

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
«МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

Лабораторная работа 4.7.3  
«Изучение поляризованного света»

Овсянников Михаил Александрович  
студент группы Б01-001  
2 курс ФРКТ

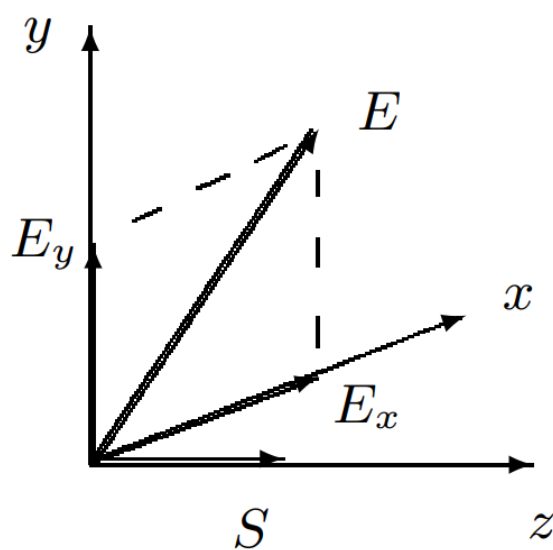
г. Долгопрудный  
2022 г.

**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).

## Теоретические сведения

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



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

**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

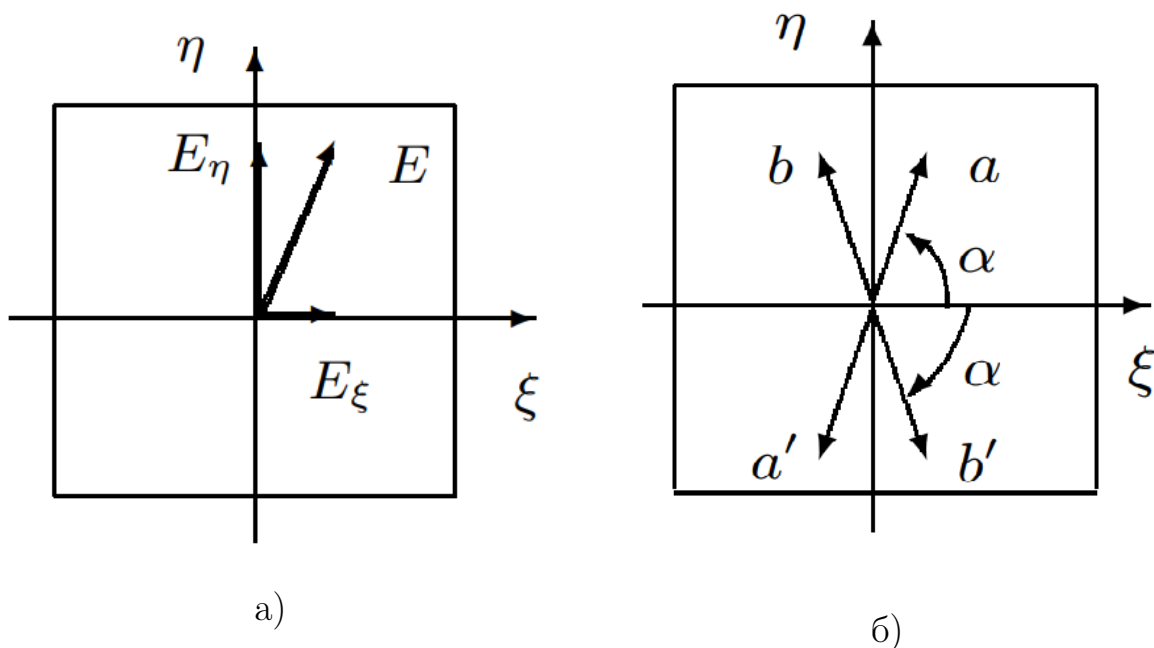
поляризованного света после прохождения через анализатор зависит от угла, образованного плоскостью колебаний с разрешенным направлением анализатора по закону Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha.$$

Существует несколько способов получения плоскополяризованного света:

1. Отражение света от диэлектрической пластинки
2. Преломление света в стеклянной пластинке
3. Преломление света в двоякопреломляющих кристаллах
4. Поглощение света в дихроических пластинках

**Получение эллиптически поляризованного света.** Эллиптически поляризованный свет можно получить из линейно поляризованного с помощью двоякопреломляющих кристаллических пластинок. Например, пластинки  $\lambda/4$ .



**Рис. 2.** а) Разложение линейно поляризованного света по главным направлениям двоякопреломляющей пластинки; б) Поворот направления колебаний с помощью пластинки в  $\lambda/2$

**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.

**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  $\lambda$  для зеленой спектральной компоненты,  $\lambda = 560$  нм).

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

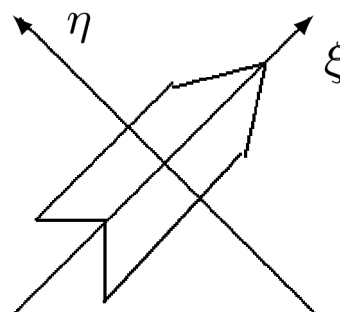
Если пластинка чувствительного оттенка помещена между скрещенными поляроидами и главные направления пластинки не параллельны направлениям разрешенных колебаний поляроидов, то при освещении белым светом пластинка кажется окрашенной в лилово-красный цвет.

Если между скрещенными поляроидами поместить пластинку чувствительного оттенка ( $\lambda$ ) и пластинку в  $\lambda/4$  так, чтобы их главные направления совпадали, цвет пластинки изменится.

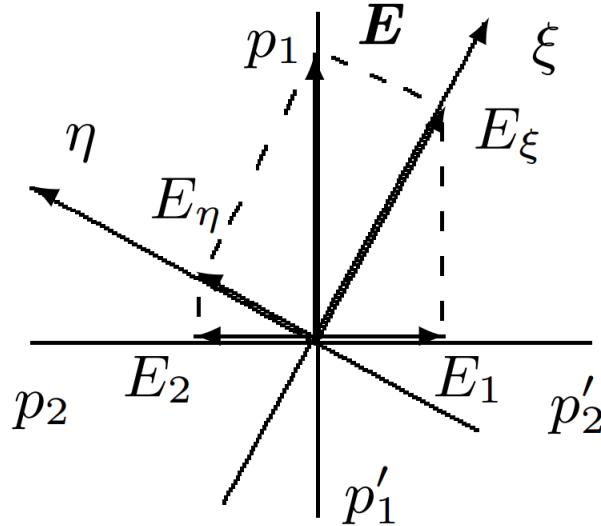
Если у пластинки чувствительного оттенка и пластинки в  $\lambda/4$  совпадут главные направления, соответствующие большей скорости распространения, то разность хода между  $E_\xi$  и  $E_\eta$  для зеленого света составит уже  $5\lambda/4$ . Это соответствует разности хода в  $\lambda$  для света с большей длиной волны, т. е. для «более красного» света. При освещении этих пластинок белым светом теперь погасится не зеленая, 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 приобретет оранжево-желтую окраску (погасится фиолетово-голубая часть спектра).

**Интерференция поляризованных лучей.** Тонкие двоякопреломляющие пластинки, помещенные между поляроидами, кажутся окрашенными. Эта окраска может быть истолкована как результат интерференции поляризованных лучей.

Здесь  $p_1 p'_1$  — разрешенное направление колебаний поляризатора (пер-



**Рис. 3.** Пластина чувствительного оттенка



**Рис. 4.** Объяснение интерференции поляризованного света

вого поляроида);  $\xi, \eta$  — координатная система, связанная с главными направлениями двоякопреломляющей пластинки;  $p_2 p'_2$  — разрешенное направление колебаний анализатора (второго поляроида). Волны  $E_\xi$  и  $E_\eta$  на выходе из пластинки когерентны, но не могут интерферировать, так как  $\mathbf{E}_\xi \perp \mathbf{E}_\eta$ . 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 ее поворотах не меняется, а меняется только интенсивность света. За один оборот пластинки интенсивность четыре раза обращается в нуль, — это происходит при совпадении главных направлений  $\xi$  и  $\eta$  с разрешенными направлениями колебаний поляроидов.

Если же двоякопреломляющую пластинку оставить неподвижной, а второй поляроид повернуть так, чтобы разрешенные направления  $p_1 p'_1$  и  $p_2 p'_2$  совпали, то волны  $E_1$  и  $E_2$  приобретают дополнительный фазовый сдвиг на  $\pi$  для всех спектральных компонент; поэтому цвет пластинки изменится на дополнительный.

# Ход работы

## I. Определение разрешённых направлений поляроидов

1. Разместим на оптической скамье осветитель  $S$ , поляроид  $P_1$  и чёрное зеркало так, чтобы плоскость падения была горизонтальна.

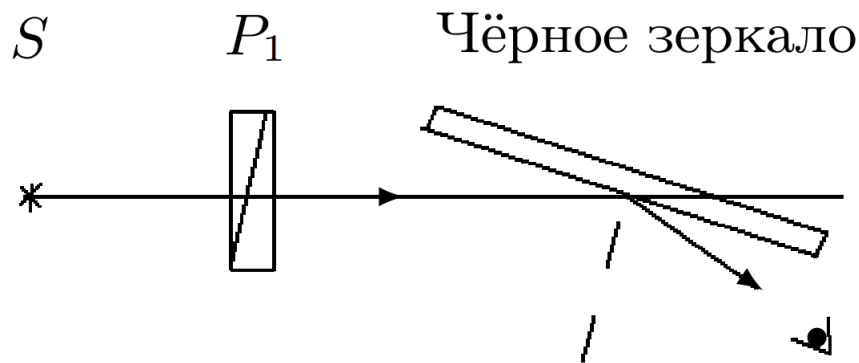


Рис. 5. Определение разрешённого направления поляроида

2. 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:

$$\alpha_1 = (138^\circ \pm 1^\circ)$$

3. 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:

$$\alpha_2 = (36^\circ \pm 1^\circ)$$

## II. Определение угла Брюстера для эбонита

1. Поставим на скамью вместо чёрного зеркала эбонитовую пластину с круговой шкалой.
2. Повернем эбонитовое зеркало вокруг вертикальной оси так, чтобы его плоскость была перпендикулярна лучу, и попытаемся совместить

отражённое от эбонита пятно с отверстием осветителя. Отметим начало отсчёта по лимбу. Дальше все записи идут уже вычисленные относительно этого отсчета.

3. Установим направление разрешённых колебаний поляроида  $P_1$  горизонтально и найдем угол поворота эбонита  $\varphi_B$ , при котором интенсивность отражённого луча минимальна:

$$\varphi_B = (58^\circ \pm 1^\circ)$$

Повторим измерения, добавив светофильтр  $\Phi$ :

$$\varphi_B = (57^\circ \pm 1^\circ)$$

Нетрудно видеть, что эти два результата в пределах погрешностей совпадают.

4. Теперь по найденному углу Брюстера рассчитаем показатель преломления эбонита  $n = \operatorname{tg} \varphi_B$ .

*Без фильтра:*

$$n = (1,60 \pm 0,06)$$

*С фильтром:*

$$n = (1,54 \pm 0,06)$$

Видим, что опять же, в пределах погрешностей результаты совпадают. Причем, они даже совпадают с табличным значением  $n = 1,6$ .

### III. Исследование стопы

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

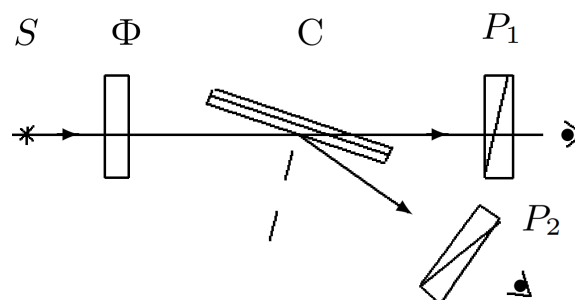


Рис. 6. Исследование стопы

- Осветим стопу неполяризованным светом (снимем поляризатор с оптической скамьи) и, рассматривая через поляроиды свет, отражённый от стопы, определим ориентацию вектора  $\mathbf{E}$  в отражённом луче:

- Поляризация линейная и угол  $\alpha = 142^\circ$  по поляризатору  $P_1$ .

Теперь определим характер поляризации света в преломлённом луче:

- Поляризация линейная и угол  $\alpha = 55^\circ$  по поляризатору  $P_1$ .

#### IV. Определение главных плоскостей двоякопреломляющих пластин

- Поставим кристаллическую пластинку между скрещенными поляроидами  $P_1$  и  $P_2$ .

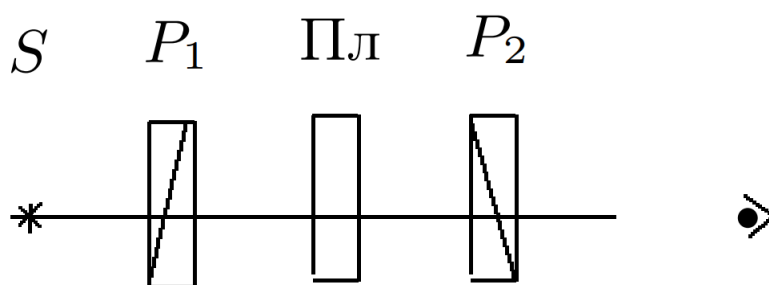


Рис. 7. Определение главных направлений в пластинках

- Вращая пластинку вокруг направления луча и наблюдая за интенсивностью света, проходящего сквозь второй поляриод, определим, когда главные направления пластинки совпадают с разрешёнными направлениями поляроидов:

- Минимумы первой пластинки:  $26^\circ, 116^\circ, 206^\circ, 296^\circ$ .

Повторим опыт для второй пластинки:

- Минимумы второй пластинки:  $14^\circ, 104^\circ, 194^\circ, 284^\circ$ .

#### V. Выделение пластин $\lambda/2$ и $\lambda/4$

- Добавим к предыдущей схеме зелёный фильтр; установим разрешённое направление поляроида горизонтально, а главные направления исследуемой пластинки — под углом  $45^\circ$  к горизонтали.



2. С помощью второго поляроида установим, какую поляризацию имеет свет, прошедший пластинку: круговую или линейную с переходом в другой квадрант.

У первой пластинки интенсивность не меняется с изменением угла, а значит, свет имеет круговую (эллиптическую) поляризацию. Таким образом, первая пластинка – это  $\lambda/4$ .

3. Повторим то же для второй пластинки. Получаем, что при изменении угла второго поляроида свет имеет линейную поляризацию. Таким образом, вторая пластинка – это  $\lambda/2$ .

## VI. Определение направлений большей и меньшей скорости в пластинке $\lambda/4$

1. Поставим между скрещенными поляроидами пластинку чувствительного оттенка ( $\lambda$  для зелёного света), имеющую вид стрелки. Световой вектор, ориентированный вдоль направления стрелки, проходит с большей скоростью, перпендикулярный — с меньшей. Установим разрешённое направление первого поляроида горизонтально и убедимся с помощью второго поляроида, что эта пластинка не меняет поляризацию зелёного света в условиях предыдущего опыта.

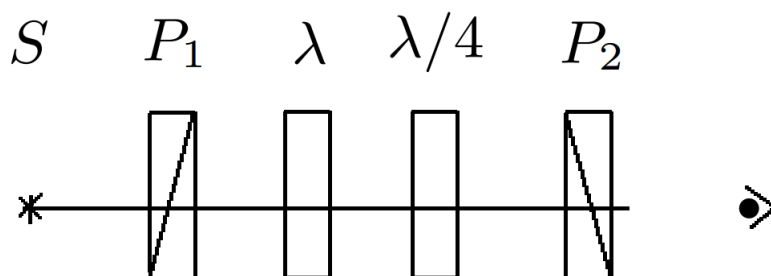


Рис. 8. Определение направлений большей и меньшей скорости

2. Уберем зелёный фильтр и поставим между скрещенными поляроидами пластинку  $\lambda$ . Глядя сквозь второй поляроид на стрелку, убедимся, что она имеет пурпурный цвет (зелёный свет задерживается вторым поляроидом, а красная и синяя компоненты проходят).
3. Добавим к схеме пластинку  $\lambda/4$ , 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. «Быстрые оси» совпадают, когда пластинка имеет зеленый цвет.

## VII. 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 направления большей и меньшей скорости. На рисунке  $x$  – большая скорость, а  $y$  – меньшая. Рядом нарисуем две вышедших из пластинки синусоиды:  $x(t)$  и  $y(t)$  со сдвигом фаз в четверть периода. По рисунку направление вращения электрического вектора в эллиптически поляризованной волне против часовой стрелки.

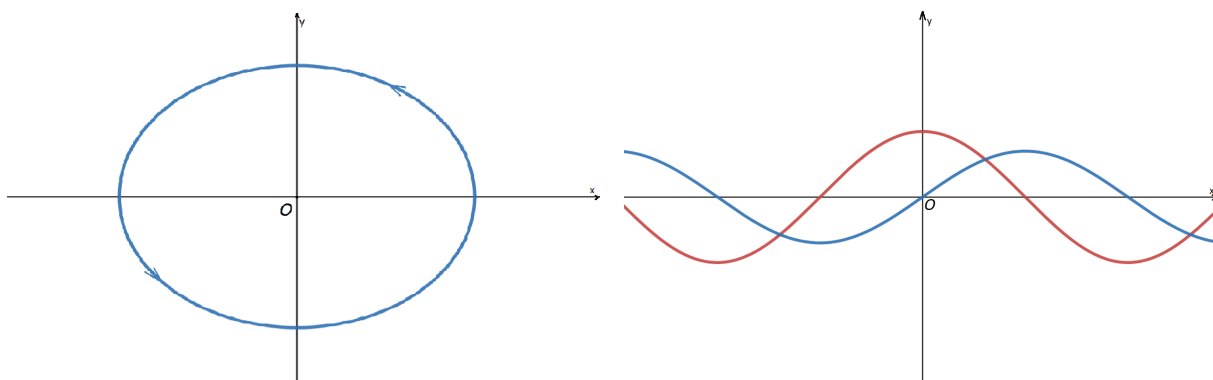


Рис. 9. Эллипс поляризации и синусоиды

2. Снова поставим зелёный фильтр, а за ним между скрещенными поляроидами — пластинку  $\lambda/4$  с соседней установки.
3. Получим эллиптически-поляризованный свет. Для этого установим разрешённое направление первого поляроида под углом  $10\text{--}20^\circ$  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, найдем минимальную интенсивность света, прошедшего второй поляроид. Вращая второй поляроид, убеждаемся, что свет поляризован эллиптически, а не линейно. Таким образом, был получен эллипс поляризации с вертикально ориентированной малой осью.
4. 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 прошёл две пластинки  $\lambda/4$ : свет на выходе из второй пластинки будет линейно поляризован. Если пластинки поодиночке дают эллипсы,

вращающиеся в разные стороны, то поставленные друг за другом, они скомпенсируют разность фаз, и вектор  $\mathbf{E}$  на выходе останется в первом и третьем квадрантах. Если же световой вектор перешёл в смежные квадранты, значит, эллипсы вращаются в одну сторону.

По эксперименту получили, что эллипсы вращаются в одну сторону. Таким образом, световой вектор в эллиптически поляризованной волне имеет направление вращения против часовой стрелки.

## VIII. Интерференция поляризованных лучей

1. 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  $3\lambda/4$ ). Что-то похожее на это:

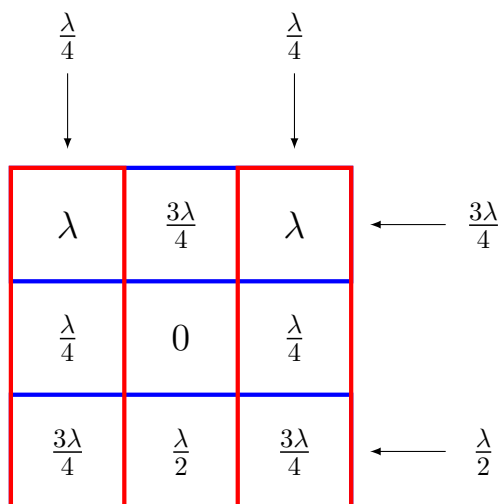


Рис. 10. Мозаичная пластинка

2. В центральном квадратике слюды нет. Главные направления всех пластинок ориентированы параллельно сторонам квадрата.
3. Вращая пластинку и второй поляроид будем наблюдать за изменениями интенсивности и цвета в отдельном квадратике.

*Вращаем пластинку:*

Центральный квадратик всегда черный. Это объясняется тем, что он не покрыт слюдой, а свет проходит через него и скрещенные поляроиды, поэтому интенсивность нулевая.

Боковые квадратики изменяют как свой цвет, так и свою интенсивность. Периодичность  $\frac{\pi}{4}$ .

*Вращаем поляроид:*

Теперь и центральный квадратик изменяет интенсивность и цвет. Это потому, что теперь разрешенные направления поляроидов не являются скрещенными.

## Вывод

В данной работе мы познакомились с методами получения поляризованного света и способами его анализа. Были определены разрешенные направления конкретных поляроидов, использованных в этой работе:  $\alpha_1 = (138^\circ \pm 1^\circ)$  и  $\alpha_2 = (36^\circ \pm 1^\circ)$ . Был определен угол Брюстера для эбонита:  $\varphi_B = (58^\circ \pm 2^\circ)$ , откуда был найден и показатель преломления:  $n = (1,57 \pm 0,09)$ . Была исследована стопа Столетова, определены главные плоскости двоякопреломляющих пластин, а также направления большей и меньшей скорости в пластинке в четверть длины волны. Мы пронаблюдали эллиптическую поляризацию и интерференцию поляризованных лучей. Хотя большинство экспериментов носило качественный характер, численные значения найденных величин имеют погрешности. Они связаны с неточностью измерений – как минимум с неточностью выставления зеркала, стопы или пластин.