

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4.7.3

Изучение поляризованного света.

Автор:

Глеб Уваркин

615 группа

Преподаватель:

Клёнов Сергей Львович



31 марта 2018 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 света (пластинка чувствительного оттенка).

1 Теоретические сведения.

Естественный и поляризованный свет. Как известно, световые волны поперечны: электрический вектор **E** и магнитный вектор **H** (или **B**) взаимно перпендикулярны и располагаются в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны (лучу **S**). Во всякой данной точке пространства ориентация пары векторов **E** и **H** в плоскости, перпендикулярной лучу **S**, может, вообще говоря, изменяться со временем. В зависимости от характера такого изменения различают естественный и поляризованный свет.

Обычные источники света являются совокупностью огромного числа быстро высвечивающихся ($10^{-10} \div 10^{-9}$) элементарных источников (атомов или молекул), испускающих свет независимо друг от друга, с разными фазами и с разными ориентациями векторов **E** и **H**. Ориентация векторов **E** и **H** в результирующей волне поэтому хаотически изменяется во времени, так что в плоскости, перпендикулярной лучу **S**, все направления оказываются в среднем равноправными. Такой свет называют естественным или неполяризованным.

При помощи специальных приспособлений (поляризаторов) естественный свет может быть превращен в линейно поляризованный. В линейно поляризованной световой волне пара векторов **E** и **H** не изменяет с течением времени своей ориентации. Плоскость **E**, **S** называется в этом случае плоскостью колебаний. Наиболее общим типом поляризации является эллиптическая поляризация. В эллиптически поляризованной световой волне конец вектора **E** (в данной точке пространства) описывает некоторый эллипс. Линейно поляризованный свет можно рассматривать как частный случай эллиптически поляризованного света, когда эллипс поляризации вырождается в отрезок прямой линии; другим частным случаем является круговая поляризация (эллипс поляризации является окружностью).

При теоретическом рассмотрении различных типов поляризации часто бывает удобно проектировать вектор **E** в некоторой точке пространства на два взаимно перпендикулярных направления (рис. 1). В том случае, когда исходная волна была поляризованной, E_x и E_y когерентны между собой и могут быть записаны в виде

$$E_x = E_{x0} \cos(kz - \omega t), \quad E_y = E_{y0} \cos(kz - \omega t - \varphi) \quad (1)$$

где амплитуды E_{x0} , E_{y0} , волновой вектор **k**, частота ω и сдвиг фаз φ не зависят от времени. Формулы (1) описывают монохроматический свет. Немонхроматический свет может быть представлен суммой выражений типа (1) с различными значениями частоты ω .

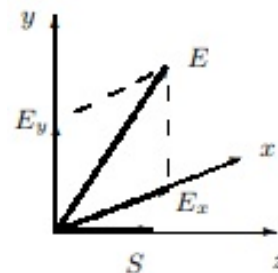


Рис. 1: Представление световой волны в виде двух линейно поляризованных волн.

Ориентация эллипса поляризации определяется отношением амплитуд E_{y_0}/E_{x_0} и разностью фаз φ . В частности, при $\varphi = 0, \pm\pi$ эллипс вырождается в отрезок прямой (линейная поляризация). При $\varphi = \pm\varphi\pi/2$ главные оси эллипса совпадают с осями x, y . Если при этом отношение амплитуд $E_{y_0}/E_{x_0} = 1$, эллипс поляризации вырождается в окружность 2.

В плоскости $z = z_0$ вектор \mathbf{E} волны (1) вращается против часовой стрелки (при наблюдении навстречу волне), если $0 < \varphi < \pi$. В этом случае говорят о левой эллиптической поляризации волны. Если же $\pi < \varphi < 2\pi$, вращение вектора \mathbf{E} происходит по часовой стрелке, и волна имеет правую эллиптическую поляризацию.

В фиксированный момент времени $t = t_0$ концы вектора \mathbf{E} при различных z лежат на винтовой линии. При этом для левой эллиптической поляризации образуется левый винт, а для правой – правый винт.

Неполяризованный свет также может быть разложен на две линейно поляризованные компоненты; однако в этом случае разность фаз φ испытывает быстрые хаотические изменения, так что колебания E_x и E_y оказываются некогерентными.

Методы получения линейно поляризованного света. Для получения линейно поляризованного света применяются специальные оптические приспособления — поляризаторы. Направление колебаний электрического вектора в волне, прошедшей через поляризатор, называется разрешенным направлением поляризатора.

Всякий поляризатор может быть использован для исследования поляризованного света, т. е. в качестве анализатора. Интенсивность I линейно поляризованного света после прохождения через анализатор зависит от угла, образованного плоскостью колебаний с разрешенным направлением анализатора:

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

Соотношение (2) носит название закона Малюса.

Отражение света от диэлектрической пластинки. Отраженный от диэлектрика свет всегда частично поляризован. Степень поляризации света, отраженного от диэлектрической пластинки в воздух, зависит от показателя преломления диэлектрика n и от угла падения i . Как следует из формул Френеля, полная поляризация отраженного света достигается при падении под углом Брюстера, который определяется соотношением

$$\operatorname{tg} i = n \quad (3)$$

В этом случае плоскость колебаний электрического вектора в отраженном свете перпендикулярна плоскости падения.

Получение эллиптически поляризованного света. Эллиптически поляризованный свет можно получить из линейно поляризованного с помощью двоякопреломляющих кристаллических пластинок. Двоякопреломляющая пластинка имеет два взаимно перпендикулярных главных направления, совпадающих с осями эллипсоида диэлектрической проницаемости. Волны, поляризованные вдоль главных направлений, распространяются в пластинке с разными скоростями, не изменяя характера своей поляризации. Эти волны называются главными. Мы будем обозначать показатели преломления для главных волн через η_ξ и η_η , где ξ и η — главные направления кристаллической пластинки (рис. 2).

Пусть на пластинку падает линейно поляризованная волна, электрический вектор которой ориентирован под некоторым углом α к оси ξ . Разложим вектор \mathbf{E} на составляющие E_ξ и E_η . На входе пластинки E_ξ и E_η находятся в фазе. На выходе из-за разности скоростей между ними появляется разность хода (выразим её в долях длины волны):

$$\frac{\lambda}{m} = d(n_\xi - n_\eta) \quad (4)$$

при этом сдвиг фаз определяется соотношением

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{m} = kd(n_\xi - n_\eta), \quad (5)$$

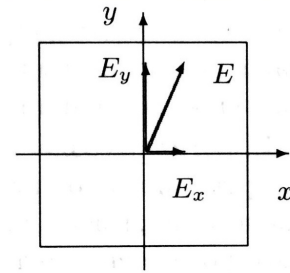


Рис. 2: Разложение линейно поляризованного света по главным направлениям двоякопреломляющей пластинки.

где k – волновое число для вакуума, d – толщина кристаллической пластинки. Как уже отмечалось, при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний, обладающих некоторым сдвигом фаз, образуется колебание, поляризованное по эллипсу.

Анализ эллиптически поляризованного света. Анализ эллиптически поляризованного света сводится к нахождению главных осей эллипса поляризации и к определению направления вращения электрического вектора.

Главные оси эллипса поляризации определяются с помощью анализатора по максимуму и минимуму интенсивности проходящего света. Направление вращения электрического вектора может быть найдено с помощью пластинки в четверть длины волны, для которой известно, какая из главных волн, E_ξ или E_η , имеет большую скорость распространения (и, соответственно, меньшее значение показателя преломления).

Выберем для определенности координатные оси ξ и η на пластинке так, чтобы $n_\xi < n_\eta$. В этом случае главная волна E_ξ имеет большую скорость распространения. Поместим такую пластинку на пути эллиптически поляризованного света и совместим главные оси эллипса поляризации с главными направлениями пластинки $\lambda/4$. На выходе из этой пластинки сдвиг фаз между E_ξ и E_η вместо $\pi/2$ станет равным нулю или π . Свет окажется линейно поляризованным. Из двух возможных значений сдвига фаз, 0 или π , реализуется одно: то, которое соответствует имеющемуся в волне направлению вращения электрического вектора.

Рассмотрим, например, случай, когда электрический вектор в эллиптически поляризованной волне вращается против часовой стрелки, если смотреть навстречу лучу. В этом случае, очевидно, в волне, падающей на пластинку в $\lambda/4$, колебание E_η отстает по фазе на $\pi/2$ от колебания E_ξ . При прохождении через пластинку разность фаз увеличивается до π . На выходе из пластинки, таким образом, возникают линейно поляризованные волны со сдвигом фаз π . Сложение этих волн дает плоско поляризованную волну, электрический вектор которой располагается во втором и четвертом квадрантах координатной системы ξ, η .

Рассуждая аналогичным образом, найдем, что при вращении электрического вектора по часовой стрелке направление колебаний в линейно поляризованной волне, выходящей из пластинки, располагается в первом и третьем квадрантах. Определяя направление колебаний на выходе из пластинки с помощью поляроида, можно, таким образом, определить характер эллиптической поляризации (вращение против или по часовой стрелке).

Пластинка чувствительного оттенка. Установить, какому из двух главных направлений пластинки в четверть длины волны соответствует большая скорость распространения

света, можно с помощью пластинки *чувствительного оттенка* (так называют пластинку в λ для зелёной спектральной компоненты, $\lambda = 560$ нм).

Пластинка имеет форму стрелы, вдоль оси которой расположено главное направление, соответствующее большей скорости распространения.

Если пластинка чувствительного оттенка помещена между скрещенными поляроидами и главные направления пластинки не параллельны направлениям разрешённых колебаний поляроидов, то при освещении белым светом пластинка кажется окрашенной в лилово - красный цвет. Это объясняется тем, что зелёная компонента линейно поляризованного света при прохождении пластинки не меняет поляризации и задерживается вторым поляроидом. Для красной и фиолетовой компонент пластинка создаёт сдвиг фаз, несколько отличный от 2π . На выходе из пластинки красная и фиолетовая компоненты оказываются поэтому эллиптически поляризованными и частично проходят через второй поляроид. Таким образом, в известном смысле наблюдаемый в указанном опыте цвет пластинки дополнителен к зелёному.

Если между скрещенными поляроидами поместить пластинку чувствительного оттенка (λ) и пластинку в $\lambda/4$ так, чтобы их главные направления совпадали, цвет пластинки изменится. Если у пластинки чувствительного оттенка и пластинки в $\lambda/4$ совпадут главные направления, соответствующие большей скорости распространения, то разность хода между E_x и E_y для зелёного света составит уже $5\lambda/4$. Это соответствует разности хода в λ для света с большей длиной волны, т.е. для «более красного» света. При освещении этих пластинок белым светом теперь погасится не зелёная, а красная часть спектра, и проходящий свет будет казаться зеленовато - голубым. Если же главные направления, соответствующие большей скорости распространения, у пластинки чувствительного оттенка и у пластинки в $\lambda/4$ окажутся перпендикулярными, то проходящий свет приобретёт оранжево - жёлтую окраску (погасится фиолетово - голубая часть спектра).

Изменение цвета позволяет, таким образом, определить какое из главных направлений пластинки в $\lambda/4$ соответствует большей скорости.

Интерференция поляризованных лучей. Тонкие двоякопреломляющие пластинки, помещённые между поляроидами, кажутся окрашенными. Эта окраска может быть истолкована как результат интерференции поляризованных лучей. На рис. 3 представлена схема для случая скрещенных поляроидов.

Здесь $p_1 p'_1$ – разрешённое направление колебаний первого поляроида; x, y – координатная система, связанная с главными направлениями двоякопреломляющей пластинки; $p_2 p'_2$ – разрешённое направление колебаний второго поляроида. Волны E_x и E_y на выходе из пластинки когерентны, но не могут интерферировать, так как $E_x \perp E_y$. Волны E_1 и E_2 на выходе второго поляроида также являются когерентными и к тому же поляризованы в одной плоскости. Эти волны интерферируют между собой. Результат интерференции определяется зависящим от длины волны сдвигом фаз между E_1 и E_2 . В результате интерференции поляризованных лучей пластинка, освещаемая белым светом, кажется окрашенной.

Если поворачивать двоякопреломляющую пластинку, расположенную 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

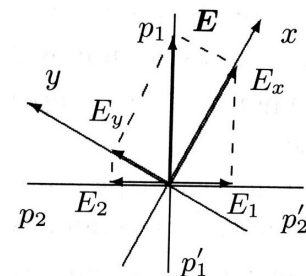


Рис. 3: К объяснению интерференции поляризованных лучей.

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 изменяются так, что цвет пластинки изменится на дополнительный.

2 Ход работы.

2.1 Определение разрешённых направлений поляроидов.

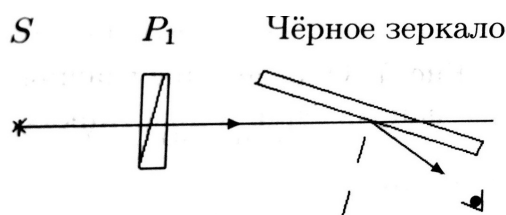


Рис. 4: Определение разрешённого направления поляроида.

Соберём схему, показанную на рис. 4 для определения разрешенных направлений поляроидов.

Получим для 1 поляроида: разрешённое направление **горизонтально** при $+10^\circ$.

Разрешённое направление второго поляроида определим, скрестив поляроиды: после поляроида с известной поляризацией поставим второй поляроид и, глядя навстречу лучу, вращением второго поляроида добьёмся минимальной яркости луча.

Получим для 2 поляроида: разрешённое направление **вертикально** при -50° .

2.2 Определение угла Брюстера для эбонита.

Поставим на скамью вместо чёрного зеркала эбонитовую пластину с круговой шкалой. Повернём эбонитовое зеркало вокруг вертикальной оси так, чтобы его плоскость была перпендикулярна лучу. Отметим начало отсчёта по лимбу: 270° .

Установим направление разрешённых колебаний поляроида P_1 горизонтально и найдём угол поворота эбонита φ_B , при котором интенсивность отражённого луча минимальна: Конец отсчёта 325° .

Глаз не воспринимает изменение интенсивности при повороте на $\pm 3^\circ$. Получаем,

$$\varphi_B = 55^\circ$$

$$n = \operatorname{tg} \varphi_B \Rightarrow n \simeq 1.43 \pm 0.05$$

Повторим изменения, добавив светофильтр Φ . В результате этого лишь уменьшилась интенсивность, а угол Брюстера не изменился.

2.3 Исследование стопы.

Поставим стопу стеклянных пластинок вместо эбонитового зеркала и подберём для нее такое положение, при котором свет падает на стопу под углом Брюстера.

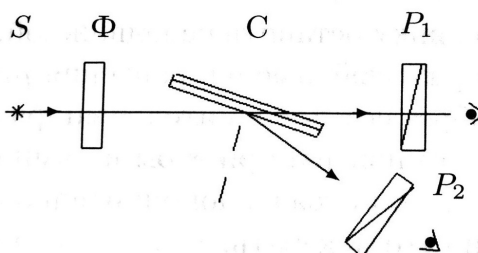


Рис. 5: Исследование стопы.

Осветим стопу неполяризованным светом и, рассматривая через поляроиды (рис 5) свет, отражённый от стопы, определим ориентацию вектора \mathbf{E} в отражённом луче: отражённый луч поляризован, *вектор \mathbf{E} перпендикулярен плоскости падения*, т.е **вертикален**.

Преломлённый свет поляризован частично, максимальная интенсивность наблюдается при горизонтальном разрешённом направлении поляроида.

2.4 Определение главных направлений двойкопреломляющих пластин.

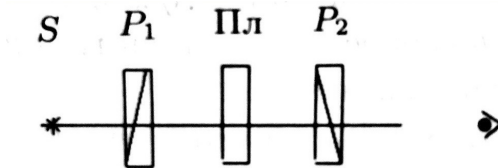


Рис. 6: Определение главных направлений в пластинках.

Поставим кристаллическую пластинку между скрещенными поляроидами (рис. 6). Вращая пластинку вокруг направления луча и наблюдая за интенсивностью света, найдём положение пластинки, при котором интенсивность минимальна. В таком положении разрешённые направления поляроидов совпадают с главными направлениями пластин.

Для чёрной пластины: *min* при 260° .

Для серебристой пластины: *min* при 50° .

2.5 Выделение пластин $\frac{\lambda}{2}$ и $\frac{\lambda}{4}$.

Добавим к схеме изображённой на рис.6 зелёный фильтр. Установим разрешённое направление первого поляроида горизонтально, а главные направления исследуемой пластинки – под углом 45° к горизонтали.

Получаем, что в опыте с серебристой пластиной интенсивность света при вращении 2 поляроида практически не меняется \Rightarrow поляризация круговая \Rightarrow

серебристая пластинка – $\lambda/4$

В опыте с чёрной пластинкой интенсивность имеет ярко выраженный максимум и минимум \Rightarrow линейная поляризация \Rightarrow

чёрная пластинка – $\lambda/2$

2.6 Определение направлений «быстрой» и «медленной» оси в пластинке $\lambda/4$.

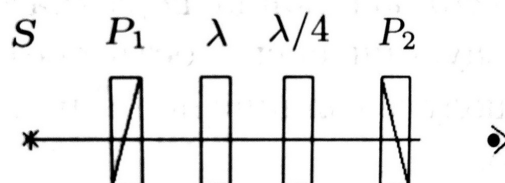


Рис. 7: Определение направлений большей и меньшей скорости.

Поставим между скрещенными поляроидами пластинку чувствительного оттенка (λ для зелёного цвета), имеющую вид стрелки. Световой вектор, ориентированный вдоль направления стрелки, проходит с большей скоростью, перпендикулярный с меньшей.

Добавим к схеме пластинку $\lambda/4$ (рис.7), главные направления которой совпадают с главными направлениями пластины λ и ориентированы под углом 45° к разрешённым направлениям скрещенных поляроидов.

При вращении пластинки относительно пластинки чувствительного оттенка цвет стрелки менялся от голубого до жёлтого. В положении, когда цвет голубой, быстрые направления пластинок совпадают, когда жёлтый, они перпендикулярны.

Получаем, что *быстрая ось вертикальна при 135°* .

2.7 Интерференция поляризованных лучей.

Расположим между скрещенными поляроидами мозаичную слюдяную пластинку. Она собрана из 4-х узких полосок слюды, лежащих по сторонам квадрата (две полоски «толщиной» $\lambda/4$ и по одной – $\lambda/2$ и $3\lambda/4$). В центральном квадратике слюды нет. Главные направления всех пластинок ориентированы параллельно сторонам квадрата.

При вращении мозаичной пластинки менялась только интенсивность света, а цвета оставались неизменными. За один оборот пластинки интенсивность четыре раза обращается в нуль – это происходит при совпадении главных направлений x и y с разрешёнными направлениями колебаний поляроидов.

Вращая 2 поляроид, мы заметили, что менялись цвета квадрантов. Это происходило в том случае, когда направления $p_1p'_1$ и $p_2p'_2$ совпадали (см рис. 3). В этом случае волны E_1 и E_2 приобретают дополнительный фазовый сдвиг на π для всех спектральных компонент (то есть, те спектральные линии, которые имели максимум, теперь имеют минимум) \Rightarrow цвет пластинки изменяется на дополнительный.

2.8 Определение направления вращения светового вектора в эллиптически поляризованной волне.

1. Нарисуем эллипс поляризации для вектора \mathbf{E} , вышедшего из пластинки $\lambda/4$, и укажем на нём направление большей и меньшей скорости. Рядом нарисуем две вышедших из пластинки синусоиды: $x(t)$ и $y(t)$ со сдвигом фаз в четверть периода (рис. 8).

Пусть x – направление быстрой оси, то E_x опережает по фазе на $T/4$ E_y .

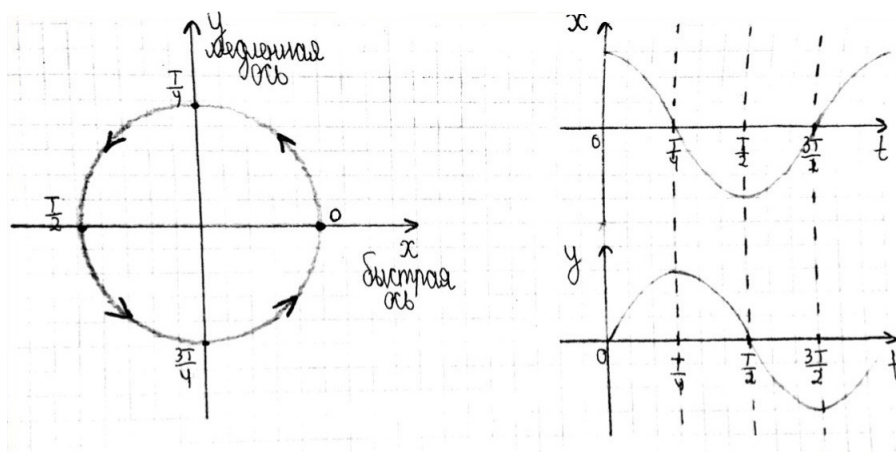


Рис. 8: К определению направления эллиптической поляризации.

2. Получим эллиптически-поляризованный свет. Для этого установим разрешённое направление первого поляроида под углом 30° к горизонтали так, чтобы вектор \mathbf{E} падающего на пластинку света был расположен в первом квадранте. Установим разрешённое направление второго поляроида вертикально и, вращая пластинку найдём минимальную интенсивность света, прошедшего второй поляроид. Вращая второй поляроид, убедимся что свет поляризован эллиптически, а не линейно. Таким образом, мы получили эллипс поляризации с вертикально ориентированной малой осью.
3. Для определения направления вращения светового вектора в эллипсе установим между поляроидами дополнительную пластинку $\lambda/4$ с известными направлениями «быстрой» и «медленной» осей, ориентированными по осям эллипса поляризации анализируемого света. В этом случае вектор \mathbf{E} на выходе будет таким, как если бы свет прошел две пластинки $\lambda/4$: свет на выходе из второй пластинки будет линейно поляризован.

Получаем, что световой вектор перешел в смежные квадранты (на выходе из 1 поляризатора он лежит в 1 и 3 квадрантах, а после прохождения пластинок во 2 и 4 квадрантах). Значит, разность фаз, даваемая пластинками не скомпенсировалась, а сложилась. Значит, эллипсы вращаются в одну сторону.

Из пункта 1 получаем, что эллипсы поляризации ориентированы

против часовой стрелки.

3 Вывод.

В результате проведения этой лабораторной работы, мы

- ознакомились с методами получения и анализа поляризованного света.
- исследовали явление интерференции поляризованного света.
- измерили коэффициент преломления эбонита.
- определили направление вращения вектора \mathbf{E} эллиптически поляризованного света.