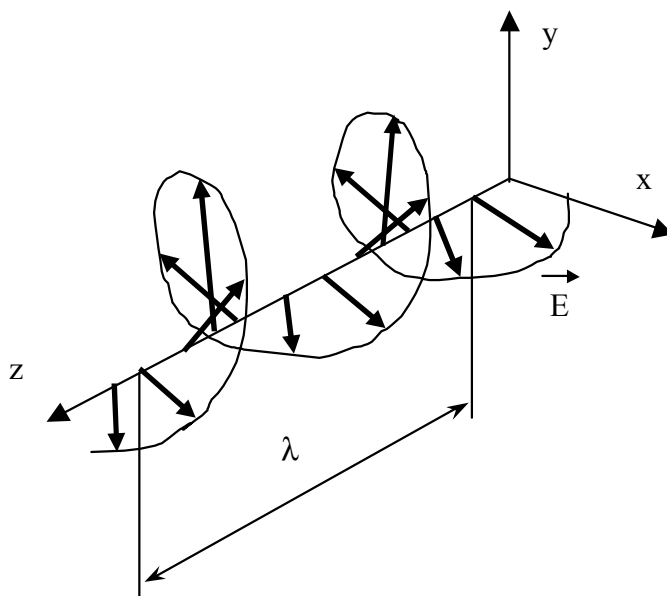


Рис. 5

тические приборы, называемые линейными поляризаторами (или просто поляризаторами). В них используется одно из трех физических явлений: линейный дихроизм, двойное лучепреломление и поляризация при отражении и преломлении света на границе раздела двух изотропных сред с различным показателем преломления. В первых двух случаях свет проходит через вещество, обладающее оптической анизотропией, т.е. различием оптических свойств среды в зависимости от направления светового луча и светового вектора.

1.1. Линейный дихроизм.

Некоторые кристаллы (турмалин), а также искусственно полученные полимерные пленки имеют сильно различающийся коэффициент поглощения для света с различным направлением колебаний электрического вектора. Это явление называется линейным дихроизмом. Дихроизм используется в наиболее распространенном поляризаторе - поляроиде. Он представляет собой тонкую поляризующую пленку, обычно заклеенную для защиты от механических повреждений и действия влаги между двумя прозрачными стеклами. Дихроизм поляроидов некоторого типа обусловлен дихроизмом особых нитевидных молекул полимера, введенных в прозрачную матрицу из пластмассы и пространственно однородно ориентированных в ней. Ориентацию осуществляют с помощью растяжения пленки или иной специальной технологии.

Если на поляроид падает волна с направлением колебаний E_1 , т.е. поперек нитевид-

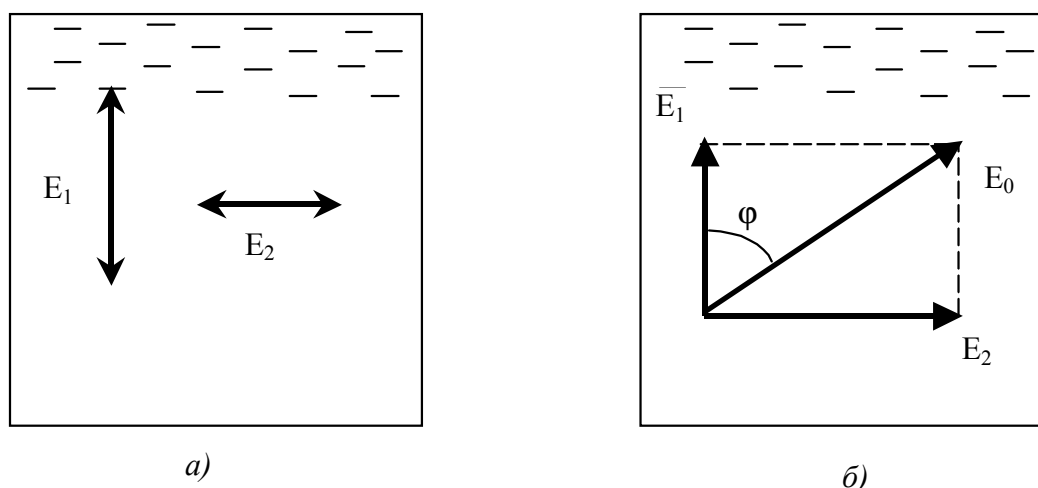


Рис. 6

ных молекул, показанных штрихами на рис.6, а, то она проходит через поляроид с незначительным ослаблением. Волна с направлением колебаний E_2 , т.е. вдоль молекул, практически полностью поглощается. Направление колебаний электрического вектора в волне, прошедшей через поляроид (или другой поляризатор) называется разрешенным направлением поляризатора.

Закон Малюса.

Пусть на поляроид (или другой поляризатор) падает линейно поляризованная волна амплитуды E_0 , направление колебаний которой составляет угол φ с разрешенным направлением (рис. 6,б). Вектор \vec{E}_0 можно разложить на две ортогональные составляющие - вдоль (\vec{E}_2) и поперек молекул (\vec{E}_1). Компонента \vec{E}_2 поглощается, а компонента \vec{E}_1 , равная $E_1 = E_0 \cos \varphi$, проходит через поляроид. Следовательно, интенсивность прошедшего света I (энергетическая величина, пропорциональная квадрату амплитуды) определяется выражением

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

(I_0 - интенсивность падающего света). Соотношение (2) носит название закона Малюса.

Если на поляризатор падает естественный свет, то на выходе поляризатора свет будет линейно поляризованным. В естественном свете все значения угла φ равновероятны. Поэтому доля света, прошедшего через поляризатор, будет равна среднему значению $\cos^2 \varphi$, т.е. 1/2. При вращении поляризатора вокруг направления естественного луча интенсивность прошедшего света остается одной и той же, изменяется лишь ориентация плоскости колебаний светового вектора волны, выходящей из поляризатора.

Поставим на пути луча от источника S естественного света два поляроида - П и А,

угол φ между разрешенными направлениями которых можно изменять (рис.7). Из первого поляроида выйдет линейно поляризованный свет, интенсивность которого I_0 составит половину интенсивности естественного света $I_{ЕСТ}$. Согласно закону Малюса из второго поляроида выйдет свет интенсивности $I_0 \cos^2 \varphi$. Таким образом, интенсивность света, прошедшего через два поляроида, равна

$$I = \frac{1}{2} I_{ЕСТ} \cos^2 \varphi \quad (3)$$

Максимальная интенсивность света, равная $1/2 I_{ЕСТ}$ получается при $\varphi=0$ (говорят, что поляроиды «параллельны»). При φ равном $\pi/2$ («скрещенные» поляроиды), свет через них не проходит. При изменении угла φ от нуля до 2π свет два раза будет погашен, и два раза достигнет максимума.

В оптической схеме на рис. 7 первый от лампы поляроид служит поляризатором света, а второй - анализатором. Если при вращении анализатора наблюдается полное гашение света, то

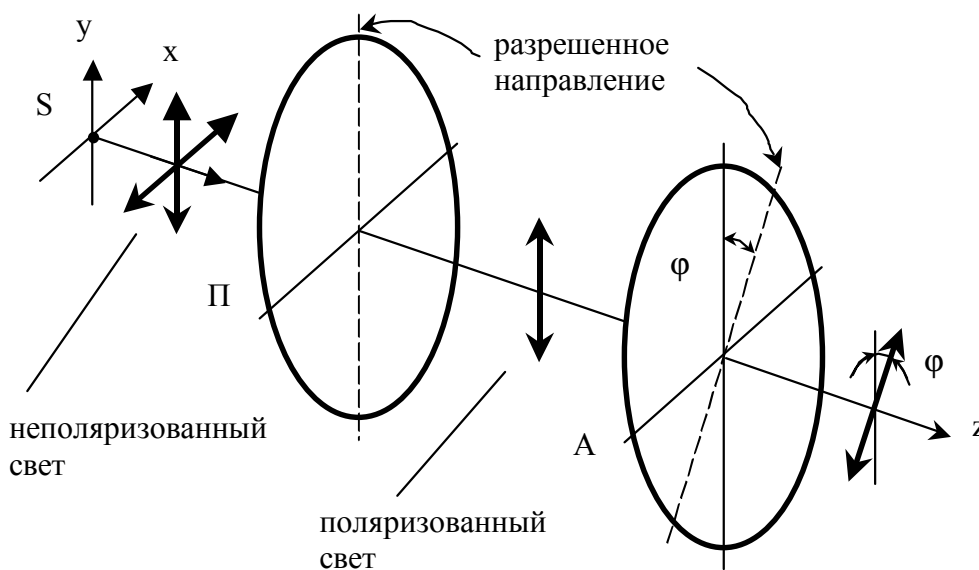


Рис. 7

свет перед анализатором имеет линейную поляризацию. Если на анализатор падает естественный свет, то интенсивность прошедшего света не изменяется при вращении анализатора. (Об анализе циркулярно поляризованного света будет сказано ниже).

Поляризатор, задерживающий перпендикулярные к его разрешенному направлению колебания только частично, будем называть несовершенным. Просто поляризатором будем называть идеальный поляризатор, полностью задерживающий колебания, перпендикулярные к его разрешенному направлению, и не ослабляющий колебаний вдоль разрешенного направления. Формулы (2) и (3) верны для идеальных поляризаторов. Скрещенные поляроиды не гасят свет полностью, их нельзя считать идеальными.

На выходе из несовершенного поляризатора получается свет, в котором колебания одного направления преобладают над колебаниями других направлений. Такой свет называется частично поляризованным. Его можно рассматривать как смесь естественного и линейно поляризованного света.

Если пропустить частично поляризованный свет через идеальный поляризатор, то при вращении поляризатора вокруг направления луча интенсивность прошедшего света будет измениться в пределах от $I_{МАКС}$ до $I_{МИН}$. Выражение

$$P = \frac{I_{МАКС} - I_{МИН}}{I_{МАКС} + I_{МИН}} \quad (4)$$

называют степенью поляризации. Для линейно поляризованного света $I_{\text{мин}}=0$ и $P=1$. Для естественного света интенсивность не изменяется при вращении поляризатора и $P=0$.

Задание 1. Получение и анализ линейно поляризованного света с помощью поляроидов.

С лабораторным оборудованием необходимо обращаться очень бережно: не прикладывать усилий, не трогать оптические поверхности руками, не протирать их, принадлежности держать в коробках.

Перечень используемого в работе оборудования приведен в конце методических указаний.

Описание установки.

Первые три и некоторые последующие задания выполняются на установке номер 1

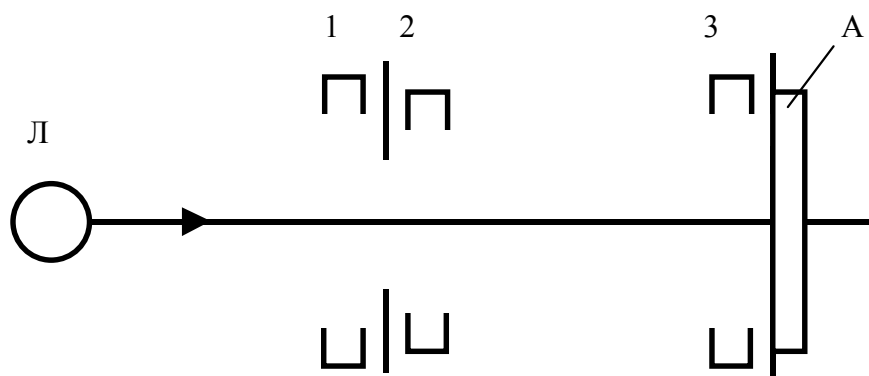


Рис. 8

(рис.8). Она состоит из лампы накаливания Л с колбой из молочного стекла и анализатора А (поляроида). Между лампой и анализатором имеются вертикальные направляющие 1, 2 и 3, в которые можно вставлять кассеты с различными оптическими деталями – поляририд, двоякопреломляющий кристалл и т.д.

У поляроидов заводского изготовления оправа состоит из двух колец. Одно из них с помощью резьбы закрепляется на пластине, а другое кольцо, имеющее для удобства насечку, можно поворачивать вместе с поляриридом. На вращающемся кольце нанесены две точки, лежащие на одном диаметре. Соединяющая точки линия (назовем ее условно линией двух точек) связана с разрешенным направлением поляририда; как именно - вдоль или поперек разрешенного направления - Вы можете определить в задании 3 или 5.

Выполнение задания.

1. Включить лампу в сеть 220 В. Между лампой и анализатором сначала не должно быть оптических деталей.

Посмотрите на лампу через анализатор. Легко заметить, что поляририд ослабляет свет лампы (объясните это).

Вращая поляририд, следите за яркостью лампы. Если яркость не изменялась, то какой вывод можно сделать о поляризации света лампы?

Повторите опыт, рассматривая через поляририд другие источники света - люминесцентные лампы, свет в окне (при этом используйте поляририд в виде отдельной детали - номер 10 или 11).

2. Выполнить наблюдения по схеме рис.7. Для этого в направляющие 1 (рис.8) вставить поляририд, закрепленный на пластине 70x70 мм (кассета 10). Этот поляририд превращает естественный свет лампы в линейно поляризованный, т.е. служит поляризатором. Для удобства анализа поляризованного света установите поляризатор в определенное положение, например, когда линия двух точек вертикальна.

При медленном вращении анализатора наблюдайте изменение интенсивности света. Обрати-

те внимание на связь между интенсивностью прошедшего света и взаимной ориентацией двух поляроидов.

Ответьте на вопрос - согласуется ли изменение интенсивности света при вращении анализатора качественно с законом Малюса? (Количественная проверка этого закона выполняется в задании 4.)

3. Установить анализатор в скрещенное положение с поляризатором. Между ними вставить третий поляроид (номер 11) и, вращая его, наблюдать изменение интенсивности света, прошедшего через три поляроида.

Объяснить наблюдаемое явление. Считая поляроиды идеальными, рассчитать, при каком положении третьего поляроида интенсивность прошедшего света максимальна и чему она равна.

1.2. Двойное лучепреломление

При падении света на границу раздела диэлектриков, например, воздух - вода, воздух - стекло, вода - стекло под произвольным углом, отличным от нуля, обнаруживается изменение направления луча, его преломление. Угол « r » преломления связан с углом « i »

падающего известным соотношением $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$, где n_1 и n_2 - показатели преломления обоих

диэлектриков, причем $n = \frac{c}{v}$ есть отношение скоростей света в вакууме и данном диэлектрике,

зависящее от диэлектрической проницаемости ϵ вещества. При нормальном падении света на границу раздела диэлектриков преломленный луч распространяется по направлению падающего.

Однако существуют кристаллические диэлектрики, в которых явление преломления выглядит не так просто, и, на первый взгляд, имеет место нарушение закона преломления. Самым известным кристаллом с необычным преломлением является исландский шпат, представляющий собой кристаллизованный в виде гексагональной системы углекислый кальций. В природе этот минерал встречается в виде крупных и оптически чистых образцов, и до настоящего времени исландский шпат является достойным, хотя и не единственным, материа-

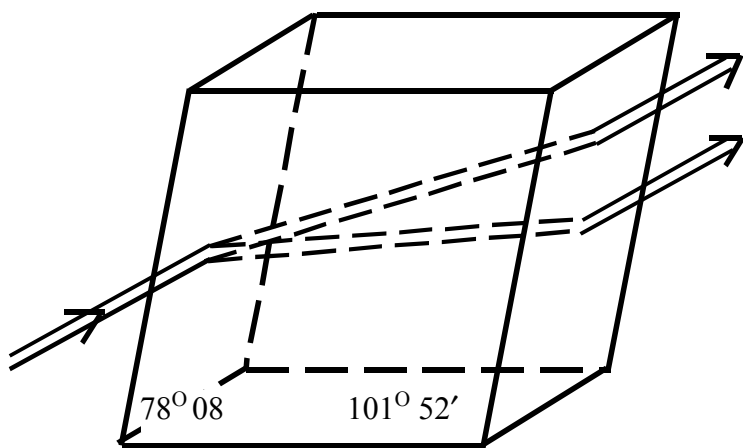


Рис. 9

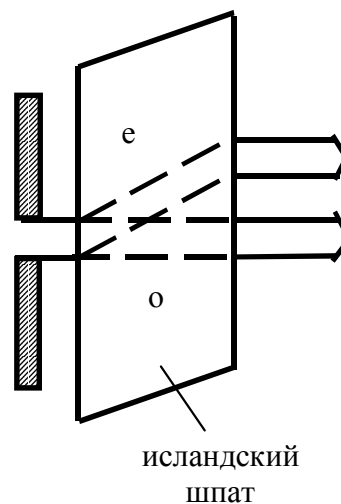


Рис. 10

лом для изготовления оптических приборов, использующих поляризацию света.

Кристалл исландского шпата можно обколоть в виде ромбоэдра. Ромбы, его ограничивающие, имеют углы $101^{\circ}52'$ и $78^{\circ}08'$ (рис. 9). При падении на такой кристалл светового пучка происходит образование двух преломленных пучков несколько различных направле-

ний распространения. Если кристалл достаточно толстый, а падающий пучок света узкий, то из кристалла выходят два параллельных первоначальному направлению пучка, пространственно разделенные. В силу такой особенности преломления кристаллы, подобные исландскому шпату, получили название двойкопреломляющих. Даже в том случае, когда пучок падает на грань кристалла по нормали (рис. 10), преломленный пучок разделяется на два, и один из пучков внутри кристалла отклоняется от первоначального направления света.

В частности, это отступление от обычного закона преломления дало повод назвать один из лучей обыкновенным (о), а отклоняющийся луч - необыкновенным (е). Отличие в отклонении лучей показывает, что они имеют различные показатели преломления, причем показатель преломления обыкновенного луча постоянен при всех углах падения, а для необыкновенного луча n_e зависит от направления: для $\lambda = 5893 \text{ \AA}$, $n_o = 1,658$, $1,486 < n_e < 1,658$ (исландский шпат).

Оба пучка, вышедшие из кристалла исландского шпата, оказываются полностью линейно-поляризованными, но плоскости колебаний векторов \vec{E} в обоих пучках перпендикулярны друг другу. На выходе из кристалла оба пучка совершенно идентичны, за исключением пространственной ориентации плоскостей колебаний, поэтому термины «обыкновенный» и «необыкновенный» применимы к пучкам света лишь внутри кристалла.

В кристалле исландского шпата существует одно определенное направление, вдоль которого оба преломленных пучка (луча) обладают одним и тем же показателем преломления, т. е. вдоль которого они распространяются, не раздваиваясь и с одной скоростью, как в обычной изотропной среде. Направление это составляет вполне определенные углы с ребрами естественного кристалла, и это направление принято называть оптической осью кристалла. Любая прямая, параллельная найденному направлению, является оптической осью кристалла. Через любую точку кристалла можно провести плоскость, проходящую через оптическую ось, такая плоскость называется главным сечением или главной плоскостью. Обычно главное сечение проводят через падающий световой луч.

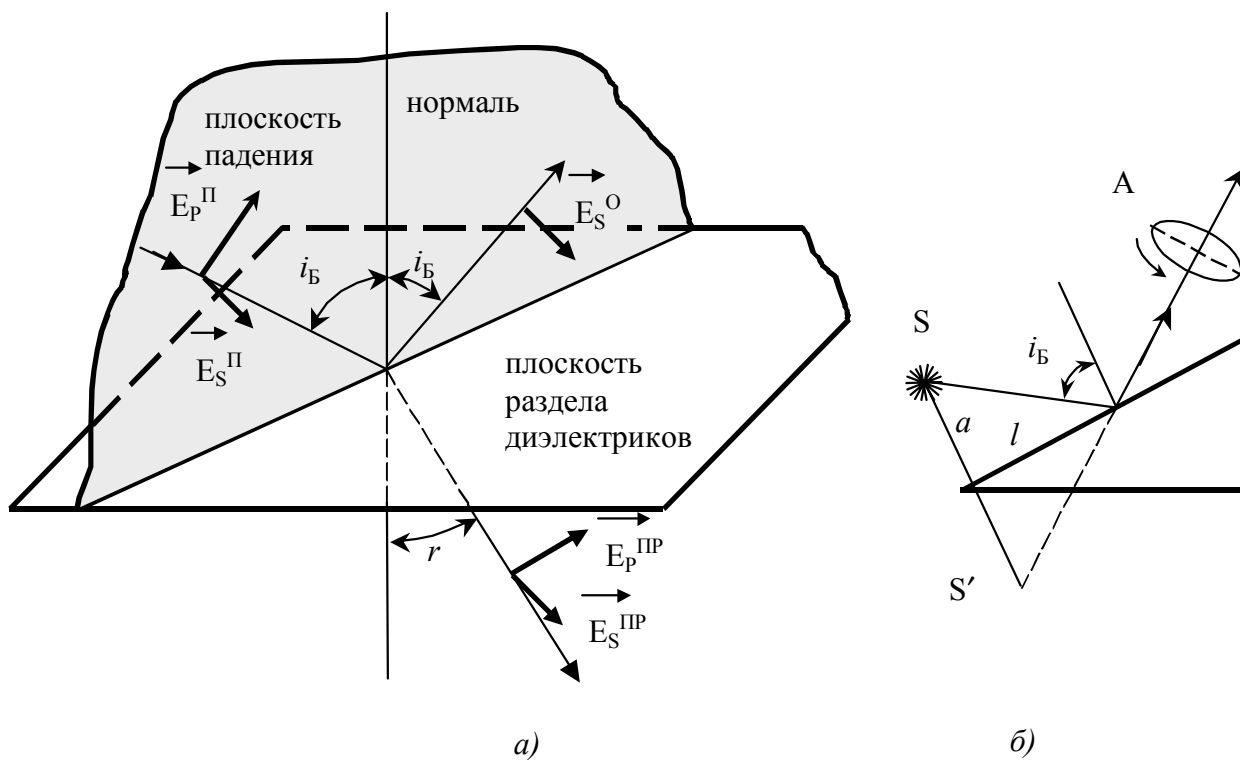


Рис. 11

Исследуя оба луча, вышедшие из двойкопреломляющего кристалла, с помощью пластинки турмалина или поляроида (анализатора), можно убедиться, что электрические коле-

бания обыкновенного луча происходят перпендикулярно к главной плоскости, а необыкновенного - лежат в главной плоскости.

Объяснение двойного лучепреломления в кристаллах с одной оптической осью было впервые дано Гюйгенсом и познакомиться с ним можно в [1,2]. На большом различии n_o и n_e основано применение исландского шпата для разделения лучей, поляризованных по взаимно перпендикулярным направлениям.

Задание 2.

В лабораторной установке двоякопреломляющий кристалл расположен между пластинами кассеты 14. При наблюдении прохождения света от обычного источника (лампа накаливания, люминесцентная лампа, солнечный свет) со стороны, противоположной той пластине, где сделано маленькое круглое отверстие, можно увидеть два световых пучка (пятна) одинаковой интенсивности (яркости). Детальное исследование прошедших кристалл пучков осуществляется на установке 1 (рис. 8), включающей в себя источник света Л, кассету с кристаллом и анализатор А.

Выполнение задания

1. Включить лампу в сеть 220 В.
2. Вставить кассету 14 с двоякопреломляющим кристаллом в держатели стойки направляющей 3 (рис.8).
3. Вращать анализатор. Описать наблюдаемую закономерность. (Изображение рассматривать через лупу).

1.3. Поляризация света при отражении и преломлении в изотропном диэлектрике

Получить линейно поляризованный свет можно не только используя кристаллы исландского шпата, турмалин или поляроиды. Малюс обнаружил, что отраженный от стекла свет поляризован, правда, при произвольном угле падения степень его поляризации $P < 1$, т. е. он представляет собой смесь линейно поляризованного света и естественного.

Меняя угол падения естественного света на плоскую границу стекла (или другого диэлектрика) можно найти такой угол падения (рис. 11а) $i = i_B$, при котором отраженный луч оказывается полностью поляризованным, причем колебания вектора \vec{E} лежат в плоскости, перпендикулярной плоскости падения, т. е. образованной падающим и отраженным лучами (в этой же плоскости находится и нормаль к границе раздела, проходящая через точку падения луча). Угол полной поляризации связан с относительным показателем преломления сред следующим соотношением (закон Брюстера):

$$\operatorname{tg}(i_B) = n_{21} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (5)$$

где

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin i}{\sin r} \quad (6)$$

Соотношение (6), называемое законом преломления, справедливо для любых углов падения. Из (5) и (6) следует, что при $i = i_B$ лучи отраженный и преломленный перпендикулярны друг другу. Анализ поляризации луча, распространяющегося во второй среде (рис. 11а), показал, что при любых углах падения преломленный луч частично поляризован, причем большую интенсивность имеет составляющая, в которой вектор \vec{E}^{pp} колеблется в плоскости падения, и наибольшей поляризации преломленный луч достигает при падении свет а на границу раздела диэлектриков под углом Брюстера.

Учитывая, что коэффициент отражения света на границе прозрачного диэлектрика мал, можно считать, что практического интереса для получения поляризованного света такой способ не представляет, да и степень поляризации проходящего света составляет $\approx 0,15$. Ес-

ли же преломленные лучи подвергнуть второму, третьему и т. д. преломлениям, то, конечно, степень поляризации преломленных лучей возрастет. При 8-10 пластинках обычного стекла при падении света под углом Брюстера (при $n_{ст} = 1,5$ $\varphi_B \cong 63^\circ$) и прошедший и отраженный свет практически становится вполне поляризованным, при этом интенсивности отраженного и прошедшего пучков будут равными между собой и составят (если не учитывать потерь на поглощение) около половины интенсивности падающего света. Плоскости колебаний пучков будут взаимно перпендикулярными. Такая группа пластинок (рис. 12) называется стопой и может служить поляризатором или анализатором.

Задание 3. Демонстрация поляризации света при отражении от диэлектрика

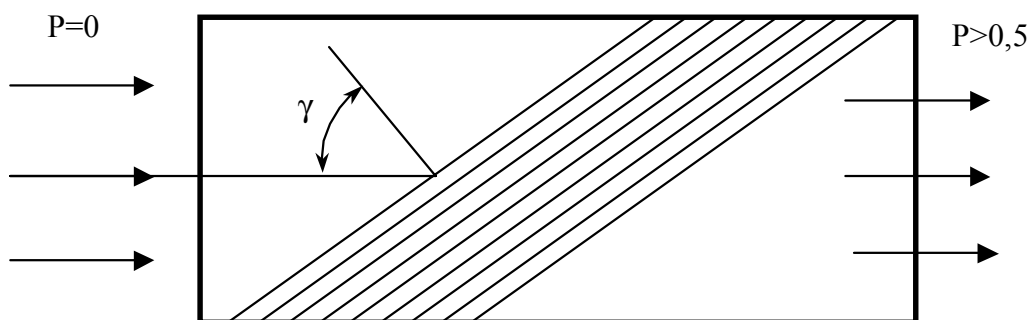


Рис. 12

Описание установки

В качестве протяженного источника естественного света используется люминесцентная лампа демонстрационного прибора 5. Свет от нее падает на полированную поверхность диэлектрика. Изображение горизонтально расположенного источника света в диэлектрическом зеркале можно наблюдать через поляририд.

Выполнение задания.

1. Включить лампу в сеть 220 В.
2. Меняя угол зрения, наблюдать горизонтальное мнимое изображение лампы в зеркале.
3. С помощью поляриоида найти такой угол наблюдения, при котором поворот поляриоида вокруг луча приводил бы к изменениям яркости частей лампы.
4. Объяснить, почему не вся длина изображения лампы при наблюдении ее через поляририд имеет одинаковую яркость, и изменения яркости при вращении поляриоида происходят по-разному в разных местах изображениях.

Задание 4. Изучение закона Малюса.

Описание установки

Задание выполняется на установке 2, разработанной на основе промышленного прибора поляриметра кругового СМ - 3 (рис. 13). На основании поляриметра закреплён корпус, в верхней части которого крепится головка анализатора, имеющая два окна для отсчёта угла поворота анализатора.

Вращение анализатора осуществляется специальной ручкой, связанной с лимбом, имеющим 360 градусную шкалу. Цена деления шкалы лимба $0,5^\circ$.

Отсчётное устройство углов поворота включает в себя два диаметрально расположенных нониуса с ценой деления $0,02^\circ$. При выполнении данного задания спектральная натриевая лампа как источник света ($\lambda = 589$ мм), расположенная в корпусе на задней части основания, не используется. Вместо неё применяется обычная лампа накаливания со сплошным спектром, располагаемая в кюветном отделении. Поляризация света осуществляется поляриридом (деталь 12), помещаемым между лампой и головкой анализатора в кюветное отделение. Анализ интенсивности света, прошедшего поляризатор и анализатор, возможен непосредственно

глазом, но для количественной проверки закона Малюса используется фотоэлектрический приёмник на основе сурьмяно-цезиевого вакуумного фотоэлемента (дет. 3), питающегося от выпрямителя напряжения (4), закреплённого на основании поляриметра. Пропорциональное току фотоэлемента напряжение регистрируется вольтметром (В7 - 22а или другим, с пределом измерения 0,2 В)

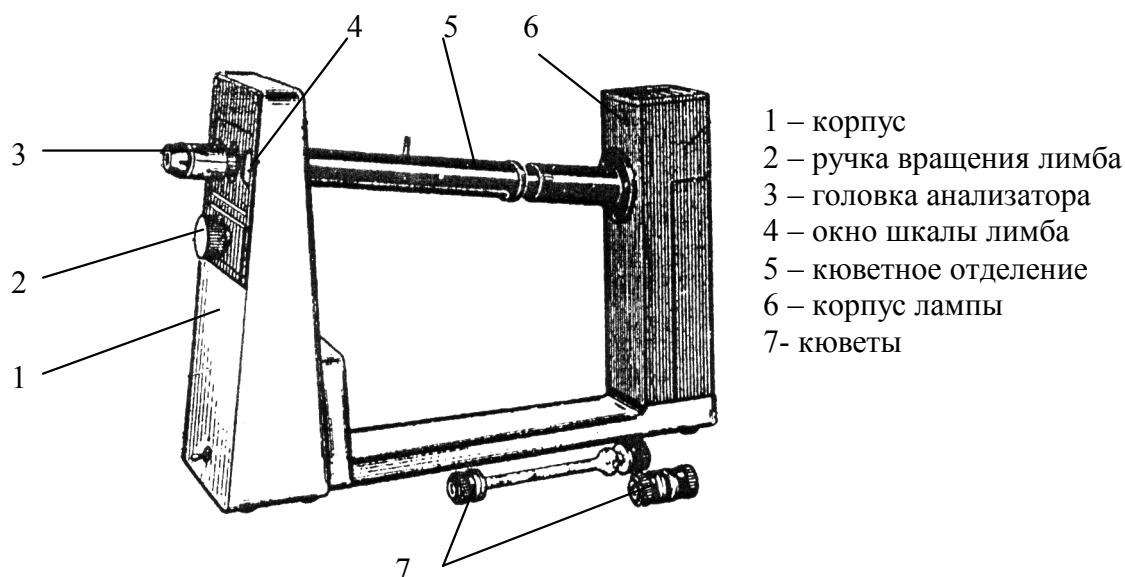


Рис. 13

Выполнение задания

1. Шкалу анализатора с помощью ручки вращения лимба установить на 90° .
2. В кюветное отделение перед осветителем положить поляризатор (дет. 12), на расстояние ≈ 5 см. от лампы.
3. Включить осветитель кнопкой на источнике питания и, поворачивая поляризатор вокруг оси, добиться наибольшего затемнения поля зрения.
4. Вращая анализатор на 90° в обоих направлениях, т.е. в пределах углов от 0° до 180° , убедиться в плавном просветлении поля зрения до максимального значения.
5. К окуляру анализатора приставить входное отверстие фотоэлектрического приёмника. Проверить подключение электрических цепей в соответствии со схемой, приведённой на панели блока питания (дет. 4) фотоприёмника. Включить вольтметр кнопкой на источнике питания, осветитель и источник питания фотоэлемента.
6. Поворачивая анализатор от 90° до 0° с шагом 10° , зафиксировать соответствующие этим углам значения напряжения. На миллиметровой бумаге построить график зависимости $\frac{U}{U_{max}} = f(\cos^2 \varphi)$, где φ - угловое положение плоскости анализатора, измеренное с помощью отсчётного устройства анализаторной головки. Линейный характер зависимости служит подтверждением справедливости закона Малюса (формула 2).

Задание 5. Измерение угла Брюстера.

Описание установки.

Для наблюдения поляризации света при отражении его от границы раздела воздух-диэлектрик используется установка 6, состоящая из диэлектрической площадки, для удобства наблюдения расположенной под некоторым углом к плоскости стола, и источника света в виде нитевидной лампы накаливания, яркость свечения которой можно изменять с помощью тумблера. Рядом с диэлектрической пластинкой находится измерительная линейка, а нить лампы расположена так, что ее изображение в отраженном свете параллельно штрихам ли-

нейки.

Выполнение задания.

1. Вставить в сетевую розетку вилку источника питания нитевидной лампы установки 6.
2. Включить проходной выключатель сеть на сетевом проводе установки и переключателем яркости лампы установить приемлемую яркость нити. Найти изображение нити в отражённом от верхней границы диэлектрика свете.
3. Используя поляроид (дет. 10) как анализатор, убедиться в том, что отражённый свет является поляризованным. Для этого, рассматривая отражение нити, вращать поляроид вместе с оправой вокруг оси отражённого пучка света. Найти положение поляроида при котором интенсивность отражённого света минимальна при данном направлении наблюдения. Проверить параллельность нити (или её изображения) линии, проведенной через две метки оправы поляриметра (это «след» плоскости наименьшего пропускания, плоскости, перпендикулярной плоскости поляризации).
4. Сохраняя положение плоскости поляризатора (или линии двух точек), изменить угол наблюдения отражения нити так, чтобы получить максимальное затемнение изображения нити. Не меняя направления наблюдения, убрать руку с оправой анализатора и заметить, против какого деления линейки расположено изображение нити лампы. Это значение представляет собой величину 1 в оптической схеме рис. 11б.
5. Замерив величину « a », найти значение угла Брюстера по формуле:

$$i_b = \arctg \frac{1}{a} \quad (7)$$

6. Оценить значение показателя преломления диэлектрика по формуле:

$$n_2 = n_1 \cdot \tg i_b, \quad (n_1 = 1 \text{ для воздуха}) \quad (8)$$

7. Опыт 5 проделать несколько раз (3 - 5) и оценить погрешность определения угла Брюстера.
8. Проверить работу в качестве поляризационного устройства набора из 10 тонких плоскопараллельных стеклянных пластинок («стопа», деталь 13). С этой целью на пути света от матовой лампы установки 1 поместить стопу 13 и подобрать её пространственное положение так (рис. 12), чтобы вращением анализатора установки можно было обнаружить изменение интенсивности проходящего света. Определить пространственное положение вектора \vec{E} в прошедшей волне, соответствующей максимальной интенсивности на выходе из анализатора и убедиться, что максимальную интенсивность в прошедшем свете имеют волны, вектор \vec{E} которых лежит в плоскости падения (см. замечание в «Задании 1»)

2. Вращение плоскости поляризации

Распространение света в кристалле в направлении оптической оси казалось бы не должно отличаться от распространения света в однородной среде, т. к. здесь не обнаруживается двойного лучепреломления. Однако на примере кристалла кварца было обнаружено, что при распространении света вдоль оптической оси пластинки осуществлялся поворот плоскости поляризации линейно поляризованного света. Кроме кварца способностью вращать плоскость поляризации обладают и другие кристаллические соединения, а также аморфные вещества. Все они называются оптически активными. В качестве примера веществ с естественной оптической активностью можно привести скипидар, камфору, никотин, раствор сахара, киноварь, биологические макромолекулы и др.

Положение плоскости поляризации принято определять относительно наблюдателя, смотрящего навстречу лучу. Если плоскость поляризации поворачивается веществом по часовой стрелке, то среда называется правовращающей, при повороте плоскости поляризации против часовой стрелки имеем дело с левовращающим веществом. Опыт показывает, что кварц встречается как право-, так и левовращающий, причем оба вида кварцев отличаются и по своей внешней кристаллической форме: одни из них являются зеркальным отображением другого.

Жидкие оптически активные среды также могут встречаться в двух модификациях ле-

во- и правовращающей.

Схема опыта для наблюдения вращения плоскости поляризации веществом изображена на рис. 14. Угол поворота плоскости поляризации с невысокой точностью определяется в результате двух установок на темноту: в отсутствии и в присутствии активного вещества. Меняя светофильтр Φ , можно обнаружить, что угол поворота плоскости поляризации для

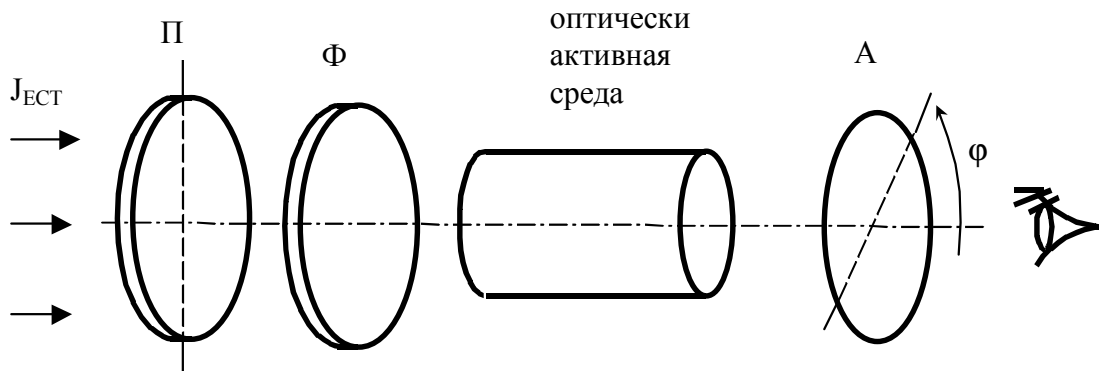


Рис. 14

разных длин волн различен, и коэффициента $\alpha \sim \frac{1}{\lambda^2}$. Поэтому для сравнения вращательной способности различных веществ измерения осуществляют на одной длине волны, обычно это 589 нм.

Для кристаллических веществ экспериментально было установлено, что $\varphi = \alpha \cdot l$, здесь l - длина оптически активной среды в направлении луча света.

На основе опытов, проведенных Био с растворами, установлено, что $\varphi = \alpha \cdot C \cdot l$, где α - постоянная вращения, удельная вращательная способность, зависящая от рода вещества, длины волны $\alpha \sim \frac{1}{\lambda^2}$ и температуры; C - концентрация раствора, а l - длина пути света в растворе.

Подобные опыты лежат в основе метода определения концентрации оптически активного вещества по углу поворота плоскости поляризации. В частности, таким методом пользуются для нахождения концентрации сахара в производственных растворах и биологических объектах (кровь, моча). Для достижения высокой точности измерений используются специаль-

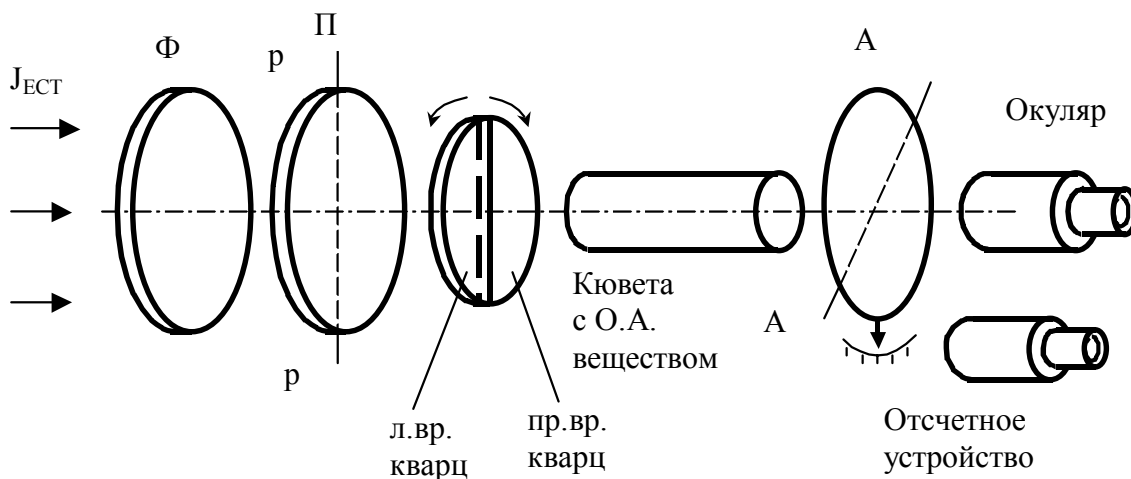


Рис. 15

ные устройства - полутеневые анализаторы, работающие следующим образом (рис. 15). Свет от источника проходит через оптическую систему, содержащую светофильтр, поляризатор и

пластинку, склеенную из лево- и правовращающего кварцев. Плоскость склейки находится на оптической оси установки, совпадает с плоскостью РР поляризации света, вышедшего из поляризатора и делит поле зрения на две половины - левую и правую (для наблюдателя). Направление АА анализатора перпендикулярно направлению РР. Если между кварцевой пластинкой и анализатором находится раствор, не обладающий способностью вращать плоскость поляризации (например, дистиллированная вода), то яркости левой и правой частей поля зрения одинаковы (рис. 16а), поскольку $J_L = J_{II} = J_P \cdot \cos^2\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) = J_P \cdot \sin^2 \gamma$

γ - это равные углы, на которые в обе стороны от направления РР поворачиваются плоскости поляризации лучей, идущих в левой и правой половинах пучка света. Обычно $\gamma = (3 - 4)^\circ$, поэтому яркости обеих частей поля зрения малы, но при этом одинаковы (случай «а», рис 16).

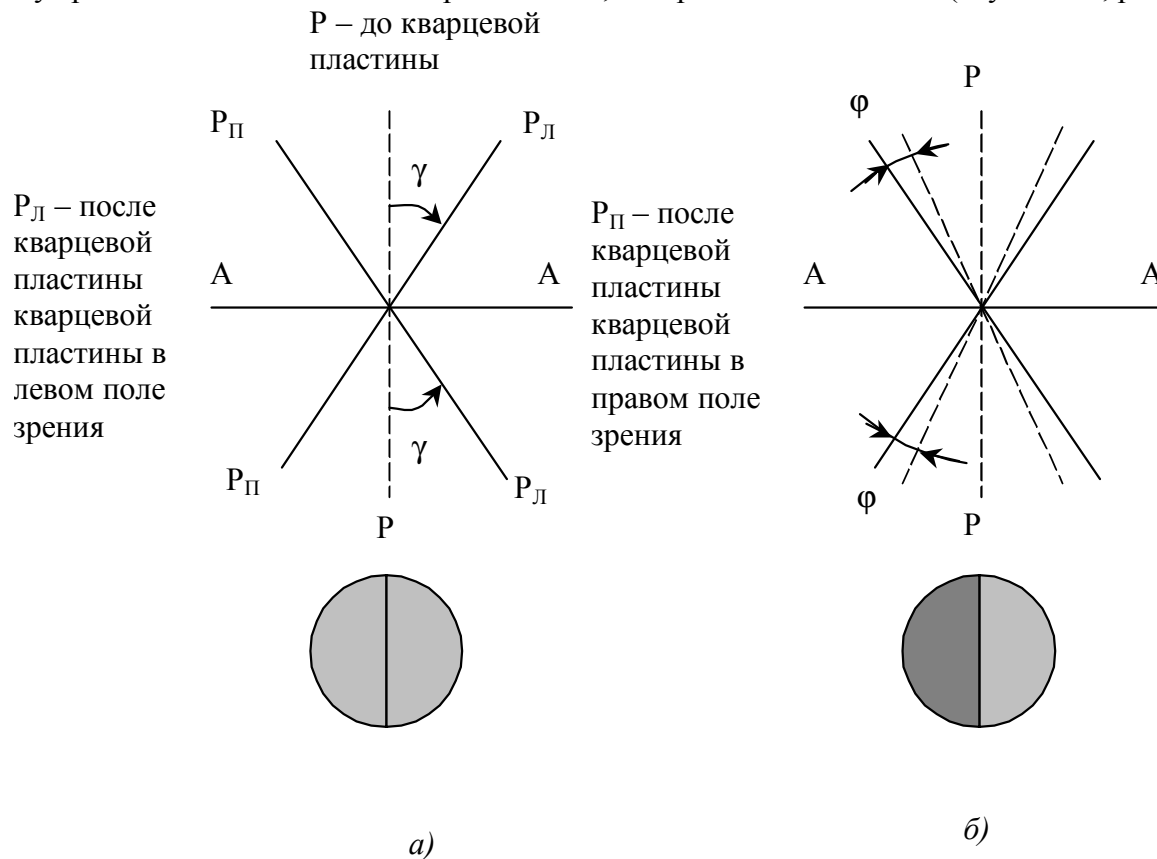


Рис. 16

Если между кварцевой пластинкой и анализатором ввести оптически активный раствор, поворачивающий плоскость поляризации на угол φ , то, как видно из рис. 16б, равенство яркостей частей поля зрения нарушится: $J_L = J_P \cdot \sin^2(\gamma - \varphi)$; $J_{II} = J_P \cdot \sin^2(\gamma + \varphi)$. Даже при малых углах φ разность J_L и J_{II} очень заметна на глаз, и для восстановления одинаковой яркости частей поля зрения необходим поворот анализатора на угол φ , регистрируемый отсчетным устройством, в направлении поворота плоскости поляризации раствора. Полутеневые анализаторы позволяют измерять угол поворота плоскости поляризации с точностью $\approx 0,01^\circ$.

Оптическую активность можно искусственно вызвать у веществ, которые в естественном состоянии ею не обладали. Так, Фарадеем было обнаружено явление вращения плоскости поляризации под действием магнитного поля. Свет при этом должен распространяться вдоль направления намагниченности вещества.

Классическая молекулярная теория оптической активности впервые была разработана М. Борном (1915 г.), который показал, что необходимо учитывать взаимодействие электро-

магнитного поля с веществом в пределах одной молекулы, электроны которой взаимодействуют между собой. При построении теории принималось во внимание, что все оптически активные вещества существуют в двух модификациях (лево- и правовращающих) и рассматривались сложные асимметричные молекулы с пространственной структурой, не имеющие ни центра симметрии, ни плоскости симметрии. Наиболее простой моделью такой молекулы является отрезок спирали.

Задание 6. Наблюдение явления вращения плоскости поляризации (демонстрация)

Описание установки.

При выполнении задания используется установка 1, на которой располагаются два поляроида (поляризатор и анализатор). Источником света служит матовая лампа. Для наблюдения явления предлагаются две кюветы с прозрачными торцами, заполненные растворами сахара различной концентрации и одна кювета с дистиллированной водой

Выполнение задания:

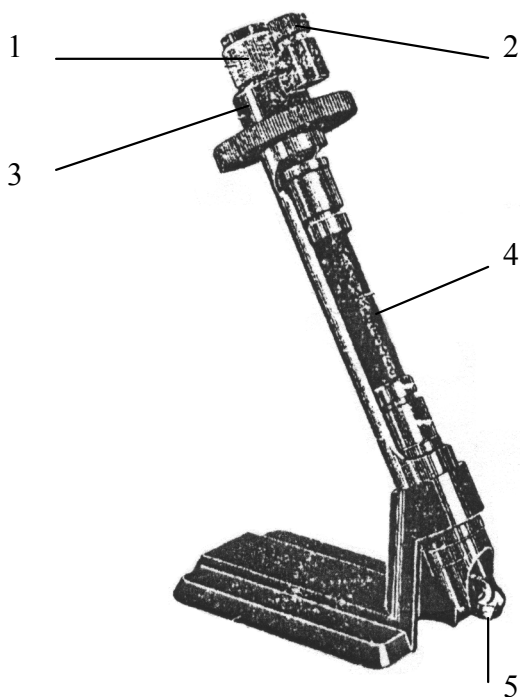
1. Вставить красный светофильтр в направляющие 2.
2. Включив источник света, повернуть анализатор в такое положение, при котором наблюдается наибольшее затемнение (скрещенные поляроиды).
3. Помещая на пути света в пространство между поляризатором и анализатором кювету с водой, убедиться, что просветления не наступает, т. е. дистиллированная вода не является оптически активной жидкостью.
4. Заменяя кювету с водой кюветой с раствором сахара, наблюдать изменение степени затемнения, и, вращая анализатор, грубо оценить угол, на который раствор поворачивает плоскость поляризации. Отметить направление вращения плоскости поляризации. Повторить опыт с синим светофильтром, а также с белым светом.

Задание 7. Измерение концентрации сахара

Описание установки

Используется портативный поляриметр П-161М, изображенный на рис. 17.

Выполнение задания



Поляриметр П 161М
1-Оправа окуляра
2-Отсчетная лупа
3-Головка анализатора
4-Трубка для растворов
5-Зеркало

Рис. 17

1. Подготовить прибор к измерениям. Перемещением окуляра зрительной трубки получить резкое изображение линии раздела поля зрения. Вращением анализатора добиться того, чтобы части поля были уравнены при минимальных яркостях.

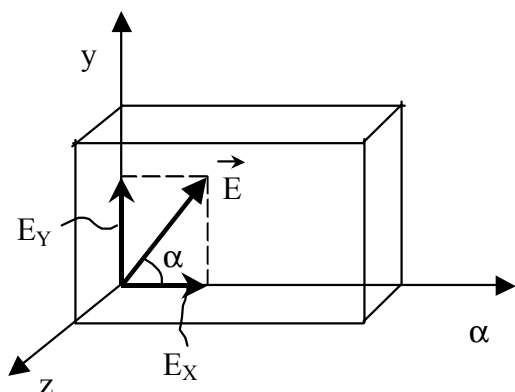


Рис. 18

2. Определить нулевой отсчет. При отсутствии трубки (кюветы) с раствором 3-5 раз настроиться на равенство яркостей частей поля зрения, каждый раз определяя показания по нониусу. Среднее значение из этих отсчетов является нулевым отсчетом прибора.

3. В соединительную трубку прибора поместить кювету с раствором сахара известной концентрации и установить окуляр на резкое изображение разделяющей линии поля зрения. Поворачивая анализатор, установить равенство яркостей частей поля зрения и определить по отсчетному устройству угол. Измерения повторить 3-5 раз и получить среднее значение угла с точностью $0,1^\circ$.

4. Из полученного среднего значения вычесть нулевой отсчет. Разность отсчетов представляет собой величину угла φ_Δ поворота плоскости поляризации оптически активной жидкости с известной концентрацией C_Δ .

Помещая в соединительную трубку поляриметра кювету такой же длины с раствором сахара неизвестной концентрации C_X , определить угол φ_X по результатам 3-5 измерений. Рассчитать концентрацию неизвестного раствора по формуле:

$$C_X = \frac{\varphi_X}{\varphi_\Delta} \cdot C \quad (9)$$

3. ПОЛУЧЕНИЕ И АНАЛИЗ ЭЛЛИПТИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА (задания 8, 9).

Эллиптически поляризованный свет получают из линейно поляризованного, пропускаемая его через двоякопреломляющую кристаллическую пластинку. Пластинка осуществляет сдвиг фаз ортогональных компонент.

В данной работе используются кристаллы слюды. В плоскости пластинки слюды имеются два взаимно перпендикулярных главных направления обозначенные на рис.18 осями x и y; они определенным образом связаны с кристаллической решеткой. Линейно поляризованные волны с направлением колебаний параллельно оси x и параллельно оси y распространяются в слюде с различными скоростями V_X и V_Y . Следовательно, для этих волн слюда имеет различные показатели преломления $n_X = c/V_X$ и $n_Y = c/V_Y$, где c - скорость света в вакууме. Для красного света с колебаниями, параллельными оси x (т.е. света, распространяющегося в кристалле быстрее), показатель преломления равен $n_X = 1,5908$, а для света с колебаниями вдоль оси y (т.е. света, распространяющегося в кристалле медленнее), он равен $n_Y = 1,5950$.

Направим на пластинку монохроматическую линейно поляризованную волну, электрический вектор \vec{E} которой ориентирован под некоторым углом α к оси x (рис.18). Разложим вектор \vec{E} на составляющие \vec{E}_X и \vec{E}_Y . На входе пластинки E_X и E_Y находятся в фазе. На выходе между ними появляется сдвиг фаз, возникающий из-за различия скоростей V_X и V_Y и определяемый соотношением

$$\delta = (2\pi / \lambda_0) \cdot d \cdot (n_Y - n_X) \quad (10)$$

где d - толщина слюды, λ_0 - длина волны света в вакууме.

Таким образом, на выходе пластинки получаем две ортогональные когерентные линейно поляризованные волны, сдвинутые по фазе. Как отмечалось во Введении, такие волны образуют эллиптически поляризованную волну, а при некоторых разностях фаз δ - ее частные слу-

чаи: циркулярную и линейную поляризации.
Рассмотрим некоторые важные случаи.

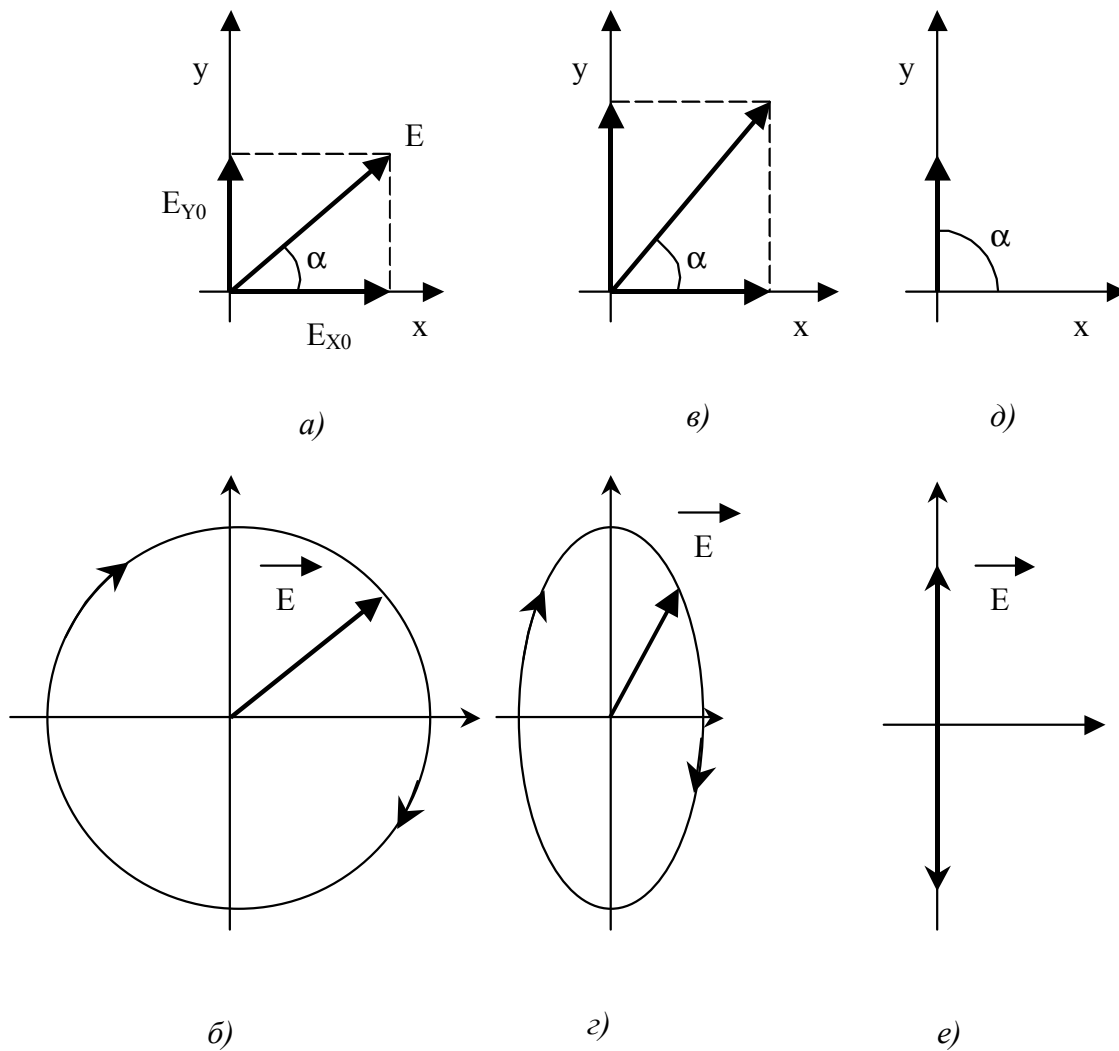


Рис. 19

а) Пластика создает сдвиг фаз $\delta = \pi/2$; она называется пластиной в четверть длины волны ($\lambda/4$). Согласно (10), толщина слюды должна быть $d = 38$ мкм для красного света с $\lambda_0 = 0,65$ мкм и несколько меньше для зеленого или синего света. Получаемая поляризация будет зависеть от ориентации вектора \vec{E} относительно главных направлений пластинки (осей x и y). Рассмотрим три основных случая для сдвига фаз $\pi/2$.

а1) Пусть вектор \vec{E} линейно поляризованной волны составляет угол $\alpha = 45^\circ$ с осью x (рис.19, а). В этом случае амплитуды ортогональных компонент одинаковы: $E_{0x} = E_{0y}$. Волна, прошедшая через пластинку, имеет циркулярную поляризацию (рис.19,б). Если $\alpha = -45^\circ$, то волна также будет циркулярной, но с противоположным направлением вращения.

а2) Пусть угол α имеет значение, при котором амплитуды ортогональных компонент различны. При этом получаем эллиптическую поляризацию (рис.19,в,г.).

а3) Рассмотрим случай, когда направление колебаний в падающей на пластинку волне совпадает с одним из главных направлений, например, $\alpha = 90^\circ$ (рис.19,д). В этом случае одна из двух ортогональных компонент отсутствует ($E_{0x} = 0$). Волна, прошедшая через пластинку, остается линейно поляризованной в той же плоскости, что и перед пластинкой (рис. 19, е).

Таким образом, с помощью пластинки в четверть длины волны из линейно поляри-

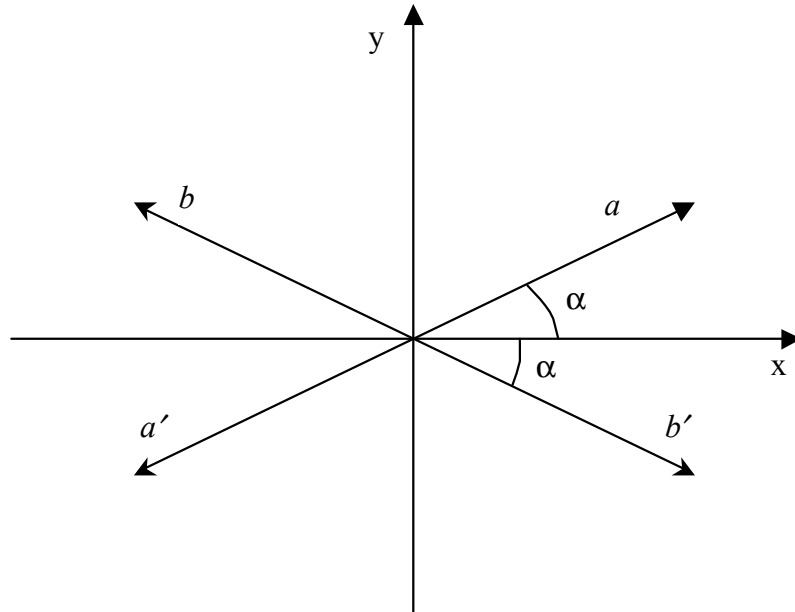


Рис. 20

ванного света можно получить свет с различной поляризацией - эллиптической или циркулярной, а также оставить поляризацию неизменной.

б) Пластика дает сдвиг фаз π (пластинка в $\lambda/2$). На выходе пластинки снова образуется линейно поляризованная волна, направление bb' колебаний которой повернуто относительно направления aa' колебаний падающей волны (рис.20). Такую пластинку используют для по-

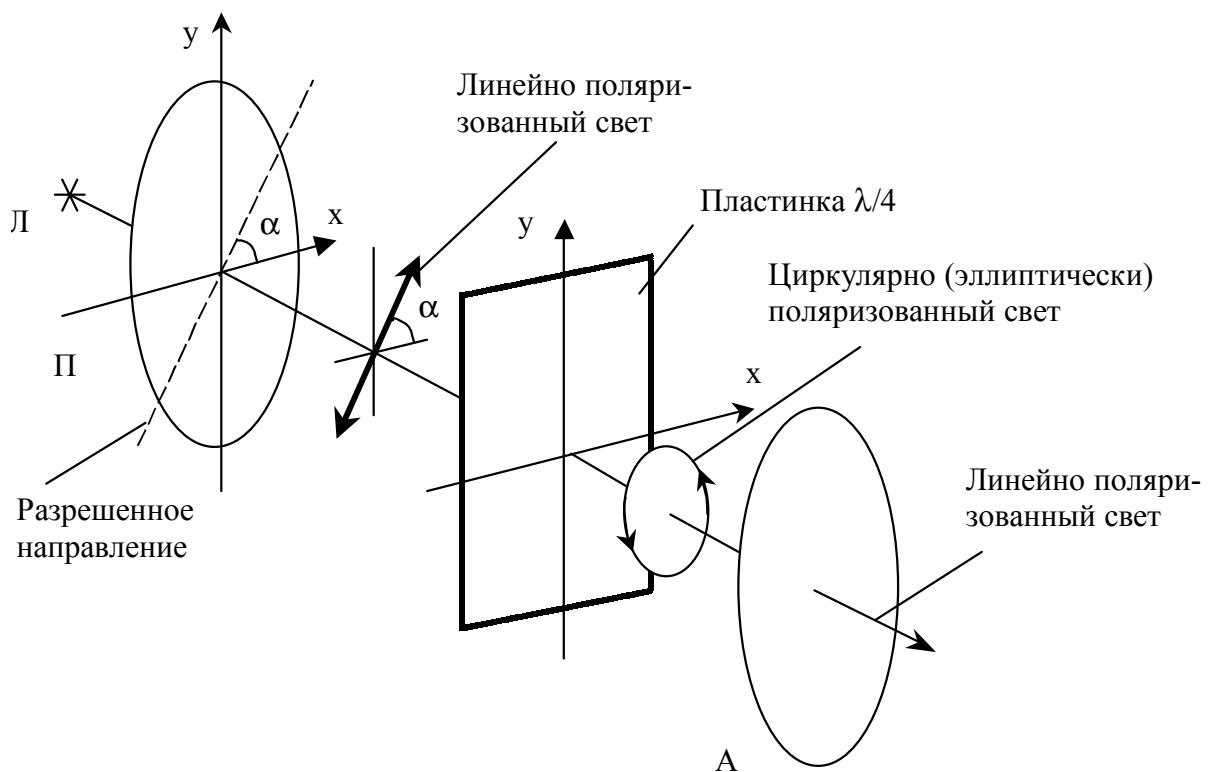


Рис. 21

ворота направления колебаний линейно поляризованной волны.

Задание 8. Получение и анализ света с эллиптической и круговой поляризацией.

Оптическая схема установки для получения и визуального анализа эллиптически поляризованного света показана на рис.21. Она состоит из лампы Л, двух поляроидов (поляризатора П и анализатора А) и пластинки в $\lambda/4$.

Пластинка в $\lambda/4$ представляет собой листочек слюды толщиной примерно 35-40 мкм, помещенный между двумя защитными стеклами 50x50 мм. Главные направления в слюде (оси x и y на рис.18) мало отличаются от направления сторон защитных стекол; поэтому, когда пластинку вставляют в прибор, ее главные направления будут близки к горизонтальному (вертикальному) направлениям.

1. Собрать установку по схеме на рис.21. Для этого в направляющие 1 прибора 1 (рис.8) вставить поляризатор (поляроид номер 10), а в направляющие 2 - пластинку в $\lambda/4$.
2. Для получения циркулярно поляризованного света установить поляризатор в положение, когда линия двух точек составляет угол 45° с вертикалью. В этом случае на пластинку в $\lambda/4$ падает линейно поляризованный свет с направлением светового вектора под углом 45° к главным направлениям пластинки (рис. 19 а, б).
3. С помощью анализатора убедиться, что свет стал циркулярно поляризованным. При вращении анализатора интенсивность прошедшего света не изменяется.
4. В действительности наблюдается небольшое изменение яркости лампы и ее окраска. Объясняется это тем, что пластинка в $\lambda/4$ создает сдвиг фаз в $\pi/2$ для света определенной длины волны (а не белого света). Повторите анализ света, используя различные цветные светофильтры, имеющиеся в наборе. Светофильтр вставить в направляющие 3 или держать перед глазом. Отметить в отчете, для какого цвета поляризация наиболее близка к циркулярной.
5. Если и со светофильтрами интенсивность света немного изменяется, то это означает, что вектор \vec{E} не составляет с осями x и y точно угол 45° . Поверните поляризатор на несколько градусов в ту или другую сторону от прежнего положения и повторите, опыты п.4.
- б. Получить эллиптически поляризованный свет. Для этого линия двух точек поляризатора должна составлять с вертикалью (или горизонталью) небольшой угол. Подобный случай рассмотрен на рис.19 в,г. Интенсивность прошедшего через анализатор света будет изменяться при его вращении: наибольшая интенсивность будет при совпадении разрешенного направления анализатора с большой осью эллипса, наименьшая - при совпадении с малой осью.
7. Когда линия двух точек совпадает с вертикалью (или горизонталью), свет, прошедший через пластинку, остается линейно поляризованным и может быть погашен анализатором (см. рис.19,е,д).

Примечание: поскольку главные направления слюды могут не совсем точно совпадать с вертикалью и горизонталью, следует опытным путем подобрать необходимое положение поляризатора, изменяя направление линии двух точек в пределах нескольких градусов около вертикали (или горизонтали).

Задание 9. Отличить естественный свет от циркулярно поляризованного.

Пусть имеются два источника света - неполяризованный и циркулярной поляризации. Если их рассматривать через поляроид, то при его вращении интенсивность света в обоих случаях не изменяется. Как отличить эти источники? Для этого сделайте следующий опыт.

1. Получите циркулярно поляризованный свет (см. п.п.2,3 задания 8).
2. Между пластинкой в $\lambda/4$ и анализатором поставьте вторую пластинку $\lambda/4$. Две четверть волновые пластинки создают сдвиг фаз ноль или π (объясните это). Поэтому на выходе из второй пластинки выйдет линейно поляризованный свет, и при вращении анализатора его можно погасить. Проведите этот опыт.
3. Ничего подобного не происходит с естественным светом. Такой свет остается не поляризованным после прохождения четверть волновой пластинки. Проверьте это следующим об-

разом. Снимите поляризатор и одну пластинку в четверть длины волны. Теперь естественный свет проходит через пластинку в $\lambda/4$ и анализатор. Проверьте, изменяется ли интенсивность света при вращении анализатора. Повторите опыт при других ориентациях четверть волновой пластинки.

4. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА (задание 10)

Тонкие двоякопреломляющие пластинки, помещенные между поляроидами, кажутся окрашенными. Эта окраска может быть истолкована как результат интерференции поляризованных лучей. На рис.22 представлена схема для случая скрещенных поляроидов.

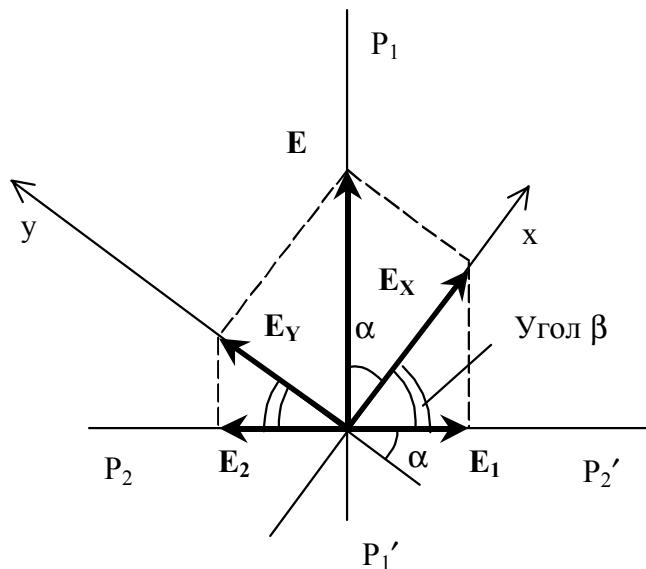


Рис. 22

Здесь P_1P_1' - разрешенное направление колебаний поляризатора (первого поляроида); P_2P_2' - разрешенное направление колебаний анализатора (второго поляроида); x, y - координатная система, связанная с главными направлениями двоякопреломляющей пластинки.

После поляризатора электрический вектор \vec{E} колеблется вдоль линии P_1P_1' . Его можно разложить на две ортогональные компоненты E_x и E_y , которые когерентны, но не могут интерферировать в силу ортогональности. Волны E_1 и E_2 на выходе второго поляроида также когерентны и к тому же поляризованы в одной плоскости. Эти волны интерferируют между собой.

Результат интерференции определяется зависящим от длины волны и толщины пластинки сдвигом фаз между E_1 и E_2 . В результате интерференции поляризованных лучей пластинка, освещаемая белым светом, кажется окрашенной. Поясним появление окраски. Если в результате интерференции будут погашены волны, например, красной части спектра, то прошедший свет будет голубым.

Из прямоугольных треугольников на рис.22 следует, что $E_1 = E_2 = 1/2 E \cdot \sin 2\alpha$. Если поворачивать двоякопреломляющую пластинку, расположенную между скрещенными поляроидами, то разность фаз между волнами E_1 и E_2 не изменяется, а изменяются только амплитуды волн E_1 и E_2 . Это означает, что цвет пластинки при ее поворотах не изменяется, а изменяется только интенсивность света. За один оборот пластинки интенсивность четыре раза обращается в нуль; это происходит при совпадении главных направлений x и y с разрешенными направлениями колебаний поляроидов.

Задание 10. Наблюдение интерференции поляризованного света.

Интерференцию наблюдают в пленке «скотч», обладающей двойным лучепреломлением. Пленка наклеена на стеклянную пластинку 50x50 мм в один слой на одной половине пластинки и в два слоя - на другой (принадлежность 16).

1. Опыт проводится на установке 1 с двумя поляроидами. Сначала установите анализатор в положение гашения света. Затем пластинку с пленкой держите между двумя поляроидами параллельно плоскости поляроидов. Пленка приобретает окраску, разную для различной толщины пленки. Вращая пластинку вокруг луча света, можно наблюдать изменение яркости без изменения окраски.
2. Второй опыт, объяснение которого найдите самостоятельно или в учебнике [1,2], заключается в следующем. Пластинку держите неподвижно между поляроидами и вращайте анализатор. При повороте анализатора цвет пластинки изменяется на дополнительный.
3. Многие пластмассовые предметы, например, линейки, пленка целлофана, дают красивые интерференционные картины, если их поместить между поляроидами.

5. ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ (задание 11)

Во многих прозрачных оптически изотропных материалах (стекло, пластмассы) под действием механической нагрузки и деформации возникает искусственное временное двойное лучепреломление. Мерой возникающей оптической анизотропии служит изменение показателей преломления волн с колебаниями вдоль главных направлений. Это изменение зависит от напряжения (силы на единицу площади) в данной точке.

Изготовленная из прозрачного изотропного материала модель какой-либо детали или конструкции помещается между скрещенными поляроидами. Пока модель не деформирована, такая система света не пропускает. Если же модель подвергнуть деформации, свет через модель начинает проходить, причем наблюдаемая в прошедших лучах картина состоит из светлых, темных или цветных полос. Разработаны методики, которые позволяют из наблюдаемой картины определить распределение напряжений, а также судить об их величине.

Такой экспериментальный метод исследования напряженно-деформированного состояния элементов машин и конструкций на прозрачных моделях называется поляризационно-оптическим методом исследования напряжений (метод фотоупругости) и рассмотрен в специальной литературе [3].

ЗАДАНИЕ 11. НАБЛЮДЕНИЕ КАРТИНЫ ПОЛОС ПРИ ДЕФОРМАЦИИ ДЕТАЛЕЙ.

Наблюдения выполняют на установке 1 с двумя поляроидами в скрещенном положении. Первый поляроид (поляризатор) установить в положение, при котором линия двух точек составляет угол 45° с вертикалью. Второй поляроид (анализатор) повернуть до затемнения лампы. Исследуемые детали помещать между поляроидами.

а) Деформацию изгиба наблюдают на небольшой пластинке из плексигласа (оргстекла), к концам которой прикреплены ручки (принадлежность 17а). Держите пластину вертикально между поляроидами. В недеформированном состоянии свет через пластину не проходит. Сдавите ручки, при этом один край пластины вдоль длинной стороны растягивается, а другой - сжимается. Зарисуйте наблюдаемую картину полос.

б) Деформацию кручения наблюдают на длинной тонкой полоске из оргстекла. Зарисуйте наблюдаемую картину.

в) Пластмассовая модель (например, двутавровой балки) помещена в кассету и может подвергаться сжатию, с помощью винта (деталь 17в). Отверните винт настолько, чтобы не было деформации. (При этом может наблюдаться просветление детали, обусловленное остаточной деформацией.) При сжатии наблюдаются разноцветные полосы, каждой из которых соответствует определенное напряжение.

6. ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ

В конце 19 века австрийский ученый Ф. Рейнитцер обнаружил, что исследуемое им вещество, холестерилбензоат, плавился как бы в две стадии: сначала образовывалась мутная жидкость, а при дальнейшем нагревании - прозрачный расплав. Мутная жидкость при наблюдении в поляризационный микроскоп, выглядевшая как двухфазная система, представляла собой промежуточное состояние между истинно твердым и истинно жидким, и свойства ее сочетали как свойства кристаллов (анизотропия оптических свойств), так и свойств жидкостей (текучесть, поверхностное натяжение). В силу таких особенностей подобные вещества были названы жидкими кристаллами.

Жидкие кристаллы играют большую роль в жизненных процессах, они входят в состав мышечных тканей, мозга, нервов. В исследовании жидких кристаллов наблюдался длительный период застоя, однако с середины 60-х годов начинается бурное развитие работ по применению жидких кристаллов в электронике, оптике и приборостроении. В частности, микроэлектроника давно испытывала острую нужду в экономичных и дешевых цифровых и буквенных индикаторах. Оказалось, что тонкий слой жидкого кристалла, помещенный в соответствующую ячейку с прозрачными электродами, с успехом решает такую задачу. Жидкие кристаллы являются подходящими материалами и для регистрации ИК и СВЧ излучений. В настоящей лабораторной работе мы познакомимся с работой жидкокристаллического знакового индикатора для дисплеев микрокалькуляторов, часов и т. п.

В зависимости от внутреннего строения жидкие кристаллы разделяют на три класса: нематический, смектический, холестерический.

Наиболее простая разновидность жидких кристаллов - нематики – образуется длинными нитевидными молекулами. В жидкокристаллическом состоянии молекулы взаимно параллельны, но беспорядочно сдвинуты вдоль своих осей.

В смектических жидких кристаллах степень упорядоченности выше, молекулы сгруппированы в слои, внутри слоя сохраняется их параллельная ориентация. Между слоями взаимодействие ослаблено, поэтому смектики на ощупь мылоподобные, скользкие.

Наиболее сложно устроены холестерики. Их молекулы также вытянуты, но на конце имеют отросток из нескольких атомов, торчащих сбоку. Из-за выступающих частей молекул при их упаковке происходит закручивание структуры.

Для того, чтобы вещество проявляло себя как жидкий кристалл, необходима не только вытянутая форма молекул, но и специфический характер сил молекулярного взаимодействия. Жидкокристаллическое состояние существует в определенном для каждого вещества интервале температур. Он может быть и очень малым ($\Delta T \approx 0,01$ К) и достаточно широким ($\Delta T \approx 100$ К). Температуры перехода из твердого в жидкокристаллическое состояние различны: от -20°C до $+400^\circ\text{C}$.

В устройствах отображения информации применяются нематические жидкие кристаллы. Обычно ориентация молекул нематика распространяется не на весь объем вещества, а лишь на небольшие его области - домены. На границе раздела доменов происходит изменение направления ориентации молекул и связанное с этим изменение показателя преломления. Здесь происходит отражение и преломление света, а так как домены малы, то нематики оказываются мутными, малопрозрачными.

Существуют способы сделать нематическую жидкость однодоменным и, следовательно, прозрачным кристаллом. Один из них заключается в том, что внутренние поверхности стеклянных пластин, между которыми удерживается нематик, легко полируют, протирая стекло шерстяной тканью в выбранном направлении. При этом на стекле образуются микроборозды глубиной и шириной в десятки нанометров. Длинные молекулы нематического жидкого кристалла укладываются в эти бороздки, ориентируя и остальные молекулы. Чтобы влияние бороздок было достаточным, зазор между пластинами не превышает 0,1 мм. Если пластинки стекла с бороздками повернуть относительно друг друга на 90° вокруг оси, перпендикулярной их плоскости, то ориентация молекул в ближайших к пластинам слоях окажется взаимно перпендикулярной, а молекулы в объеме пленки из нематика, равняясь на

молекулы, лежащие в углублениях борозд, совершат постепенный плавный разворот на 90° . В итоге структура нематика окажется закрученной («твист»-структура).

Такая среда является оптически активной и может осуществить поворот плоскости поляризации проходящего через нее линейно поляризованного света. В жидкокристаллической ячейке, используемой как индикатор, снаружи стеклянных пластин помещают прозрачные пленочные поляроиды со скрещенными направлениями разрешенных колебаний вектора \vec{E} .

Если слой нематика с закрученной структурой поворачивает плоскость поляризации на 90° , то такая конструкция будет прозрачной для света. Вытянутые молекулы нематика обладают заметным дипольным моментом, поэтому легко ориентируются по направлению электрического поля, которое можно создать в пространстве между стеклянными пластинками. Для этой цели на наружные поверхности стекол наносят прозрачное проводящее покрытие (электроды) из двуокиси олова или окиси индия в форме сегментов цифры или буквы, на которые подается напряжение. Полярность напряжения не играет роли, можно подключать к электродам и переменное напряжение. Достоинством нематических жидких кристаллов является способность полностью ориентироваться по полю во всем объеме при низких напряжениях (1-5 В). Схема устройства и принципа действия жидкокристаллической ячейки приведена на рис. 23.

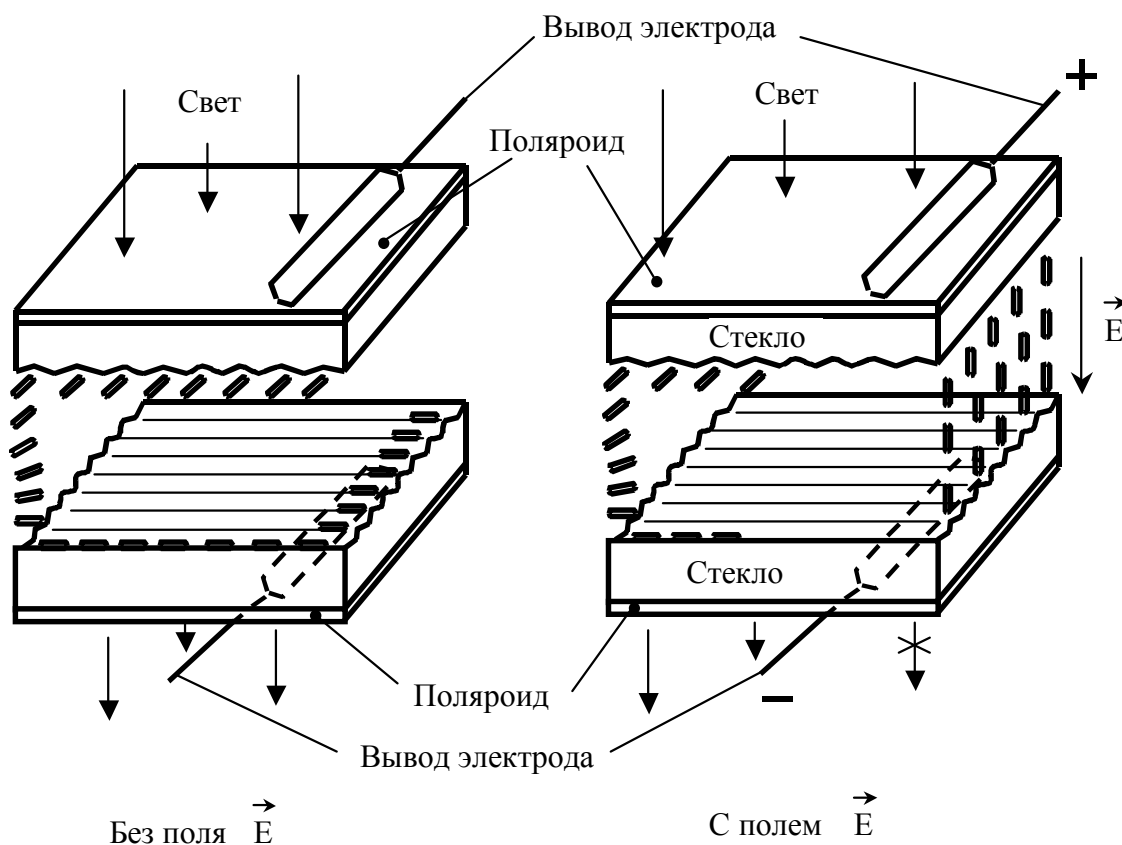


Рис. 23

Задание 12. Ознакомиться с работой жидкокристаллического индикатора.

Элементы индикатора на жидких кристаллах заключены в круглую пластмассовую кассету с разъемами для подключения переменного напряжения (прибор №8). Индикатор работает в проходящем свете. При отсутствии электрического поля в объеме нематика, заключенного между стеклянными пластинами (выключено напряжение питания кассеты), ячейка полностью прозрачна.

Включив трансформатор, питающий низким напряжением $0 < U < 5\text{В}$ электроды жид-

кокристаллической ячейки, можно увидеть непрозрачные символы, причем контраст изображения зависит от величины напряжения, регулируемого потенциометром на блоке питания.

Зарисовать темные символы жидкокристаллической ячейки.

7. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА. ДЕПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

(Задания 13, 14)

1. В газовом (гелий-неоновом) лазере излучение многократно проходит через стеклянные окна под углом Брюстера ("окна Брюстера"). При этом компонента, поляризация которой перпендикулярна плоскости падения, частично отражается и частично проходит. После большого числа проходов через окна 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. В конечном итоге половина света пропадает, а вторая половина выходит из лазера полностью линейно поляризованной (рис.24).

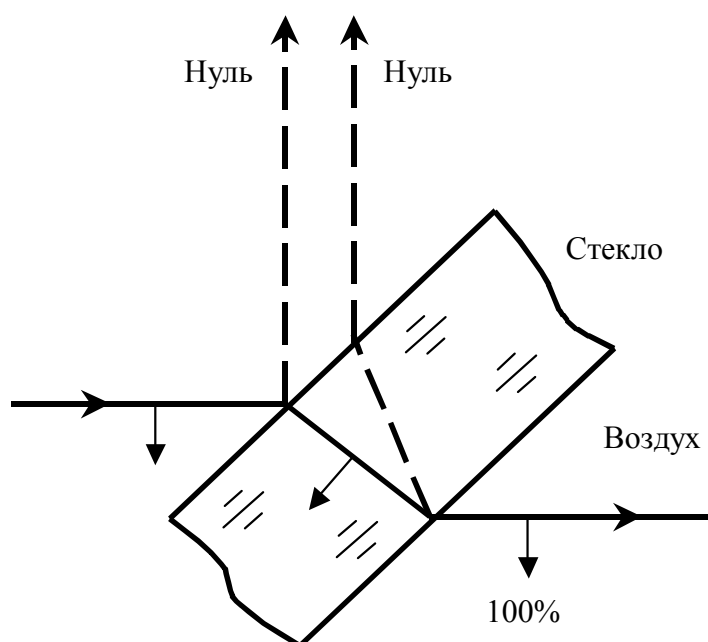


Рис. 24

Задание 13. Определение состояния поляризации лазерного излучения.

ВНИМАНИЕ! По технике безопасности не допускается попадание прямого или зеркально отраженного луча в глаз.

С помощью учебного мастера включить лазер, имеющийся в лаборатории. Поставить поляроид на пути лазерного луча. Вращая поляроид, наблюдать изменение яркости пятна на экране. Какой вывод можно сделать из этого наблюдения?

Задание 14. Наблюдение деполяризации при отражении света от матовой поверхности.

В результате взаимодействия поляризованного света со средой в ряде случаев наблюдается уменьшение степени поляризации. Это явление называется деполяризацией света. Причины деполяризации могут быть различные. К деполяризации приводит, например, рассеяние света в мутной среде или на матовой поверхности.

Для наблюдения деполяризации при диффузном отражении держите поляроид перед глазом и, вращая поляроид, рассматривайте лазерное пятно на экране или белой бумаге.

Контрольные вопросы.

1. В чем заключается свойство поперечности электромагнитных волн?
2. В таком случае говорят, что свет имеет линейную поляризацию?
3. Как на опыте можно определить, имеет ли исследуемый свет линейную поляризацию?
4. Что такое круговая, эллиптическая поляризация?
5. Какие физические явления используются для получения линейно поляризованного света?
6. Как получить циркулярно поляризованный свет?
7. Как отличить циркулярно поляризованный свет от естественного?
8. Под каким углом падает солнечный свет на поверхность воды ($n=1,33$), если отраженный луч имеет степень поляризации $p=1$?
9. Что такое оптическая активность?

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики, т. 2.
2. Ландсберг Г.С. Оптика.
3. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела, М., 1973.

ПРИЛОЖЕНИЕ

СОСТАВ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ (порядковые номера нанесены на приборы и принадлежности).

Приборы:

1. Демонстрационный прибор.
2. Установка для изучения закона Малюса.
3. Фотоприемник.
4. Источники питания фотоприемника и лампы накаливания в установке 2.
5. Прибор для демонстрации поляризации света при отражении от диэлектрика.
6. Прибор для измерения угла Брюстера.
7. Прибор для измерения угла вращения плоскости поляризации (поляриметр П-161М).
8. Индикатор на жидком кристалле.
9. Понижающий трансформатор (с 220 В до 5 В) для индикатора.

Принадлежности:

10. Поляроид (на пластине 70x70 для прибора 1).
 11. Поляроид (в пластмассовой оправе, снабженной ручкой).
 12. Поляроид (в круглой оправе из алюминия для прибора 2).
 13. Стопа стеклянных пластинок в оправе.
 14. Кристалл исландского шпата в оправе.
 15. Пластика в четверть длины волны ($\lambda/4$), 2 шт.
 16. Пленка «скотч» на стеклянной пластинке 50x50 мм.
 17. а,б,в Детали из оргстекла.
- Кюветы с раствором сахара.
Лупа.
Светофильтры.