Национальный исследовательский институт

«Высшая школа экономики»



Оптика

Отчёт о выполнении практической работы

«Изучение поляризованного света»

Выполнил:

Илюшкин Егор, БФ3224

Москва, 06.04.2024

**Оглавление**

[1. Калибровка поляризаторов 4](#_Toc164343777)

[1.1. Поляризованный и естественный свет 4](#_Toc164343778)

[1.2. Поляроиды и поляризаторы 4](#_Toc164343779)

[1.3. Формулы Френеля, явление Брюстера 5](#_Toc164343780)

[1.4. Калибровка поляризатора A с использованием чёрного зеркала 7](#_Toc164343781)

[1.5. Калибровка поляризатора B по скрещённому положению 8](#_Toc164343782)

[2. Поляризация источника света 9](#_Toc164343783)

[2.1. Лазерный источник 9](#_Toc164343784)

[2.2. Измерение степени поляризации источника 9](#_Toc164343785)

[3. Закон Малюса 11](#_Toc164343786)

[3.1. Формулировка закона Малюса 11](#_Toc164343787)

[3.2. Проверка закона Малюса 11](#_Toc164343788)

[4. Двойное лучепреломление в пластинках 13](#_Toc164343789)

[4.1. Эллиптическая поляризация 13](#_Toc164343790)

[4.2. Двулучепреломляющие пластинки 15](#_Toc164343791)

[4.3. Определение главных направлений двулучепреломляющих пластинок 16](#_Toc164343792)

[5. Свойства пластинок и 17](#_Toc164343793)

[5.1. Исследование пластинки 17](#_Toc164343794)

[5.2. Исследование пластинки 20](#_Toc164343795)

[6. Определение типа неизвестной пластинки 23](#_Toc164343796)

[6.1. Проверка гипотез и 23](#_Toc164343797)

[7. Отражение s- и p-поляризованных волн 26](#_Toc164343798)

[7.1. Формулы Френеля для энергетических коэффициентов отражения 26](#_Toc164343799)

[7.2. Исследование мощности отражённого s-поляризованного света 26](#_Toc164343800)

[7.3. Исследование мощности отражённого p-поляризованного света 27](#_Toc164343801)

[7.4. Оценка справедливости формул Френеля 28](#_Toc164343802)

[8. Приложение 30](#_Toc164343803)

# Калибровка поляризаторов

## Поляризованный и естественный свет

*Поляризация волн* – характеристика *поперечных волн*, описывающая поведение вектора колеблющейся величины в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Свет является поперечной *электромагнитной волной*, в нём направления векторов и взаимно перпендикулярны и располагаются в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны .

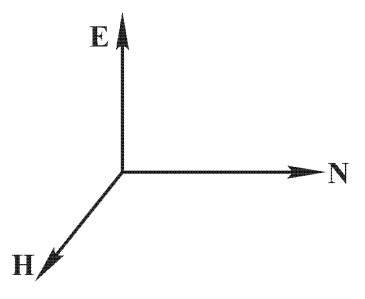


Рисунок 1. Взаимное расположение векторов , и

Если электрический вектор всё время лежит в одной плоскости, в которой также расположена нормаль к фронту волны , волна называется *линейно поляризованной* или *плоскополяризованной*. Упомянутая выше плоскость называется *плоскостью колебаний* или п*лоскостью поляризации*. В отличие от *поляризованного* света, в *естественном* свете векторы , и хотя и остаются всё время взаимно перпендикулярными, но и хаотично меняют своё направление с течением времени, что не позволяет выделить какое-либо направление колебаний. Можно также сказать, что естественный свет в статистическом смысле обладает *осевой симметрией* относительно . Для линейно поляризованного света такой симметрии нет. Нет симметрии и для смеси естественного света с линейно поляризованным – *частично поляризованного* света.

## Поляроиды и поляризаторы

Некоторые кристаллы обладают свойством *линейного дихроизма*. Они поглощают световые лучи, в которых вектор перпендикулярен к оптической оси кристалла, и в то же время пропускают лучи, в которых вектор параллелен оси. Всякая оптическая среда, обладающая такими свойствами, называется *поляроидом*. А любой прибор, служащий для получения поляризованного света (с помощью *дихроического кристалла*, магнитного поля и т.д.) – *поляризатором*. Тот же прибор, применяемый для исследования поляризации света, называется *анализатором*.

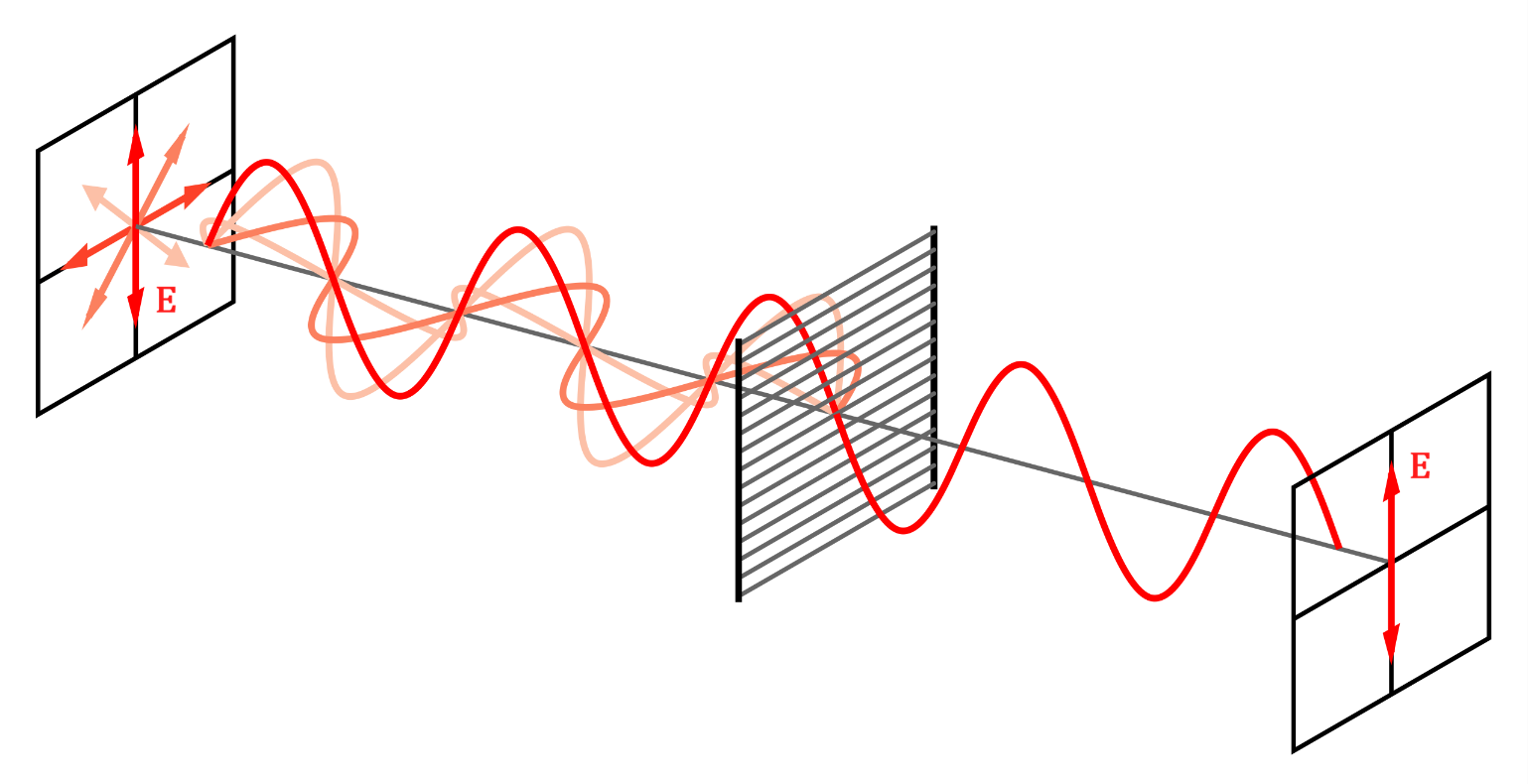


Рисунок 2. Прохождение естественного света через поляроид с образованием линейно поляризованного света

## Формулы Френеля, явление Брюстера

При падении света на плоскую границу раздела сред различают два важных случая линейной поляризации света: *s-поляризация* (от нем. *senkrecht* – перпендикулярный) и *p-поляризация* (от англ. *parallel* – параллельный). Они определяются направлением вектора по отношению к *плоскости падения* света (т.е. плоскости, содержащей падающий и отражённый лучи).

На рисунках ниже и далее в тексте ,  **–** показатели преломления сред; – амплитудный вектор падающей волны (от англ. *incidence* – падение),  **–** амплитудный вектор отражённой волны (от англ. *reflection* – отражение),  **–** амплитудный вектор преломлённой волны (от англ. *transmission* – пропускание); *,*  – углы, соответственно, падения/отражения, преломления света (считаем их соотносящимися по *закону Снеллиуса*);

, , – волновые векторы соответствующих волн.

|  |  |
| --- | --- |
| Рисунок 3. Отражение света, s-поляризация | Рисунок 4. Отражение света, p-поляризация |

*Амплитудные коэффициенты* отражения и преломления обозначим как:

Тогда в немагнитной среде ожидаем, что *коэффициент интенсивности* *отражения* излучения:

Из граничных условий, накладываемых *уравнениями Максвелла*, и закона Снеллиуса можно получить в явном виде формулы для коэффициентов и для случаев s- и p-поляризованных волн. Выпишем эти формулы для , ():

Из последней формулы можно увидеть, что для случая падения p-поляризованной волны на границу раздела двух сред существует угол – *угол Брюстера* – такой, что амплитуда отражённой волны равна нулю. В самом деле, положим, что :

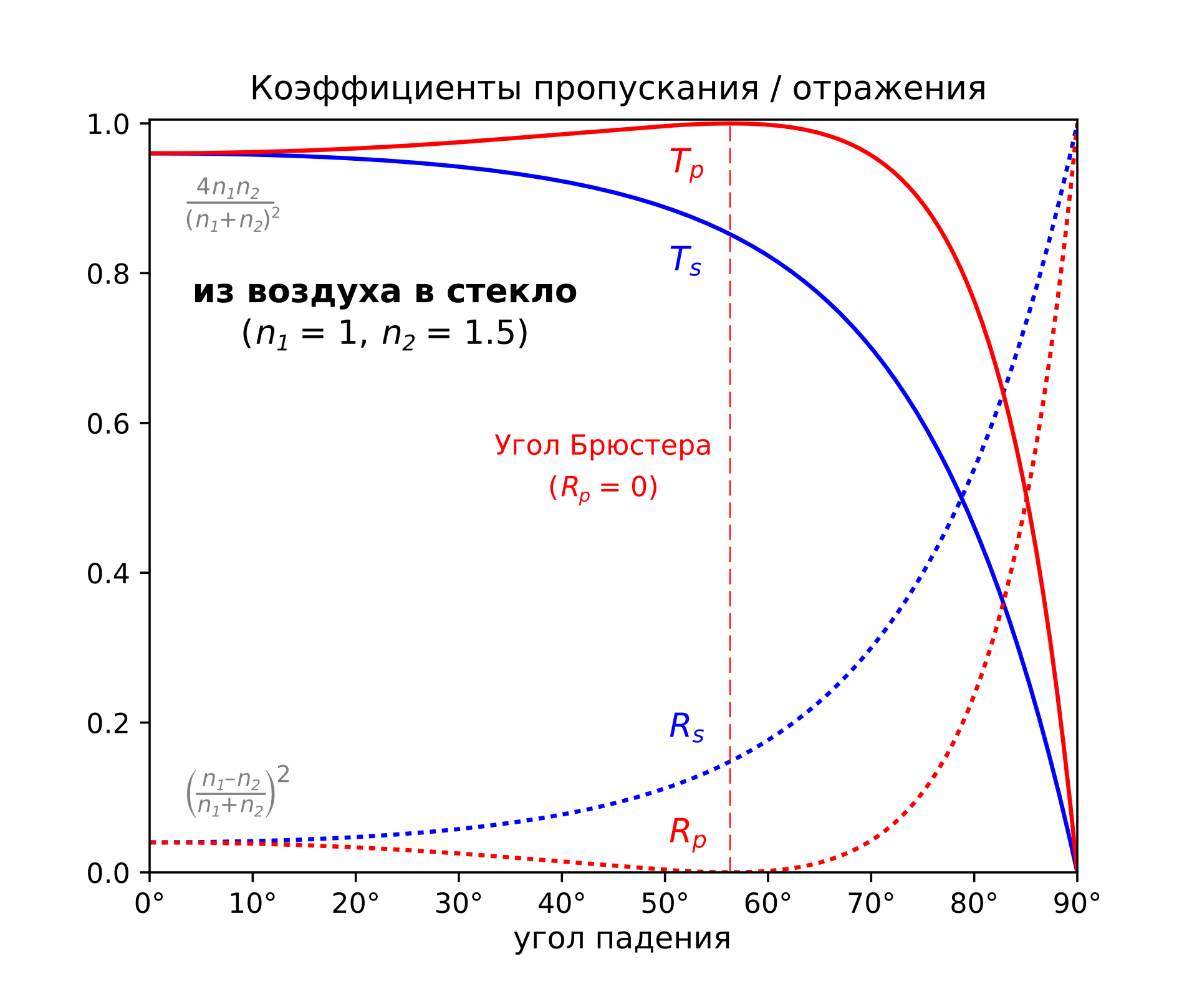


Рисунок 5. Графики зависимости коэффицентов интенсивности , , , от угла падения для случая

## Калибровка поляризатора A с использованием чёрного зеркала

Для калибровки поляризатора A соберём следующую установку:

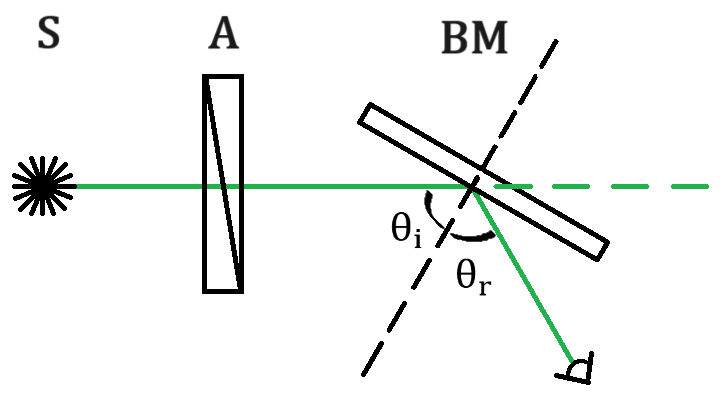


Рисунок 6. Схема установки для определения рарешённого направления поляризатора А с использованием чёрного зеркала

Полагая, что коэффициент преломления чёрного зеркала для зелёного света и пренебрегая коэффициентом преломления воздуха (), установим чёрное зеркало таким образом, чтобы угол падения оказался в окрестности угла Брюстера . Как видно из рис. 5 для случая , линейно поляризованный свет будет хуже всего отражаться от поверхности, если он p-поляризован относительно неё. Поэтому, медленно вращая поляризатор A, подберём такой угол его поворота , при котором мощность света, приходящая на детектор, будет минимальна.

Это положение соответствует горизонтальному расположению плоскости поляризации прошедшей через поляризатор волны (плоскость падения горизонтальна).

## Калибровка поляризатора B по скрещённому положению

Определив разрешённое направление поляризатора A, можем определить разрешённое положение поляризатора B по иной схеме.

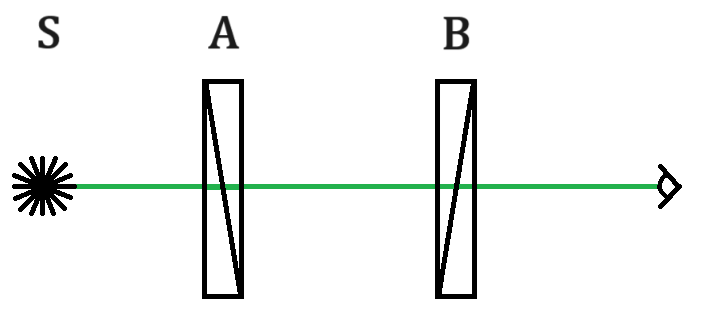


Рисунок 7. Схема установки для определения рарешённого направления поляризатора B с использованием поляризатора A

Так как поляризатор A превращает условно естественный свет источника в линейно поляризованный, можно найти такое положение поляризатора B, при котором его разрешённое направление окажется перпендикулярно направлению поляризации падающего на него света. В таком случае, интенсивность света на выходе из поляризатора B должна стремиться к нулю. Найдём это положение .

Это положение соответствует вертикальному расположению плоскости поляризации прошедшей через поляризатор B волны (полностью поляризованная в горизонтальной плоскости волна поглощается).

# Поляризация источника света

## Лазерный источник

Источником света в лабораторной работе является *зелёный* () *лазер* «KLM-A532-5-5» мощностью . Излучение света происходит в *лазерном полупроводниковом диоде*. Лазерное излучение, как правило, частично или полностью поляризовано за счёт механизма *вынужденного излучения* и/или конструкции резонатора. Будем полагать, что в нашем случае свет является суммой линейно поляризованного и неполяризованного.

## Измерение степени поляризации источника

*Степень поляризации* света характеризует отношение интенсивности *линейно поляризованной* компоненты к полной интенсивности излучения . Оценить степень поляризации можно, измерив соотношение максимальной и минимальной интенсивностей излучения после прохождения им анализатора. В таком случае полагаем, что разница между и соответствует мощности отфильтрованного линейно поляризованного света (), а сумма перпендикулярно ориентированных компонент и соответствует полной мощности источника ().

Прямое измерение интенсивности излучения потребовало бы учитывать геометрию установки, поглощение света на пути его следования и точной калибровки измерительного оборудования. Несколько проще измерить отношение не интенсивностей прошедшего поляризатор света, а световых мощностей, приходящих на световой датчик в максимуме и минимуме яркости. Так как мощность при нормальном падении света равна , где – площадь поперечного сечения светового пучка, то соотношение для степени поляризации перепишем в виде:

При помощи оптического ваттметра «918D-SL-OD3R» измерим мощности света, приходящие на площадку за анализатором, , и соответствующие экстремумам мощности положения поляризатора A , . Учтём, что при длинах волн производителем ваттметра заявлена инструментальная погрешность измерения .

Соотнося откалиброванное значение (соответствующее горизонтальному разрешённому направлению поляризатора A) и положение поляризатора при максимуме интенсивности проходящего через него света лазера , приходим к выводу, что плоскость поляризации лазерного излучения лежит под углом к горизонтали, или же под углом к вертикали.

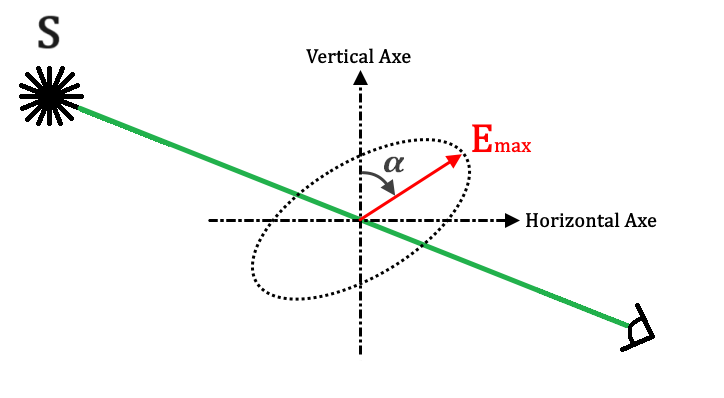


Рисунок 8. Геометрический смысл угла

# Закон Малюса

## Формулировка закона Малюса

Пусть линейно поляризованный свет падает на линейный поляризатор, причём угол между плоскостью поляризации падающего света и *разрешённым направлением* поляризатора составляет , где , – соответствующие плоскостям углы относительно горизонтальной оси. Геометрически процесс поляризации можно представить как *проекцию* амплитудного вектора набегающей волны на единичный вектор разрешённого направления ()**:**

В немагнитной среде , поэтому для интенсивности света после поляризатора имеем:

Это и есть формулировка *закона Малюса*.

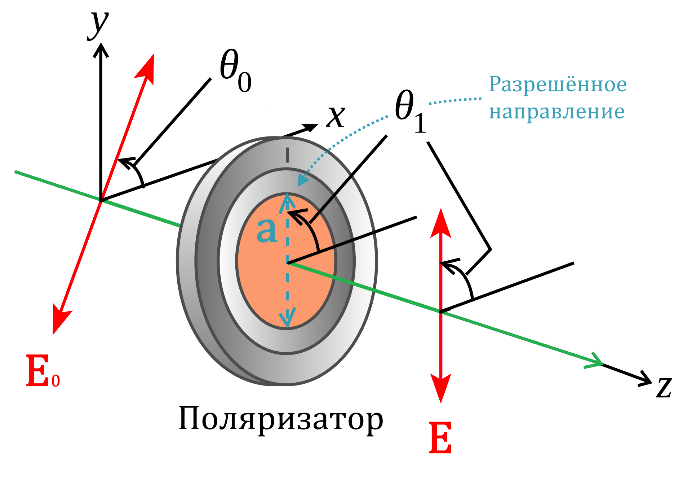


Рисунок 9. Прохождение линейно поляризованного света через поляризатор

## Проверка закона Малюса

Поляризатор A расположим в положении (прошедший свет поляризован в горизонтальной плоскости, ). За ним установим поляризатор B по схеме, аналогичной изображённой на рис. 7. Изначально разрешённое направление B установим вертикально, т.е. в положение (относительно горизонтальной оси ), при этом ожидаемо получим околонулевое значение мощности на датчике освещённости. Затем будем изменять угол от до , не меняя

Отсчёт, конечно, придётся производить по лимбу поляризатора B, но формула выше выражает линейную зависимость .

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Мощность | Угол поворота B , | Угол , |
| 0,270[[1]](#footnote-2) | 98 | 90 |
| 4.70 | 102 | 86 |
| 27.9 | 108 | 80 |
| 104 | 118 | 70 |
| 218 | 128 | 60 |
| 359 | 138 | 50 |
| 506 | 148 | 40 |
| 655 | 158 | 30 |
| 749 | 168 | 20 |
| 823 | 178 | 10 |
| 846 | 188 | 0 |

Таблица 1. Измерение зависимости мощности излучения от угла

За примем значение мощности в максимуме , при . Тогда ожидаем, что зависимость примет вид:

На графике ниже видно, что практически измеренные значения лежат, в пределах погрешности, на теоретической кривой.

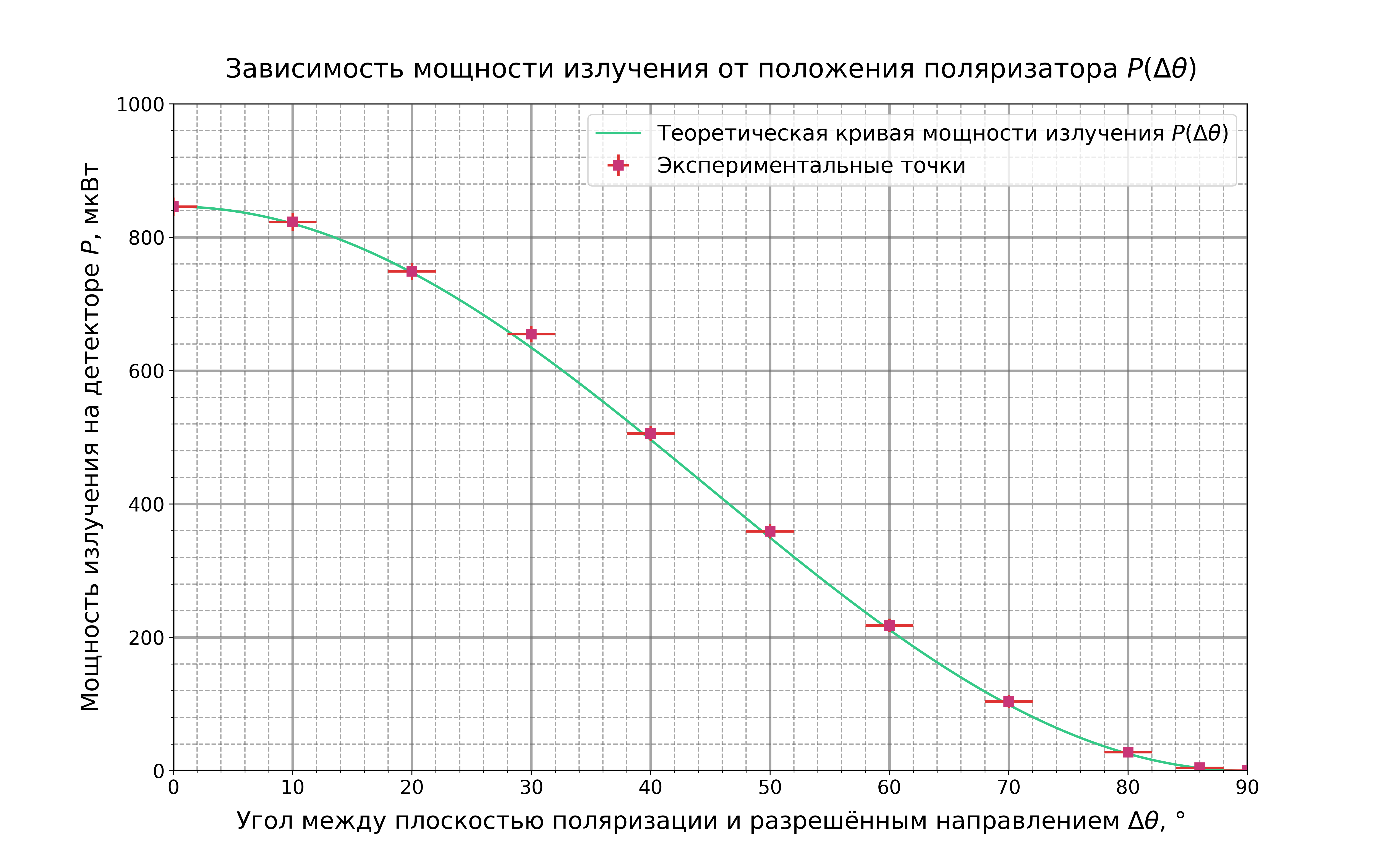


Рисунок 10. Сравнение экспериментальной и теоретической зависимостей

# Двойное лучепреломление в пластинках

## Эллиптическая поляризация

Кроме случаев *линейной поляризации*, когда вектор в каждой точке электромагнитного поля волны лежит в одной и той же плоскости, и *естественной поляризации*, когда вектор изменяется во времени и пространстве хаотически, хотя и статистически симметрично относительно оси распространения волны, выделяют также состояние *эллиптической поляризации*. Это состояние реализуется при наложении *когерентных монохроматических* плоскополяризованных в разных направлениях волн.

Вершина вектора в эллиптически поляризованной волне в каждой точке поля описывает эллипс. Если разложить колебания на перпендикулярные компоненты в плоскости фронта волны, получим две плоскополяризованные волны:

Из такого представления понятны условия когерентности и монохроматичности излучения, необходимые для получения эллиптической поляризации, так как для поддержания постоянной эллиптической формы траектории , разность фаз должна оставаться постоянной.

Излучение лабораторного лазера можно в некотором приближении считать за монохроматическое . Оно также является когерентным, хотя в процессе работы мы получаем эллиптическую поляризацию таким образом, что когерентность излучения обеспечивалась бы даже для естественного света, прошедшего через фильтр.

В завершение отметим несколько частных случаев эллиптической поляризации:

* – монохроматический случай линейной поляризации;
* – *левая* эллиптическая поляризация (при наблюдении навстречу волне вращается против часовой стрелки);
* – *правая* эллиптическая поляризация (при наблюдении навстречу волне вращается по часовой стрелке);
* – левая/правая *круговая* поляризация (большая и малая полуоси эллипса равны).

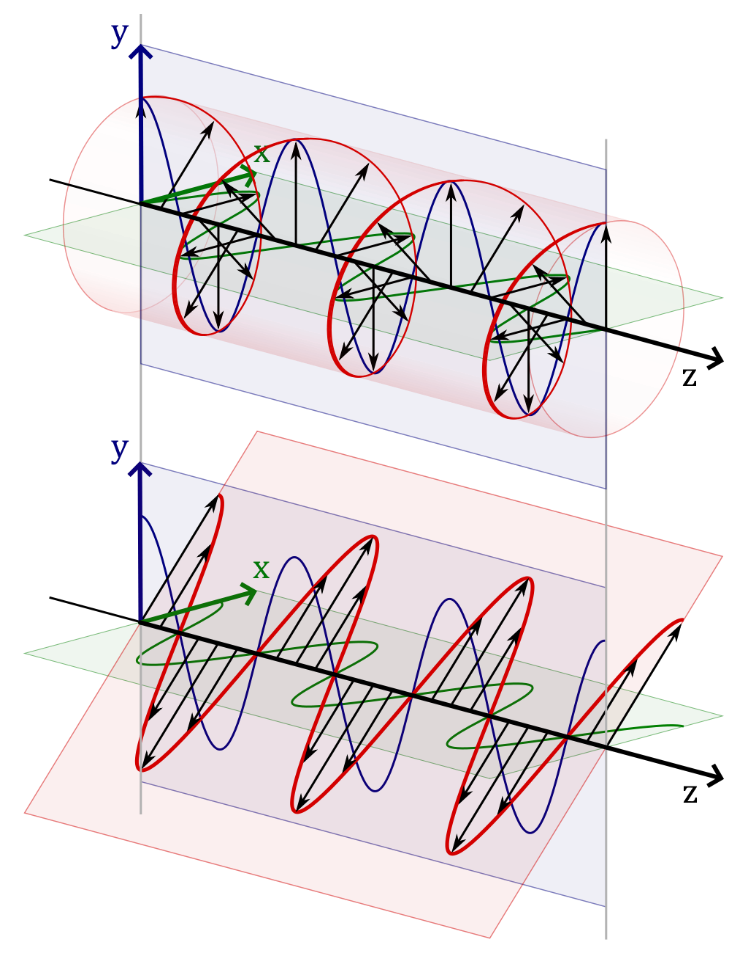


Рисунок 11. Правая круговая () и линейная () поляризация света

## Двулучепреломляющие пластинки

Эллиптически поляризованный свет можно получить из линейно поляризованного (на рис. 12 направлен вдоль оси ; , где – длина волны в вакууме) с помощью *двулучепреломляющих кристаллических пластинок*. Двулучепреломляющая пластинка имеет два взаимно перпендикулярных *главных направления* и , совпадающих с осями эллипсоида диэлектрической проницаемости анизотропного кристалла, из которого изготовлена пластинка. Волны, поляризованные вдоль главных направлений, – и – распространяются в пластинке с разными скоростями, не изменяя характера своей поляризации. Эти волны называются *главными*. Пусть на пластинку падает плоскополяризованная волна , а главное направление наклонено на угол относительно плоскости поляризации :

где и – коэффициенты преломления вдоль главных направлений; , – волновые числа соответствующих волн; , .

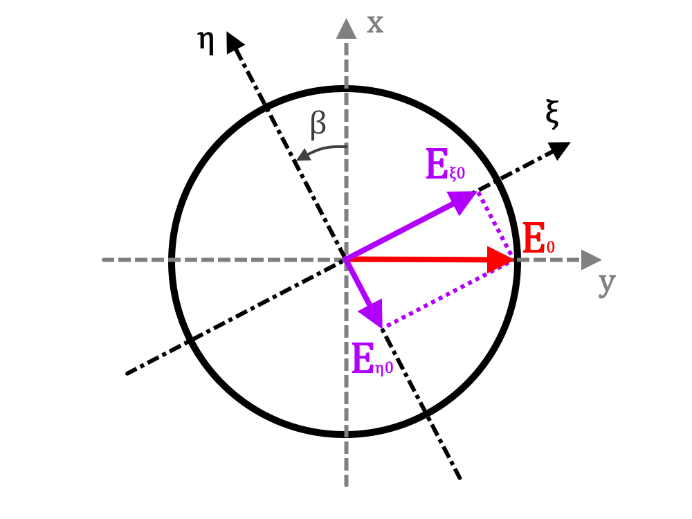


Рисунок 12. Разложение линейно поляризованного света по главным направлениям и

По мере прохождения через кристалл, волны и будут накапливать разницу фаз . И если в начале () , то далее одна из них будет опережать другую. Пусть для определённости и опережает , тогда скажем, что – *«быстрое»* главное направление.

Пусть пластинка имеет толщину и не поглощает энергию электромагнитных колебаний при данной частоте . Тогда после её прохождения волны и будут задаваться уравнениями:

Видно, что является эллиптически поляризованной волной, так как после прохождения пластинки (т.е. выполнены условия монохроматичности и когерентности).

Если же угол между и плоскостью поляризации , то , и на выходе получается, с точностью до сдвига фазы, такая же линейно поляризованная волна , как и на входе[[2]](#footnote-5).

Пластинки классифицируют по пространственному сдвигу фаз волн и для света определённой частоты. Например, если () для света частоты , то , и такую пластинку принято называть *пластинкой* .

## Определение главных направлений двулучепреломляющих пластинок

Расположим поляризаторы A и B в скрещенное положение (, ) и поместим между ними по очереди исследуемые пластинки и .

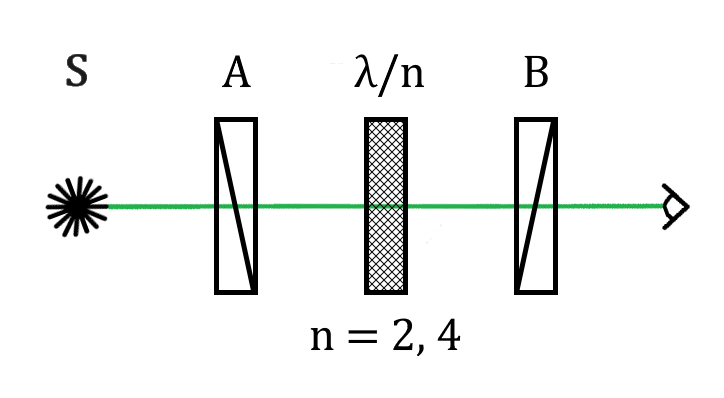


Рисунок 13. Схема установки для определения главных направлений пластинок и

Если одно из главных направлений пластинки (или ) совпадает с разрешённым направлением A (горизонтальное, на рис. 12), то плоскополяризованная волна проходит через пластинку без изменений и полностью блокируется поляризатором B (вертикальное разрешённое направление, на рис. 12). В других случаях волна после пластинки поляризована эллиптически, и на детектор за поляризатором B придёт излучение ненулевой мощности . Поворачивая пластинку в оправе, найдём положение , при котором достигается минимум . Это положение будет соответствовать горизонтальной ориентации одного из главных направлений пластинки, и, соответственно, вертикальной ориентации второго главного направления. Зафиксируем найденные положения для пластинок и :

# Свойства пластинок и

## Исследование пластинки

Пластинка создаёт между - и -поляризованными компонентами набегающей линейно поляризованной волны сдвиг .

То есть в каждый момент времени вектор , а, следовательно, и амплитудный вектор выходящей из пластинки волны , зеркально отражены относительно оси по сравнению с направлением электрических векторов до прохождения пластинки. Результирующая волна описывается следующими уравнениями:

|  |  |
| --- | --- |
| Рисунок 14. Волна в фазе заходит в пластинку | Рисунок 15. Волна в фазе выходит из пластинки |

Видно, что – это линейно поляризованная волна. Причём её плоскость поляризации повернута на угол относительно плоскости поляризации входящей волны.

Отметим также, что у нас нет оборудования, позволяющего определять фазу волны в конкретной точке пространства, поэтому, наблюдая линейно поляризованный свет ,мы не сможем различить «быструю» и «медленную» оси в условиях данного опыта[[3]](#footnote-6). Так что нам безразлично является ли на самом деле ось быстрой, как мы предположили выше. Плоскость поляризации волны в любом случае повернётся на угол .

Проверим на практике обозначенное свойство пластинки поворачивать плоскость поляризации падающего света на угол при собственном повороте относительно на угол . Для этого измерим зависимость угла поворота поляризатора B от вертикальной оси , при котором достигается минимум яркости на приёмнике светового сигнала (), от . Угол соответствует нормали к плоскости поляризации света, прошедшего пластинку.

Измерим зависимость и занесём результаты в таблицу.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Угол , | Угол , | Угол , | Угол , |
| 55,0 | 0,0 | 98,0 | 0,0 |
| 40,0 | 15,0 | 126,0 | 28,0 |
| 25,0 | 30,0 | 154,0 | 56,0 |
| 10,0 | 45,0 | 186,0 | 88,0 |
| 355,0 | 60,0 | 216,0 | 118,0 |
| 340,0 | 75,0 | 248,0 | 150,0 |
| 325,0 | 90,0 | 276,0 | 178,0 |

Таблица 2. Измерение зависимости поворота плоскости поляризации от поворота главных осей пластинки

Построим график зависимости , чтобы продемонстрировать соответствие наблюдения предсказанному результату.



Рисунок 16. Сравнение экспериментальной и теоретической зависимостей

## Исследование пластинки

Пластинка создаёт между - и -поляризованными компонентами набегающей линейно поляризованной волны сдвиг .

То есть конец вектора выходящей волны в каждой точке на луче после пластинки совершает движение по эллипсу, причём полуоси эллипса равны и .

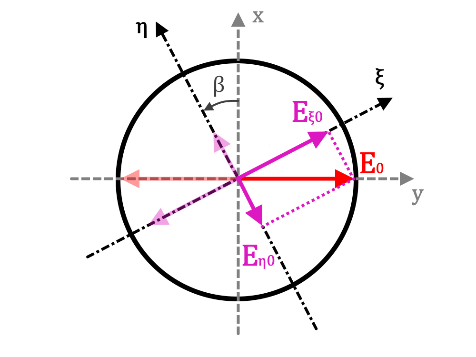


Рисунок 17. Волна в фазе заходит в пластинку

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

Рисунок 18. Волна в фазе выходит из пластинки

Для экспериментальной проверки эллиптической поляризации волны после прохождения пластинки установим пластинку под углом . В таком положении , то есть после пластинки волна имеет поляризацию, близкую к круговой. Следовательно, изменение угла поворота поляризатора B относительно вертикальной оси не должно приводить к изменению интенсивности проходящего через него излучения, так как свет с круговой поляризацией в статистическом смысле симметричен.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Угол , | Угол , | Мощность , |
| 98,0 | 0,0 | 1100 |
| 113,0 | 15,0 | 1123 |
| 128,0 | 30,0 | 1163 |
| 143,0 | 45,0 | 1187 |
| 158,0 | 60,0 | 1204 |
| 173,0 | 75,0 | 1210 |
| 188,0 | 90,0 | 1200 |
| 203,0 | 105,0 | 1168 |
| 218,0 | 120,0 | 1142 |
| 233,0 | 135,0 | 1121 |
| 248,0 | 150,0 | 1108 |
| 263,0 | 165,0 | 1105 |
| 278,0 | 180,0 | 1116 |

Таблица 3. Измерение мощности света после пластинки и поляризатора B

В действительности видим неидеальную симметрию излучения, так как точность задания ориентации пластинки довольно низкая (погрешность ). Учтём этот факт и проанализируем изменение интенсивности излучения в зависимости от угла поворота анализатора.

Пусть большая полуось эллипса поляризации , а малая . Тогда, поворачивая анализатор B вокруг собственной оси на угол , мы будем отфильтровывать из света плоскую волну с амплитудой . Угол определим как такой угол поворота поляризатора B от вертикального положения, при котором совпадёт с разрешённым направлением поляризатора. Теоретически .

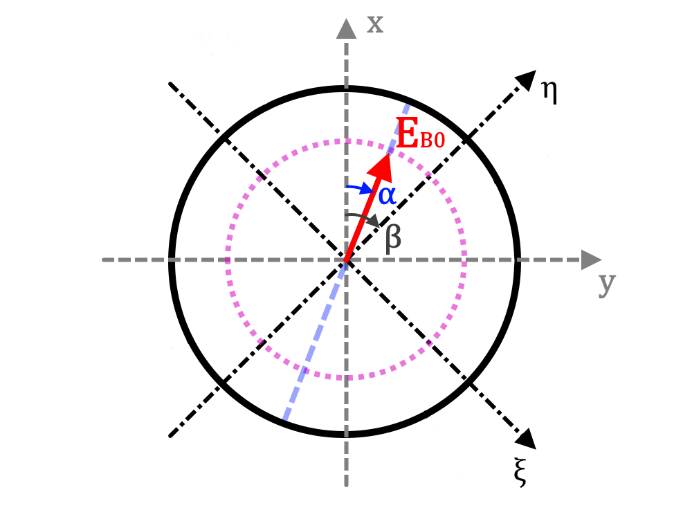


Рисунок 19. Амиплитудный вектор после фильтра B при .

Интенсивность излучения , поэтому экстремумы величины , достигаемые на полуосях эллипса поляризации, сохранятся и для монотонно зависящей от неё , и для .

,, – параметры модели, оценим их с помощью методов вычислительной оптимизации.

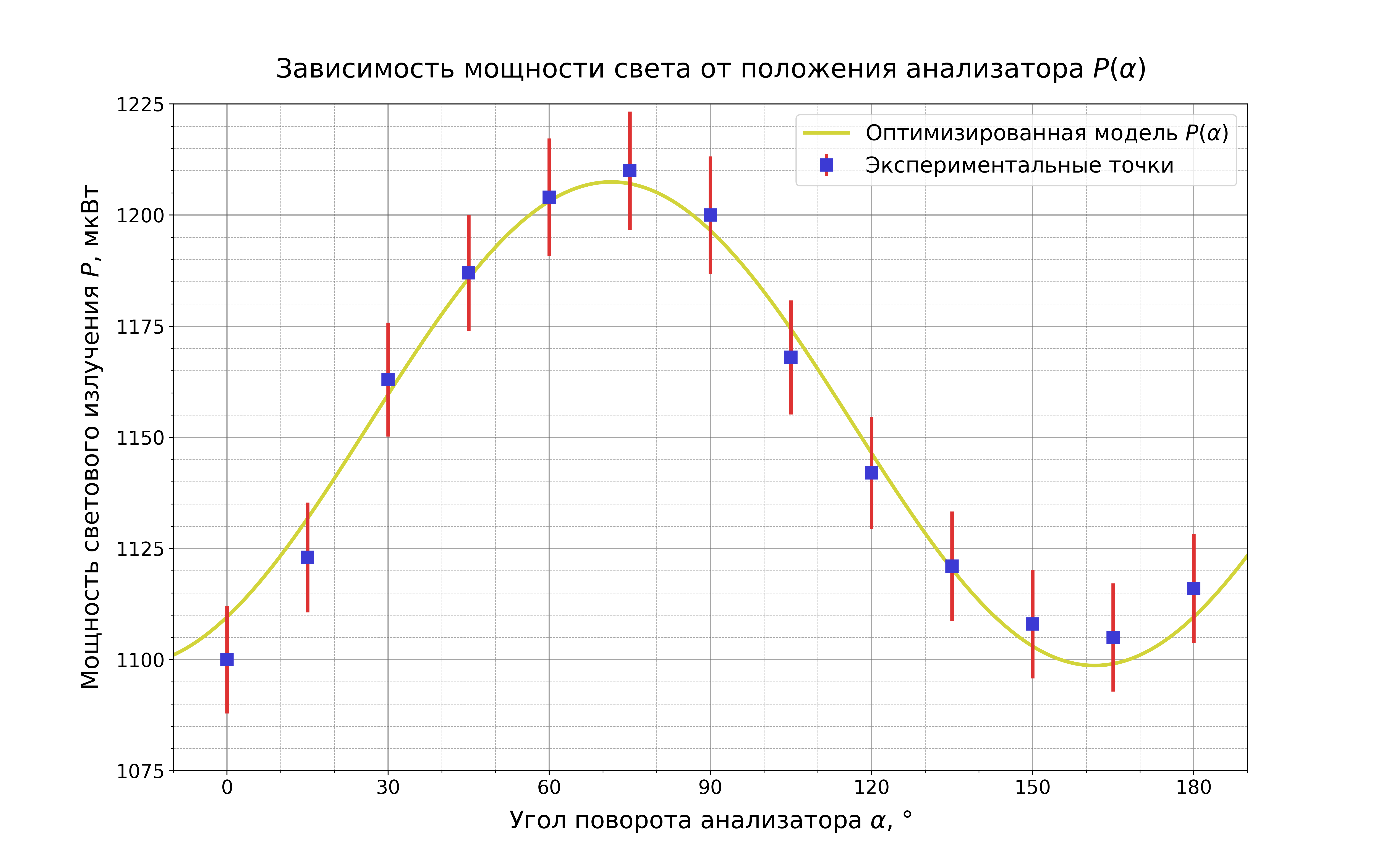


Рисунок 20. График функции , оптимизированной по

Получен противоречивый результат: с одной стороны, по соотношению полуосей эллипса поляризации мы получили оценку , что довольно близко к углу, отсчитанному по лимбу пластинки . С другой стороны, , что никак не совпадает с . Вероятнее всего, в процессе работы калибровка поляризатора B сбилась, и углы , в абсолютном значении отсчитаны неверно.

Тем не менее, по характеру изменения мощности света на оптическом датчике можно с уверенностью говорить об эллиптической поляризации света после прохождения пластинки и о выполнении соотношений

для амплитуды электрических векторов, характеризующих полуоси эллипса поляризации.

# Определение типа неизвестной пластинки

## Проверка гипотез и

Как было показано ранее, пластинки типа не меняют характера поляризации подающего на них линейно поляризованного света, но лишь поворачивают плоскость поляризации на некоторый угол вокруг оси распространения. Пластинки типа , напротив, меняют поляризацию света на эллиптическую, если только плоскость поляризации падающего на них света не совпадает с главными направлениями пластинки.

Для определения типа неизвестной пластинки, найдём сначала её главные направления методом, описанным в пункте 4.3:

Повернём пластинку вокруг собственной оси на угол и при помощи анализатора B проверим тип поляризации света, прошедшего пластинку. Возможны два варианта:

* Тип : свет линейно поляризован, при повороте анализатора B на ожидаем наблюдать изменение мощности излучения в пределах от до с периодом ;
* Тип : свет эллиптически поляризован, при повороте анализатора B на ожидаем наблюдать изменение мощности излучения в пределах от до с периодом .

|  |  |
| --- | --- |
| Пластинка | Пластинка |

Рисунок 21. Возможные состояния поляризации волны после пластинки

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Угол , | Угол , | Мощность , |
| 98,0 | 0,0 | 864 |
| 113,0 | 15,0 | 698 |
| 128,0 | 30,0 | 645 |
| 143,0 | 45,0 | 718 |
| 158,0 | 60,0 | 886 |
| 173,0 | 75,0 | 1115 |
| 188,0 | 90,0 | 1403 |
| 203,0 | 105,0 | 1464 |
| 218,0 | 120,0 | 1700 |
| 233,0 | 135,0 | 1666 |
| 248,0 | 150,0 | 1491 |
| 263,0 | 165,0 | 1217 |
| 278,0 | 180,0 | 929 |

Таблица 4. Измерение мощности света после неизвестной пластинки и поляризатора B

Из данных сразу видно, что , то есть свет имеет явно эллиптическую поляризацию. **Установлено, что пластинка имеет тип .** Мощность света на детекторе, как установлено в пункте 5.2, должна изменяться по закону:

Причём, так как , поляризация должна быть близка к круговой, т.е. . На практике степень эллиптичности заметно выше.

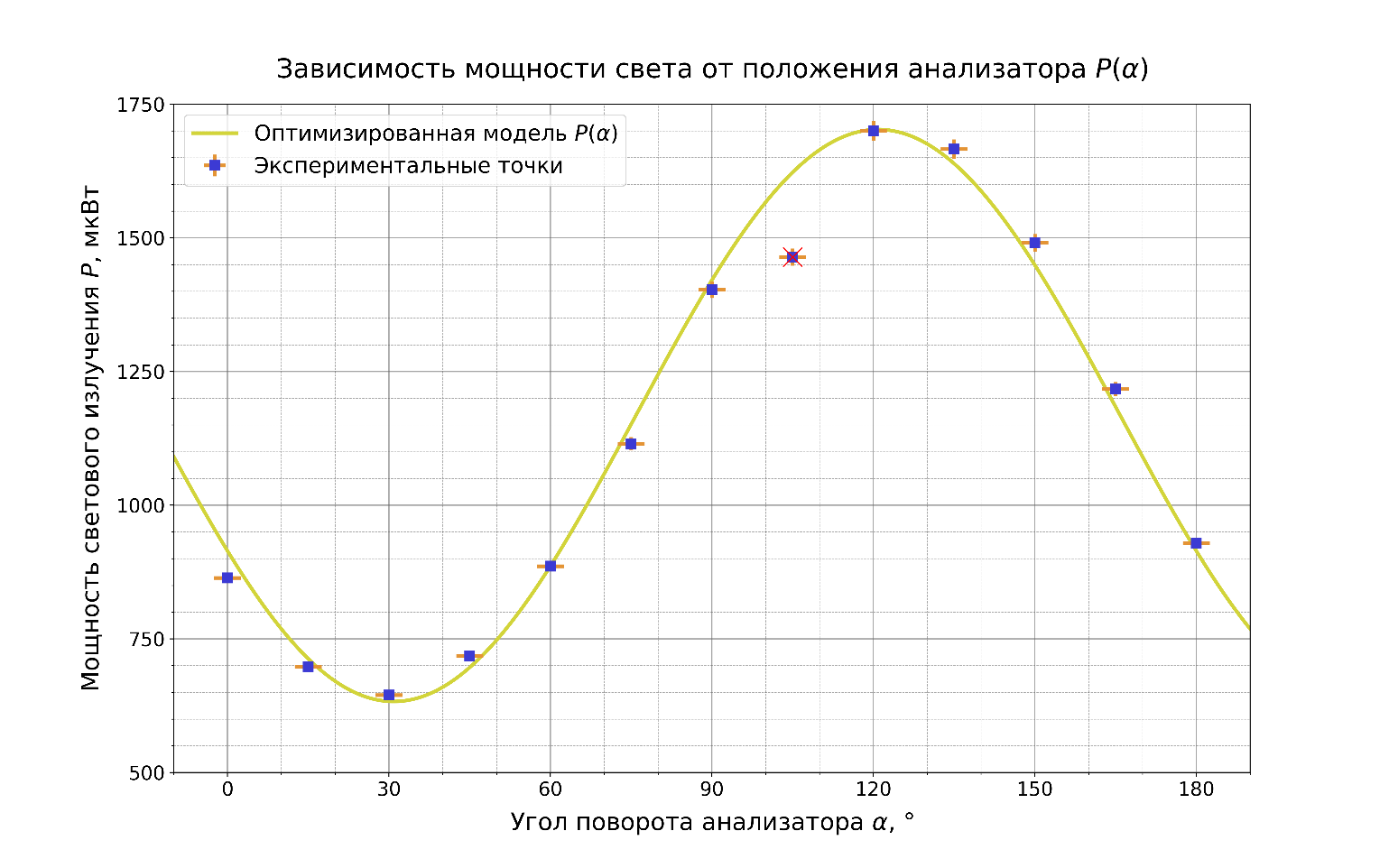


Рисунок 22. График функции , оптимизированной по

Реальный угол отклонения пластинки от главных направлений с уверенностью не попадает в допустимое отклонение от . Вероятно, в процессе поворота пластинки нормировка была сбита. Тем не менее пластинка определённо имеет тип .

# Отражение s- и p-поляризованных волн

## Формулы Френеля для энергетических коэффициентов отражения

Как обсуждалось ранее в пункте 1.3, для s- и p- поляризованных компонент падающего на границу раздела сред света можно аналитически найти отношение амплитуд вектора падающей , отражённой и преломлённой волн – формулы Френеля. Там же было показано, что, так как интенсивность падающего света , а , то для отношения энергий падающей и отражённой волн соответствующих поляризаций будет справедливо:

В реальности, однако, нужно учесть, что, из-за неточной настройки поляризаторов, волна, падающая на поверхность диэлектрика, будет представлять из себя суперпозицию s- и p- поляризованных волн. Пусть – отношение интенсивности падающего s-поляризованного света к полной интенсивности падающего света , тогда в общем виде для мощности отражённого света модельная функция выглядит следующим образом:

Где – мощность падающего на чёрное зеркало света, – мощность шума, обусловленного излучением, приходящим на датчик из посторонних источников и в результате рассеяния.

## Исследование мощности отражённого s-поляризованного света

Соберём установку, аналогичную изображённой на рис. 6, установив разрешённое направление поляризатора A вертикально (перпендикулярно к плоскости падения света на чёрное зеркало) и проведём серию измерений зависимости мощности пришедшего на датчик света от угла падения . Результаты измерения см. в табл. 5.

Для описания зависимости используем модель . При помощи численной оптимизации найдём параметры , , , , взяв как начальное приближение . Нанесём измерения и предсказания модели на график.

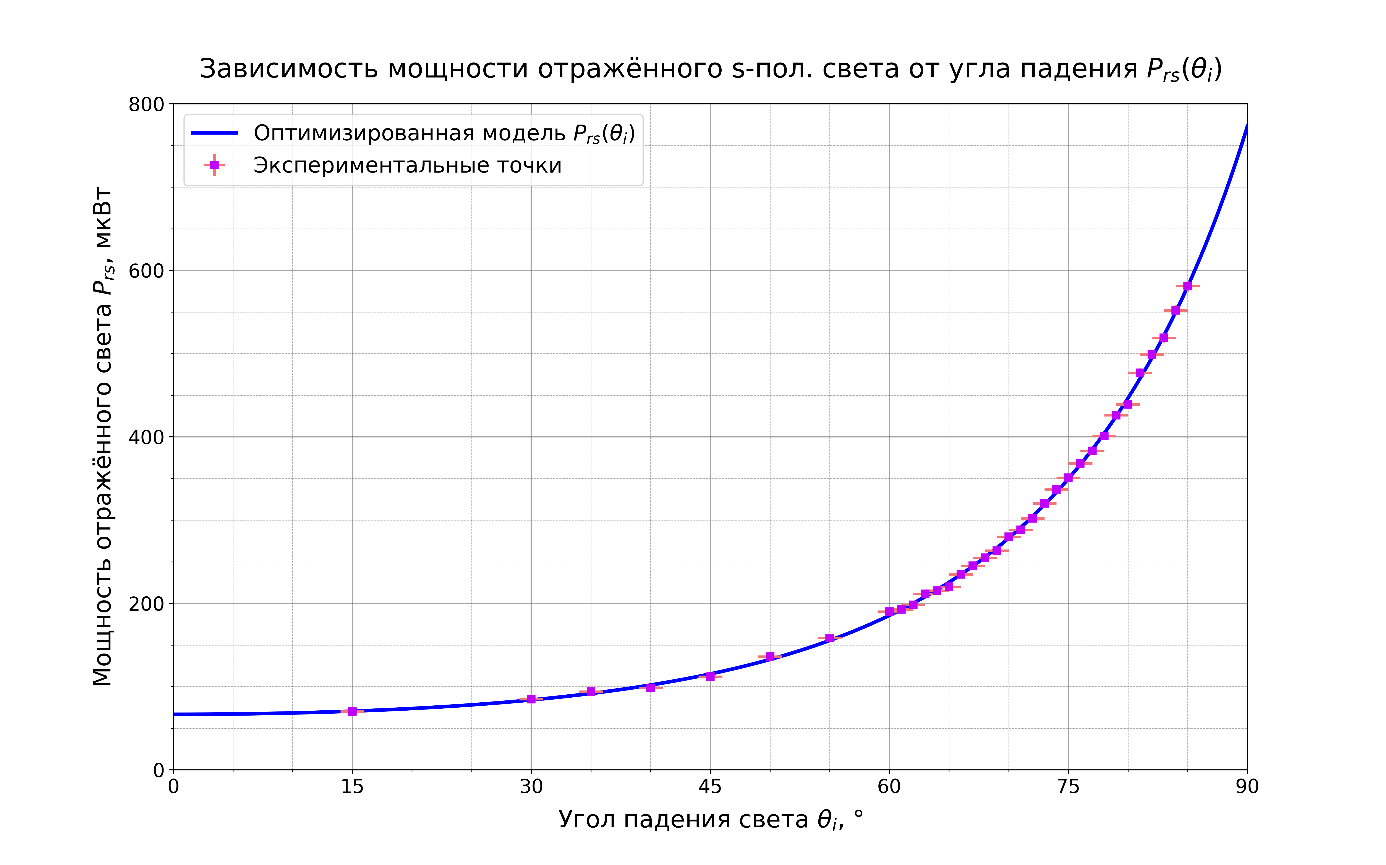


Рисунок 23. График функции , оптимизированной по

Видим, что модель крайне правдоподобно описывает данные, полученные в эксперименте.

## Исследование мощности отражённого p-поляризованного света

Аналогичным образом произведём измерение и моделирование зависимости . Для этого установим поляризатор A в горизонтальное положение и повторим серию измерений . Результаты см. в табл. 6.

Для описания зависимости используем ту же модель . Так же помощи численной оптимизации найдём параметры , , , , взяв на этот раз начальное приближение . Нанесём измерения и предсказания модели на график.

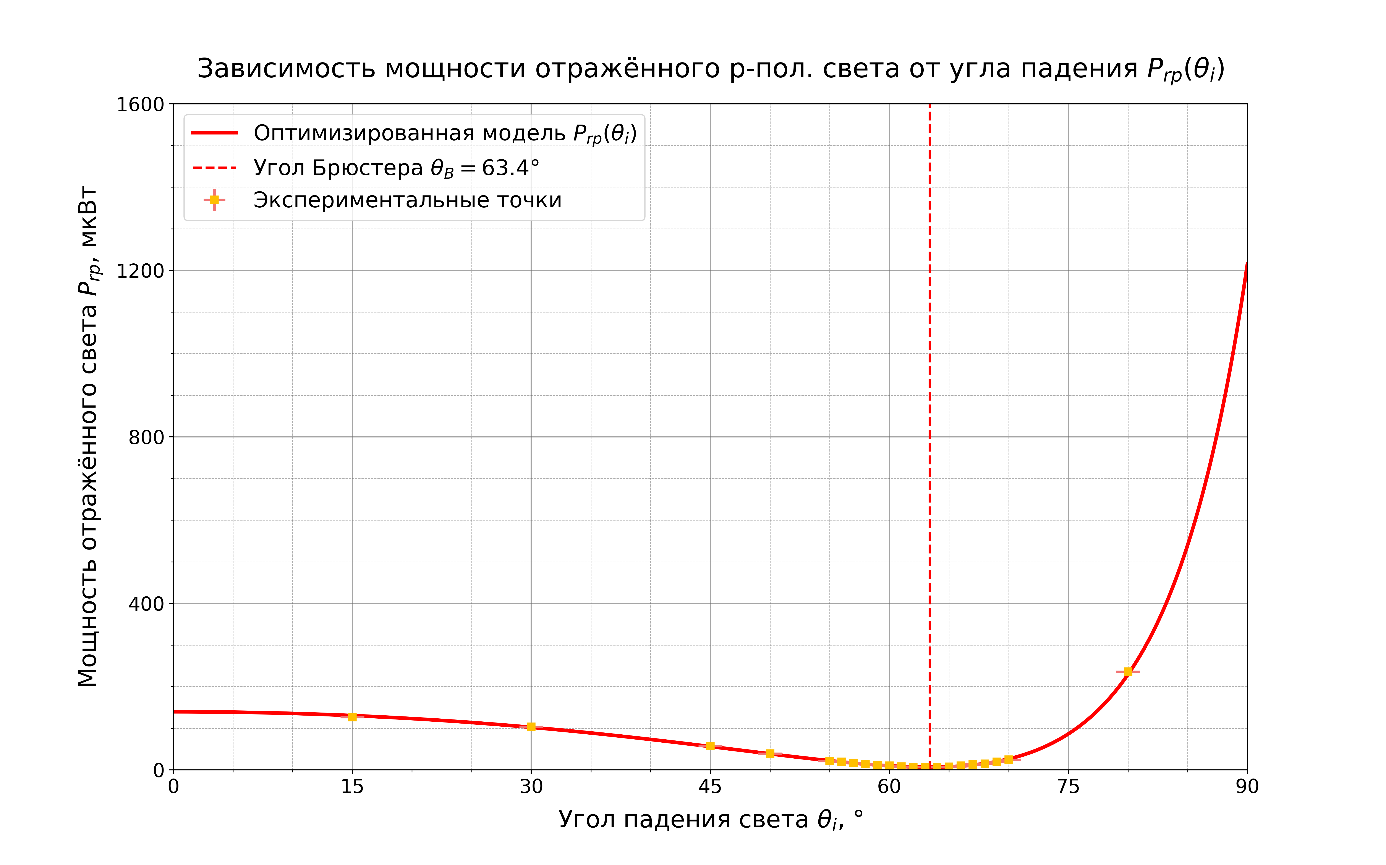


Рисунок 24. График функции , оптимизированной по

Опять же, модель крайне хорошо совместима с экспериментом, однако полученная оценка  **расходится с полученной ранее**  приблизительно на два , что является не вполне достоверным, но всё же, при определённых допущениях, возможным результатом.

По положению экстремума функции можем оценить угол Брюстера чёрного зеркала:

## Оценка справедливости формул Френеля

Приведя модельные функции , и данные измерений в безразмерный вид, нанесём их на один график зависимости коэффициента отражения от угла падения .

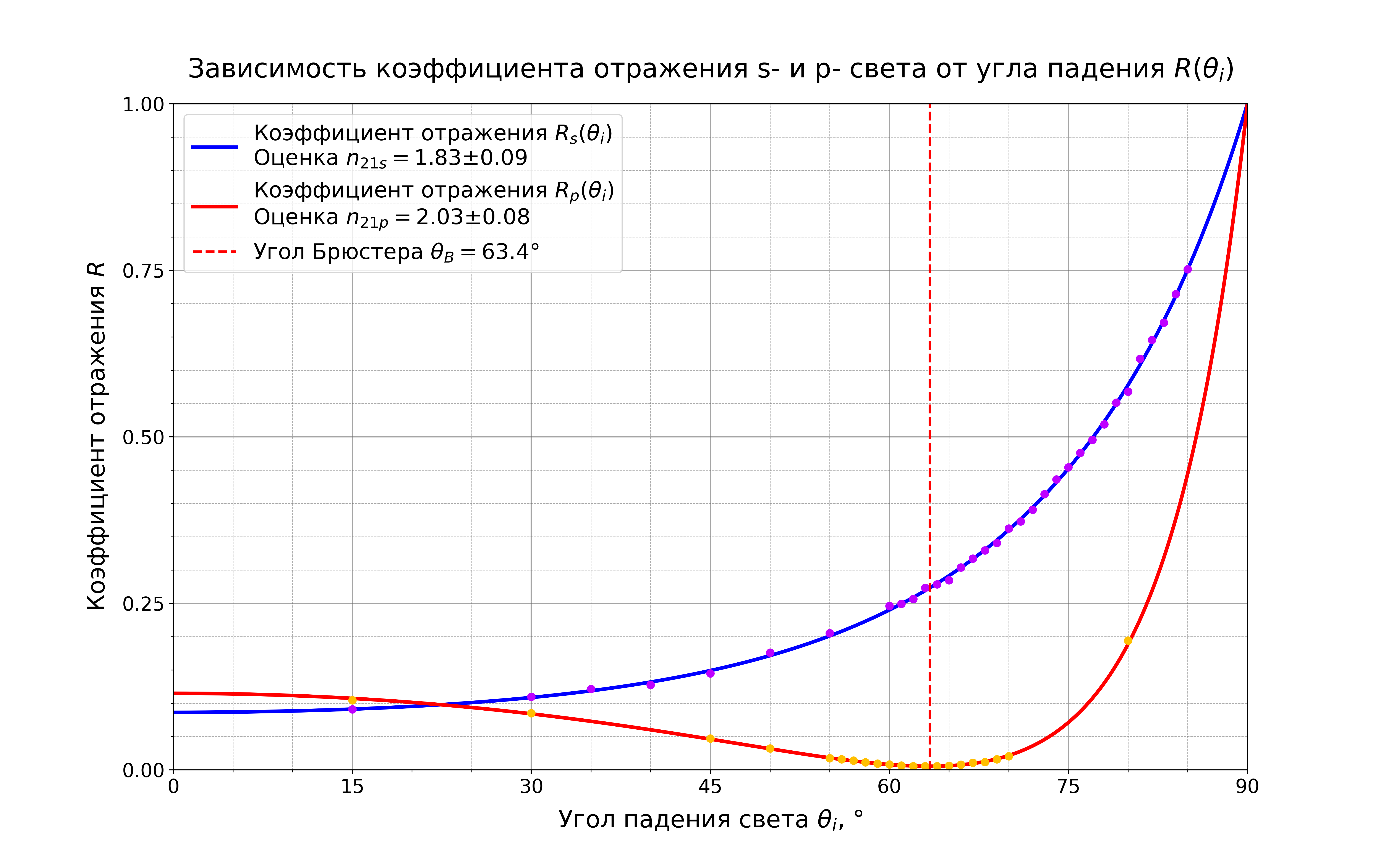


Рисунок 25. Графики функций и

Понятно, что при нормальном падении (), разницы между и не должно быть, если только зеркало не состоит из оптически анизотропного материала. На графике, основанном на модельных функциях , видим существенное различие. Попробуем устранить это различие, допустив, что реальный коэффициент преломления материала чёрного зеркала (коэффициент преломления воздуха ) равен среднему арифметическому оценок и :

Заново оптимизируем , , на этот раз с фиксированным параметром , а в случае с зафиксируем также и , полагая, что от серии к серии измерений он изменяться не должен (измерения проводились на одной и той же установке при одних и тех же условиях освещённости). Приведя оптимизированные функции в безразмерный вид, снова нанесём их на график , также для удобства отметим погрешности измерения.

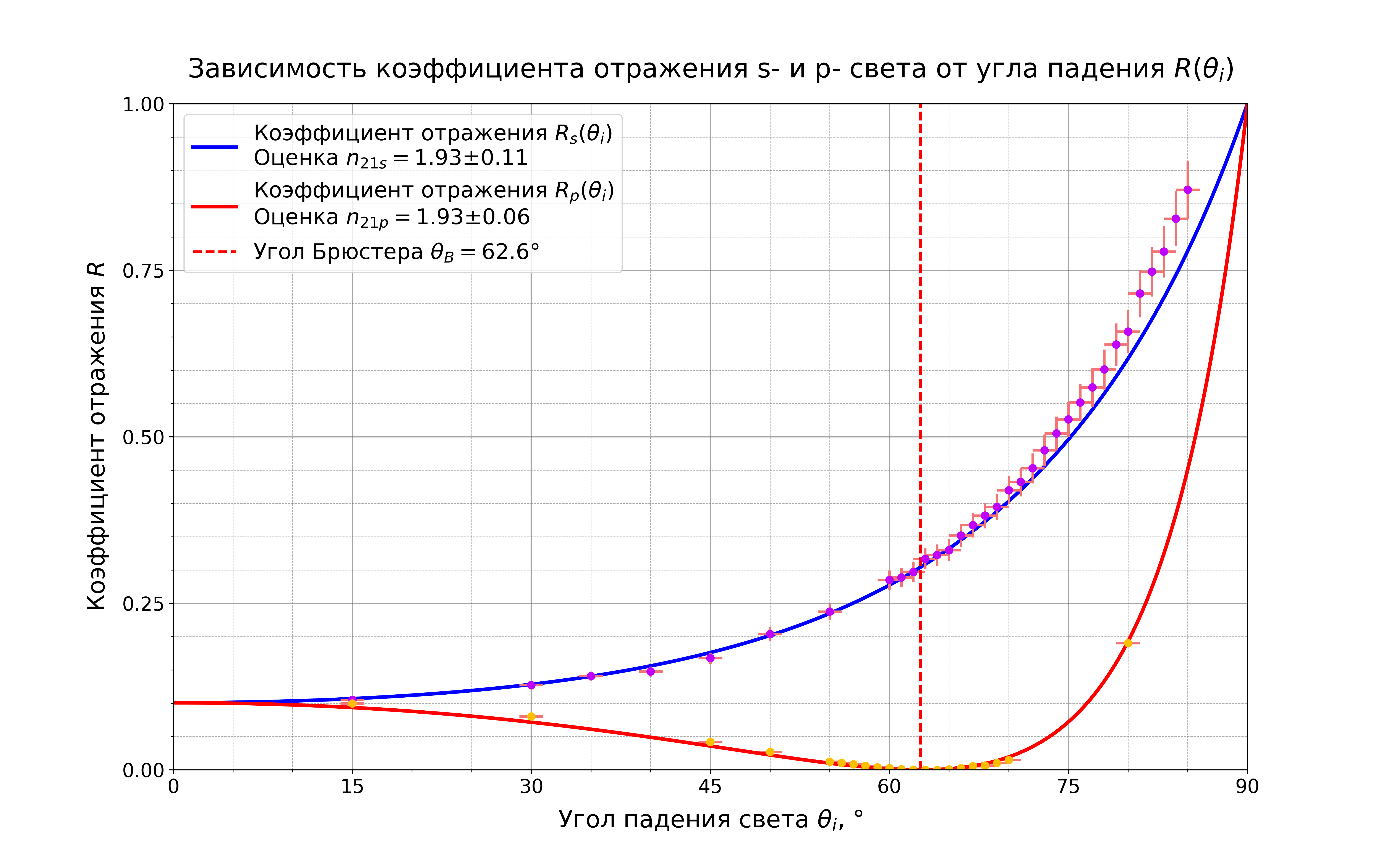


Рисунок 26. Графики функций и при едином

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Тип |  | , мкВт |  |  |
| p-поляризация |  |  |  |  |
| s-поляризация |  |  |

Обновлённая оценка угла Брюстера составляет:

Как можно заметить, сравнив рис. 25 и рис. 26, унифицированные по модели и дают худшие предсказания интенсивности отражённого света, чем модели, построенные для изначально различных оценок . Хотя, c учётом инструментальной погрешности, расхождение не выглядит критично. Есть все основания полагать, что более удачно поставленный эксперимент позволит окончательно подтвердить актуальность использованных моделей. Вместе с тем, в случаях рассмотрения s- и p-поляризаций по отдельности (рис. 23, рис. 24), **формулы Френеля дают точное предсказание зависимости** .

# Приложение

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Угол , | Мощность , мкВт |  | Угол , | Мощность , мкВт |
| 15 | 70.2 | 70 | 280.1 |
| 30 | 84.9 | 71 | 288.4 |
| 35 | 93.9 | 72 | 302 |
| 40 | 98.5 | 73 | 320 |
| 45 | 111.9 | 74 | 337 |
| 50 | 136.1 | 75 | 351 |
| 55 | 158.5 | 76 | 368 |
| 60 | 190.2 | 77 | 383 |
| 61 | 192.8 | 78 | 401 |
| 62 | 198.2 | 79 | 426 |
| 63 | 211.4 | 80 | 439 |
| 64 | 215.2 | 81 | 477 |
| 65 | 220.0 | 82 | 499 |
| 66 | 234.8 | 83 | 519 |
| 67 | 245.1 | 84 | 552 |
| 68 | 254.7 | 85 | 581 |
| 69 | 263.3 |  | |

Таблица 6. Измерение мощности отражённого s-поляризованного света

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Угол , | Мощность , мкВт |  | Угол , | Мощность , мкВт |
| 15 | 127 | 62 | 6.86 |
| 30 | 103.5 | 63 | 6.55 |
| 45 | 57.3 | 64 | 6.71 |
| 50 | 39.1 | 65 | 7.47 |
| 55 | 21.38 | 66 | 9.66 |
| 56 | 19.25 | 67 | 13.14 |
| 57 | 16.78 | 68 | 14.36 |
| 58 | 13.94 | 69 | 19.19 |
| 59 | 11.44 | 70 | 24.66 |
| 60 | 9.91 | 80 | 236.1 |
| 61 | 7.97 |  | |

Таблица 7. Измерение мощности отражённого p-поляризованного света

1. Напомним, что инструментальная погрешность измерения [↑](#footnote-ref-2)
2. Аналогично если , , , и на выходе так же . [↑](#footnote-ref-5)
3. Иными словами, мы не можем отличить волну с амплитудным вектором от волны с амплитудным вектором , которая возникла бы, если бы «быстрым» направлением было . [↑](#footnote-ref-6)