

Отчет о выполнении лабораторной работы 4.7.3

Изучение поляризованного света

Выполнил: Голубович Тимур, группа Б01-108

09.03.2023

Цель работы

Ознакомление с методами получения и анализа поляризованного света.

Оборудование и приборы

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).

Теоретическое введение

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.

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:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha. \quad (1)$$

Существует несколько способов получения плоскополяризованного света:

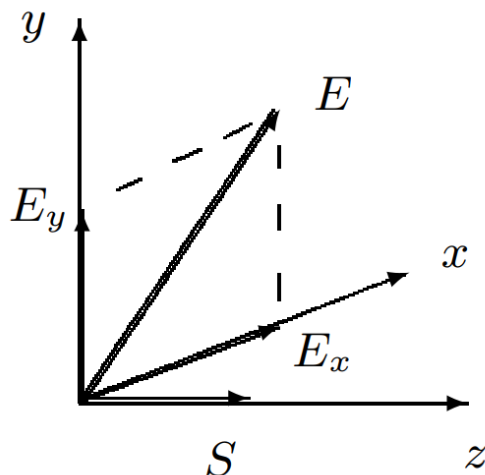


Рис. 1: Представление световой волны в виду двух линейно поляризованных волн

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 $\lambda/4$.

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 λ 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 разре-

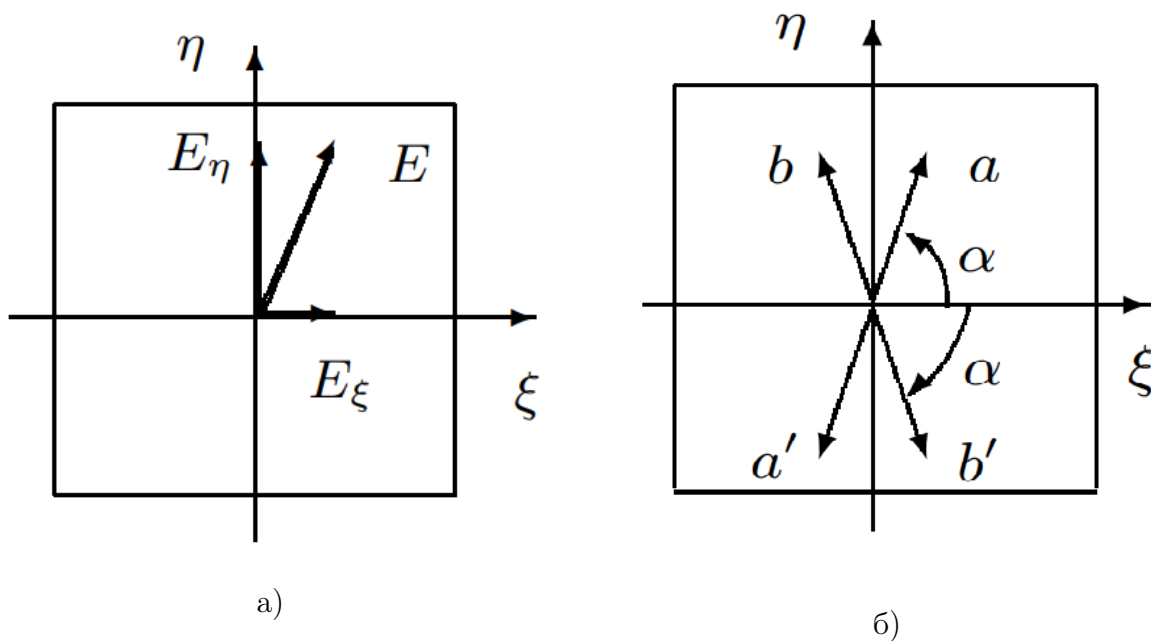


Рис. 2: а) Разложение линейно поляризованного света по главным направлениям двоякопреломляющей пластинки; б) Поворот направления колебаний с помощью пластинки в $\lambda/2$

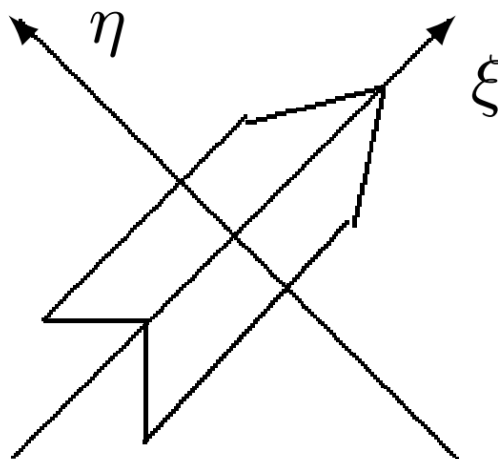


Рис. 3: Пластика чувствительного оттенка

шенных колебаний поляроидов, то при освещении белым светом пластинка кажется окрашенной в лилово-красный цвет.

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_ξ и E_η для зеленого 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 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.

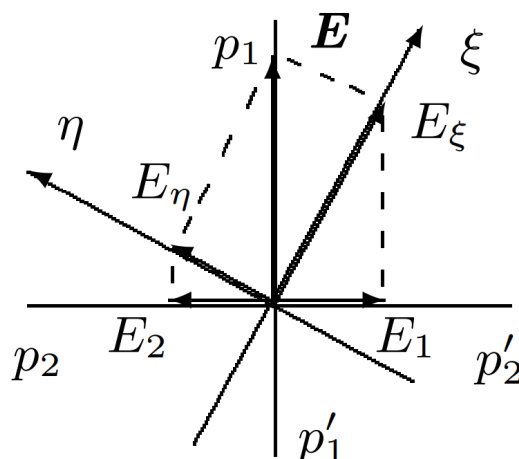


Рис. 4: Объяснение интерференции поляризованного света

Здесь $p_1 p'_1$ — разрешенное направление колебаний поляризатора (первого поляроида); ξ, η — координатная система, связанная с главными направлениями двоякопреломляющей пластинки; $p_2 p'_2$ — разрешенное направление колебаний анализатора (второго поляроида). Волны E_ξ и E_η 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 ξ и η 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 π 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 (пластинку чёрного стекла) так, чтобы плоскость падения была горизонтальна.

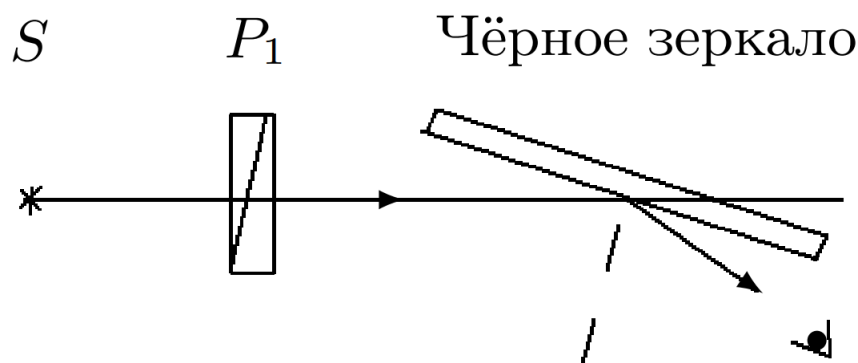


Рис. 5: Определение разрешённого направления поляроида

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 φ_B , при котором интенсивность отражённого луча минимальна:

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

Повторим измерения, добавив светофильтр Φ :

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

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

- 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

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

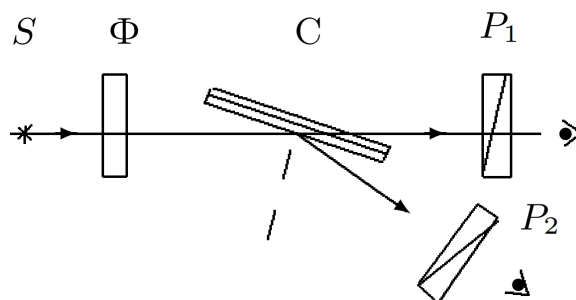


Рис. 6: Исследование стопы

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

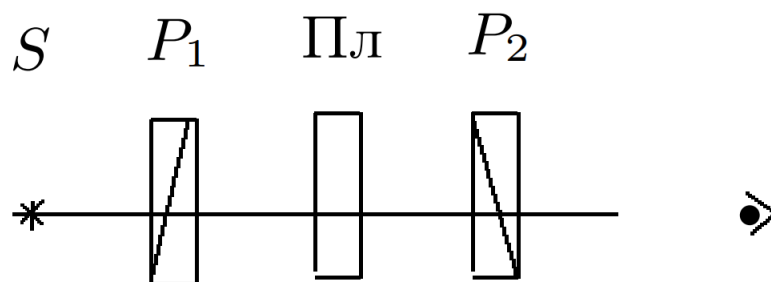


Рис. 7: Определение главных направлений в пластинках

- Минимумы первой пластинки: 26° , 116° , 206° , 296° .

Повторим опыт для второй пластинки:

- Минимумы второй пластинки: 14° , 104° , 194° , 284° .

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

1. Добавим к предыдущей схеме зелёный фильтр; установим разрешённое направление поляроида горизонтально, а главные направления исследуемой пластинки — под углом 45° 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 (λ 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.
2. Уберем зелёный фильтр и поставим между скрещенными поляроидами пластинку λ . Глядя сквозь второй поляризатор на стрелку, убедимся, что она имеет пурпурный цвет (зелёный свет задерживается вторым поляризатором, а красная и синяя компоненты проходят).

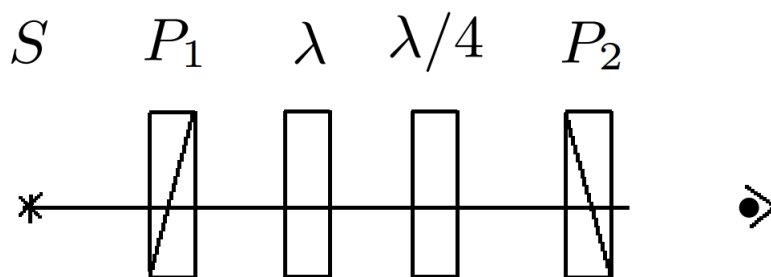


Рис. 8: Определение направлений большей и меньшей скорости

- Добавим к схеме пластинку $\lambda/4$, главные направления которой совпадают с главными направлениями пластины λ и ориентированы под углом 45° к разрешённым направлениям скрещённых поляроидов. При повороте рейтера со стрелкой на 180° вокруг вертикальной оси цвет стрелки меняется от зелёно-голубого до оранжево-жёлтого. «Быстрые оси» совпадают, когда пластинка имеет зелёный цвет.

VII. Определение направления вращения светового вектора в эллиптически поляризованной волне

- 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.

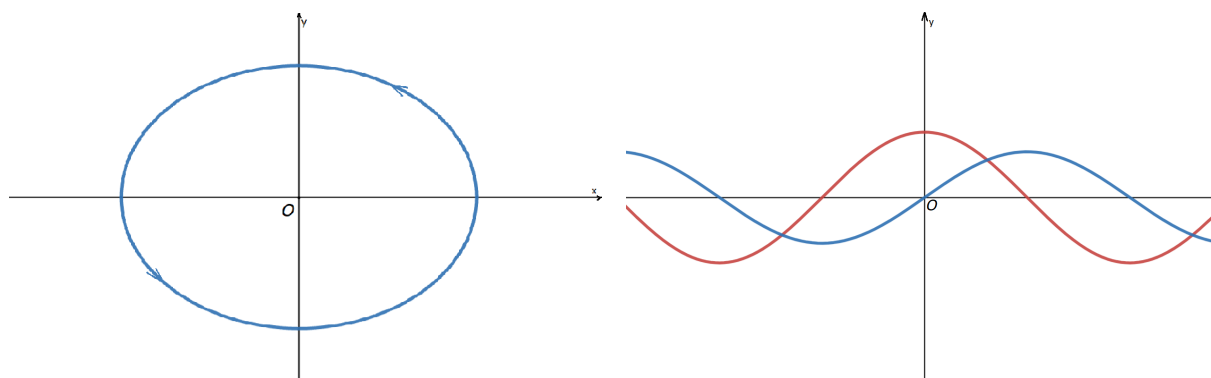


Рис. 9: Эллипс поляризации и синусоиды

- Снова поставим зелёный фильтр, а за ним между скрещёнными поляроидами — пластинку $\lambda/4$ с соседней установки.
- Получим эллиптически-поляризованный свет. Для этого установим разрешённое направление первого поляроида под углом $10-20^\circ$ 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 поляридом. Вращая второй поляридом, убеждаемся, что свет поляризован

эллиптически, а не линейно. Таким образом, был получен эллипс поляризации с вертикально ориентированной малой осью.

- 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

- 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:

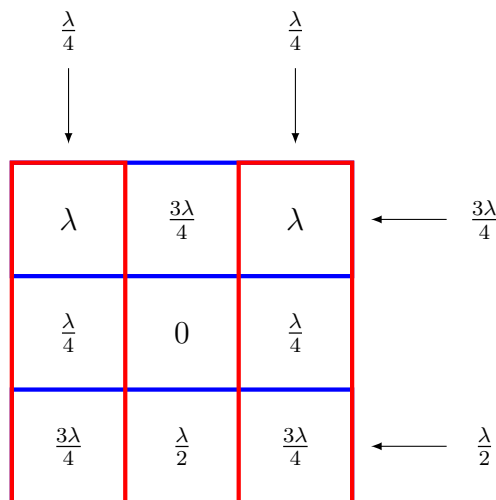


Рис. 10: Мозаичная пластинка

- В центральном квадратике слюды нет. Главные направления всех пластинок ориентированы параллельно сторонам квадрата.
- Вращая пластинку и второй поляризатор 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.

Список литературы

- [1] Сивухин Д. В. *Общий курс физики. Том 4 Оптика*, 2004
- [2] Кириченко Н.А. *Оптика.*, 2011
- [3] *Лабораторный практикум по общей физике. В 3 томах. Том 3. Оптика: учебное пособие* под ред. А. В. Максимычева, М. Г. Никулина