

Ярославский государственный педагогический
университет им. К. Д. Ушинского

Лабораторная работа № 13

Изучения явлений поляризации света

Ярославль
2014

Оглавление

1.	Вопросы для подготовки к работе	3
2.	Краткая теория	3
3.	Описание установки	9
4.	Порядок выполнения работы	10
	Задание 1.	10
	Задание 2.	11
	Задание 3.	12
	Задание 4.	13
	Задание 5.	14
	Задание 6.	16
5.	Контрольные вопросы	17

Составители: В.К. Мухин, старший преподаватель кафедры общей физики
Г.В. Жуть, кандидат технических наук, доцент кафедры
общей физики

Лабораторная работа № 13

Изучения явлений поляризации света

Цель работы: получить поляризованный свет различными способами и исследовать его.

Приборы и принадлежности: поляризационный микроскоп, пластина из диэлектрика, стопа стеклянных пластин, кристалл исландского шпата, пластинки из слюды в оправе, кристаллы медного купороса.

Литература:

1. Руководство к лабораторным занятиям по физике. под ред. Л.Л. Гольдина. – М.: Наука, 1973.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1982. – Т.2.
3. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976.

1. Вопросы для подготовки к работе

1. Какой свет называется плоскополяризованным?
2. Методы получения поляризованного света: поляризация при отражении, поляризация при преломлении, двойное лучепреломление.
3. Анализ плоскополяризованного света. Анализаторы.

2. Краткая теория

Свет, согласно электромагнитной теории, представляет собой поперечные электромагнитные волны, частота которых лежит в пределах от $0,75 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$ до $0,43 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$. Плоскую электромагнитную волну можно наглядно представить, изобразив картину поля векторами \vec{E} — напряженности электрического поля и \vec{B} — индукции магнитного поля в некоторый момент времени t (рис. 2.1).

Вектора \vec{E} и \vec{B} всегда перпендикулярны друг другу и с направлением распространения волны образуют правовинтовую систему. При этом крест векторов \vec{E} и \vec{B} может располагаться произвольным образом в плоскости xOz , перпендикулярной распространению волны.

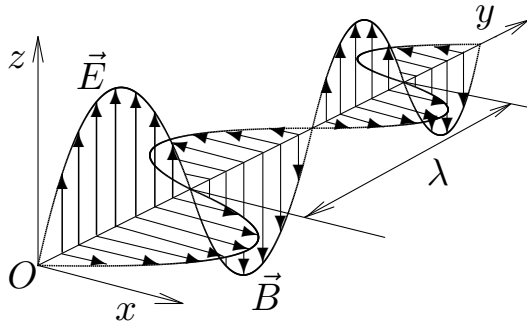


Рис. 2.1

При взаимодействии электромагнитной волны с веществом основную роль играет электрическое поле, поэтому в дальнейшем мы будем говорить только о колебаниях вектора \vec{E} .

Свет, испускаемый различными источниками (Солнце, лампы накаливания и т.д.) представляет собой совокупность цугов электро-

магнитных волн, излучаемых отдельными атомами. Плоскость колебаний вектора \vec{E} для каждого цуга произвольна и, следовательно, такая волна имеет всевозможные ориентации вектора \vec{E} . Такой свет называется естественным.

Если в световой волне вектор \vec{E} колеблется в одной единственной плоскости, то такой свет называется **плоскополяризованным**.

Если конец электрического вектора \vec{E} описывает круг или эллипс, то свет называется **поляризованным по кругу или по эллипсу**.

Плоскость, в которой колеблется вектор \vec{E} , называется плоскостью колебаний, а перпендикулярная ей плоскость, в которой колеблется вектор \vec{B} , называется **плоскостью поляризации**.

Примечание. По новой терминологии плоскополяризованная волна характеризуется только плоскостью поляризации, под которой понимается плоскость, в которой колеблется вектор \vec{E} (по-старому это “плоскость колебаний”). В литературе, в том числе и новой, часто еще используется старая терминология, поэтому перед чтением книги по этой теме следует разобраться в терминах.

Рассмотрим некоторые способы получения плоскополяризованного света.

Отраженный от диэлектрика свет всегда частично поляризован. Степень поляризации отраженного луча всегда зависит от i – угла падения (рис. 2.2). Полная поляризация света в отраженном луче достигается при угле падения

$$i = \operatorname{arctg} n_{21}, \quad (2.1)$$

где n_2 – относительный показатель преломления диэлектрика.

2. Краткая теория

Этот угол носит название угла Брюстера. Вектор \vec{E} в отраженном луче колеблется в плоскости; перпендикулярной плоскости падения луча (схематически на рис. 2.2 он изображен точками). При этом преломленный луч будет частично поляризован. Вектор \vec{E} в этом луче имеет преимущественное направление колебаний в плоскости падения луча (схематически на рис. 2.2 он показан стрелками и точками). Доля поляризованного света в преломленном луче невелика (порядка 0,1 от интенсивности падающего света). Для увеличения степени поляризации преломленного луча используют несколько слоев пластин диэлектрика (сток, стеклянных пластин). При большом числе пластин можно получить преломленный луч полностью поляризованным (рис. 2.3). Колебания вектора \vec{E} в этом луче лежат в плоскости падения луча.

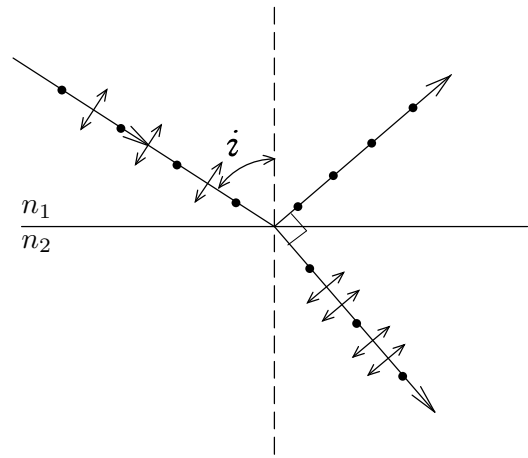


Рис. 2.2

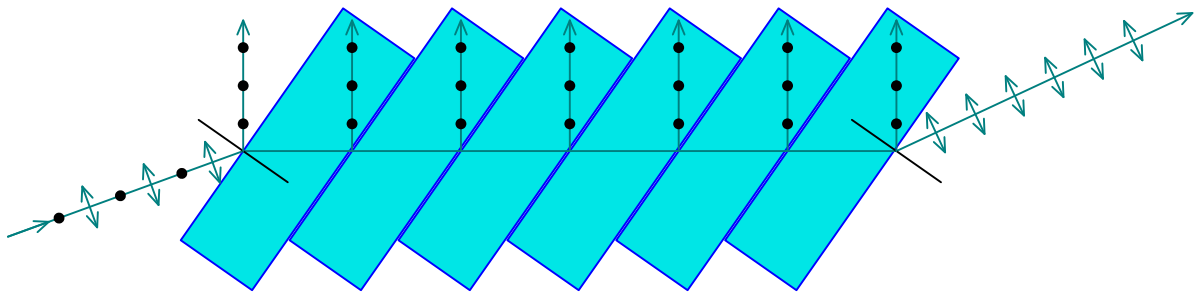


Рис. 2.3

При прохождении света через кристаллы некоторых веществ за счет анизотропии их оптических свойств наблюдается двойное лучепреломление — световой луч разделяется на два. Один из лучей подчиняется закону преломления света $\frac{\sin i}{\sin r} = n$, и его называют обыкновенным лучом (*o* - луч). Для другого луча отношение $\frac{\sin i}{\sin r}$ не остается постоянным при изменении угла падения луча. Этот луч называют необыкновенным (*e* - луч на рис. 2.4). Даже при нормальном падении света на такой кристалл необыкновенный луч отклоняется от первоначального направления. Если вращать кристалл вокруг оси, параллельной падающему лучу, то обыкновенный луч остается

на месте, а необыкновенный описывает окружность в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света. Эти два луча поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях. Колебания вектора \vec{E} в e -луче совпадают с плоскостью падения света, а в o -луче перпендикулярны плоскости падения света.

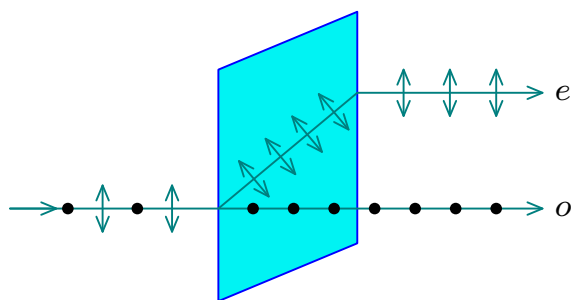


Рис. 2.4

один из лучей практически полностью поглощается. Это свойство кристаллов позволяет сделать тонкие дихроические пластинки из кристаллов, ориентированных определенным образом, – поляроиды. Свет, падающий на поляроид, поляризуется в некоторой плоскости – плоскости пропускания поляроида. (Используют и другие эквивалентные термины: главная плоскость, главное направление, разрешенное направление и др.)

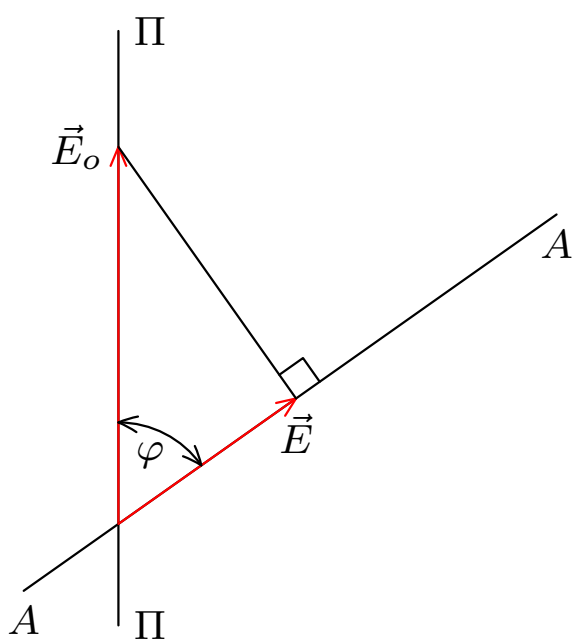


Рис. 2.5

Обыкновенный и необыкновенный лучи могут поглощаться некоторыми кристаллами в неодинаковой степени. Это явление называется дихроизмом. Дихроизм кристаллов может быть настолько велик, что в сравнительно тонких кристаллических пленках

Глаз человека не может отличить естественный свет от поляризованного. Чтобы обнаружить поляризованный свет, его необходимо пропустить **через устройство, плоскополяризующее световой луч**. Такое устройство называется **анализатором**. Анализатор действует следующим образом. Пусть на него падает поляризованный свет (рис.2.5), $ПП$ – сечение плоскости колебаний вектора \vec{E} плоскостью рисунка. \vec{E}_0 – вектор амплитуды этих колебаний. AA – сечение плоскости пропускания анализатора плоскостью рисунка.

2. Краткая теория

Через анализатор пройдут колебания, амплитуда которых равна

$$E = E_o \cos \varphi .$$

Возведя обе части в квадрат, получим соотношение для интенсивностей

$$J = J_o \cos^2 \varphi ,$$

где J_o — интенсивность света, падающего на анализатор,
 J — интенсивность света, вышедшего из анализатора.

Этот закон носит название закона Малюса.

При изменении угла (вращении поляризатора или анализатора) интенсивность света, вышедшего из анализатора, меняется от $J = J_o$ при $\varphi = 0$ (максимальная интенсивность, плоскости пропускания поляризатора и анализатора параллельны) до $J = 0$ при $\varphi = \frac{\pi}{2}$ (минимальная интенсивность, плоскости пропускания поляризатора и анализатора перпендикулярны).

Таким образом, если на анализатор падает полностью или частично поляризованный свет, то при вращении анализатора интенсивность J света меняется. Полное погасание светового луча может быть только у полностью плоскополяризованного света.

Эллиптически поляризованный свет получается в результате сложения двух когерентных световых волн, имеющих разные амплитуды, некоторую разность фаз и поляризованных в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Для этого плоскополяризованный свет направляют на двоякопреломляющую пластину из одноосного кристалла (кварц, исландский шпат, турмалин) так, чтобы направление колебаний вектора \vec{E}_o плоскополяризованного света составляло некоторый угол α с OO — главным направлением кристаллической пластинки (направлением, в котором лучи не претерпевают двойного лучепреломления, т.е. распространяются с одинаковой скоростью (рис. 2.6).

Сквозь пластинку будут распространяться в одном направлении, но с разной скоростью две волны, поляризованные в двух взаимно перпендикулярных направлениях с амплитудами

$$E_{xo} = E_o \sin \alpha \quad \text{и} \quad E_{yo} = E_o \cos \alpha ,$$

где E_o — модуль вектора \vec{E}_o амплитуды волны, падающее на пластинку. Пройдя расстояние α (толщину пластинки), эти две волны приобретают разность хода

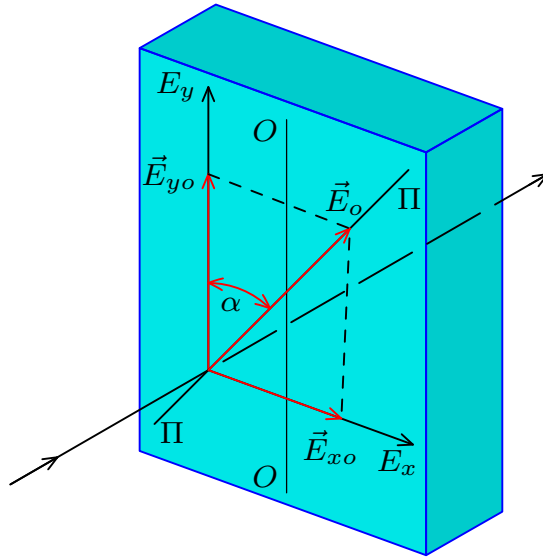


Рис. 2.6

$$\Delta = dn_o - dn_e = d(n_o - n_e),$$

где n_o — показатель преломления обыкновенной волны,
 n_e — показатель преломления необыкновенной волны,
 что соответствует φ — разности фаз, равной

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d.$$

Обыкновенная волна отстает по фазе от необыкновенной.

Если сложить эти два взаимно перпендикулярных колебания, то получим колебание, при котором конец результирующего вектора описывает эллипс в плоскости волнового фронта с частотой сложенных колебаний.

Колебания волн, прошедших через пластинку, описываются уравнениями

$$E_x = E_{x_o} \cos(\omega t + \varphi); \quad E_y = E_{y_o} \cos \omega t.$$

Исключив время t из этих уравнений, получим траекторию, которую описывает конец вектора \vec{F}_o амплитуда результирующего колебания:

$$\frac{E_x^2}{E_{x_o}^2} + \frac{E_y^2}{E_{y_o}^2} - \frac{2E_x E_y}{E_{x_o} E_{y_o}} \cos \varphi = \sin^2 \varphi.$$

Это уравнение эллипса. Форма эллипса и ориентация его осей относительно x и y зависит от углов α и φ . При соответствующей

3. Описание установки

толщине пластинки (разности хода) можно получить такую разность фаз φ , что большая и малая полуоси эллипса будут ориентированы вдоль осей x и y (вдоль главных направлений кристалла).

Этот случай соответствует разности хода $\frac{\lambda}{4}$ или разности фаз $\varphi = \frac{\pi}{2}$. Такая пластинка называется четвертьволновой. При $\varphi = \frac{\pi}{2}$ уравнение эллипса принимает вид

$$\frac{E_x^2}{E_{x0}^2} + \frac{E_y^2}{E_{y0}^2} = 1.$$

Соотношение длин осей эллипса зависит от угла α . При $\alpha = 45^\circ \implies E_{x0} = E_{y0} = \sqrt{2}E_0$ эллипс обращается в круг. Получаем свет, поляризованные по кругу.

Если толщина пластинки такова, что

$$d(n_o - n_e) = \frac{\lambda}{2},$$

то $\varphi = \pi$, и эллипс вырождается в прямую

$$\frac{E_x}{E_{x0}} + \frac{E_y}{E_{y0}} = 0.$$

В этом случае свет остается линейно поляризованным, но направление колебаний изменяется на угол $(180^\circ - 2\alpha)$.

3. Описание установки

Для получения поляризованного света и его исследования в данной работе используют поляризационный микроскоп (рис. 3.1).

Принцип действия этого микроскопа такой же, как и обыкновенного, но в нем есть поляризирующее устройство — два поляроида: A — верхний и P — нижний. Поляроиды могут вводиться в действие или убираться в зависимости от цели исследования.

Подвижным по горизонтали сделан и конденсор K . При необходимости он отводится влево.

Грубая наводка на резкость осуществляется винтом B_1 , точная — винтом B_2 . Конденсор может перемещаться по вертикали винтом B_3 .

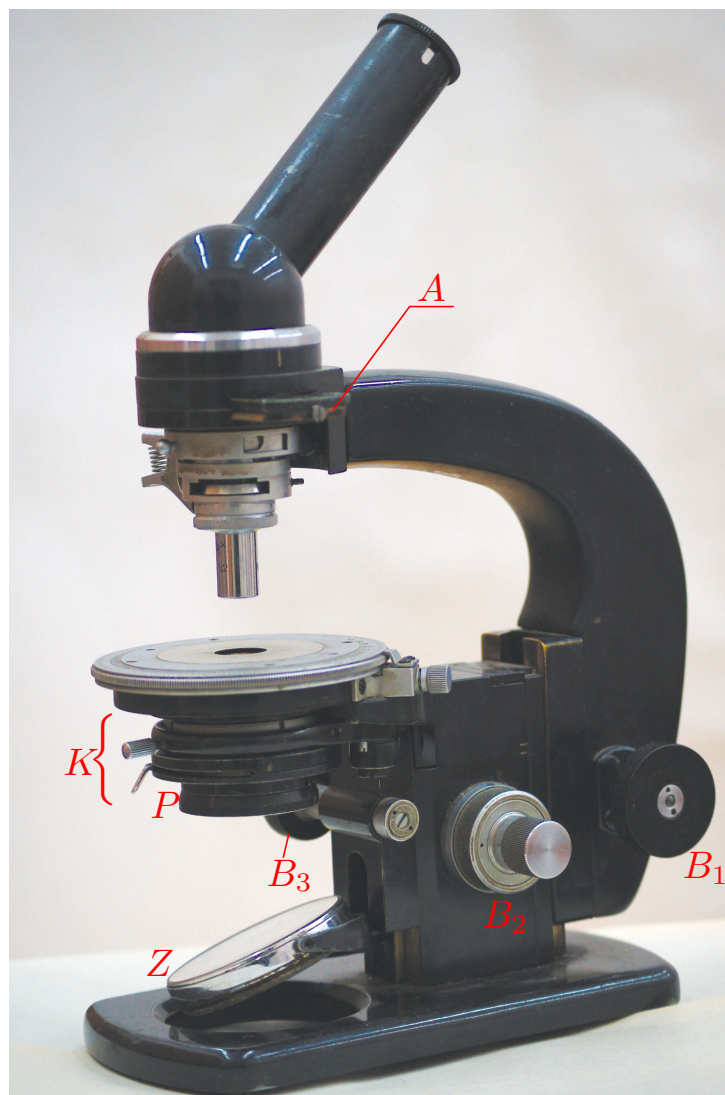


Рис. 3.1

Зеркало Z имеет с одной стороны диэлектрическое покрытие (стекло) без металлического отражающего слоя, для выполнения задания № 3.

4. Порядок выполнения работы

Задание 1. Знакомство с описанием и конструкцией экспериментальной установки.

С конструкцией поляризационного микроскопа и расположением на нем органов управления ознакомьтесь по схематическому рисунку (рис. 3.1).

4. Порядок выполнения работы

Задание 2. Определение плоскости пропускания колебаний верхнего поляроида.

Плоскость пропускания колебаний верхнего поляроида определяют по известной плоскости колебаний нижнего поляроида.

Соберите установку, как показано на рис. 4.1. Свет от источника S с помощью зеркала Z направьте в поле зрения микроскопа. Конденсор в данном задании использовать не рекомендуется.

В качестве поляризатора P используется нижний поляроид. Анализатором A служит верхний поляроид. Нижний поляроид выньте из гнезда конденсора и поместите на предметный столик микроскопа.

Плоскость пропускания колебаний нижнего поляроида проходит через отметку “90” на оправе поляроида и его центр.

Поляроид положите на столик так, чтобы “0” на оправе поляроида и “0” на лимбе столика лежали на одном диаметре. Вращая столик микроскопа по часовой стрелке, добейтесь полного затмения поля зрения (вращать столик надо медленно, чтобы не пропустить момента полного затмения поля зрения). В этом случае плоскости пропускания нижнего и верхнего поляроидов скрещены (взаимно перпендикулярны).

На лимбе предметного столика отсчитайте угол φ_{min} , который показывает на сколько повернута плоскость пропускания верхнего поляроида A относительно указателя лимба (т.е. плоскость пропускания проходит через “0” лимба и оптическую ось микроскопа).

Вращая столик дальше, добейтесь максимального просветления поля зрения и запишите значение угла φ_{max} . В этом случае плоскости пропускания нижнего и верхнего поляроидов параллельны.

При одном полном обороте столика должно наблюдаться два минимума и два максимума освещенности поля зрения. Сделайте не менее трех полных оборотов столика. Данные запишите в таблицу 1.

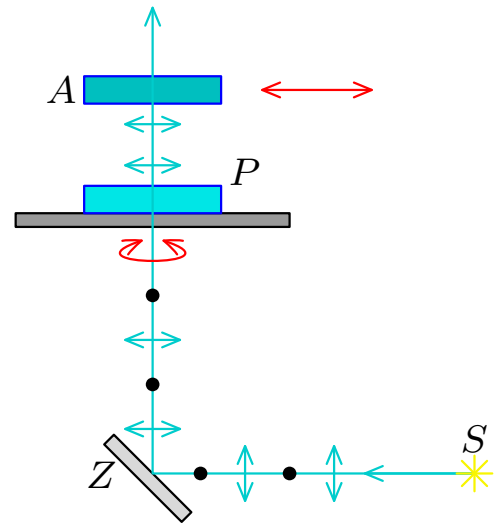


Рис. 4.1

Таблица 1

n	$\varphi_{1min\ i}$	$\Delta(\varphi_{1min})_i$	$\varphi_{1max\ i}$	$\Delta(\varphi_{1max})_i$	$\varphi_{2min\ i}$	$\Delta(\varphi_{2min})_i$	$\varphi_{2max\ i}$	$\Delta(\varphi_{2max})_i$
1								
и т.д.								
среднее		X		X		X		X

Вычислите среднюю квадратичную ошибку по формуле

$$\Delta\varphi = t_{\alpha n} \sqrt{\frac{\sum_i (\Delta\varphi_i)^2}{n(n-1)}}.$$

Результат запишите в виде

$$\varphi_{1min} = \bar{\varphi}_{1min} \pm \Delta\varphi_{1min}; \quad \varphi_{2min} = \bar{\varphi}_{2min} \pm \Delta\varphi_{2min};$$

$$\varphi_{1max} = \bar{\varphi}_{1max} \pm \Delta\varphi_{1max}; \quad \varphi_{2max} = \bar{\varphi}_{2max} \pm \Delta\varphi_{2max}.$$

Сравните величины φ_{1min} , φ_{1max} , φ_{2min} и φ_{2max} и сделайте выводы. Обратите внимание на отличие $\Delta\varphi_{1min}$ от $\Delta\varphi_{1max}$, а также $\Delta\varphi_{2min}$ от $\Delta\varphi_{2max}$, что очень важно при рассмотрении принципов действия сахариметров и поляриметров (лабораторные работы № 15 и 17).

Задание 3. Исследование света, отраженного от диэлектрика.

В качестве диэлектрика используется зачерненная сторона осветительного зеркала микроскопа. Параллельный пучок света из осветителя ОИ-9м направьте на зачерненную сторону зеркала, поставленного под некоторым углом i к направлению падающего луча. (Обратите внимание на то, чтобы оптическая ось микроскопа лежала в плоскости падения луча.) После отражения свет попадает в поле зрения микроскопа (рис. 4.2).

Исследование отраженного луча на поляризацию проводится с помощью нижнего поляроида. В этом случае он играет роль анализатора. Поляриод установите на столик так же, как и в 2-ом задании. Верхний поляриод уберите из поля зрения. Конденсор в данном задании не используется. Вращая столик микроскопа, наблюдайте за

4. Порядок выполнения работы

изменением интенсивности отраженного от зачерненной стороны зеркала света. Далее определите плоскость колебаний вектора \vec{E} в отраженном луче по известной плоскости пропускания анализатора (как в задании 2). Для этого, вращая столик микроскопа по часовой стрелке, добейтесь максимального погасания отраженного луча. Отрегулируйте зеркало путем изменения угла i с целью получения полной поляризации отраженного луча. В этом случае плоскость колебаний вектора \vec{E} перпендикулярна плоскости пропускания анализатора. На лимбе предметного столика отсчитайте угол φ_{min} , который показывает, на сколько повернута плоскость колебаний вектора \vec{E} относительно указателя лимба в отраженном от диэлектрика пучке. Вращая столик дальше, добейтесь максимальной интенсивности отраженного луча и отсчитайте угол φ_{max} . Сделайте не менее пяти полных оборотов столика.

Результаты измерений занесите в таблицу 2, такую же как таблица 1, и обработайте по аналогии с заданием 2.

Задание 4. Исследование света, прошедшего через стопу пластин из диэлектрика.

В качестве поляризующего устройства используется стопа стеклянных пластин, помещенных в оправе под углом Брюстера. Для исследования соберите установку (рис. 4.3).

Свет направьте в поле зрения микроскопа, через стопу пластин, закрепленную в штативе. (Обратите внимание на то, чтобы оптическая ось микроскопа лежала в плоскости падения луча) В качестве анализатора используется поляририд, установленный на столике микроскопа так же, как в задании 2. Вращая столик с анализатором, исследуйте на поляризацию свет, прошедший через стопу пластин. Затем определите плоскость колебаний вектора \vec{E} в поляризованном луче, вышедшем из стопы (как в задании 3).

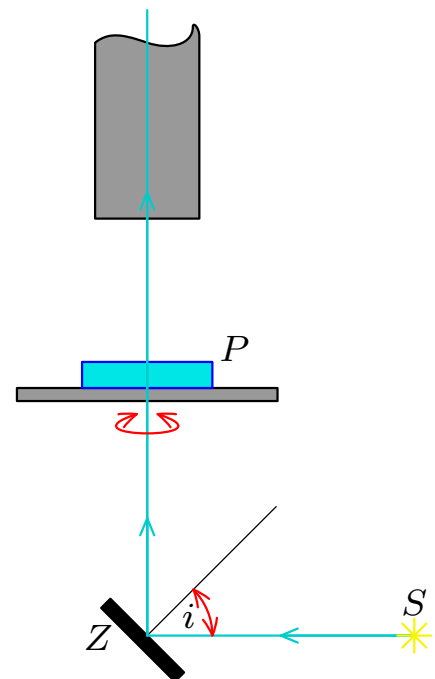


Рис. 4.2

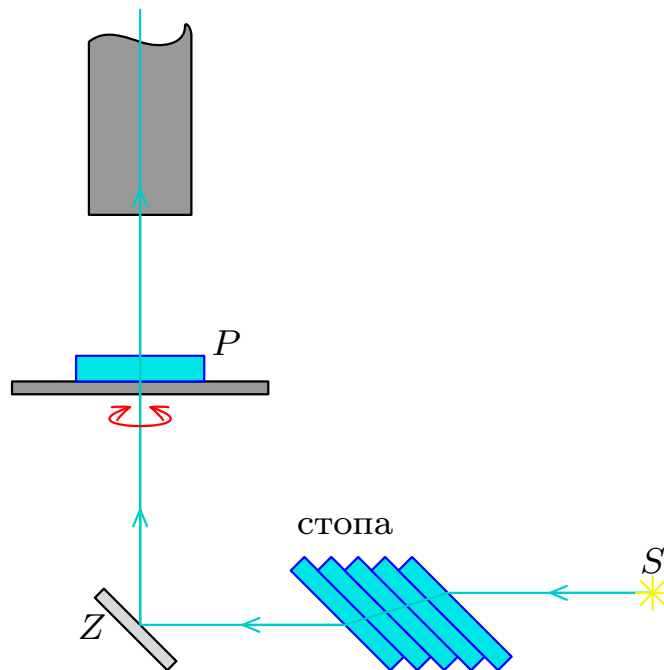


Рис. 4.3

Далее это задание выполните по образцу задания 3. Результаты измерений занесите в таблицу 3, аналогичную таблицам 1 и 2, и обработайте по образцу задания 2.

Сравните взаимное положение плоскостей колебаний вектора \vec{E} в этом задании и в задании 3.

Задание 5. Исследование света, прошедшего через кристалл исландского шпата.

Исследование заключается:

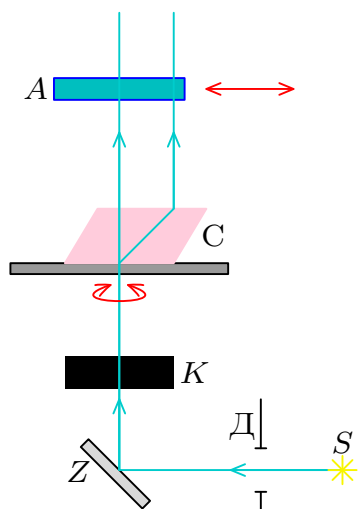


Рис. 4.4

1. в наблюдении двойного лучепреломления и выяснении, какой из лучей обыкновенный, а какой необыкновенный;
2. в выяснении, поляризованы эти лучи или нет;
3. в определении их плоскости колебаний и сравнении с теоретическими данными.

Для выполнения первой части задания уберите оба поляроида, введите в оптическую схему микроскопа конденсор K и максимально задиафрагмируйте осветитель. Получите

4. Порядок выполнения работы

в центре поля зрения микроскопа изображение круглого отверстия диафрагмы. Поместите на столик микроскопа кристалл исландского шпата C , сфокусируйте микроскоп и наблюдайте появление двух изображений отверстия диафрагмы. Одно из них принадлежит обыкновенному лучу, другое — необыкновенному (рис. 4.4). Вращая столик с кристаллом, выясните, какой луч обыкновенный и какой необыкновенный (рис. 2.4). Данные опыта зарисуйте.

Для выяснения поляризованности этих лучей в качестве анализатора используйте верхний поляроид. Вращая столик с кристаллом, наблюдайте изменение интенсивности лучей и определите в них плоскости колебаний вектора \vec{E} , зная плоскость пропускания верхнего поляроида.

Для определения положения плоскостей колебаний вектора \vec{E} в обыкновенном и необыкновенном лучах определите только те углы, при которых получаются минимумы интенсивности (максимумы — не нужно). В этих положениях плоскость пропускания анализатора и плоскость колебаний вектора \vec{E} соответствующего луча будут скрещены.

Сделайте не менее трех полных оборотов столика и значения углов занесите в таблицу 4.

Таблица 4

n	ψ_{1i}		$\Delta\psi_{1i}$		ψ_{2i}		$\Delta\psi_{2i}$	
	o	e	o	e	o	e	o	e
1								
и т.д.								
среднее			×	×			×	×

Вычислите среднюю квадратичную ошибку и результат запишите в виде:

$$\begin{aligned} \psi_{o1} &= \bar{\psi}_{o1} \pm \Delta\psi_{o1}; & \psi_{o2} &= \bar{\psi}_{o2} \pm \Delta\psi_{o2}; \\ \psi_{e1} &= \bar{\psi}_{e1} \pm \Delta\psi_{e1}; & \psi_{e2} &= \bar{\psi}_{e2} \pm \Delta\psi_{e2}. \end{aligned}$$

Пользуясь полученными данными и данными задания 2, вычислите положена» плоскостей колебания вектора \vec{E} в o - и e -лучах по формуле

$$\Theta = \psi_1 \pm 90^\circ - \varphi_{1min} .$$

Плоскость колебаний вектора \vec{E} соответствующего луча пройдет через точку, соответствующую углу Θ на лимбе, и оптическую ось микроскопа.

Сравните полученные экспериментальные данные с теоретическими. Сделайте в изометрии рисунок, где покажите положение плоскостей колебаний вектора \vec{E} относительно кристалла исландского шпата.

Задание 6. Наблюдение кристаллических пластинок в поляризованном свете.

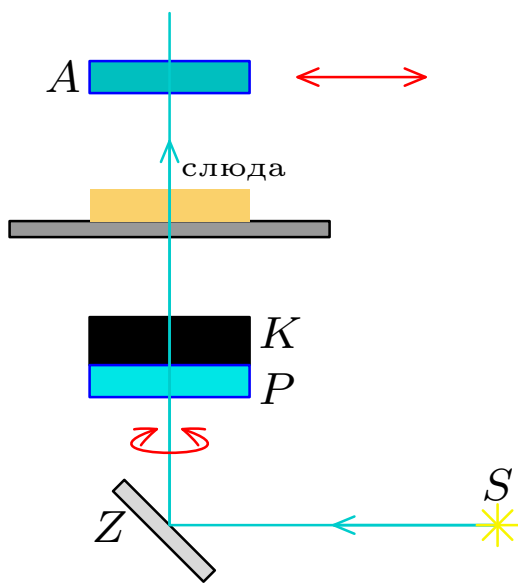


Рис. 4.5

Введите в действие оба поляроида. Нижний поляроид P вставьте в оправу конденсора K . Он играет роль поляризатора. Верхний поляроид — роль анализатора. На столик микроскопа поместите исследуемую пластинку (три круга из слюды, частично перекрывающие друг друга и помещенные в стеклянную оправу; рис. 4.5). Добейтесь четкого изображения слюдяных пластинок. Вращая нижний поляроид, наблюдайте изменение окраски пластинок. Такой же опыт проделайте с кристаллами медного купороса, нанесенными на стекло.

Объясните это явление.

5. Контрольные вопросы

1. Может ли наблюдаться поляризация продольных волн?
2. Будет ли свет, отраженный от матовой поверхности (например, белой бумаги), поляризованным?
3. Почему в задании 3 используется диэлектрическое (черное) зеркало, а не металлическое (обычное)?
4. Почему $\Delta\varphi_{max} > \Delta\varphi_{min}$?
5. Почему в опыте задания 6 мы видим кристаллические пластинки окрашенными?