

Лабораторная работа 4.7.3

Поляризация

Гарина Ольга Б04-901

25 февраля 2021 г.

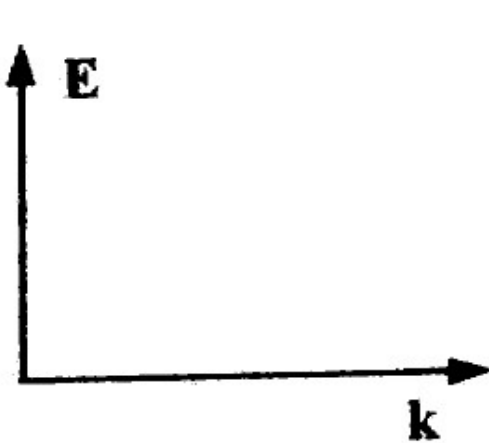
Цель работы: ознакомление с методами получения и анализа поляризованного света.

В работе используются: оптическая скамья с осветителем; зеленый светофильтр; два поляроида; черное зеркало; полированная эбонитовая пластинка; стопа стеклянных пластинок; слюдяные пластинки разной толщины; пластинки в $1/4$ и $1/2$ длины волны; пластинка в одну длину волны для зеленого цвета (пластинка чувствительного оттенка).

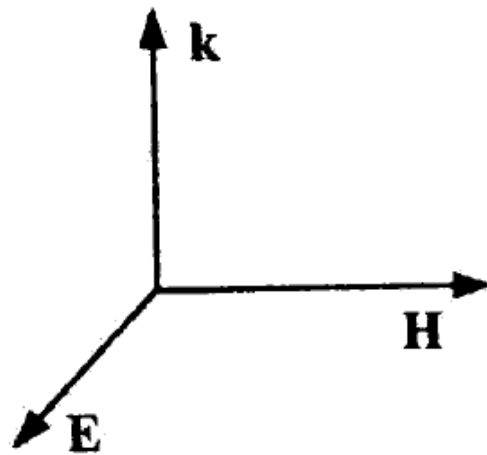
1 Введение

1.1 Типы поляризации

Поляризацией называется характеристика векторных волновых полей, описывающая поведение вектора колеблющейся величины в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Этот термин применим только к поперечным волнам. Векторы электрического, магнитного полей вместе с волновым вектором образуют правую ортогональную тройку. Плоскостью поляризации называется плоскость, построенная на векторах (\mathbf{E}, \mathbf{k}) .



Плоскость поляризации



Правая тройка векторов

Плоская волна называется *линейно поляризованной*, если ориентация плоскости поляризации не меняется во времени. То есть вектор напряженности электрического поля \mathbf{E} всегда лежит в одной и той же плоскости, содержащей вектор \mathbf{k} . В линейно поляризованной волне вектор \mathbf{E} совершает колебания вдоль фиксированной прямой.

Пусть частота колебаний поля равна ω . Тогда для компонент поля можно записать выражения

$$E_x = E_{x0} \cos(\omega t + \phi_x)$$

$$E_y = E_{y0} \cos(\omega t + \phi_y)$$

Если разность фаз колебаний этих величин равна

$$\delta = \phi_x - \phi_y = 0, \pm\pi,$$

то вектор \mathbf{E} совершает колебания вдоль фиксированной прямой, образующей с осью угол θ такой, что

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{E_y}{E_x} = \pm \frac{E_{y0}}{E_{x0}}$$

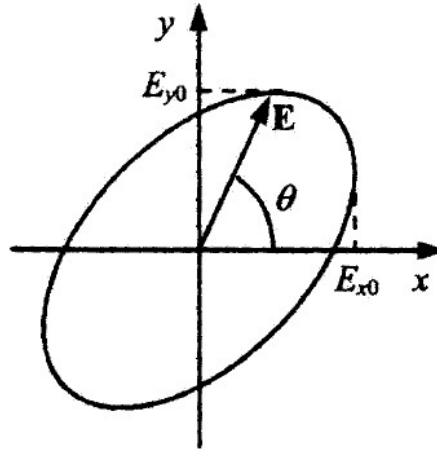


Рисунок 1 – Эллиптическая поляризация

Если сдвиг фаз колебаний отличается от 0 и $\pm\pi$, то вектор \mathbf{E} совершает вращение. В этом случае свет имеет *эллиптическую поляризацию*. Получим уравнение кривой, описываемой концом вектора \mathbf{E} :

$$\left(\frac{E_x}{E_{x0}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{y0}}\right)^2 - 2\frac{E_x}{E_{x0}}\frac{E_y}{E_{y0}}\cos\delta = \sin^2\delta$$

Если окажется

$$\delta = \phi_x - \phi_y = \pm\pi/2, E_{x0} = E_{y0},$$

то описываемая вектором \mathbf{E} кривая есть окружность. В этом случае говорят о *круговой поляризации*.

Говорят, что свет *поляризован частично*, если он представляет собой смесь полностью поляризованного и естественного (неполяризованного) излучения. Пусть интенсивности этих компонент равны соответственно $I_{\text{пол}}$ и $I_{\text{ест}}$. Тогда суммарная интенсивность составляет

$$I_0 = I_{\text{пол}} + I_{\text{ест}}.$$

Степенью поляризации излучения называется отношение

$$P = \frac{I_{\text{пол}}}{I_0}. \quad (1)$$

1.2 Поляризаторы

Поляризатором называют прибор, предназначенный для получения полностью или частично поляризованного оптического излучения.

1.2.1 Поляроиды

Поляроиды обладают разрешенным направлением P (осью) таким, что если вектор напряженности электрического поля световой волны \mathbf{E} параллелен этой оси, то эта волна свободно, практически без поглощения, проходит через поляроид. Если же $\mathbf{E} \perp P$, то данная волна сильно поглощается веществом. Таким образом, ставя на пути неполяризованного светового пучка поляроид P , мы получаем на выходе свет преимущественно с линейной поляризацией.

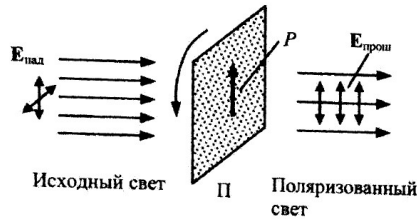


Рисунок 2 – Использование поляроида П

1.3 Стопа Столетова

При падении света на одну пластинку под углом Брюстера интенсивность отраженного линейно поляризованного света очень мала. например, от границы воздух-стекло ($n = 1,5$) отражается около 3,75% интенсивности падающего луча.

Для прошедшего излучения отношение интенсивностей компонент с s- и p-поляризациями равно

$$\delta = \frac{(I_{\text{проп}})_{\perp}}{(I_{\text{проп}})_{\parallel}} = \frac{d_{\perp}^2}{d_{\parallel}^2} \quad (2)$$

Из формул Френеля получаем

$$\delta = \cos^2(\theta - \theta'')$$

. При падении под углом Брюстера

$$\delta = \frac{4n^2}{(1 + n^2)^2} < 1. \quad (3)$$

Таким образом в прошедшем свете доля компоненты с s-поляризацией уменьшается. В частности, при $n = 1,5$, находим $\delta = 0,852$.

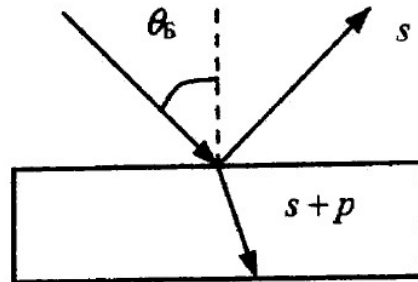


Рисунок 3 – Преломление луча, падающего под углом Брюстера

Для того чтобы увеличить степень поляризации прошедшего и отраженного излучения применяют несколько пластинок, сложенных в стопу Столетова. При ее прохождении доля s-поляризованного света убывает, а p-поляризованного растет – отраженный свет оказывается s-поляризованным, а прошедший – p-поляризованным. Например, для стопы выполненной из 16 стеклянных пластинок, степень поляризации составляет около 99%.

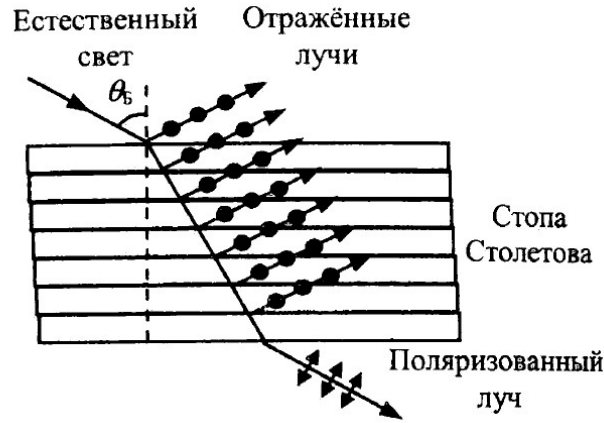


Рисунок 4 – Стопа Столетова

1.4 Обыкновенные и необыкновенные лучи

При падении света на некоторые кристаллы луч расщепляется на два луча. Один из них, следующий обычным законам преломления, называется *обыкновенным*, а второй – *необыкновенным*. Явление расщепления одного луча на два, различающихся по свойствам, называют двойным лучепреломлением.

В кристаллах существуют оси, вдоль которых обыкновенный и необыкновенный лучи распространяются вместе, не разделяясь и с одинаковой скоростью. В общем случае таких осей две. Соответствующие направления называются *оптическими осями кристалла*. Для обыкновенного луча показатель преломления не зависит от направления распространения, а для необыкновенного – зависит.

Плоскость, проходящая через оптическую ось кристалла, называется *главной плоскостью*. Обычно выбирают главную плоскость так, чтобы она содержала не только оптическую ось, но и волновой вектор \mathbf{k} . Показатель преломления для обыкновенного луча равен радиусу окружности, а для необыкновенного луча – расстоянию от начала координат до точки пересечения луча с эллипсовидной кривой (*обратным эллипсом*) (рисунок 5). Рисунок 5 называется оптической индикатрисой.

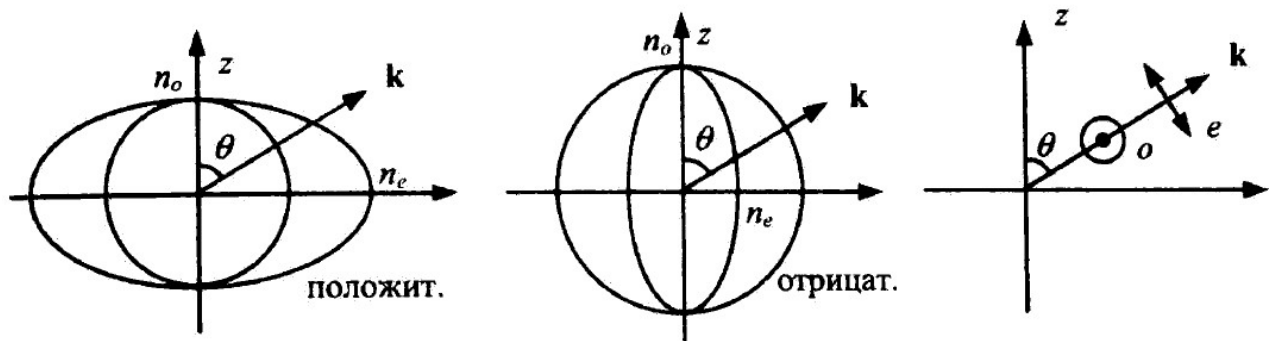


Рисунок 5 – Оптическая индикатриса для обыкновенного (o) и необыкновенного (e) лучей

Обыкновенный и необыкновенный лучи отличаются поляризацией: в обыкновенном луче вектор напряженности \mathbf{E} перпендикулярен главной плоскости, а в необыкновенном – лежит в главной плоскости. Поэтому при измерении направления луча угол между оптической осью кристалла и вектором \mathbf{E} в случае обыкновенного луча остается неизменным, равным $\pi/2$, и

меняется в случае необыкновенного луча.

$$\begin{aligned} n &= n_o = \text{const}, v_o = c/n_o \\ n_e &= n(\theta), v_e = c/n(\theta) \end{aligned}$$

Эффект двойного лучепреломления обусловлен тем, что скорость волны $v = c/n$ тем меньше, чем больше показатель преломления. Поэтому, например, в положительном кристалле ($n_e > n_o, v_e < v_o$) наибольшая скорость достигается в направлении оси кристалла

$$n_e(\theta) > n(0) = n_o, v_e(\theta) < v_0 = v_o.$$

Обыкновенный луч следует обычным законам преломления и при нормальном падении на поверхность кристалла распространяется без отклонения.

1.5 Кристаллические пластинки $\lambda/2$ и $\lambda/4$

1.5.1 Определения

Пусть пластинка вырезана из одноосного кристалла параллельно его оси. В такой пластинке обыкновенный и необыкновенный лучи не разделяются, но им отвечают разные показатели преломления. Поэтому, пройдя пластинку, лучи приобретают дополнительную разность хода

$$\Delta = h(n_e - n_o). \quad (4)$$

Соответствующая разность фаз равна

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} h(n_e - n_o). \quad (5)$$

Выделяют два случая

1. Если

$$\Delta = \lambda/4 + m\lambda, m = 0, 1, 2, \dots, \quad (6)$$

пластинка называется пластинкой в четверть волны. Эта пластинка вносит дополнительную разность фаз обыкновенного и необыкновенного лучей

$$\Delta\phi = \pi/2 + 2\pi m.$$

2. Если

$$\Delta = \lambda/2 + m\lambda, m = 0, 1, 2, \dots, \quad (7)$$

то пластинка называется пластинкой в полволны. Эта пластинка создает дополнительную разность фаз

$$\Delta\phi = \pi + 2\pi m.$$

1.5.2 Действие четвертьволновой пластинки

После прохождения волны с круговой поляризацией четвертьволновой пластинки она оказывается линейно поляризованной. Если исходная волна была линейно поляризована, то после прохождения пластинки она превращается в волну с эллиптической поляризацией.

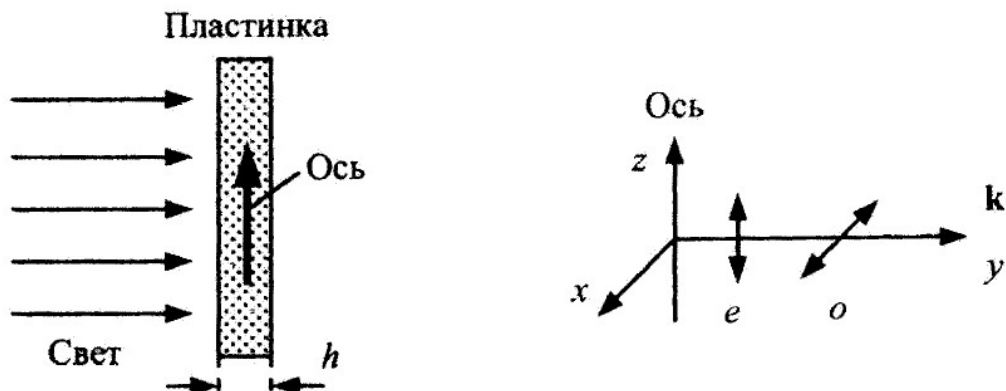


Рисунок 6 – Свет падает по нормали на пластинку, вырезанную вдоль оптической оси кристалла. Слева - схема эксперимента, справа - взаимная ориентация оси кристалла, волнового вектора и вектора напряженности электрического поля волны

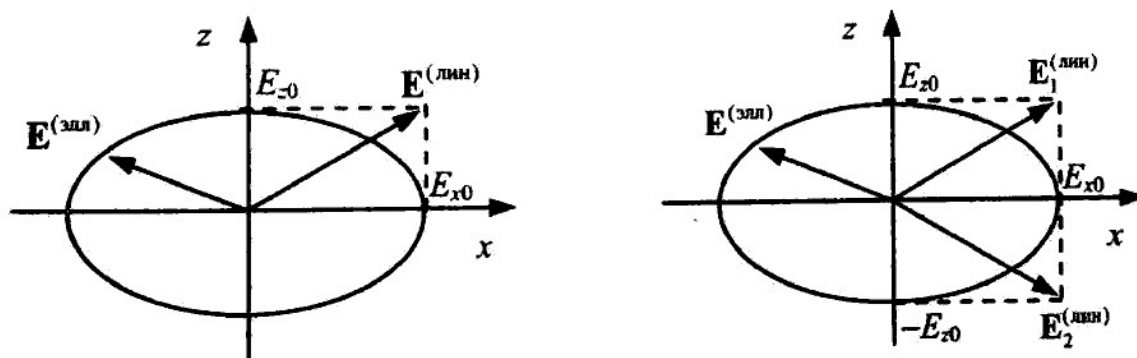


Рисунок 7 – Слева – преобразование волны с линейной поляризацией в эллиптически поляризованную; справа – эллиптически поляризованной в линейно поляризованную

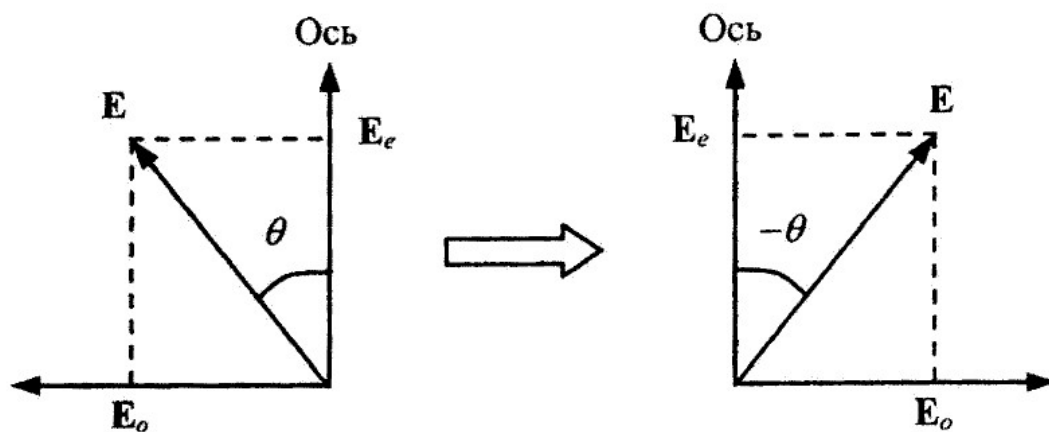


Рисунок 8 – Линейно поляризованная волна (слева) после прохождения полуволновой пластинки меняет направления плоскости поляризации (справа)

1.5.3 Действие полуволновой пластинки

Если падающая волна была линейно поляризованной, то в результате прохождения пластинки $\lambda/2$ меняется плоскость поляризации, как показано на Рисунке 8. Этот результат объясняется тем, что волнирует дополнительный сдвиг фаз обыкновенного и необыкновенного лучей в π .

2 Обработка результатов

2.1 Определение разрешенных направлений поляроидов

Смотря на черное зеркало через поляроид его вращением можно добиться наименьшей интенсивности луча. Далее при неподвижном поляроиде можно вращением зеркала вокруг вертикальной оси также добиться наименьшей интенсивности света. Показания лимба поляроида

$$a = 295 \pm 1$$

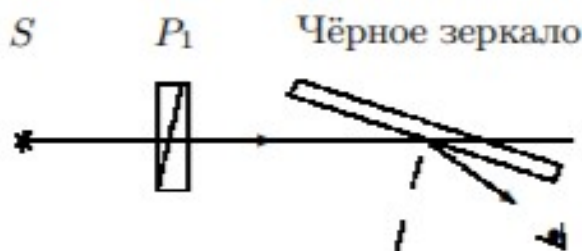


Рисунок 9 – Схема установки для опыта 1

2.2 Определение угла Брюстера для эбонита

В опыте предлагает вместо черного зеркала разместить на скамье эбонитовую пластину с круговой шкалой. Далее поворотом эбонита следует найти угол Брюстера. Начало отсчета:

$$\phi = 28 \pm 1$$

Результат без светофильтра

$$\phi_B = \Delta\phi = 58 \pm 1$$

Результат с использованием светофильтра

$$\phi_B = \Delta\phi = 60 \pm 1$$

По формуле

$$n = \operatorname{tg} \phi_B \quad (8)$$

получаются следующие показатели преломления

$$n_1 = 1,6$$

$$n_2 = 1,73$$

$$n_{\text{табл}} = 1.58 - 1.79$$

Светофильтр не меняет угол Брюстера.

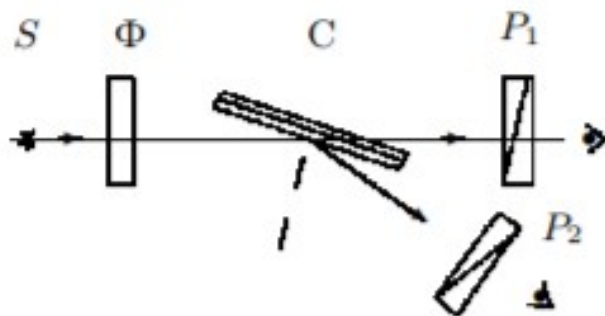


Рисунок 10 – Схема исследования стопы

2.3 Исследование стопы

При наблюдении отраженного луча через поляририд, стоящий на скамье, получается следующая картина: несколько коцентрических кругов разных размеров. При наблюдении преломленного луча через второй поляририд получается несколько кругов расходящихся в сторону. В первом случае наблюдалась р-поляризация, во втором – s-поляризация.

2.4 Определение главных плоскостей двоякопреломляющих пластин

Для проведения опыта следует поставить однородную кристаллическую пластинку между двумя скрещенными поляриоидами. При вращении первой пластинки и наблюдении света через второй поляририд в минимуме интенсивности наблюдали розовый цвет. Для второй пластинки результат аналогичный, однако, розовый цвет темнее. Таким образом были определены главные направления обеих пластин. Численные результаты получились следующие:

$$a_1 = 224 \pm 2$$

$$a_2 = 124 \pm 2$$

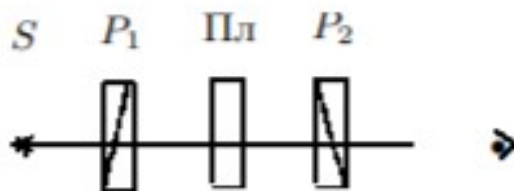


Рисунок 11 – Определение главных направлений в пластинках

2.5 Выделение пластин $\lambda/2$ и $\lambda/4$

К схеме в п.2.4 добавляется зеленый фильтр и главное направление пластинки помещается под углом 45 градусов к горизонтали. Наблюдалась картина, характерная в первом случае для круговой поляризации (отсутствие минимумов), а во втором – для линейной. Объяснения приведены в 1.5.2 и 1.5.3. По результатам опыта можно сделать вывод, что первая пластинка – четвертьволновая, а вторая полуволновая.

2.6 Определение направлений большей и меньшей скоростей в пластинке $\lambda/4$

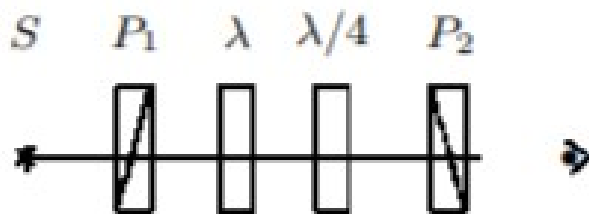


Рисунок 12 – Определение скоростей

Для проведения опыта нужно:

1. Поставьте между скрещенными поляроидами пластинку чувствительного оттенка. Пластинка не меняет поляризацию зелёного света.
2. Убрать зелёный фильтр. Стрелка имеет пурпурный цвет, так как исчезает зелёная часть спектра.
3. Добавить к схеме пластинку $\lambda/4$, главные направления которой совпадают с главными направлениями пластины λ и ориентированы под углом 45 к разрешённым направлениям скрещенных поляроидов.

При вращении пластинки λ наблюдается быстрая смена цветов:

Зелёно-голубой цвет отвечает совпадению «быстрых» осей

$$\lambda + \lambda/4 = 5\lambda/4$$

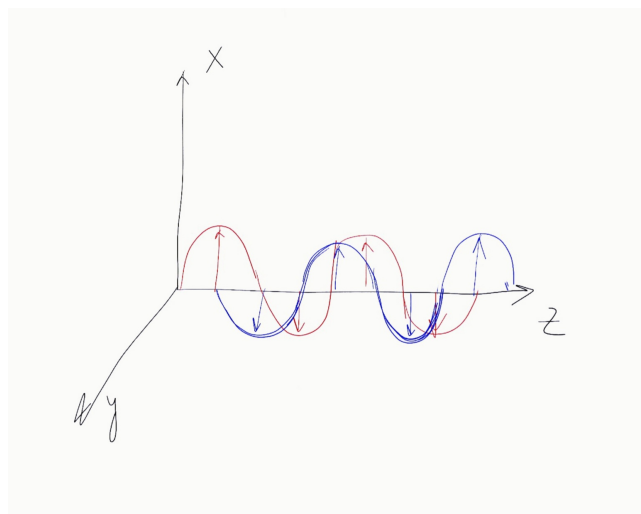
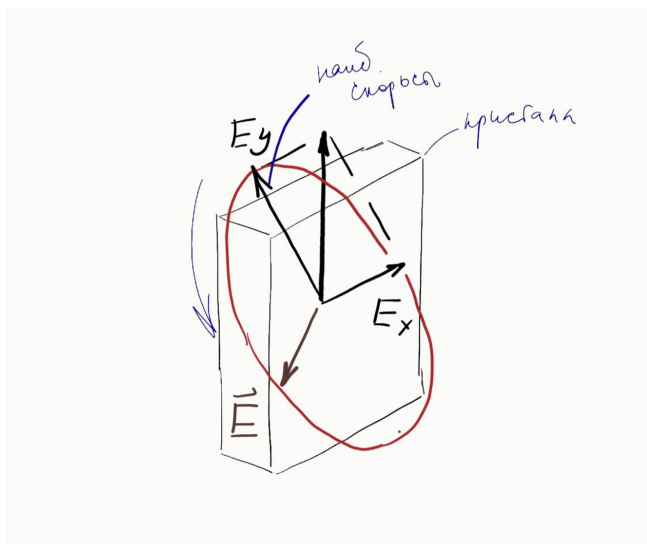
(«вырезается» красная часть спектра)

Оранжево-жёлтый цвет отвечает несовпадению «быстрых» осей

$$\lambda - \lambda/4 = 3\lambda/4$$

(«вырезается» синяя часть спектра)

2.7 Определение направления вращения светового вектора в эллиптически поляризованной волне



Для наблюдения эллиптической поляризации света:

1. Поставить зелёный фильтр, а за ним между скрещенными поляроидами пластинку произвольной толщины
2. Получить эллиптически-поляризованный свет. Для этого установить разрешённое направление первого поляроида под углом 10–20° к горизонтали так, чтобы вектор E падающего на пластинку света был расположен в первом квадранте. Установить разрешённое направление второго поляроида вертикально и, вращая пластинку, найти минимальную интенсивность света, прошедшего второй поляроид. Так будет получен эллипс поляризации с вертикально ориентированной малой осью.
3. Для определения направления вращения светового вектора установить между поляроидами дополнительную пластинку $\lambda/4$ с горизонтально ориентированной «быстрой» осью. В этом случае свет на выходе из второй пластинки будет линейно поляризован.

Если пластинки поодиночке дают эллипсы, вращающиеся в разные стороны, то поставленные друг за другом, они скомпенсируют разность фаз, и вектор E на выходе останется в первом и третьем квадрантах. Если же световой вектор перешёл в смежные квадранты, значит, эллипсы вращаются в одну сторону, что и наблюдается.

Качественно наблюдалось 2 минимума интенсивности, что соответствует фокусам эллипса, откуда можно сделать вывод, что поляризация получилась эллиптической.

2.8 Интерференция поляризованных лучей

Для наблюдения интерференции между скрещенными поляроидами была помещена мозаичная кристаллическая пластинка. При вращении пластинки наблюдалось изменение интенсивности света в отдельном квадрате. При вращении второго поляроида наблюдалось изменение цвета в отдельном квадрате. Если поворачивать двоякопреломляющую пластинку, расположен-

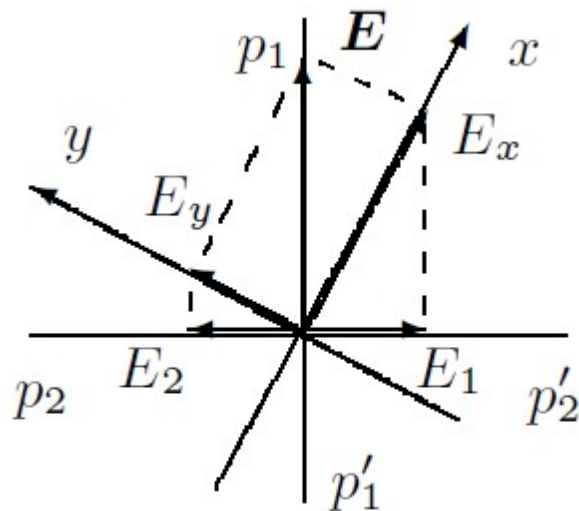


Рисунок 13 – Объяснение интерференции

ную между скрещенными поляроидами, то соотношение амплитуд волн E_1 и E_2 и разность фаз между ними не изменяются. Это означает, что цвет пластинки при её поворотах не меняется, а меняется только интенсивность света. За один оборот пластинки интенсивность четыре раза обращается в нуль – это происходит при совпадении главных направлений x и y с разрешёнными направлениями колебаний поляроидов. Если же двоякопреломляющую пластинку оставить неподвижной, а второй поляроид повернуть так, чтобы разрешённые направления p_1p_1 и p_2p_2 совпали, то волны E_1 и E_2 приобретают дополнительный фазовый сдвиг на π для всех спектральных компонент; при этом их амплитуды изменятся так, что цвет пластинки изменится на дополнительный.

3 Вывод

В ходе лабораторной работы удалось ознакомиться с законом Малюса для линейно поляризованного света; с помощью четвертьволновой пластинки определить направления обыкновенной и необыкновенной осей кристалла слюды; наблюдать интерференцию поляризованного света.

4 Литература

1. Лабораторный практикум по общей физике: учеб. пособие. В трёх томах. Т. 2. Оптика / А.В. Максимычев, Д.А. Александров, Н.С. Берюлёва и др.; под ред. А.В. Максимычева. М.: МФТИ, 2014. 446 с.
2. Принципы оптики: учебное пособие/ Н.А. Кириченко