

# Лабораторная работа 4.7.3. Изучение поляризованного света.

Радькин Кирилл, Б01-005

8.04.22

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

**Оборудование:** оптическая скамья с осветителем; зелёный светофильтр; два поляроида; чёрное 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 зелёного света (пластинка чувствительного оттенка).

## 1 Теоретическая справка

### 1.1 Определение направления разрешённой плоскости колебаний поляроида

Определить направление разрешённых колебаний поляроида проще всего с помощью чёрного зеркала.

При падении на отражающую поверхность под углом Брюстера, свет в отражённом луче почти полностью поляризован, а вектор  $\mathbf{E}$  параллелен отражающей поверхности. Луч света, прошедший поляроид и отразившийся от чёрного зеркала, имеет минимальную интенсивность при выполнении двух условий: свет падает на отражающую поверхность под углом Брюстера и вектор  $\mathbf{E}$  лежит в плоскости падения.

Вращая поляроид вокруг направления луча и чёрное зеркало вокруг оси, перпендикулярной лучу, методом последовательных приближений можно добиться минимальной яркости луча, отражённого от зеркала, и таким образом определить разрешённое направление поляроида.

Измеряя угол поворота зеркала (угол Брюстера), нетрудно определить коэффициент преломления материала, из которого изготовлено зеркало.

### 1.2 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  $n_x$  и  $n_y$ , где  $x$  и  $y$  — главные направления кристаллической пластинки (Рис. 1).

Пусть на пластинку падает линейно поляризованная волна, электрический вектор которой ориентирован под некоторым углом  $\alpha$  к оси  $x$ . Разложим вектор  $\mathbf{E}$  на составляющие  $E_x$  и  $E_y$ . На входе пластинки  $E_x$  и  $E_y$  находятся в фазе. На выходе из-за разности скоростей между ними появляется разность хода  $d(n_x - n_y)$ , при этом сдвиг фаз определяется соотношением

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{m} = kd(n_x - n_y) \quad (1)$$

Как уже отмечалось, при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний, обладающих некото-

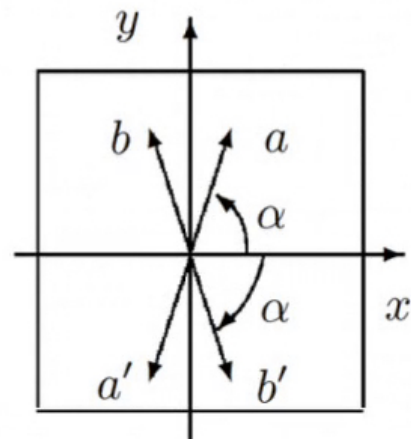


Рис. 1. Разложение линейно поляризованного света.

рым сдвигом фаз, образуется колебание, поляризованное по эллипсу.

Рассмотрим практически важные частные случаи.

1. Пластика даёт сдвиг фаз  $2\pi$  (пластинка в длину волны  $\lambda$ ). В результате сложения волн на выходе пластинки образуется линейно поляризованная волна с тем же направлением колебаний, что и в падающей волне.
2. Пластика даёт сдвиг фаз  $\pi$  (пластинка в полдлины волны  $\lambda/2$ ). На выходе пластинки снова образуется линейно поляризованная волна. Направление  $bb'$  колебаний этой волны повернуто относительно направления  $aa'$  колебаний падающей волны (рис. 2). Как нетрудно сообразить, направление  $bb'$  является зеркальным отображением направления  $aa'$  относительно одного из главных направлений пластинки. Такую пластинку используют для поворота направления колебаний линейно поляризованного света.

3. Пластика создаёт между колебаниями сдвиг фаз  $\pi/2$  (пластинка в четверть длины волны). При сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний, имеющих разность фаз  $\pi/2$ , образуется эллипс, главные оси которого совпадают с координатными осями  $x$  и  $y$ . При равенстве амплитуд возникает круговая поляризация.

Следует отметить, что, говоря о пластинках  $\lambda$ ,  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$  и т. д., всегда подразумевают какую-либо вполне определённую монохроматическую компоненту (например, пластинка  $\lambda/2$  для зелёного света). Если на двоякопреломляющую пластинку падает не монохроматический свет, то на выходе из неё для разных спектральных компонент эллипсы поляризации будут различными.

### 1.3 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,  $E_x$  или  $E_y$ , имеет большую скорость распространения (и соответственно меньшее значение показателя преломления).

Выберем для определённости координатные оси  $x$  и  $y$  на пластинке так, чтобы  $n_x < n_y$ . В этом случае главная волна  $E_x$  имеет большую скорость распространения. Поместим такую пластинку на пути эллиптически поляризованного света и совместим главные направления пластинки  $\lambda/4$  с главными осями эллипса поляризации. На выходе из этой пластинки сдвиг фаз между  $E_x$  и  $E_y$  вместо  $\pi/2$  станет равным нулю или  $\pi$ . Свет окажется линейно поляризованным. Из двух возможных значений сдвига фаз, 0 или  $\pi$ , 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  $E_y$  отстаёт по фазе на  $\pi/2$  от колебания  $E_x$ . При прохождении через пластинку разность фаз увеличивается до  $\pi$ . Таким образом на выходе из пластинки возникают линейно поляризованные волны со сдвигом фаз  $\pi$ . Сложение этих волн даёт плоскополяризованную волну, электрический

вектор которой располагается во втором и четвёртом квадрантах координатной системы  $x, y$ .

Рассуждая аналогичным образом, найдём, 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).

## 1.4 Пластика чувствительного оттенка

Выше предполагалось известным, какому из двух главных направлений пластинки в четверть длины волны соответствует большая скорость распространения света. Установить это можно различными способами, например с помощью пластинки чувствительного оттенка (так называют пластинку в  $\lambda$  для зелёной спектральной компоненты,  $\lambda = 560$  нм). 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.

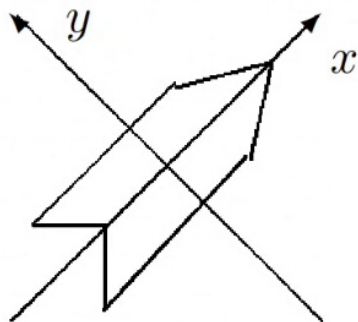


Рис. 2. Пластика чувствительного оттенка

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  $2\pi$ . 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 ( $\lambda$ ) 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  $\lambda$  для света с большей длиной волны, т. е. для «более красного» света. При освещении этих пластинок (напомним, что они расположены между скрещенными поляроидами) 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-желтую окраску (погасится фиолетово-голубая часть спектра).

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

## 1.5 Интерференция поляризованных лучей

Тонкие двоякопреломляющие пластинки, помещённые между поляроидами, кажутся окрашенными. Эта окраска может быть истолкована как результат интерференции поляризо-

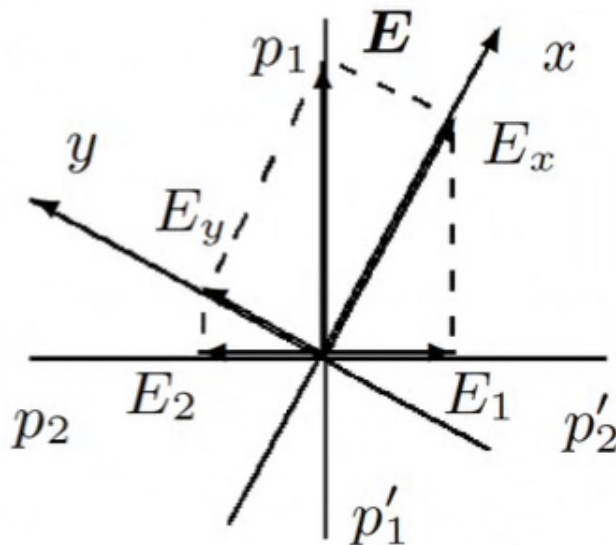


Рис. 3. К объяснению интерференции поляризованных лучей

ванных лучей. На рис. 4 представлена схема для случая скрещенных поляроидов.

Здесь  $p_1p'_1$  — разрешённое направление колебаний поляризатора (первого поляроида);  $x, y$  — координатная система, связанная с главными направлениями двоякопреломляющей пластинки;  $p_2p'_2$  — разрешённое направление колебаний анализатора (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 обращается в нуль — это происходит при совпадении главных направлений  $x$  и  $y$  с разрешёнными направлениями колебаний поляроидов.

## 2 Ход работы

### 2.1 Определение разрешенных направлений поляроида

Поворачивая поляроид вокруг направления луча, добьемся наименьшей яркости отражённого пятна. Оставим поляроид в этом положении и вращением зеркала вокруг вертикальной оси снова добьемся минимальной интенсивности отражённого луча. Уточним положения поляроида и зеркала, соответствующие минимуму интенсивности, и определим разрешённое направление поляроида.

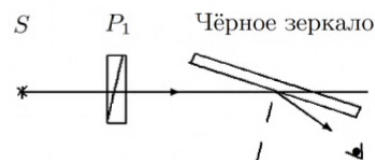


Рис. 4. Определение разрешенных направлений поляроида

да:  $8^\circ$ .

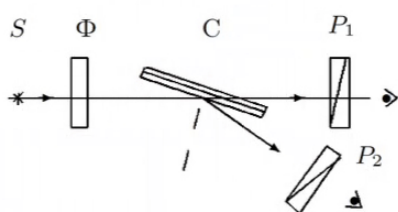
Разрешённое направление второго поляроида можно определить, скрестив поляроиды: после поляроида с известной поляризацией поставим второй поляроид и, глядя навстречу лучу, вращением второго поляроида добьемся минимальной яркости луча. Разрешенное направление второго поляроида:  $-10^\circ$

## 2.2 Определение показателя преломления эбонита

Поставим на скамью вместо чёрного зеркала (Рис. 4) эбонитовую пластину и определим по лимбу угол Брюстера. Получаем  $\theta_1 = (58 \pm 5)^\circ$  без фильтра и  $\theta_2 = (56 \pm 5)^\circ$ .

Отсюда получаем, что  $n = \operatorname{tg} \theta_1 \approx 1.6 \pm 0.2$ . Табличное значение коэффициента преломления эбонита находится между 1.6 и 1.7.

## 2.3 Исследование стопы



Исследуем характер поляризации света в преломлённом и отражённом от стопы лучах.

Для этого поставим вместо эбонитового зеркала (Рис. 5) стопу стеклянных пластинок под углом Брюстера.

В отраженном луче минимум при  $5^\circ$  на поляризаторе  $\rightarrow$  у отраженного луча поляризация вертикальная. В преломленном луче при  $98^\circ$  минимум  $\rightarrow$  поляризация горизонтальная.

Рис. 5. Исследование стопы

## 2.4 Двойкопреломляющие пластины

Поставим однородную кристаллическую пластинку между скрещенными поляроидами. Вращая пластинку вокруг направления луча и наблюдая за интенсивностью света, проходящего сквозь второй поляроид, определим, при каком условии главные направления пластинки совпадают с разрешёнными направлениями поляроидов.

У первой пластины:  $277^\circ$  — горизонтальное направление, у второй пластинки:  $5^\circ$  — горизонтальное направление.

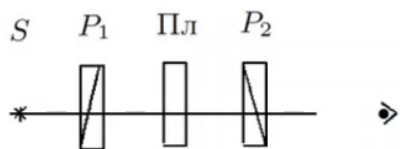


Рис. 6. Определение главных направлений в пластинках

## 2.5 Пластинки $\lambda/2$ , $\lambda/4$

Для выделения пластин  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$  Добавим к схеме, изображённой на Рис. 7, зелёный фильтр и установим разрешённое направление первого поляроида горизонтально, а главные направления исследуемой пластинки — под углом  $45^\circ$  к горизонтали.

С помощью второго поляроида установим, какую поляризацию имеет свет, прошедший пластинку: круговую или линейную. В случае пластинки  $\lambda/4$  получаем круговую поляризацию, а при  $\lambda/2$  — линейную.

## 2.6 Быстрая и медленная оси $\lambda/4$

Поставим между скрещенными поляроидами пластинку чувствительного оттенка, имеющую вид стрелки. Уберем зелёный фильтр и убедимся, что стрелка имеет пурпурный цвет. Это объясняется тем, что зелёная компонента линейно поляризованного света при прохождении пластинки не меняет поляризации и задерживается вторым поляроидом. Добавим к схеме пластинку  $\lambda/4$  (Рис. 7), главные направления которой совпадают с главными направлениями пластины  $\lambda$  и ориентированы под углом  $45^\circ$  к разрешённым направлениям скрещенных поляроидов. При повороте рейтера со стрелкой на  $180^\circ$  вокруг вертикальной оси цвет стрелки меняется от зелёно-голубого до оранжево-жёлтого. В первом случае у нас «быстрая» ось (они совпадают), во втором — медленная согласно пункту 1.4.

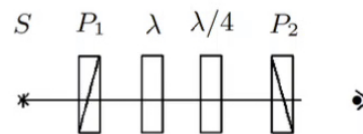


Рис. 7. Определение направлений большей и меньшей скорости

## 2.7 Эллиптически поляризованная волна

Нарисуем эллипс поляризации для вектора напряжённости из пластинки  $\lambda/4$  и укажем, какая из осей соответствует большей скорости. Это ось  $x$ . Рядом нарисуем две вышедших из пластинки синусоиды:  $x(t)$  (красная) и  $y(t)$  (синяя) со сдвигом фаз в четверть периода. Определим направление вращения электрического вектора в эллиптически поляризованной волне.

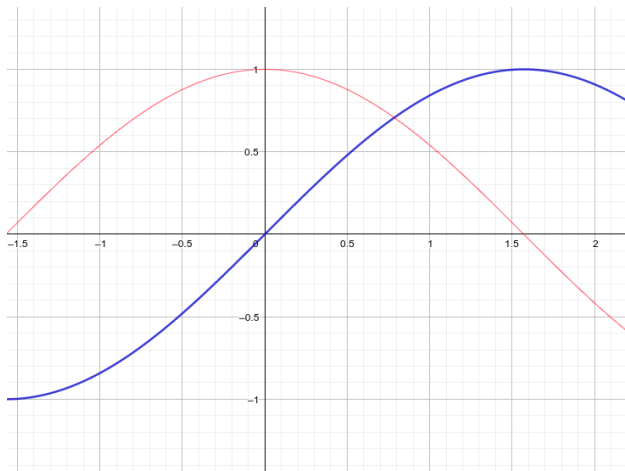


Рис. 8. Синусоиды со сдвигом фаз  $\pi/2$

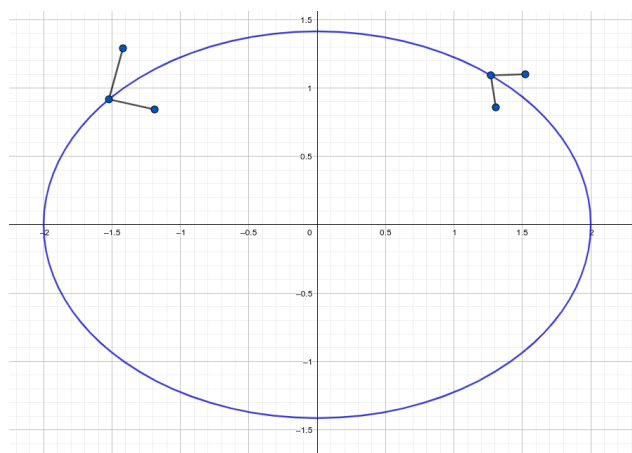


Рис. 9. Эллипс поляризации

Т.к. на выходе вектор  $E$  остался в 1-3 квадрантах, это означает, что вращение происходит против часовой стрелки.

## 2.8 Интерференция поляризованных лучей

Исследуем интерференцию поляризованных лучей. Для этого 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 пластинки изменяются только цвета в ячейках (кроме центральной). При вращении поляроида меняются цвет и интенсивность света в клетках.