

4.7.3. ПОЛЯРИЗАЦИЯ

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).

Теоретическая часть

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. Пусть на пластинку падает линейно поляризованная волна, электрический вектор которой ориентирован под некоторым углом α к оси x . Разложим вектор 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:

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

где k — волновое число (в пустоте), d — толщина кристаллической пластинки. Как уже отмечалось, при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний, обладающих некоторым сдвигом фаз, образуется колебание, поляризованное по эллипсу.

Рассмотрим практически важные частные случаи.

- а) Пластинка даёт сдвиг фаз 2π (пластинка в длину волны λ). В результате сложения волн на выходе пластинки образуется линейно поляризованная волна с тем же направлением колебаний, что и в падающей волне.
- б) Пластинка даёт сдвиг фаз π (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. 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.
- в) Пластинка 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 $E_x^{max} = E_y^{max}$ возникает круговая поляризация.

Следует отметить, что, говоря о пластинках λ , $\lambda/2$, $\lambda/4$ 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.

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 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_y отстаёт по фазе на $\pi/2$ от колебания E_x . При прохождении через пластинку разность фаз увеличивается до π . Таким образом на выходе из пластинки возникают линейно поляризованные волны со сдвигом фаз π . 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).

Пластинка 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 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 скрещёнными 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 (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.

Интерференция поляризованных лучей. Тонкие двоякопреломляющие пластинки, помещённые между поляроидами, кажутся окрашенными. Эта окраска может быть истолкована как результат интерференции поляризованных лучей. 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. 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. Студентам предлагается самостоятельно это доказать.

Результаты и обработка

1. **Определение разрешенных направлений поляроида.** Методом последовательных приближений (поворачиваем зеркало и поляроид) была получена минимальная интенсивность (черное пятно) при отражении от зеркала света, прошедшего через

поляроид. Отсчет по лимбу для поляроида P1 $(82.6 \pm 0.2)^\circ$.

Таблица 1: Запись по лимбу для разрешенного направления поляроида P1

№	1	2	3	4	5
$\varphi, ^\circ$	83	82	82	83	83

Скрестив первый поляроид со вторым получили минимум интенсивности при отсчете по лимбу P2 $(-9.8 \pm 0.2)^\circ$.

Таблица 2: Запись по лимбу для разрешенного направления поляроида P2

№	1	2	3	4	5
$\varphi, ^\circ$	-9	-10	-10	-10	-10

2. **Определение показателя преломления для эбонита.** Поворачивая зеркало, ищем минимум интенсивности отраженного света прошедшего через поляроид. Начало отсчета $(88.0 \pm 0.5)^\circ$ – зеркало выставлено параллельно поляроиду.

Таблица 3: Запись по лимбу зеркала для минимума интенсивности

№	1	2	3	4	5
$\varphi, ^\circ$	31	31	32	33	32

Таблица 4: Запись по лимбу зеркала для минимума интенсивности зеленого света

№	1	2	3	4	5
$\varphi, ^\circ$	32	33	32	33	32

Итоговые значения: $(56 \pm 1)^\circ$, зеленый свет: $(56 \pm 1)^\circ$. Показатель преломления оценим по формуле $n = \tan \varphi_B$.

$$n = (1.49 \pm 0.03) \quad n_z = (1.46 \pm 0.03)$$

3. **Исследование поляризации света в преломленном и отраженном от стопы лучах.** Освещаем стопу неполяризованным светом и рассматриваем через поляроиды отраженный от стопы и преломленный лучи. Результаты представлены в таблице.

Таблица 5: Поляризация света в преломленном и отраженном от стопы лучах

	Вертикальная поляризация	Горизонтальная поляризация
Преломленный свет	–	+
Отраженный свет	+	–

4. **Определение главных направлений двоякопреломляющих пластин.** Вращая пластинку вокруг направления луча и наблюдая за интенсивностью света, проходящего сквозь второй поляроид, определяем, положение при котором интенсивность света минимальна – при этом условии главные направления пластинки совпадают с разрешёнными направлениями поляроидов. Полученные отсчеты по лимбу для пластин:

$$\varphi_{\lambda/2} = (5 \pm 1)^\circ \quad \varphi_{\lambda/4} = (62 \pm 1)^\circ.$$

5. **Выделение пластин $\lambda/2$ и $\lambda/4$.** Устанавливаем разрешённое направление первого поляроида горизонтально, а главные направления исследуемой пластинки – под углом 45° к горизонтالي. Наблюдаем свет через второй поляроид, вращая его:

$\lambda/4$ ничего не меняется – поляризация круговая;

$\lambda/4$ минимумы сменяют максимумы и т.д – линейная поляризация.

6. **Определение быстрой и медленной оси в пластине** Определите «быструю» и «медленную» оси в пластинке $\lambda/4$: Поставим между скрещенными поляроидами пластинку чувствительного оттенка, имеющую вид стрелки. Из первого поляроида выходит горизонтально поляризованный свет, второй пропускает – вертикально поляризованный. Добавляем к схеме пластинку $\lambda/2$, главные оси повернуты под углом 45° к горизонту. При повороте рейтера со стрелкой на 180° вокруг вертикальной оси цвет стрелки меняется от зелёно-голубого до оранжево-жёлтого. В случае когда цвет стрелки зелено-голубой – ее направление совпадает с быстрой осью пластины $\lambda/2$.

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. Вращая пластинку, наблюдаются изменения интенсивностей в отдельных квадратиках. Не трогая пластинки, вращаем поляроид, при этом цвета квадратиков изменяются на дополнительные. Чем отличается эффект? Опишите и объясните результат.

8. **Направление вращения светового вектора в эллиптически поляризованной волне.**

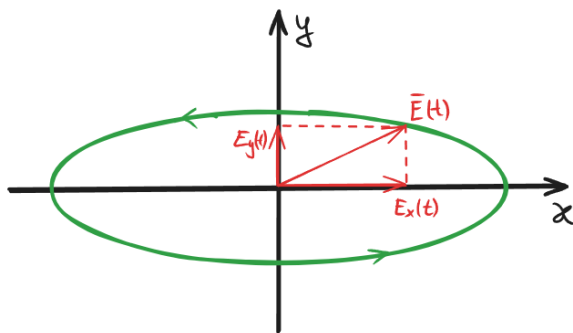


Рис. 1: Эллипс поляризации вектора \mathbf{E}

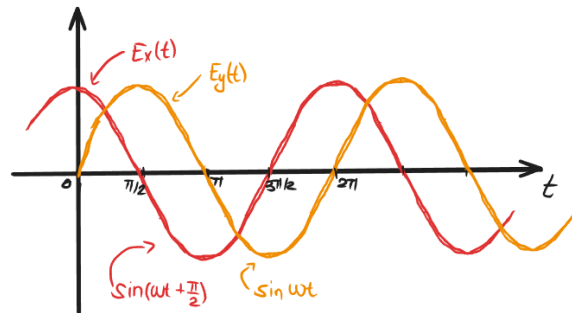


Рис. 2: Графики зависимости E_x, E_y от времени

Нетрудно заметить, что направление вращения вектора \mathbf{E} против часовой стрелки возникает при разнице фаз $\varphi_x - \varphi_y = \pi/2$. Вращению по часовой стрелке соответствует $\varphi_x - \varphi_y = -\pi/2$. Если быстрая ось – Ox , то разность фаз $-\varphi_x + \varphi_y = kd(n_x - n_y) < 0$,

то есть вектор **E** после пластинки $\lambda/4$ вращается против часовой стрелке. Устанавливаем разрешённое направление первого поляроида под углом $\sim 15^\circ$ к горизонтали. Устанавливаем разрешённое направление второго поляроида вертикально, вращая пластинку, находим минимальную интенсивность света, прошедшего второй поляроид. Так мы получили эллипс поляризации с вертикально ориентированной малой осью.

Устанавливаем между поляроидами дополнительную пластинку $\lambda/4$ с горизонтально ориентированной «быстрой» осью. В этом случае свет на выходе из второй пластинки будет линейно поляризован. При этом световой вектор перешел в смежные квадранты, то есть пластинки дают эллипсы, вращающиеся в одну сторону. Значит направление вращения против часовой стрелке.