

Лабораторная работа №4.7.3

Поляризация

Севастьян Черняков и Иван Юдин

2 мая 2024 г.

Цель работы: ознакомление с методами получения и анализа поляризованного света

1 Теоретические сведения

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 («правило иголки»). 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.

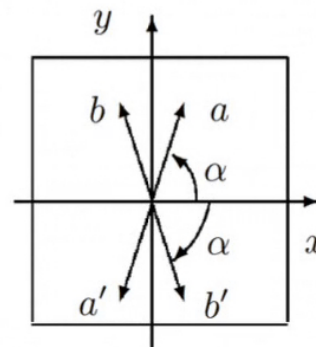
Вращая поляроид вокруг направления луча и чёрное зеркало вокруг оси, перпендикулярной лучу, методом последовательных приближений можно добиться минимальной яркости луча, отражённого от зеркала, и таким образом определить разрешённое направление поляроида.

Измеряя угол поворота зеркала (угол Брюстера), нетрудно определить коэффициент преломления материала, из которого изготовлено зеркало. Описанный метод часто используется для измерения коэффициента преломления непрозрачных диэлектриков.

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).



Разложение линейно поляризованного света по главным направлениям.

Пусть на пластинку падает линейно поляризованная волна, электрический вектор которой ориентирован под некоторым углом α 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

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

Как уже отмечалось, при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний, обладающих некоторым сдвигом фаз, образуется колебание, поляризованное по эллипсу.

Рассмотрим практически важные частные случаи.

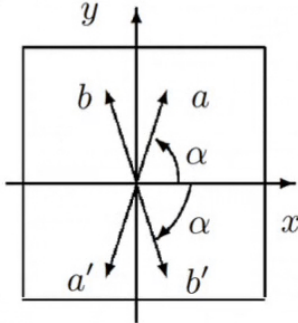


Рис. 1: Поворот направления колебаний с помощью пластинки в $\lambda/2$

1. Пластика 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.
2. Пластика 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 (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 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.

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 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).

1.4 Пластика чувствительного оттенка

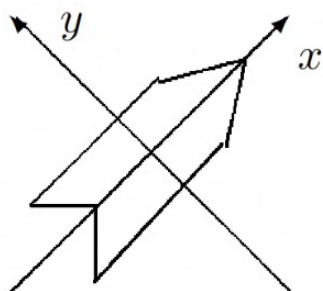


Рис. 2: Пластика чувствительного оттенка

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 λ для зелёной спектральной компоненты, $\lambda = 560$ нм).

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 скрещёнными 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 скрещёнными 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 поляризованных лучей. На рис. 4 представлена схема для случая скрещённых 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

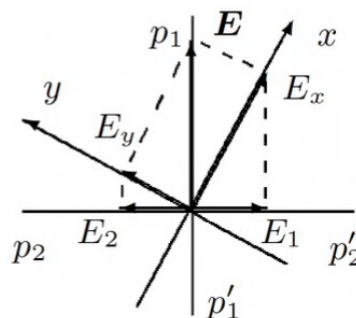


Рис. 3: К объяснению интерференции поляризованных лучей

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 Результаты измерений и обработка данных

2.1 Определение разрешенных направлений поляроида

Поворачивая поляроид вокруг направления луча, а чёрное зеркало вокруг вертикальной оси, методом последовательных приближений добьемся наименьшей яркости отражённого пятна. Определим разрешённое направление поляроида. По лимбу оно равно 89°

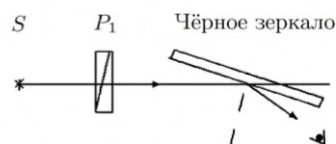


Рис. 4: Определение разрешенных направлений поляроида

2.2 Определение показателя преломления эбонита

Поставим на скамью вместо чёрного зеркала (рис. 5) эбонитовую пластину и определим по лимбу угол Брюстера. Получаем $\theta = (52 \pm 4)^\circ$.

Отсюда получаем, что $n = \operatorname{tg} \theta \approx 1,3 \pm 0,3$, что совпадает с табличным значением $n = 1.6$ с учетом погрешности.

2.3 Исследование стопы

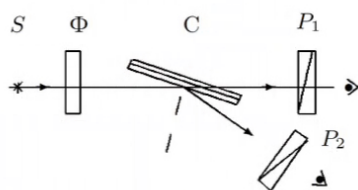


Рис. 5: Исследование стопы

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.

Осветим стопу неполяризованным светом и, рассматривая через поляроиды (рис. 6) отражённый от стопы и преломлённый лучи, определим в них ориентацию вектора \mathbf{E} . Получаем, что он отклоняется от направления распространения света на угол $\pi/2$.

2.4 Двоякопреломляющие пластины

Определим главные направления двоякопреломляющих пластин.

Поставим кристаллическую пластинку между скрещенными поляроидами (рис. 7). 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.

Повторим опыт для второй пластинки.

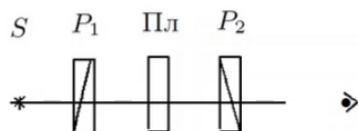


Рис. 6: Определение главных направлений в пластинках

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° к горизонтали.

С помощью второго поляроида установим, какую поляризацию имеет свет, прошедший пластинку: круговую или линейную с переходом в другой квадрант. В случае круговой мы получаем пластинку длиной $\lambda/4$, а при линейной — $\lambda/2$.

2.6 Быстрая и медленная оси $\lambda/4$

Определим «быструю» и «медленную» оси в пластинке $\lambda/4$. Поставим между скрещенными поляроидами пластинку чувствительного оттенка, имеющую вид стрелки, и убедимся, что эта пластинка не меняет поляризацию зелёного света. 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. 8), главные направления которой совпадают с главными направлениями пластины λ и ориентированы под углом 45° к разрешённым направлениям скрещенных поляроидов. При повороте рейтера со стрелкой на 180° 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. Для последнего упражнения установим направление «быстрой» оси пластины $\lambda/4$ горизонтально.

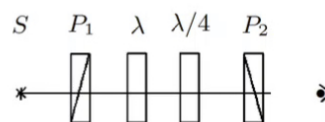


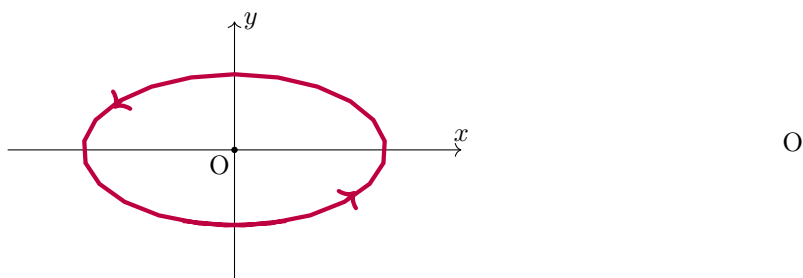
Рис. 7: Определение направлений большей и меньшей скорости

2.7 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. Вращая пластинку, наблюдаем за изменениями в отдельном квадратике. В этом случае изменяется интенсивность. Не трогая пластинки, поворачиваем второй поляризатор. В этом случае изменяется цвет.

2.8 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 нарисует две вышедших из пластинки синусоиды: $x(t)$ и $y(t)$ со сдвигом фаз в четверть периода. Определим направление вращения электрического вектора в эллиптически поляризованной волне.



Эллипс поляризации

3 Вывод

Таким образом, в ходе работы были получены следующие результаты:

- Определены разрешённые направления поляроидов — для первого поляроида разрешённое направление горизонтальное, на лимбе 89° ;
- Был определен показатель преломления эбонита по углу Брюстера:

$$n = 1,3 \pm 0,3$$

Полученный результат в пределах погрешности совпадает с табличным $n = 1,6$;

- Получили, что в стопе стеклянных пластинок преломленные лучи горизонтальные, а отраженные — вертикальные;
- Для двоякопреломляющих пластин определены главные направления — минимумы и максимумы интенсивности чередуются через 45° , главные плоскости пластин совпадают с разрешенными направлениями поляроидов при максимальной интенсивности.
- Выяснили, что из двух имеющихся пластинок первая из них — пластинка $\lambda/2$, а вторая — $\lambda/4$;
- «Быстрая» ось пластинки $\lambda/4$ совпадает с «быстрой» осью пластинки λ и ориентирована под углом 45° к разрешенным направлениям скрещенных поляроидов. При повороте рейтера со стрелкой на 180° вокруг вертикальной оси получаем медленную ось.
- При изучении интерференции поляризованных лучей было получено, что при вращении пластинки в отдельном квадратике изменяется интенсивность, а при вращении второго поляроида — изменяется цвет;
- Было определено направление вращения светового вектора в эллиптически поляризованной волне после пластинки $\lambda/4$: оно компенсирует разность фаз со второй пластинкой, «быстрая» и «медленная» оси которой известны. Таким образом, эллипс первой пластинки вращается в противоположную сторону.