

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель Отделения  
экспериментальной физики ТПУ

\_\_\_\_\_ А. М. Лидер

« \_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА МАЛЮСА  
(свет отражен от стекла под углом Брюстера)**

Методические указания к выполнению лабораторной работы О-38  
по курсу «Общая физика» для студентов всех направлений и  
специальностей

*Составитель В.В. Шамиутдинова*

Издательство  
Томского политехнического университета  
2023

УДК 53(07)

**Изучение закона Малюса (свет отражен от стекла под углом Брюстера):** методические указания к выполнению лабораторной работы О-38/ В.В. Шамшутдинова, – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2023. – 17 с.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром Отделения экспериментальной физики

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Председатель учебно-методической комиссии \_\_\_\_\_ А.М. Лидер

*Рецензент*

*Л.Н. Никитина*

## ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА МАЛЮСА (свет отражен от стекла под углом Брюстера)

**Цель работы:** рассчитать угол Брюстера, экспериментально проверить закон Малюса, определить степень поляризации света.

**Приборы и принадлежности:** лампа, поворотный столик со съемным блоком пластин, анализатор во вращающейся обойме, подвижный фотоэлемент, единый блок питания и измерения интенсивности света.

Работа допускает **4 варианта** выполнения в зависимости от числа стеклянных пластин  $N$  в блоке ( $N = 2, 4, 6, 8$ ).

### 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Данная лабораторная работа посвящена исследованию явлений, связанных с поляризацией электромагнитных волн.

*Волной* называют процесс распространения колебаний в пространстве с течением времени. Волны делят на

- *продольные* – колебания происходят в направлении распространения волны,
- *поперечные* – колебания совершаются в направлениях, перпендикулярных направлению распространения волны.

Для продольной волны поворот вокруг направления распространения не меняет направления колебаний и поэтому скорость распространения остается неизменной. У поперечной волны такой поворот изменяет направление колебаний, что может влиять на распространение волны в пространстве. Для описания этого свойства (определенной направленности колебаний в пространстве) и вводится понятие поляризации. Следовательно, свойство поляризации присуще только поперечным волнам.

*Свет* представляет собой электромагнитную волну, в которой колебания векторов напряженностей электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей происходят во взаимно перпендикулярных плоскостях с одинаковой частотой (рис. 1). Кроме того, векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  всегда перпендикулярны направлению распространения волны (вектору

фазовой скорости  $\vec{v}$  в рассматриваемом круге явлений) и вместе векторы  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  и  $\vec{v}$  образуют правую тройку векторов.

В отрыве друг от друга в электромагнитной волне электрические и магнитные поля существовать не могут. Однако ввиду того, что физиологические, фотоэлектрические, фотохимические и другие действия света обусловлены колебаниями вектора напряженности электрического поля, а также для удобства объяснения, на рисунках изображают только изменение вектора  $\vec{E}$ , называя его *световым* вектором.

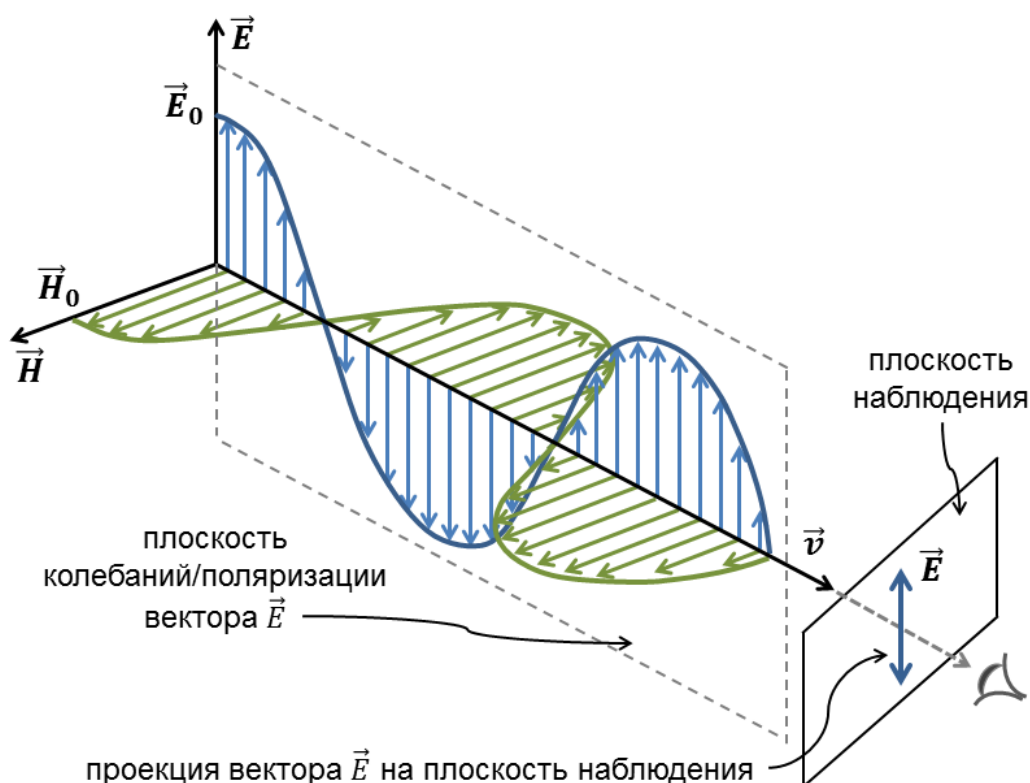


Рис. 1. Колебания векторов напряженностей  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в электромагнитной волне

Световые волны испускают атомы при переходе электронов с более высоких энергетических уровней на более низкие. Этот переход осуществляется за короткий промежуток времени порядка  $10^{-8}$  с. Обычные источники света состоят из огромного числа атомов, которые испускают независимо друг от друга волны с различными направлениями векторов  $\vec{E}$ . Накладываясь друг на друга, эти волны образуют результирующую волну, в которой колебания светового вектора в различных направлениях быстро и беспорядочно сменяют друг друга и с

равной вероятностью могут происходить во всех направлениях, перпендикулярных вектору скорости  $\vec{v}$ . Такой свет называют *естественным* или *неполяризованным*.

*Поляризованным* является свет, в котором колебания светового вектора  $\vec{E}$  каким-либо образом упорядочены: ориентация светового вектора в любой точке пространства с течением времени остаётся неизменной или меняется по определённом закону. Вид поляризации волны определяется видом той кривой, которую описывает электрический вектор за один период колебания в *плоскости наблюдения* – плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны (см. рис. 1). При этом свет должен распространяться к наблюдателю. Например, если колебания светового вектора происходят только в одной плоскости (как на рис. 1), свет является *плоско* (или *линейно*) *поляризованным*. В этом случае проекция вектора  $\vec{E}$  на плоскость наблюдения будет иметь вид отрезка прямой линии (рис. 2).

Естественный свет можно рассматривать как совокупность линейно поляризованных волн со всеми возможными направлениями колебаний вектора  $\vec{E}$ , причем амплитуда этих векторов одинакова во всех направлениях, так что концы их лежат на окружности (рис. 2).

Свет, у которого изменения направления светового вектора в пространстве упорядочены лишь частично (есть преимущественное направление колебаний  $\vec{E}$ , но не единственное), называется *частично поляризованным*. Он представляет собой смесь естественного и линейно поляризованного света (рис. 2).

Вид поляризации схематично изображают на световом луче с помощью стрелок и точек, причем стрелки обозначают колебания, происходящие в плоскости рисунка, а точки – в перпендикулярных ей направлениях (рис. 2).

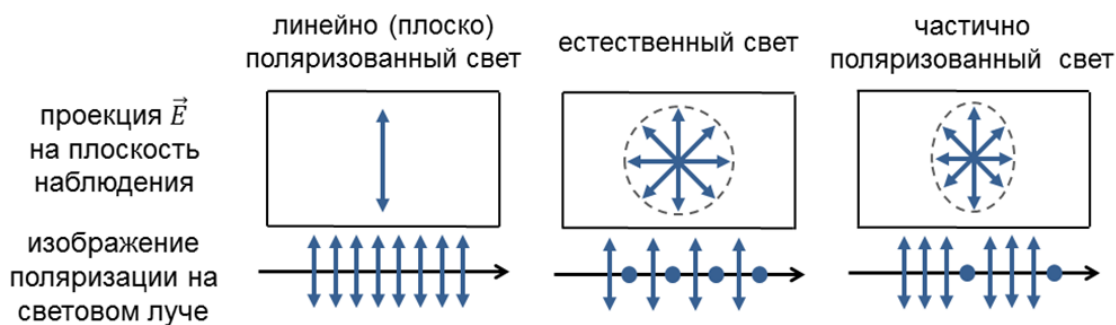


Рис. 2. Схематичное изображение поляризации

Обычные источники: солнце, пламя, электрические лампочки и др., излучают неполяризованный свет. В практических целях требуется из неполяризованного получать полностью поляризованный свет, прежде всего, линейно поляризованный. Визуально поляризованный свет отличить от неполяризованного нельзя. Для выделения линейно поляризованного света используют оптические устройства, называемые *поляризаторами*. Они пропускают световые колебания лишь в определенной плоскости – *плоскости поляризатора* (рис. 3). Те же самые приборы, применяемые для анализа состояния поляризации света, называют *анализаторами*.

Первые поляризаторы были изготовлены из двулучепреломляющих кристаллов (призменные поляризаторы). В настоящее время более распространены поляризаторы из дихроичных материалов – поляроиды, и используемые в данной работе.

### Закон Малюса

При прохождении линейно поляризованного света с напряженностью  $\vec{E}_0$  через анализатор последний пропустит только составляющую  $\vec{E}$ , лежащую в плоскости поляризатора  $PP'$  (рис. 3):  $E = E_0 \cos \varphi$ . Здесь  $\varphi$  – угол между плоскостью колебаний падающего света и плоскостью поляризатора.

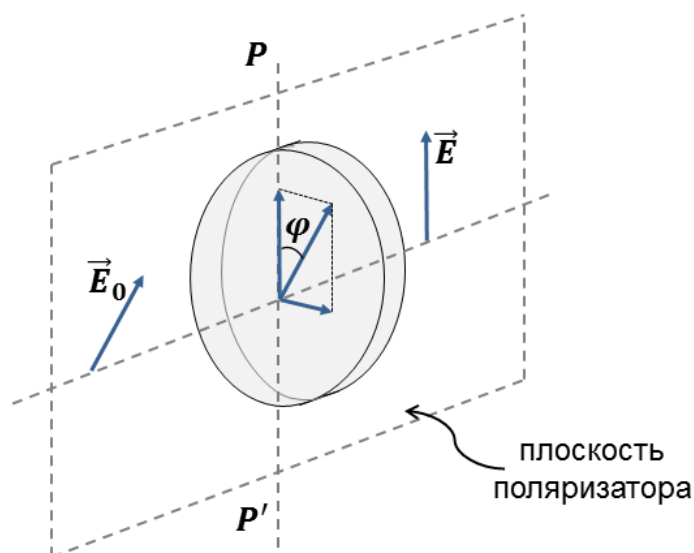


Рис. 3. Принцип работы поляризатора

Поскольку интенсивность световой волны  $I$  пропорциональна квадрату ее амплитуды  $E^2$ , для интенсивности света на выходе из анализатора получим

$$I = I_0 \cos^2 \varphi, \quad (1)$$

где  $I_0$  – интенсивность падающего на анализатор линейно поляризованного света. Это соотношение называют *законом Малюса*. В рассуждениях выше предполагали, что свет падает на анализатор нормально, потери интенсивности света при отражении и прохождении пренебрежимо малы; составляющая света, перпендикулярная плоскости поляризатора, полностью поглощается.

Из закона Малюса следует, что через два скрещенных под прямым углом идеальных поляризатора, линейно поляризованный свет не пройдет. При параллельном их расположении интенсивность прошедшего света будет максимальной. При повороте анализатора на  $360^\circ$  дважды наблюдаются максимальная и нулевая интенсивности. Следует отметить, что такой результат будет только в том случае, если на анализатор падает линейно поляризованный свет.

### Степень поляризации

У частично поляризованного света интенсивность в определенном направлении является преобладающей. Поэтому при вращении анализатора, на который падает частично поляризованный свет, интенсивность прошедшего света будет изменяться от  $I_{min}$  до  $I_{max}$ . Степень выделения световых волн с определенной ориентацией электрического вектора характеризуют безразмерной величиной – *степенью поляризации*  $P$ :

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}. \quad (2)$$

Для естественного света  $I_{max} = I_{min}$  и  $P = 0$ , для плоско поляризованного  $I_{min} = 0$  и  $P = 1$ , для частично поляризованного света –  $0 < P < 1$ .

Интенсивность падающего частично поляризованного света можно представить как сумму интенсивностей линейно поляризованного части  $I_{0пол}$  и неполяризованной (естественной)  $I_{0ест}$ . После прохождения анализатора интенсивность такого света будет равна

$$I = \frac{1}{2} I_{0ест} + I_{0пол} \cos^2 \varphi. \quad (3)$$

Множитель  $\frac{1}{2}$  при  $I_{\text{ест}}$  появляется из-за усреднения  $\cos^2\varphi$  (в естественном свете все значения угла  $\varphi$  равновероятны), т.е. через идеальный поляризатор проходит только половина от интенсивности естественного света.

Минимальное значение  $I_{\min} = \frac{1}{2}I_{\text{ест}}$  интенсивности (3) наблюдается при  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , максимальное  $I_{\max} = \frac{1}{2}I_{\text{ест}} + I_{\text{пол}}$  – при  $\varphi = 0$ . Следовательно, выражение (3) можно записать в виде

$$I = I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min})\cos^2\varphi. \quad (4)$$

Формула (4) демонстрирует линейную зависимость интенсивности  $I$  частично поляризованного света, прошедшего анализатор, от  $\cos^2\varphi$ :

$$I = kx + b \quad (5)$$

переменная	$x = \cos^2\varphi$
угловой коэффициент	$k = I_{\max} - I_{\min}$
свободный член	$b = I_{\min}$
значение функции при $x = 1$	$I(1) = I_{\max}$

Следовательно, определив по графику зависимости  $I = f(\cos^2\varphi)$  значения  $k$ ,  $b$ ,  $I(1)$ , можно рассчитать степень поляризации света:

$$P = \frac{k}{b + I(1)}. \quad (6)$$

### Угол Брюстера

Поляризацию света можно наблюдать при его отражении и преломлении на границе раздела двух изотропных диэлектриков. Например, при падении луча естественного света на поверхность стекла, воды и т.д. часть его отражается, а часть, преломляясь, распространяется в среде. Располагая анализатор на пути луча, можно исследовать поляризации отраженного и преломленного лучей. Оба луча будут частично поляризованы.

Назовем *плоскостью падения* плоскость, проходящую через падающий луч и нормаль к границе раздела сред, проведённую в точке падения луча (см. рис. 4).

В отраженном луче будут преобладать колебания вектора  $\vec{E}$ , перпендикулярные плоскости падения, а в преломленном луче – колебания, параллельные ей. Степень поляризации зависит от угла падения  $\alpha$ . При некотором строго определенном для данных сред



значении угла падения отраженный свет будет полностью поляризован (линейно). Такой угол падения называют *углом полной поляризации* или *углом Брюстера*. Его значение удовлетворяет условию

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{Бр}} = n_{21}, \quad (7)$$

где  $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$  – относительный показатель преломления второй среды по отношению к первой. Соотношение (7) известно, как *закон Брюстера*. Показатель преломления оптических стекол лежит в интервале  $1,3 \div 2,1$ , следовательно, угол Брюстера варьируется в диапазоне  $52,4^\circ \div 64,5^\circ$ .

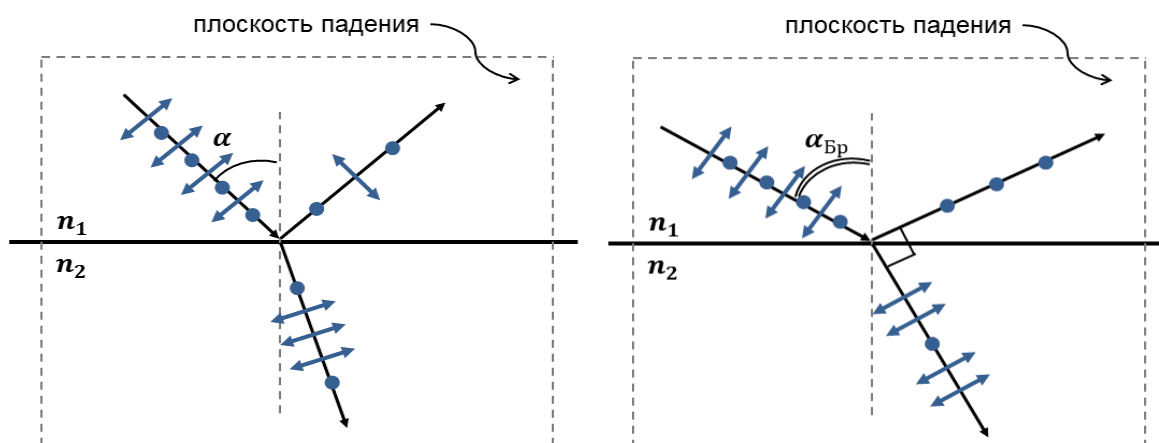


Рис. 4. Поляризации естественного света при падении на диэлектрик

Преломленный луч всегда частично поляризован с разной степенью. Отметим, что при угле падения равном углу Брюстера угол между отраженным и преломленным лучами равен  $90^\circ$ .

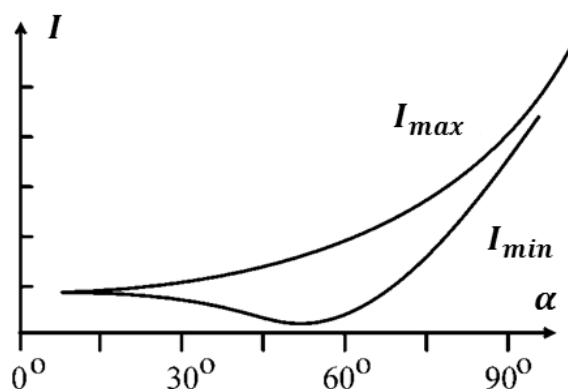


Рис. 5. Зависимости максимального и минимального значений интенсивности отраженного света от угла падения

На рисунке 5 представлен вид теоретических зависимостей интенсивностей отраженного света  $I_{\min}$  и  $I_{\max}$  от угла падения  $\alpha$ .

Минимальное значение интенсивности  $I_{min}$  соответствует максимальной степени поляризации отраженного света и углу падения, равному углу Брюстера.

Брюстеровское отражение является самым простым и дешевым способом получения линейно поляризованного света. В определенных диапазонах длин волн этот способ вообще является единственным. Однако использование отраженного луча в таких поляризаторах не всегда удобно, так как его направление зависит от угла падения и доля отражаемого от диэлектрика света очень мала (например, от стеклянной пластины отражается 3-5% падающего света). Поэтому применяют многократное отражение волн от стопы пластин или используют не отраженный, а преломленный луч, заставляя последний многократно преломляться, при условии падения каждый раз на границу раздела под углом Брюстера (рис. 6).

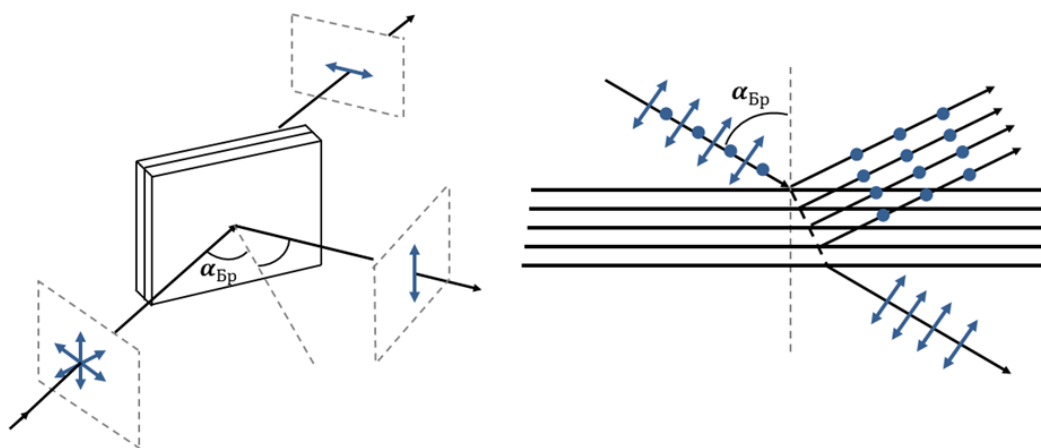


Рис. 6. Поляризация света с помощью стопы Столетова

Подобные конструкции содержат 8-10 пластин и носят название *стоп Столетова*. Выбор веществ при изготовлении стоп связан с исследуемой областью спектра. Например, в видимой области (свет) материалом стопы может быть обычное стекло, в инфракрасной – селен или хлористое серебро.

## 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для получения и исследования поляризации света в работе используется установка, схема которой приведена на рис. 7.

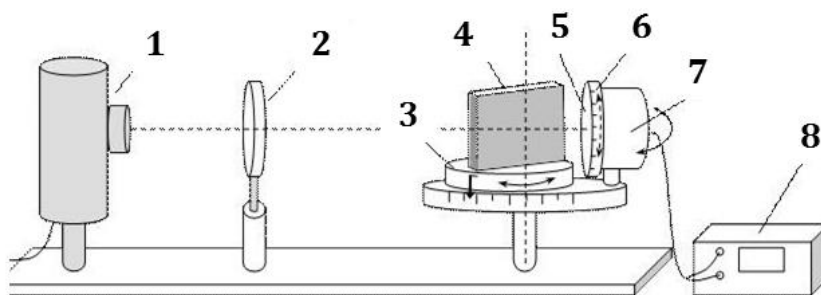


Рис. 7. Схема установки

На оптической скамье размещены лампа в корпусе 1, поляризатор 2, поворотный столик 3, съемный блок с пластинами 4, анализатор 5 во вращающейся обойме 6, подвижный фотоэлемент 7, единый блок питания и измерения интенсивности света 8.

Поворот лампы вокруг своей оси позволяет при необходимости исключать попадание излучения на фотоэлемент для фиксирования интенсивности окружающего света – «шума».

Поляризатор является съемным. *При ненадобности рекомендуется не убирать его с оптической скамьи, а опускать вниз до упора.*

Поворотный столик снабжен стрелкой-указателем для определения угла падения света на блок пластин. Под ним находится угловая шкала, положение которой можно регулировать. Зажимной винт позволяет фиксировать положение столика. Поворотный столик может вращаться вокруг вертикальной оси, тем самым изменять угол падения света на пластины.

Блок (стопа) с пластинами устанавливается в штыри поворотного столика. В работе используется набор блоков с двумя, четырьмя, шестью и восемью пластинами.

Анализатор расположен во вращающейся обойме, снабженной угловой шкалой. *Ноль угловой шкалы анализатора может не соответствовать положению, при котором плоскости поляризатора и анализатора совпадают.*

Фотоэлемент подвижен. Он может быть расположен как за блоком с пластинами, так и перед ним.

Данные, поступающие с фотоэлемента, преобразуются в блоке измерения интенсивности света в показания, пропорциональные световому потоку, падающему на фотоэлемент. *В работе эти показания принимаются за интенсивность света в условных единицах.*

Единый блок питания и измерения интенсивности света снабжен кнопкой одновременного включения лампы и шкалы измерителя интенсивности.

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомьтесь с основными узлами и элементами установки:
  - источник света,
  - поляризатор,
  - поворотный столик с фиксаторами для стеклянных пластин, стрелка-указатель угла падения, винтовой зажим,
  - вращающийся узел анализатор-фотоэлемент, вращающаяся обойма с анализатором,
  - измеритель интенсивности света-блок питания лампы.
2. Определите уровень «шума». Для этого включите блок питания, исключите попадание света лампы на фотоэлемент (поверните/прикройте рукой лампу). Зафиксируйте в отчете значения интенсивности освещения помещения.
3. Проведите настройку установки по вертикали. Для этого опустите поляризатор максимально вниз. Разместите фотоэлемент напротив источника. Изменяя высоту приборов, расположите выходное отверстие источника на одном уровне с центром фотоэлемента.
4. Проведите настройку отсчета угла падения. Расположите стрелку-указатель угла падения как можно ближе к источнику. Совместите ноль шкалы отсчета углов падения со стрелкой-указателем.
  - *Дальнейшие манипуляции в работе проводите, придерживая шкалу отсчета углов, чтобы она не сдвигалась вслед за столиком или фотоэлементом.*
5. Определите степень поляризации излучения источника. Для этого фотоэлемент разместите строго напротив источника. Убедитесь, что при малом смещении фотоэлемента влево-вправо значения интенсивности уменьшаются. В положении, при котором интенсивность максимальна, начинайте поворачивать анализатор. Вращая плоскость анализатора на  $360^\circ$ , зафиксируйте в отчете максимальное и минимальное значения интенсивности.
  - *Поворот плоскости анализатора вблизи  $I_{min}$  и  $I_{max}$  следует проводить плавно с малым шагом, чтобы не пропустить наименьшее или наибольшее значение.*

Рассчитайте степень поляризации излучения источника по формуле (2).

**Таблица 1**

«Шум»	Степень поляризации излучения источника		
$I$ , усл. ед.	$I_{max}$ , усл. ед.	$I_{min}$ , усл. ед.	$P$

6. Рассчитайте угол Брюстера для используемого стекла, показатель преломления которого равен 1,38.
  7. Установите на поворотном столике блок с пластинами, количество пластин соответствует вашему варианту выполнения работы. Поверните столик так, чтобы угол падения был равен рассчитанному углу Брюстера.
  8. Поворачивая фотоэлемент, добейтесь попадания на него отраженного света. Правильное положение фотоэлемента соответствует максимальному значению интенсивности света вблизи угла отражения. Убедитесь, что при малом сдвиге фотоэлемента из этого положения значения интенсивности уменьшаются.
- 
9. В этом положении фотоэлемента начинайте поворачивать анализатор. Вблизи отметки  $0^\circ$  на шкале анализатора, найдите такое его положение, при котором значение интенсивности света максимально. Данное положение плоскости анализатора  $\varphi_A$  зафиксируйте в отчете. Оно соответствует углу  $\varphi = 0^\circ$  и может не совпадать с нулевым значением на шкале анализатора! Максимальное значение интенсивности укажите, как соответствующее  $\varphi = 0^\circ$ .
  10. Поворачивая анализатор на  $360^\circ$  с шагом  $10^\circ$  от найденного положения  $\varphi_A$ , снимите зависимость интенсивности  $I$  от угла  $\varphi$  между плоскостями поляризации отраженного света и анализатора:  $\varphi = \varphi_A + 10^\circ, \varphi_A + 20^\circ, \dots$
  11. Среди снятых показаний найдите максимальное значение  $I_{max}$ . Проведите нормировку полученных значений на единицу, результаты расчета  $I/I_{max}$  укажите в отчете.

**Таблица 2**

Зависимость интенсивности света от угла между плоскостями поляризации поляризатора и анализатора			
Максимальной интенсивности света соответствует угол $\varphi_A = \underline{\hspace{2cm}}$ по шкале анализатора			
$\varphi$	$I$ , усл. ед.	$I/I_{max}$	$\cos^2 \varphi$
0°			1,000
10°			0,970
20°			0,883
⋮	⋮	⋮	⋮
330°			0,750
340°			0,883
350°			0,970

12. Постройте зависимость  $I/I_{max} = f(\varphi)$  в полярной системе координат (см. Приложение к методическим указаниям).
13. Рассчитайте значения  $\cos^2 \varphi$  для всех выбранных углов  $\varphi$ .
14. На той же координатной сетке постройте график функции  $\cos^2 \varphi = f(\varphi)$ .
15. В декартовой системе координат постройте график зависимости  $I = f(\cos^2 \varphi)$ .
16. Рассчитайте степень поляризации отраженного излучения по формуле (2), используя данные таблицы измерений.

**Таблица 3**

Степень поляризации прошедшего излучения			
По данным таблицы измерений	$I_{max}$ , усл. ед.	$I_{min}$ , усл. ед.	$P$
По графику зависимости $I = f(\cos^2 \varphi)$	$k$	$b$	$I(1)$

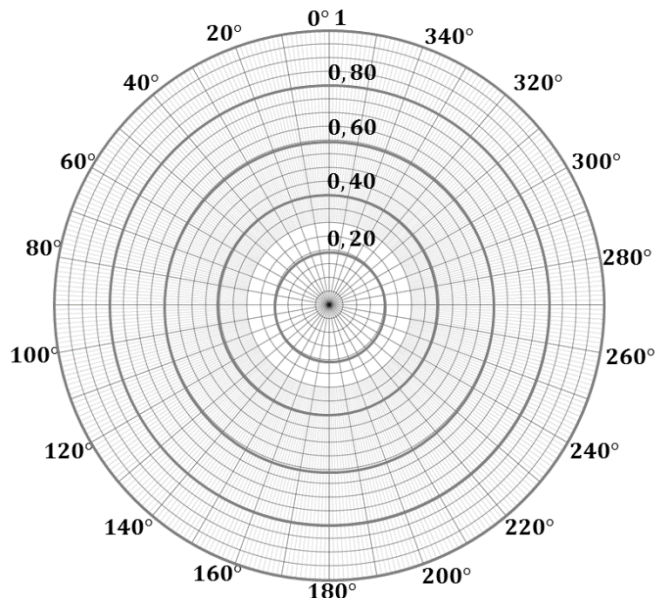
17. Рассчитайте степень поляризации отраженного излучения по формуле (6), найдя все необходимые данные из графика зависимости  $I = f(\cos^2 \varphi)$ .
18. Сформулируйте вывод, анализируя результаты работы.

#### 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Возможна ли поляризация продольных волн? Почему?
2. Что такое электромагнитная волна?
3. Какой свет называют «естественным»? частично поляризованным?
4. Как найти степень поляризации света?
5. Чему равна степень поляризации естественного света? линейно поляризованного?
6. Чем отличается поляризатор от анализатора?
7. Сформулируйте и запишите закон Малюса.
8. Как изменяется интенсивность прошедшего света при вращении поляризатора вокруг направления луча падающего естественного света?
9. Как изменяется интенсивность прошедшего света при вращении поляризатора вокруг направления луча падающего линейно поляризованного света?
10. Чем замечателен угол Брюстера?

## 5. ПРИЛОЖЕНИЕ

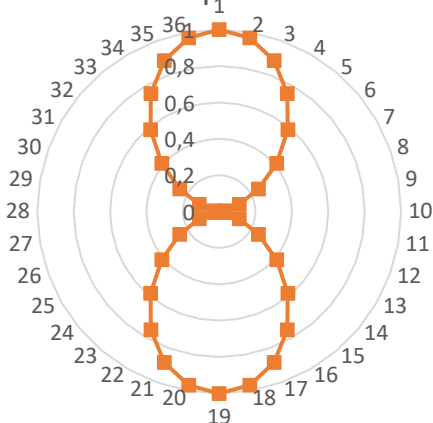
Зависимость  $I/I_{max} = f(\varphi)$  в работе необходимо изображать в полярной системе координат. При рукописном выполнении задания предварительно заготовьте координатную сетку.



Угол  $\varphi$  откладывается от полярной оси против часовой стрелки. Полярным радиусом служит отношение  $I/I_{max}$ .

При работе в Excel или других программах используйте вставку диаграммы. Из списка «Все типы диаграмм» выберите «Лепестковая с маркерами». При выборе данных для диаграммы выделите весь столбец со значениями  $I/I_{max}$  из 36 элементов. При этом получите график следующего вида:

Линейно поляризованный свет



Неполяризованный свет

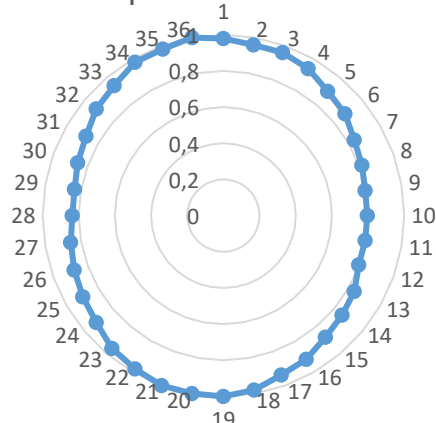


График линейно поляризованного света в полярных координатах имеет вид восьмерки, неполяризованного – близок к окружности.



Учебное издание

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА МАЛЮСА  
(свет отражен от стекла под углом Брюстера)**

Методические указания к выполнению лабораторной работы О-38

*Составитель*

Шамшутдинова Варвара Владимировна

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати \_\_\_\_\_ 2023. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл.печ.л. 9,01. Уч.-изд.л. 8,16.

Заказ . Тираж \_\_\_\_ экз.

---

Национальный исследовательский Томский политехнический  
университет




Система менеджмента качества



Томского политехнического университета сертифицирована

NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008

---

**ИЗДАТЕЛЬСТВО**  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Тел./факс: 8(3822)56-35-35, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)

