

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.7.3

Изучение поляризованного света

Выполнила студентка группы Б01-903
Прохорова Юлия

Долгопрудный, 2020 г.

Содержание

1. Цель работы	2
2. Оборудование	2
3. Теоретическая часть	2
3.1. Определение направления разрешенной плоскостиколебаний поляроида.	2
3.2. Получение эллиптически поляризованного света.	2
3.3. Анализ эллиптически поляризованного света	3
3.4. Пластиинка чувствительного оттенка	4
3.5. Интерференция поляризованных лучей	5
4. Ход работы	5
4.1. Определение разрешенных направлений поляроидов	5
4.2. Оценим угол Брюстера и коэффициент преломления для эбонита	6
4.3. Исследуем характер поляризации света в преломленном и отраженном от стопы лучах	6
4.4. Определим главные направления двояко преломляющих пластин	6
4.5. Выделение пластиинок $\lambda/4$ и $\lambda/2$	7
4.6. Определить быструю медленную оси в пластиинке $\lambda/4$	7
4.7. Интерференция поляризованных лучей	7
4.8. Определение вращения светового вектора \vec{E} в эллиптически поляризованной волне	7
5. Вывод	8
6. Контрольные вопросы	9

1. Цель работы

Ознакомление с методами получения и анализа поляризованного света.

2. Оборудование

Оптическая скамья с осветителем, зеленый светофильтр, два поляроида, черное зеркало, полированная эбонитовая пластинка, стопа стеклянных пластинок, слюдяные пластиинки разной толщины, пластиинки толщиной $\lambda/4$ и $\lambda/2$, пластиинка в одну длину волны для зеленого света (пластиинка чувствительного оттенка).

3. Теоретическая часть

3.1. Определение направления разрешенной плоскостиколебаний поляроида.

Определить направление разрешенных колебаний поляроида проще всего с помощью черного зеркала. При падении света на отражающую поверхность под углом Брюстера, свет в отраженном луче почти полностью поляризован, а вектор \vec{E} параллелен отражающей поверхности. Луч света, прошедший поляроид и отразившийся от черного зеркала, имеет минимальную интенсивность при выполнении двух условий: во-первых, свет падает на отражающую поверхность под углом Брюстера и, во-вторых, в падающем пучке вектора \vec{E} лежит в плоскости падения.

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

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

3.2. Получение эллиптически поляризованного света.

Эллиптически поляризованный свет можно получить из линейно поляризованного с помощью двоякопреломляющих кристаллических пластинок.

Двоякопреломляющая пластиинка имеет два взаимно перпендикулярных главных направления, совпадающих с осями эллипса диэлектрической проницаемости. Волны, поляризованные вдоль главных направлений, распространяются в пластиинке с разными скоростями, не изменяя характера своей поляризации. Эти волны называют главными. Пусть x , y - главные направления кристаллической пластиинки, тогда n_x и n_y - показатели преломления для главных волн.

Пусть на пластиинку падает линейно поляризованная волна, электрический вектор которой ориентирован под некоторым углом α к оси

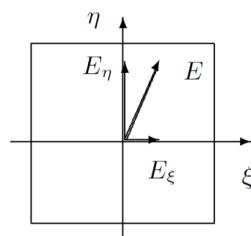


Рис. 1: Разложение линейно поляризованного света по главным направлениям двоякопреломляющей пластиинки

х. Разложим вектор \vec{E} на \vec{E}_x и \vec{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 некоторым сдвигом фаз, образуется колебание, поляризованное по эллипсу.

Рассмотрим практически важные частные случаи.

- Пластиинка (в длину волны λ) дает сдвиг фаз 2π . В результате сложения волн на выходе пласинки образуется линейно поляризованная волна с тем же направлением колебаний, что в падающей волне.
- Пластиинка дает сдвиг фаз π (пoldлины волны $\lambda/2$). Н выходе пластиинки 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 пластиинки. Такую пластиинку изпользуют для поворота направления колебаний линейно поляризованного света.
- Пластиинка создает между колебаниями фаз $\pi/2$ (пластиинка 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 пластиинках $\lambda, \lambda/2, \lambda/4$ и тд, всегда подразумевают какую-либо монохроматическую компоненту (например, $\lambda/2$ для зеленого света). Если на двояко преломляющую пластиинку падает не хроматический свет, то на выходе из нее для разных спектральных компонент эллипсы поляризации будут различны.

3.3. Анализ эллиптически поляризованного света

Анализ эллиптически поляризованного света сводится к нахождению главных осей эллипса поляризации к определнию 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 пластиинки в четверть длины волны, для которойизвестно, какая из главных волн, E_x и E_y , имеет большую скорость распространения (соответственно меньшее значение показателя преломления).

Выберем для определенности координаты оси x и y на пластиинке так, чтобы $n_x < n_y$. В этом случае главная волна E_x имеет большую скорость распространения. Поместим такую пластиинку на пути эллиптически поляризованного света и совместим главные направления пластиинки $\lambda/4$ с главными осями эллипса поляризации. На выходе из этой пластиинки 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 фах (0 и π) реализуется одно: то, которое соответствует имеющемуся в волне направлению вращения электрического вектора.

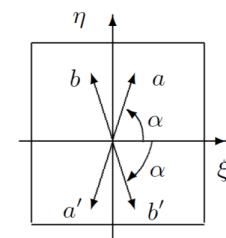


Рис. 2: Поворот направления колебаний с помощью пластиинки в $\lambda/2$

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

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

3.4. Пластинка чувствительного оттенка

Выше предполагалось известным, какому из двух главных направлений пластины в четверть длины соответствует большая скорость распространения света. Установить это можно различными способами, например, с помощью пластины чувствительного оттенка (пластина в λ для зеленой спектральной компоненты, $\lambda = 560\text{нм}$).

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

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

Если у пластины чувствительного оттенка и пластины $\lambda/4$ совпадут главные направления, соответствующие **большей скорости распространения**, то разность хода между E_x и E_y для зеленого света составит уже $5\lambda/4$. Это соответствует разности хода в λ для света с большей длиной волны (для более красного). При освещении пластины белым светом теперь погасится не зеленая, а красная часть спектра, проходящий свет будет казаться зеленовато-голубым.

Если же главные направления, соответствующие большей скорости **окажутся перпендикулярными**, то проходящий свет приобретет оранжево-желтую окраску (погасится фиолетово-голубая часть спектра).

Получим: $\lambda - \lambda/4 = 3\lambda/4 = \lambda' < \lambda$ следует, что P_2 не пропускает голубой свет.

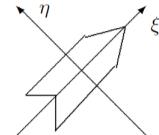


Рис. 3: Пластина чувствительного оттенка

Показатель преломления для обыкновенной волны, которая распространяется вдоль оптической оси x , будет меньше, чем для необыкновенной ($n_o < n_e$) следовательно скорость будет больше.

3.5. Интерференция поляризованных лучей

Тонкие двоякотрепещущие пластиинки, помещенные между поляроидами, кажутся окрашенными. Эта окраска может быть истолкована как результат интерференции поляризованных лучей.

Здесь p_1p' - разрешенное направление колебаний поляризатора (первого поляроида); x, y - координатная система, связанная с главными направлениями двоякотрепещущей пластиинки; p_2p' - разрешенное направление колебаний анализатора (второго поляроида). Волна E_x и E_y на выходе из пластиинки когерентны, но не могут интерферировать, так как $E_x \perp E_y$. Волны E_1 и E_2 на выходе второго поляроида также - когеренты и поляризованы в одной плоскости в добавок. Эти волны интерферируют между собой. Результат интерференции зависящим от длины волны сдвигом фаз между E_1 и E_2 . В результате интерференции поляризованных лучей пластиинка, освещенная белым светом, кажется окрашенной.

Если поворачивать двоякотрепещущую пластиинку, расположенную между скрещенными поляроидами, то соотношение амплитуд волн E_1 и E_2 и разность фаз между ними не изменяются. Это означает, что цвет пластиинки при ее поворотах не меняется, а меняется только интенсивность света. За один оборот пластиинки интенсивность разрешенных направлений колебаний поляроидов.

Если же двоякотрепещущую пластиинку оставить неподвижной, а второй поляроид повернуть, так, чтобы разрешенные направления p_1p' и p_2p' 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 пластиинки изменится на дополнительный.

4. Ход работы

4.1. Определение разрешенных направлений поляроидов

- 1) Разместим на оптической скамье осветитель S , поляроид P_1 и черное зеркало как на рис. 5
- 2) Поворачивая поляроид добьемся наименьшей яркости отраженного пятна и определим разрешенное направление. $\varphi_1 \approx 127^\circ$

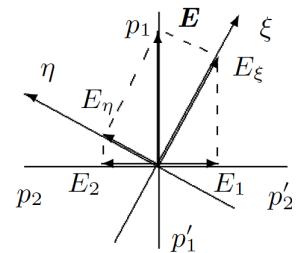


Рис. 4: К объяснению интерференции поляризованных лучей

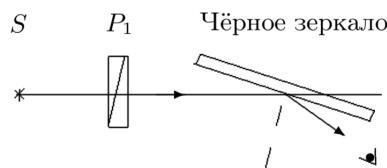


Рис. 5: Определение разрешенного направления поляроида

- 3) Поставим вместо черного зеркала - второй поляроид. Скрестив поляроиды, определим разрешенное направление второго. $\varphi_2 \approx 50^\circ$

4.2. Оценим угол Брюстера и коэффициент преломления для эбонита

- 1) Поставим на скамью эбонитовую пластинку и определим по лимбу угол Брюстера для эбонита. $\varphi_B \approx 123^\circ$
- 2) Добавим светофильтр Φ . $\varphi_B \approx 125^\circ$
- 3) Расчитаем показатель преломления по формуле $\operatorname{tg}(\varphi_B) = n$, получим: $n \approx 1.54$ $n_{\text{фильтр}} \approx 1.43$

4.3. Исследуем характер поляризации света в преломленном и отраженном от стопы лучах

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

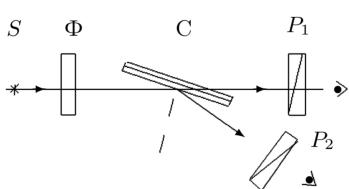


Рис. 6: Исследование стопы

Освятим стопу неполяризованным светом и, рассматривая через поляроиды (рис. 6) отраженный и преломленный лучи, определим в них ориентации вектора \vec{E} .

Видим, что плоскости поляризации для отраженного и преломленного лучей взаимно перпендикулярны. Преломленные лучи горизонтальные, отраженные - вертикальные. Лучи имеют правый вид поляризации. (\vec{E} вращается по часовой стрелке - значит правая) (В отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные плоскости падения; в преломленном луче преобладают колебания, параллельные плоскости падения)

4.4. Определим главные направления двояко преломляющих 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 пластиинки совпадают с разрешенными направлениями поляроидов.

При максимальной интенсивности разрешенные направления поляроидов совпадают с главными осями пластиинки.

Для 1-ой пластиинки углы : $60^\circ, 148^\circ, 236^\circ, 325^\circ$.

Для 2-ой пластиинки углы : $64^\circ, 152^\circ, 240^\circ, 332^\circ$.

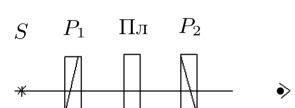


Рис. 7: Определение главных направлений в пластинах

4.5. Выделение пластинок $\lambda/4$ и $\lambda/2$

Добавим к схеме (рис. 7) зеленый фильтр. Установим разрешенное направление первого поляроида горизонтально, а главные направления исследуемой пластиинки - под углом 45° к горизонтали. С помощью второго поляроида установим, какую поляризацию имеет свет, прошедший пластиинку.

- $\lambda/4$ создает сдвиг фаз между колебаниями - эллиптическая поляризация. Она не меняет интенсивность при повороте.
- $\lambda/2$ не меняет характер поляризации, при ее повороте меняется интенсивность.

4.6. Определить быструю медленную оси в пластиинке $\lambda/4$

Поставим между скрещенными поляроидами пластиинку чувствительного оттенка, имеющую вид стрелки (она не меняет поляризацию зеленого света)

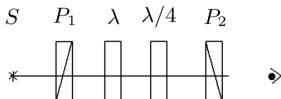


Рис. 8: Определение направлений большей и меньшей скорости

Если мы уберем зеленый фильтр, то стрелка окрасится в пурпурный цвет. Зеленый свет задерживается вторым поляроидом, а красная и синяя компоненты проходят.

При повороте рейтера со стрелкой на 180° вокруг вертикальной оси цвет стрелки меняется от зелено-голубого до оранжево-желтого.

Добавим в схему пластиинку $\lambda/4$ (рис. 8), главные направления которой совпадают с главными направлениями пластины λ и ориентированы под углом 45° к разрешенным направлениям скрещенных поляроидов.

Если же главные направления пластиинки λ не параллельны направлениям разрешенных колебаний скрещенных поляроидов, то пластиинка окрасится в лилово-красный цвет, потому что зеленая компонента линейно поляризованного света при прохождении пластиинки не меняет поляризации и задерживается вторым поляроидом.

Уберем пластиинку чувствительного оттенка. Быстрая ось получилась на 148° .

4.7. Интерференция поляризованных лучей

Разместим между скрещенными поляроидами мозаичную слюянную пластиинку. Она собрана из 4х полосок слюды (две по $\lambda/4$ и по одной - $\lambda/2$ и $3\lambda/4$). В центральном квадратике нет слюды. Главные направления всех пластиинок ориентированы параллельно сторонам квадрата.

- Вращаем пластиинку - изменяется интенсивность света с периодичностью $\pi/4$
- Вращаем второй поляроид - изменяется (инвертируется) цвет пластиинок с периодичностью $\pi/4$

4.8. Определение вращения светового вектора \vec{E} в эллиптически поляризованной волне

- 1) Снова поставим зелёный фильтр, а за ним между скрещенными поляроидами — пластиинку произвольной толщины ($\lambda/4$).
- 2) Получим эллиптически-поляризованный свет. Для этого установим разрешённое направление первого поляроида под углом $10 - 20^\circ$ к горизонтали так, чтобы вектор \vec{E} падающего на пластиинку света был расположен в первом квадранте. Установим разрешённое

направление второго поляроида вертикально и, вращая пластинку, найдем минимальную интенсивность света, прошедшего второй поляроид. Вращая второй поляроид, убедитесь, что свет поляризован эллиптически, а не линейно. Таким образом, получим эллипс поляризации с вертикально ориентированной малой осью.

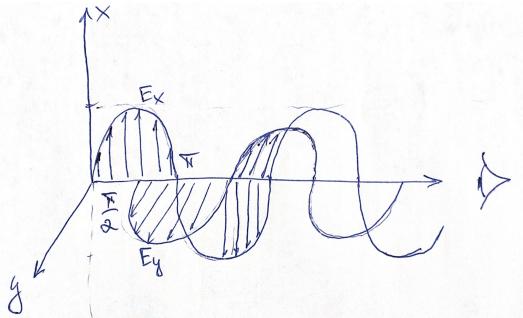


Рис. 9: Вышедшие из пластиинки синусоиды

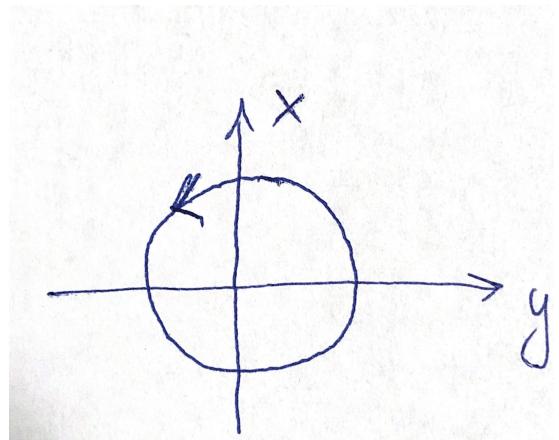


Рис. 10: Эллипс поляризации; ось x соответствует большей скорости

- 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 \vec{E} на выходе будет таким, как если бы свет прошёл две пластиинки $\lambda/4$: свет на выходе из второй пластиинки будет линейно поляризован. Если пластиинки поодиночке дают эллипсы, вращающиеся в разные стороны, то поставленные друг за другом, они скомпенсируют разность фаз, и вектор \vec{E} на выходе останется в первом и третьем квадрантах. Если же световой вектор перешёл в смежные квадранты, значит, эллипсы вращаются в одну сторону.

После второго поляроида интенсивность света максимальна. Значит, две пластины усиливают друг друга, световой вектор перешёл в смежные квадранты, эллипсы вращаются в одну сторону.

5. Вывод

Изучили свойства поляризованного света и на практике проверили оптические характеристики некоторых предметов и материалов.

6. Контрольные вопросы

Покажите, что при выполнении условий Брюстера отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны?

Степень поляризации отраженного и преломленного луча при различных углах падения получается из решения уравнений Максвелла с учетом условий на границе диэлектриков. (рис.11) К числу этих условий принадлежат: равенство тангенциальных составляющих векторов \vec{E} и \vec{H} по обе стороны границы раздела (с одной стороны нужно брать сумму соответствующих векторов для падающей и отраженной волны, с другой - вектор для преломленной волны) и равенство нормальных составляющих векторов \vec{D} и \vec{B}

В результате получим следующие формулы:

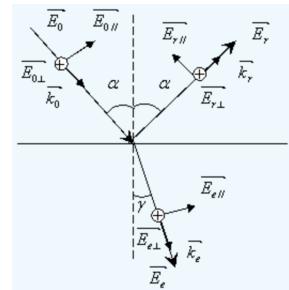


Рис. 11: Закон Брюстера

$$\begin{cases} E_{r\parallel} = E_{o\parallel} \frac{\operatorname{tg}(\alpha-\gamma)}{\operatorname{tg}(\alpha+\gamma)} \\ E_{r\perp} = -E_{o\perp} \frac{\sin(\alpha-\gamma)}{\sin(\alpha+\gamma)} \end{cases}$$

Из этих двух уравнений вытекает, что если $\alpha + \gamma = \pi/2$, то тогда $\operatorname{tg}(\alpha + \gamma) = \infty$ и $E_{r\parallel} = 0$. Значит, что в отраженном свете присутствуют только колебания $E_{r\perp}$.

Как отличить свет с правой и с левой круговой поляризацией?

Это зависит от сдвига фаз между E_x и E_y .

Если E_y отстает на $\pi/2$ от E_x , то \vec{E} вращается против часовой стрелки и значит, что это левая круговая поляризация как на рис.9

Если E_y опережает на $\pi/2$ E_x , то \vec{E} вращается по часовой стрелке и значит, что это правая круговая поляризация.

Можно вставлять $\lambda/4$ пластинку, чтобы получить линейную поляризацию с двумя разными наклонами в зависимости от первоначального направления поляризации. \vec{E} лежит во 2 и 4 квадратурах, то это левая круговая. Если \vec{E} лежит в 1 и 3 квадратурах, то это правая круговая.

Неполяризованный свет проходит через двоякотреплениющую пластинку $\lambda/4$. Что можно сказать о поляризации света на выходе из пластиинки?

Будут образованы 2 поляризованных луча. Двойное лучепреломление объясняется анизотропностью кристаллов. Диэлектрическая проницаемость зависит от направления.

Поэтому скорость световых волн будет зависеть от направления колебаний вектора \vec{E} . В обыкновенном луче колебаний вектора E_x происходят в перпендикулярном направлении к главному сечению кристалла (плоскость проходящая через оптическую ось). Необыкновенный же луч будет иметь перпендикулярную компоненту $E_y \perp E_x$ (поскольку речь идет об одноосном кристалле). Ввиду разности коэффициентов преломлений вдоль двух направлений скорость распространения лучей будет разная, что приведет к набегу разности фаз.

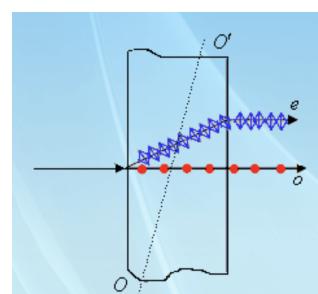


Рис. 12: е - необыкновенный; о - обыкновенный

Как отличить естественный свет от света, поляризованного по кругу, и от смеси естественного света со светом, поляризованным по кругу

Как для поляризованного по кругу, так и для света естественного, интенсивность после прохождения через анализатор одинакова при любой его ориентации.

Чтобы отличить неполяризованный от поляризованного по кругу, нужно сдвинуть фазу между поляризациями преобразуя эллиптическую поляризацию в линейную, которую в дальнейшем можно полностью погасить при определенной ориентации анализатора. Это можно сделать с помощью системы двояколучепреломляющих пластинок, вырезанных параллельно главной оптической оси кристалла. У таких пластинок отличаются коэффициенты преломления для волн, поляризованных параллельно и перпендикулярно главной оси, что и приводит к изменению сдвига фаз между ними.

Естественный свет можно рассматривать как наложение двух волн одинаковой интенсивности с ортогональными поляризациями, разность фаз между которыми изменяется в течение времени наблюдения случайно. Внесение четвертьволновой пластинкой дополнительной постоянной разности фаз между ними не может изменить случайного характера соотношения фаз ортогональных составляющих. Поэтому прошедший через четвертьволновую пластинку свет остается неполяризованным и его интенсивность не меняется при повороте анализатора.

Степень поляризации можно определить для произвольно поляризованной волны:

$$P = \frac{I_{max}(\varphi, \delta) - I_{min}(\varphi, \delta)}{I_{max}(\varphi, \delta) + I_{min}(\varphi, \delta)}$$

где макс и мин значение интенсивности берутся уже не только при изменении угла поворота анализатора, но и при изменении разницы оптических длин путей в пластинке перед анализатором.

Объясните изменения интенсивности и цвета, наблюдаемые в опытах по интерференции поляризованных лучей

Ответ в пункте 3.7.

Почему свет от вечернего неба поляризован?

Это происходит из-за рассеяния света на препятствиях значительно меньших длины волны. Если солнце стоит в зените, то поляризация будет максимальна вдоль горизонта. А если солнце находится в горизонте, то максимальная поляризация достигается в направлении, перпендикулярном солнцу, проходящем через зенит.

Рассеиваемый пучок света вызывает в частицах колебания зарядов, направления которых лежат в плоскости, перпендикулярной к пучку (рис.13). Колебания вектора \vec{E} во вторичной волне происходят в плоскости, проходящей через направление колебаний зарядов. Поэтому свет, рассеиваемый частицами в направлениях, перпендикулярных к пучку, будет полностью поляризован. В направлениях, образующих с пучком угол, отличный от $\pi/2$, рассеянный свет поляризован только частично.

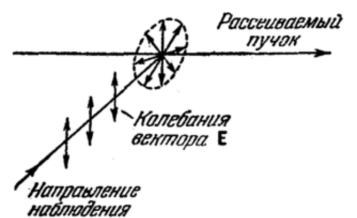


Рис. 13: Поляризация