



**НТЦ-22.02.2
ПОЛУЧЕНИЕ И
ИССЛЕДОВАНИЕ
ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА**

Методические рекомендации
по выполнению
лабораторных работ

улица Гришина, 94В,
212000, г. Могилев,
Республика Беларусь
тел/факс (+375 -222) 78-14-14,
78-37-37

E-mail: ntp@ntpcentr.com
www.ntpcentr.com

ОПИСАНИЕ УЧЕБНОГО ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Учебный лабораторный стенд предназначен для изучения поляризованного света полупроводникового лазера, нахождения угла Брюстера при падении лазерного света на стеклянную пластину, определения коэффициента преломления стекла и проверки справедливости закона Малюса.

Конструктивно стенд состоит из экспериментальной установки и блока управления и измерения (см. рисунок 1).



Рисунок 1 – Внешний вид стенда

Установка представляет собой две оптические скамьи, соединенные между собой рычажным механизмом, позволяющим изменять угол падения луча на пластину в пределах $50...120^\circ$.

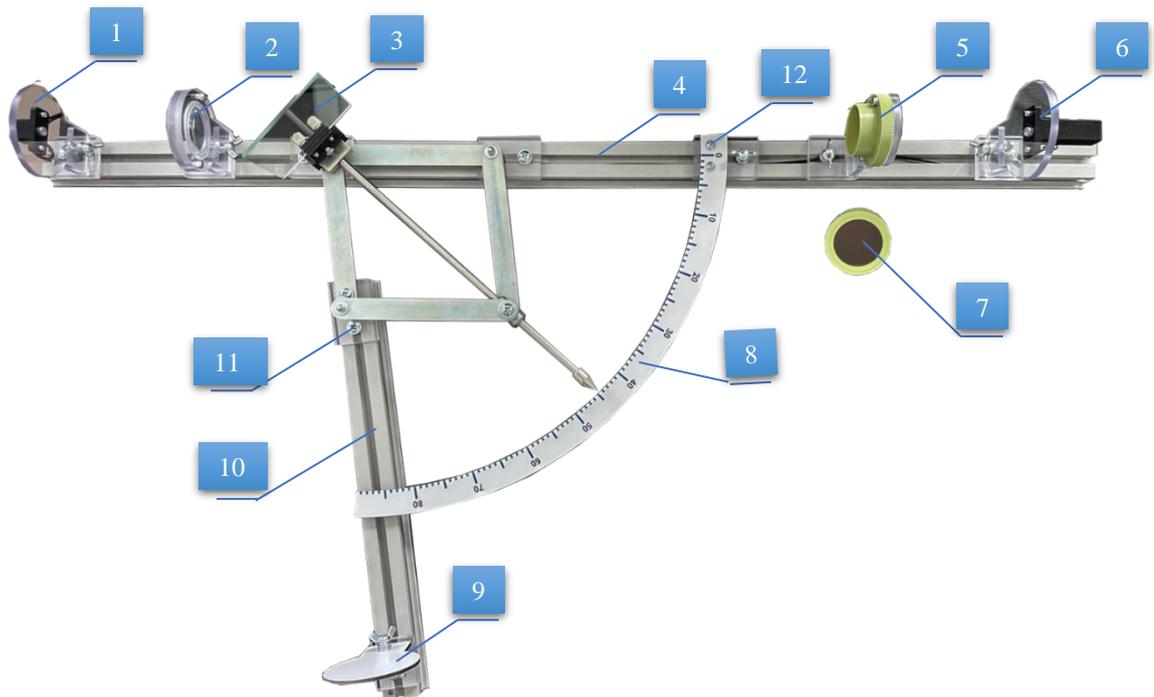
На оптической скамье установлены:

- полупроводниковый лазерный излучатель видимого света;
- экран;
- стекло;
- система из двух поляризаторов с регулируемым вектором поляризации;
- экран с детектором света;
- собирающая линза;
- угловая шкала, позволяющая определять угол падения лазерного луча.

Блок управления и измерения предназначен для измерения тока фотодетектора и питания источника света.



ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ СО СТЕНДОМ



1 – фотоприемник; 2- собирающая линза; 3 – стекло; 4 – неподвижная оптическая скамья; 5 – неподвижный поляризатор; 6 – источник излучения; 7 – подвижный поляризатор; 8 – угловая шкала, позволяющая определять угол падения лазерного луча; 9 – экран с детектором света; 10 – подвижная часть оптической скамьи; 11 – винт для крепления подвижной оптической скамьи; 12 – винты для крепления угловой шкалы

Рисунок 2 – Лабораторная установка

1. Установите учебный лабораторный стенд на ровную поверхность.
2. Закрепите винт 11 на подвижной части оптической скамьи.
3. Закрепите винты 12 на угловой шкале.
4. Подключите экспериментальную установку к блоку управления и измерения.



ВНИМАНИЕ! Производить подключение и отключение установки от блока только при выключенном питании.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ НА СТЕНДЕ

Лабораторная работа №1	5
▶ Изучение закона Брюстера	5
Лабораторная работа №2	12
▶ Изучение закона Малюса	12



Лабораторная работа №1

Изучение закона Брюстера



Цель работы

- ✓ Получение практических знаний о законе Брюстера.



Теоретическая справка

Поляризация – это характеристика поперечных волн. Она описывает положение вектора колеблющейся величины в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

Поляризация света по определению – это выделение из естественного света лучей с определенной ориентацией электрического вектора.

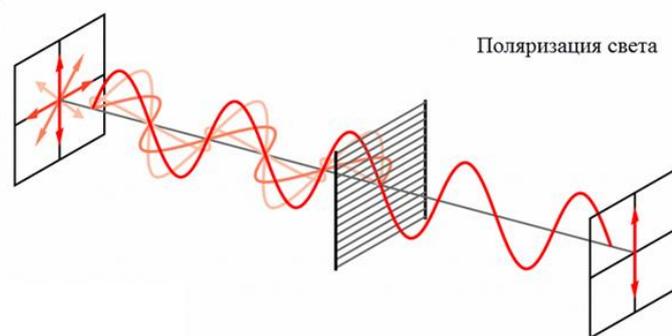


Рисунок 1.1 – Поляризация света

Свет, который мы видим вокруг себя, чаще всего неполяризован. Свет от лампочек, солнечный свет – это свет, в котором вектор напряженности колеблется во всех возможных направлениях. Но если вам по роду деятельности приходится весь день смотреть в ЖК-монитор, знайте: вы видите поляризованный свет.



Рисунок 1.2 – Разновидности света

Чтобы наблюдать явление поляризации света, нужно пропустить естественный свет через анизотропную среду, которая называется **поляризатором** и «отсекает» ненужные направления колебаний, оставляя какое-то одно.

В качестве поляризаторов используются кристаллы.

Один из способов получения поляризованного света - отражение от диэлектрика. Когда свет падает на границу раздела двух сред, луч разделяется на отраженный и преломленный. При этом лучи являются частично поляризованными, а степень их поляризации зависит от угла падения.



Рисунок 1.3 – Отражение от диэлектрика

Закон Брюстера — закон оптики, выражающий связь показателей преломления двух диэлектриков с таким углом падения света, при котором свет, отражённый от границы раздела диэлектриков, будет полностью поляризованным в плоскости, перпендикулярной плоскости падения.



Историческая справка: Это явление оптики названо по имени шотландского физика Дэвида Брюстера, открывшего его в 1815 году.

При этом преломлённый луч частично поляризуется в плоскости падения, и его поляризация достигает наибольшего значения (но не 100 %, поскольку от границы отразится лишь часть света, поляризованного перпендикулярно к плоскости падения, а оставшаяся часть войдёт в состав преломлённого луча). Угол падения, при котором отражённый луч полностью поляризован, называется **углом Брюстера**.

При падении под углом Брюстера отражённый и преломлённый лучи взаимно перпендикулярны.



Степень поляризации зависит от угла падения лучей и показателя преломления $P=f(\alpha, n)$.

Колебания вектора \vec{E} в отраженном свете перпендикулярны плоскости падения.



Поляризующий эффект можно понять, если иметь в виду следующее:

1. Колебания электрического поля в электромагнитной волне всегда происходят перпендикулярно направлению движения.
2. Взаимодействие с диэлектриком происходит в два этапа. Вначале падающая волна генерирует коллективные колебания дипольных моментов молекул диэлектрика, затем эти осцилляции в свою очередь генерируют отражённую и преломлённую волну.
3. Итак, отражённая волна генерируется колебаниями дипольных моментов молекул среды. Когда угол между отражённой и преломлённой волной составляет 90 градусов, колебания электрического поля отражённой волны в плоскости падения могли бы генерироваться только колебаниями дипольных моментов вдоль преломлённого луча. Индуцировать такие колебания могла бы только продольная компонента колебаний электрического поля преломлённого луча. Но поскольку в преломленном пучке её нет, то и в отражённом не может быть.

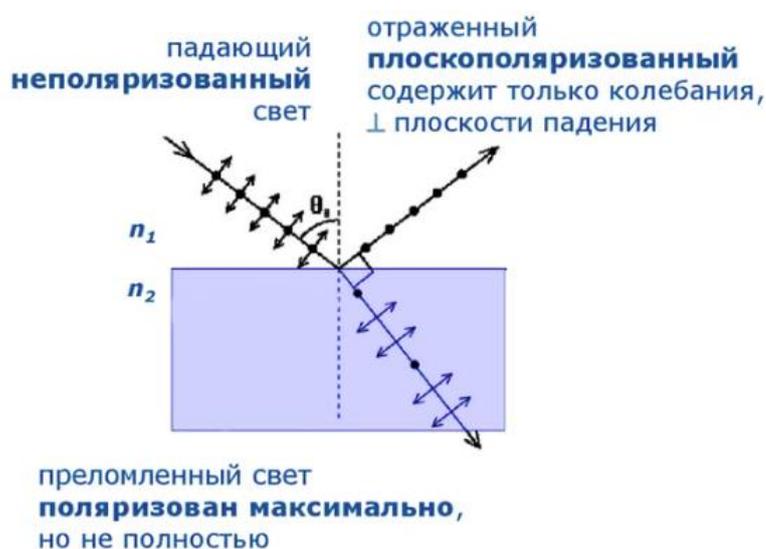


Рисунок 1.4 – Закон Брюстера

Угол между отраженным и преломленным лучами – прямой (следствие закона Брюстера).

Если угол падения луча θ_B удовлетворяет условию, то отраженный луч будет полностью поляризован.

$$\operatorname{tg} \theta_B = n_{21} \quad (1.1)$$

где θ_B – угол Брюстера (угол полной поляризации), при котором отраженная световая волна полностью поляризована;

$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ – относительный показатель преломления второй среды (на которую падает свет) относительно первой (из которой падает свет).

Если на пластинку из диэлектрика падает луч, до этого прошедший через поляризатор, то это уже поляризованный свет – в нем не все направления колебаний \vec{E} есть.

При определенном угле – угле Брюстера - падения луча на пластинку отраженного света от первой поверхности не будет: в нем должны быть колебания \vec{E} , перпендикулярные \vec{E} в падающем луче. А у преломленного луча будет наибольшая интенсивность.

Рассмотрим прохождение света через пластинку с параллельными гранями (рисунки 1.5-1.6).

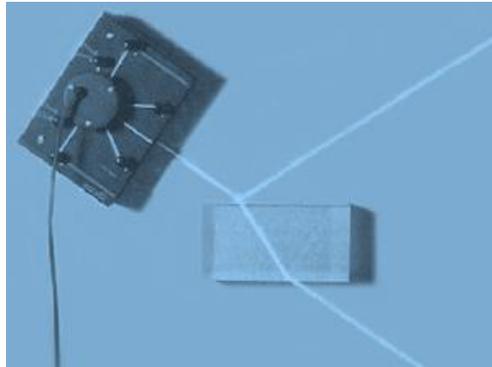


Рисунок 1.5 – Световой луч, проходящий через плоскопараллельную пластинку

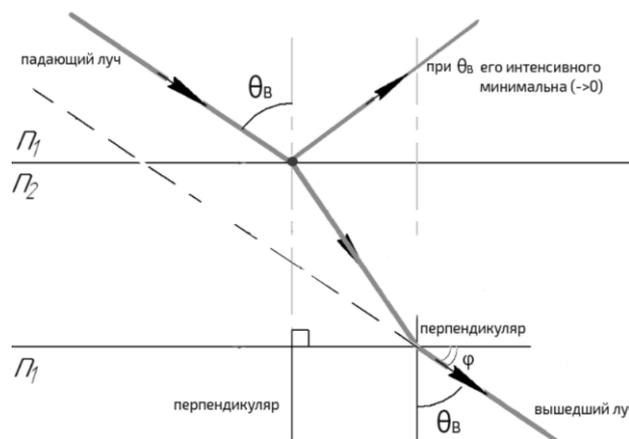


Рисунок 1.6 – Ход луча в пластине

Вышедший луч параллелен первоначально падающему лучу. При разных углах θ падения луча на пластинку и угол выхода будет такой же. Но интенсивность вышедшего луча разная. А при угле Брюстера θ_B интенсивность будет максимальная.

В экспериментальной установке угол выхода равен углу падения. Это и есть угол Брюстера. Отсчет угла осуществляется между перпендикуляром и вышедшим лучом. А если между пластинкой и лучом угол, то угол падения находится путем вычитания из 90° угла между пластинкой и вышедшим лучом.

Пусть угол φ – угол между вышедшим лучом и гранью пластинки. Тогда

$$\theta = 90^\circ - \varphi \tag{1.2}$$

где $\theta = \theta_B$, при условии, что интенсивность вышедшего луча максимальная.

У падающего поляризованного и преломленного (который потом выйдет из пластинки) лучей совпадают плоскости поляризации.



Степень поляризации преломленного света может быть значительно повышена многократным преломлением при условии падения света каждый раз на границу раздела под углом Брюстера (стопа пластинок Столетова, рисунок 1.7).

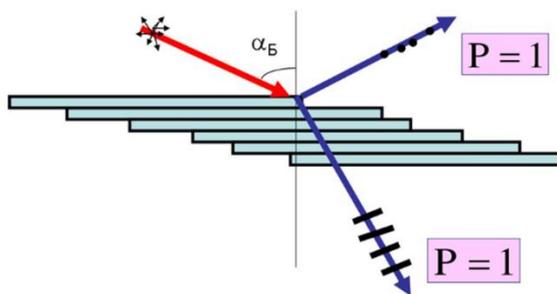


Рисунок 1.7 – Стопа пластинок Столетова

Вышедший после преломления на 8-10 стеклянных наложенных друг на друга пластинок, **преломленный свет будет полностью поляризован**, как и отраженный свет.

При падении света на одну пластинку под углом Брюстера интенсивность отражённого линейно поляризованного света очень мала (для границы воздух-стекло — около 4 % от интенсивности падающего луча). Поэтому для того, чтобы увеличить интенсивность отражённого света (или поляризовать свет, прошедший в стекло, в плоскости, параллельной плоскости падения) применяют несколько скреплённых пластинок, сложенных в стопу — стопу Столетова. Легко проследить по рисунку 1.7 происходящее. Пусть на верхнюю часть стопы падает луч света. От первой пластины будет отражаться полностью поляризованный луч (около 4 % первоначальной интенсивности), от второй пластины также отразится полностью поляризованный луч (около 3,75 % первоначальной интенсивности) и так далее. При этом луч, выходящий из стопы снизу, будет все больше поляризоваться в плоскости, параллельной плоскости падения, по мере добавления пластин.

Две фотографии озера Чёрного, сделанные фотоаппаратом без поляризующего фильтра и с ним. На правой фотографии он повернут таким образом, что отражённый свет почти полностью отфильтровывается и блики исчезают.



Рисунок 1.8 – Использование поляризующего фильтра



Практическая часть

Порядок подготовки к работе:

- Убедитесь в том, что экспериментальная установка подключена к блоку управления и измерения.
- Убедитесь в том, что на неподвижной части оптической скамьи установлены необходимые для проведения эксперимента объекты (рисунок 2).
- Подключите блок к однофазной сети переменного тока 220 В.

⚙️ Практическое изучение закона Брюстера

1. Включите питание установки с помощью тумблера на задней панели блока управления и измерения.
2. Тумблером «SA1» на передней панели блока управления и измерения включите лазерный излучатель.
3. Настройте луч лазерного излучателя прямолинейно (луч попадает на экран подвижной части оптической скамьи).
4. Установите рычажный механизм в положение минимального угла.
5. Поворачивайте рычажный механизм до максимального положения с одинаковым шагом. Значение угла и показания фототока заносите в таблицу 1.1.
6. Зафиксируйте угол Брюстера θ_B , соответствующий максимальному значению фототока.
7. Выполните проверочный расчет угла Брюстера θ_B согласно формуле (1.3). Сравните экспериментальное и расчетное значение.
8. По результатам сравнения сделайте выводы.

Обработка результатов эксперимента

Таблица 1.1 – Результаты выполнения работы

№ п/п	$\theta, ^\circ$	$I_\phi, \text{мА}$

Так как вокруг стеклянной пластинки воздух, то $n_1=n_B$, $n_2=n_{\text{пласт}}$. Угол Брюстера, в данном случае, зависит только от свойств среды, на которую падает луч, идущий в воздухе от источника ($n_B \approx 1$).

Тогда

$$\text{tg } \theta_B = n_{\text{пл}} \text{ или } \theta_B = \text{arctg } n_{\text{пл}} \tag{1.3}$$

Для стекла показатель преломления приблизительно равен 1,5 ($n_{\text{ст}} \approx 1,5$).



Примечание: Угол Брюстера для данной лабораторной установки равен приблизительно 57° .

Порядок завершения работы:

- Выключите тумблер «SA1» на передней панели блока управления и измерения.
- Отключите питание установки с помощью тумблера, установленного на задней панели блока управления и измерения.



Контрольные вопросы

1. Что такое поляризация?
2. Сформулируйте закон Брюстера.
3. От чего зависит степень поляризации преломленного света?

Лабораторная работа №2 Изучение закона Малюса

Цель работы

- ✓ Получение практических знаний о законе Малюса.

Теоретическая справка

Естественный свет можно превратить в плоскополяризованный с помощью **поляризатора**.

Поляризатор – это устройство, преобразующее естественный свет в плоскополяризованный. Поляризаторы (рисунок 2.1) пропускают колебания светового вектора только определенного направления, а остальные колебания не пропускают. Любые кристаллы, в которых присутствует анизотропия распространения света, могут работать в качестве поляризаторов.

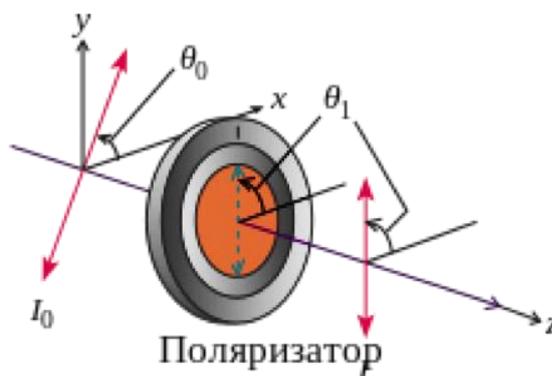


Рисунок 2.1 - Поляризатор

Из природных материалов, которые часто используют в качестве поляризатора, следует отметить минерал **турмалин** (рисунок 2.2). Этот минерал обладает сильной анизотропией, он пропускает только те колебания электрического вектора, которые параллельны его оптической оси, а все остальные не пропускает. Поэтому естественный свет, пройдя через пластинку из турмалина, становится линейно поляризованным.



Рисунок 2.2 – Турмалин (поляризатор из природных материалов)



Таким же свойством обладают **поляроиды** - множество одинаково ориентированных кристаллов сульфата йодистого хинина, нанесенных на целлулоид. Такие пластинки также поглощают все колебания, перпендикулярные к оптической оси кристалликов.

Поляроиды находят широкое применение в различных областях. Так, например, поляроиды наносятся на переднее стекло автомобиля и на его фары. Поляриод на переднем стекле автомобиля - анализатор, поляриод на фаре - поляризатор.

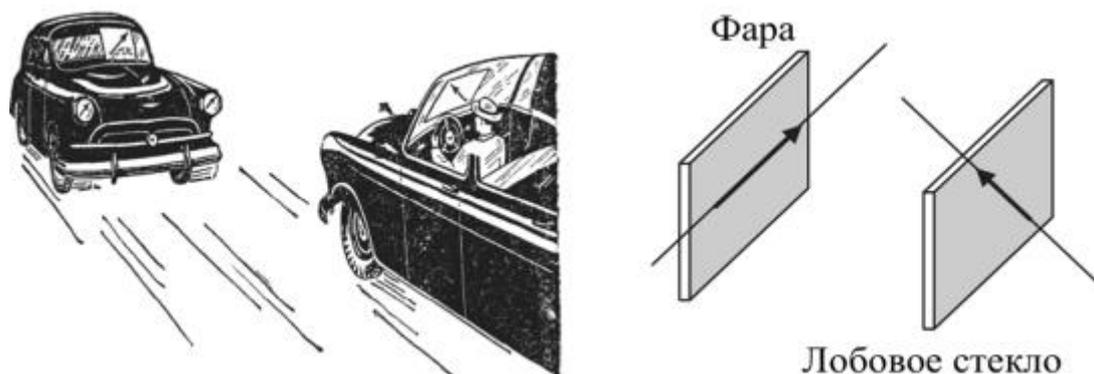


Рисунок 2.3 - Поляроиды

Оптические оси этих поляризаторов параллельны друг другу и повернуты на 45° относительно горизонта. Водитель, смотрящий на дорогу, видит отраженный от дороги свет своих фар, но не видит свет фар встречного автомобиля, поскольку оптические оси поляризаторов расположены под углом 90° . Таким образом, происходит защита от слепящего действия фар встречного автомобиля.

Из поляроидов также изготавливаются поляризационные очки, пропускающие только вертикальную световую волну и защищающие от бликов, отраженных от горизонтальных поверхностей (рисунок 2.4).

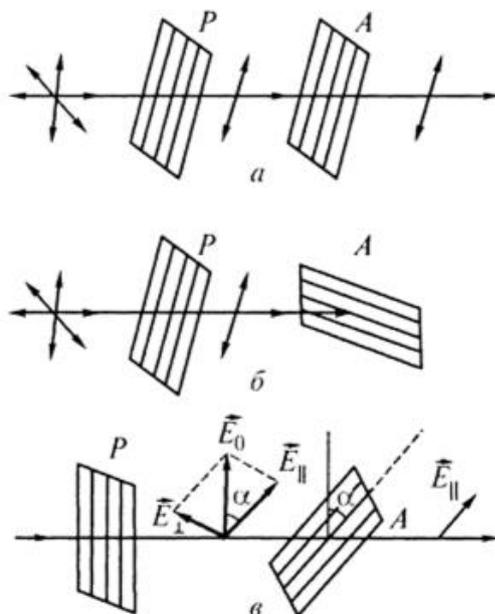


Рисунок 2.4 – Отражение бликов от горизонтальных поверхностей

Если пластинку из турмалина используют для получения поляризованного света - ее называют **поляризатором**, если она применяется для анализа поляризованного

света - ее называют **анализатором**. **Анализатором** называют поляризатор, поставленный на пути уже поляризованного света.

Анализатор – это устройство, служащее для анализа степени поляризации света.

Если пропустить частично поляризованный свет через поляризатор, то при вращении прибора вокруг направления луча интенсивность прошедшего света будет изменяться от I_{max} до I_{min} , причем переход от одного из этих значений к другому будет совершаться при повороте поляризатора на угол, равный $\pi/2$. То есть за один полный оборот по два раза будут достигаться максимальные и минимальные значения.

Выражение 2.1 называется **степенью поляризации**. Для плоско поляризованного света $I_{min}=0$ и $P=1$, для естественного света $I_{max}=I_{min}$ и $P=0$.

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \tag{2.1}$$

где I_{max} и I_{min} — максимальная и минимальная интенсивности частично поляризованного света, пропускаемого анализатором.

Угол поворота φ плоскости поляризации оптически активными веществами определяется соотношениями:

а) в твердых телах

$$\varphi = \alpha d \tag{2.2}$$

где α — постоянная вращения;

d — длина пути, пройденного светом в оптически активном веществе;

б) в чистых жидкостях

$$\varphi = [\alpha] \rho d \tag{2.3}$$

где $[\alpha]$ — удельное вращение;

ρ — плотность жидкости;

в) в растворах

$$\varphi = [\alpha] C d \tag{2.4}$$

где C — массовая концентрация оптически активного вещества в растворе.

Рассмотрим естественный свет, прошедший через поляризатор (рисунок 2.5). После поляризатора свет будет поляризован в направлении оси пропускания поляризатора.

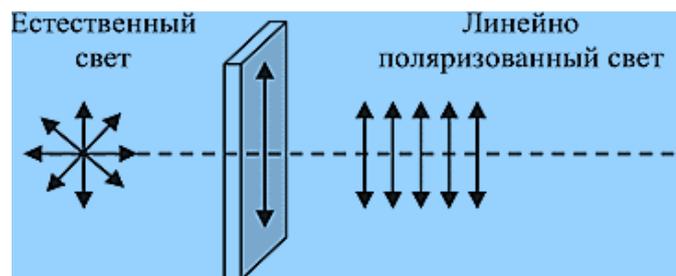


Рисунок 2.5 – Естественный свет после поляризатора



Пусть ось пропускания поляризатора OO' параллельна оси y . Колебания светового вектора можно разложить на две перпендикулярные составляющие E_x и E_y (рисунок 2.6):

$$E_x = E \sin \varphi \quad (2.5)$$

$$E_y = E_{OO'} = E \cos \varphi \quad (2.6)$$

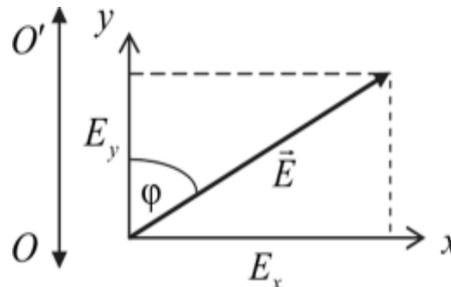


Рисунок 2.6 – Разложение колебаний светового вектора

Через поляризатор пройдет составляющая вектора напряженности электрического поля E_y , параллельная оси пропускания поляризатора.

Таким образом, естественный свет после прохождения через поляризатор станет **поляризованным**.

Поставим за поляризатором анализатор A и с его помощью будем анализировать интенсивность прошедшего света. Пусть ось пропускания анализатора повернута относительно оси пропускания поляризатора на угол φ (рисунок 2.7). Тогда через анализатор пройдет только составляющая вектора напряженности, параллельная оси OO' .

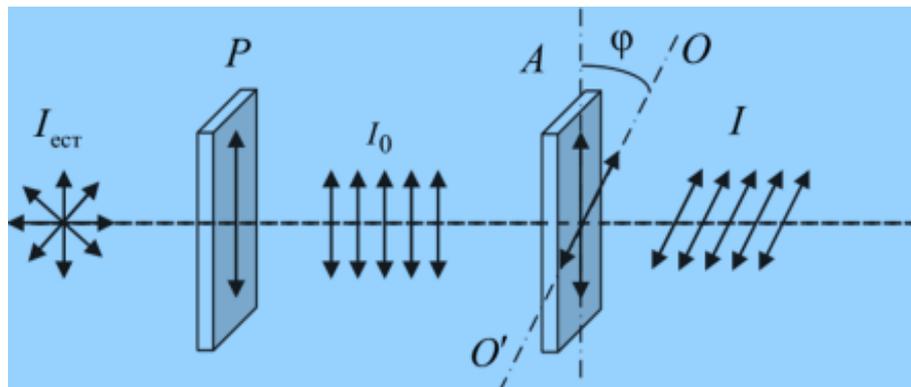


Рисунок 2.7 – Использование анализатора

Интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды. Обозначим интенсивность света после поляризатора (P) I_0 , интенсивность света после анализатора (A) I . Тогда

$$I_0 \sim E^2, I \sim E_y^2 \quad (2.7)$$

С помощью уравнений (2.5-2.6) можно найти соотношение, связывающее интенсивности падающего на анализатор поляризованного света I_0 с интенсивностью прошедшего света I :

$$I = I_0 \cos^2 \varphi \tag{2.8}$$

где I — интенсивность плоскополяризованного света, прошедшего через анализатор;
 I_0 — интенсивность плоскополяризованного света, падающего на анализатор;
 φ — угол между направлением колебаний светового вектора волны, падающей на анализатор, и плоскостью пропускания анализатора.

Уравнение (2.9) называется **законом Малюса**. Если оптические оси поляризатора и анализатора параллельны, то анализатор пропустит весь свет полностью, если же анализатор повернуть на 90° относительно поляризатора, то через него световая волна не пройдет.

$$I = k_a \cdot I_0 \cdot \cos^2 \varphi \tag{2.9}$$

где I_0 - интенсивность падающего на поляризатор света;
 I - интенсивность света, выходящего из поляризатора;
 k_a - коэффициент пропускания поляризатора.

Закон Малюса — физический закон, выражающий зависимость интенсивности линейно-поляризованного света после его прохождения через поляризатор от угла φ между плоскостями поляризации падающего света и поляризатора.

Интенсивность поляризованного света, прошедшего через поляризатор I_0 , связана с интенсивностью падающего естественного света $I_{\text{ест}}$ соотношением:

$$I_0 = \frac{1}{2} I_{\text{ест}} \tag{2.10}$$

В естественном свете векторы напряженности направлены во все стороны, поэтому среднее значение $\langle \cos^2 \varphi \rangle = 1/2$. Интенсивность света, прошедшего через поляризатор, составляет половину интенсивности естественного света.

Таким образом, интенсивность света, полученного на выходе из анализатора I , связана с интенсивностью падающего естественного света $I_{\text{ест}}$ соотношением:

$$I = \frac{1}{2} I_{\text{ест}} \cos^2 \varphi \tag{2.11}$$

Фототок пропорционален интенсивности попадающего света:

$$I_\phi \sim I_0$$

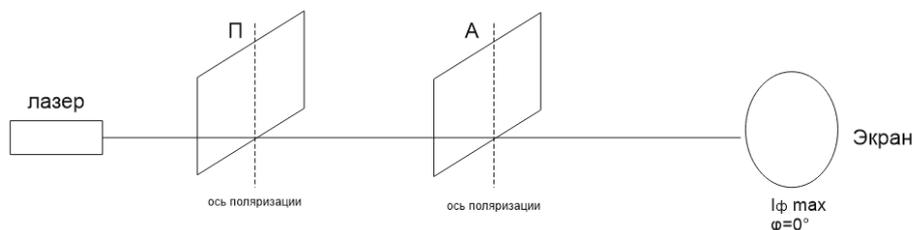


Рисунок 2.8 – Положение П и А при максимальном фототоке

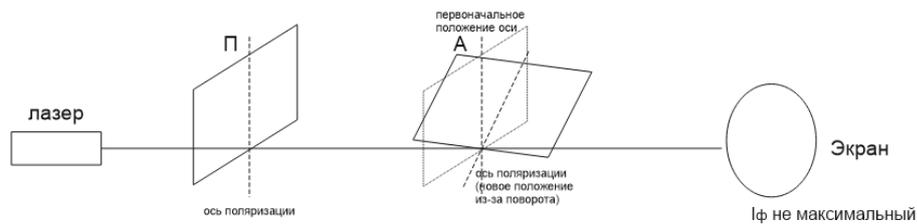


Рисунок 2.9 – Положение П и А, когда фототок не максимальный

Плоскости поляризатора П и анализатора А все время параллельны друг другу. Поворот анализатора А нужно делать вокруг горизонтальной прямой, а сам анализатор А должен оставаться перпендикулярным горизонтальной прямой. Поляризатор П все время этой прямой перпендикулярен.



Практическая часть

Порядок подготовки к работе:

- Убедитесь в том, что экспериментальная установка подключена к блоку управления и измерения.
- Аккуратно извлеките стекло из кронштейна.
- Наденьте подвижный поляризатор на неподвижный (рисунок 2).
- Подключите блок управления и измерения к однофазной сети переменного тока 220 В.



ВНИМАНИЕ! В данной лабораторной работе подвижная часть оптической скамьи и стеклянная пластина не используются.

Изучение закона Малюса

1. Включите питание стенда тумблером на задней панели блока управления и измерения.
2. На передней панели блока управления включите тумблером «SA1» лазерный излучатель.
3. Нанесите метку на подвижный поляризатор (для возможности фиксации угла поворота).
4. Поворачивая подвижный поляризатор, зафиксируйте по цифровому индикатору максимальный и минимальный фототок и углы поворота, соответствующие этим значениям.
5. Занесите результаты измерений в таблицу 2.1.
6. Рассчитайте значения фототока по формуле 2.11. Сравните с экспериментальными значениями.
7. По результатам эксперимента сделайте выводы.

Обработка результатов эксперимента

Таблица 2.1 - Результаты эксперимента

№	Угол, град	Фототок, мА

Порядок завершения работы:

- Выключите тумблер «SA1» на передней панели блока управления и измерения.
- Отключите питание установки с помощью тумблера, установленного на задней панели блока управления и измерения.



Контрольные вопросы

1. Для чего используется поляризатор?
2. Для чего используется анализатор?
3. Сформулируйте закон Малюса.