

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9а

### ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА. ЗАКОН МАЛЮСА. УГОЛ БРЮСТЕРА

Цель работы:

- 1) определить степень поляризации излучения лазера
- 2) проверить справедливость закона Малюса
- 3) определить угол Брюстера для стеклянной пластины и с его помощью вычислить показатель преломления стекла

#### Естественный и поляризованный свет

Свет- это *поперечная электромагнитная волна*, в которой колебания вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  перпендикулярны направлению распространения волны (рис.1). При рассмотрении взаимодействия света с веществом, основную роль играет вектор напряженности электрического поля  $\vec{E}$ , поэтому его называют *световым вектором*.

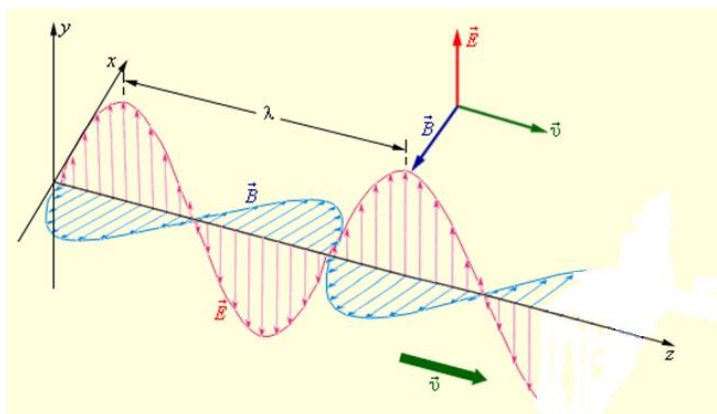


Рис.1

Волна, в которой колебания светового вектора упорядочены, называется *поляризованной*. Упорядочить колебания можно только в поперечных волнах.

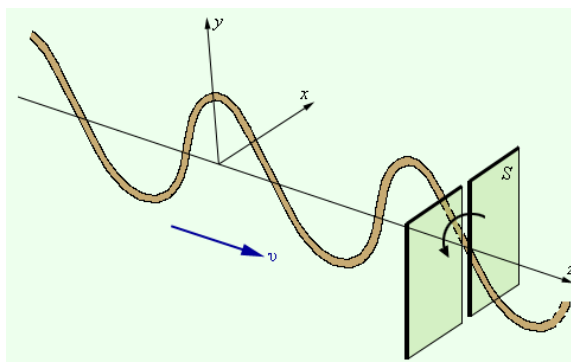


Рис.2

Это легко увидеть на примере поперечной волны, распространяющейся вдоль оси  $z$  (рис.2) . Если на пути волны, например, в тонком шнуре, поставить пластину с прорезью, то через прорезь будут проходить только те колебания, которые параллельны ей (в направлении  $y$  на рис.2). Если повернуть пластинку, так, что прорезь будет находиться параллельно оси  $x$ , то через нее колебания проходить не будут. В продольной волне колебания происходят вдоль оси  $z$ , и выделение какого либо направления пропускания невозможно.

Естественный свет (солнечный свет, свет ламп накаливания) **неполяризован** (рис.3.а), свет с преимущественными направлениями колебания вектора  $\vec{E}$  - частично поляризован (рис.3.б), в линейно поляризованном свете колебания вектора  $\vec{E}$  совершаются вдоль одной линии (рис.3.в).

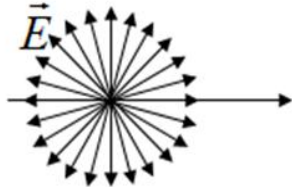


Рис.3а

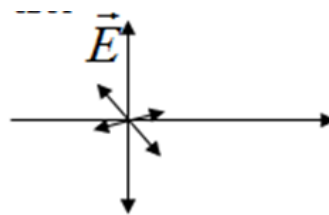


Рис.3б

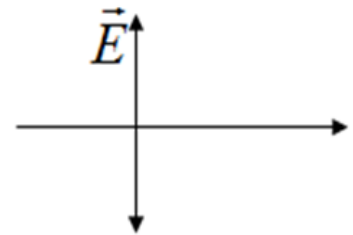


Рис.3в

Существует также эллиптическая поляризация, когда конец светового вектора описывает эллипс, и как ее частный случай – круговая поляризация, конец светового вектора описывает окружность.

Превратить естественный свет в поляризованный можно с помощью устройства, которое называют **поляризатором**. Для получения линейно поляризованного света используют поляризаторы, основанные на использовании одного из трех физических явлений: двойного лучепреломления (поляризация при преломлении), дихроизма или поляризации при отражении от поверхности раздела двух сред.

Явление двойного лучепреломления наблюдается в кристаллах исландского шпата ( $\text{CaCO}_3$ ), когда падающий луч раздваивается на два луча (рис.4).

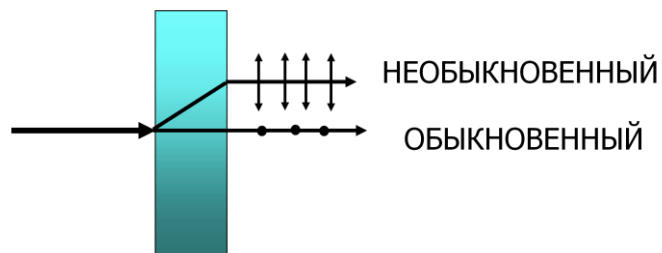


Рис.4

**Обыкновенный луч** подчиняется закону преломления, в нем колебания светового вектора происходят перпендикулярно плоскости, проходящей через падающий и преломленный лучи. В **необыкновенном луче** не выполняется закон преломления, и колебания светового вектора лежат в плоскости, проходящей через падающий и преломленный лучи. Двойное лучепреломление связано с анизотропностью показателя преломления. Для обыкновенного луча (*o*) скорость распространения световой волны изотропна (одинакова для всех направлений)

$$V_o = \text{const}.$$

Для необыкновенного луча (*e*) скорость распространения световой волны анизотропна (неодинакова для всех направлений)

$$V_e \neq \text{const}.$$

Показатели преломления соответственно

$$n_o = \frac{c}{V_o} = \text{const} \quad \text{и} \quad n_e = \frac{c}{V_e} \neq \text{const},$$

где *c* - скорость света в вакууме.

У некоторых кристаллов поглощение света сильно зависит от направления распространения волны. Это явление называется **дихроизмом**. Одним из таких кристаллов является турмалин (исландский шпат), который при определенной толщине полностью поглощает одну из взаимно перпендикулярных поляризованных волн, и частично пропускает вторую. Пластина турмалина может быть использована для получения поляризованного света.

Излучение лазера, которое исследуется в лабораторной работе – частично поляризованное. Степень поляризации излучения *P*

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (1)$$

где  $I_{\max}$  - максимальная интенсивность света,  $I_{\min}$  - минимальная интенсивность света.

### Закон Малюса

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

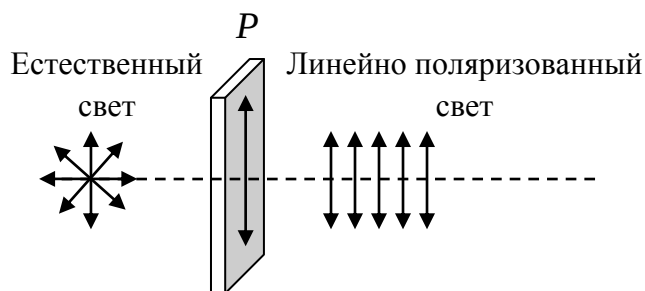


Рис.5

Пусть ось пропускания поляризатора  $OO'$  параллельна оси  $y$ . Колебания светового вектора можно разложить на две перпендикулярные составляющие  $E_x$  и  $E_y$  (рис.6)

$$E_x = E \sin \varphi \quad \text{и} \quad E_y = E_{oo'} = E \cos \varphi. \quad (2)$$

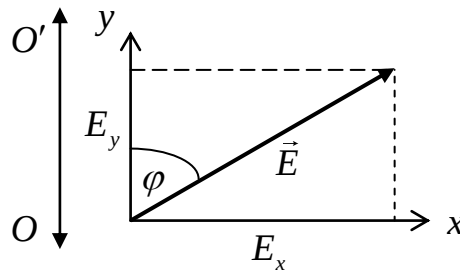


Рис.6

Через поляризатор пройдет составляющая вектора напряженности электрического поля, параллельная оси пропускания поляризатора  $-E_y$ . Таким образом естественный свет после прохождения через поляризатор станет поляризованным.

Поставим за поляризатором еще один поляризатор (анализатор  $A$ ), и с его помощью будем анализировать интенсивность прошедшего света. Пусть ось пропускания анализатора повернута относительно оси пропускания поляризатора на угол  $\varphi$  (рис.7). Тогда через поляризатор пройдет только составляющая вектора напряженности, параллельная оси  $OO'$ .

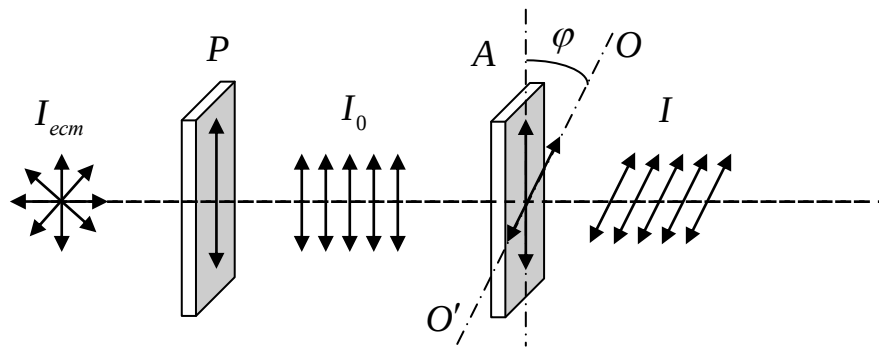


Рис.7

Интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды. Обозначим интенсивность поляризованного света (после первого поляризатора)  $I_0$

$$I_0 \sim E^2,$$

интенсивность света после анализатора  $I$

$$I \sim E_y^2.$$

С помощью уравнения (2) можно найти соотношение, связывающее интенсивности падающего на поляризатор поляризованного света  $I_0$  с интенсивностью прошедшего света  $I$

$$I = I_0 \cos^2 \varphi, \quad (3)$$

где  $\varphi$  - угол между направлениями пропускания поляризатора и направлением колебаний светового вектора падающего поляризованного света.

Уравнение (3) называется **законом Малюса**.

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

$$I_0 = \frac{1}{2} I_{ест}, \quad (4)$$

В естественном свете вектора напряженности направлены во все стороны, поэтому среднее значение  $\langle \cos^2 \varphi \rangle = \frac{1}{2}$ .

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

$$I = \frac{1}{2} I_{ест} \cos^2 \varphi.$$

### **Закон Брюстера**

Поляризованный свет можно получить при отражении от границы раздела двух сред с различными показателями преломления. Рассмотрим естественный свет, падающий под углом  $\varphi$  на границу раздела двух сред с различными показателями преломления (рис.8а ). На границе раздела часть луча отразится от поверхности под тем же углом  $\varphi$ , а другая часть луча преломится под углом  $\psi$ . Угол преломления и угол падения связаны между собой законом

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \psi} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (5)$$

Найдем количественные соотношения между интенсивностями отраженного, преломленного и падающего света.

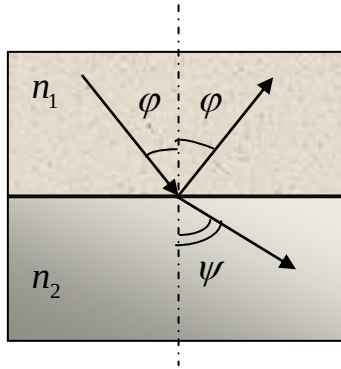


Рис.8а

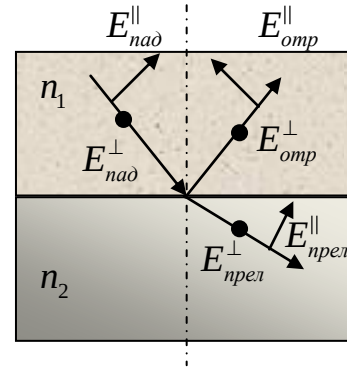


Рис.8б

Введем обозначения:

$E_{nad}^{\parallel}$  - колебания вектора напряженности падающего луча параллельные плоскости рисунка,

$E_{nad}^{\perp}$  - колебания вектора напряженности падающего луча перпендикулярные плоскости рисунка,

$E_{nrel}^{\parallel}$  - колебания вектора напряженности преломленного луча параллельные плоскости рисунка,

$E_{nrel}^{\perp}$  - колебания вектора напряженности преломленного луча перпендикулярные плоскости рисунка,

$E_{omp}^{\parallel}$  - колебания вектора напряженности отраженного луча параллельные плоскости рисунка,

$E_{omp}^{\perp}$  - колебания вектора напряженности отраженного луча перпендикулярные плоскости рисунка.

Количественные соотношения между интенсивностями падающего, отраженного и прошедшего света можно получить из граничных условий для напряженностей электрического и магнитного полей на границе раздела двух диэлектриков. Эти соотношения были получены Френелем и носят название **формул Френеля**

$$E_{omp}^{\parallel} = E_{nad}^{\parallel} \frac{\operatorname{tg}(\varphi - \psi)}{\operatorname{tg}(\varphi + \psi)}, \quad E_{nrel}^{\parallel} = E_{nad}^{\parallel} \frac{2 \cos \varphi \sin \psi}{\sin(\varphi + \psi) \cos(\varphi - \psi)}, \quad (6)$$

$$E_{omp}^{\perp} = -E_{nad}^{\perp} \frac{\sin(\varphi - \psi)}{\sin(\varphi + \psi)}, \quad E_{nrel}^{\perp} = E_{nad}^{\perp} \frac{2 \cos \varphi \sin \psi}{\sin(\varphi + \psi)}. \quad (7)$$

Коэффициент отражения

$$R = \frac{I_{omp}}{I_{nad}}.$$

Учитывая, что интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды, выразим коэффициенты отражения для продольной и поперечной составляющих

$$R^{\parallel} = \left( \frac{E_{omp}^{\parallel}}{E_{nad}^{\parallel}} \right)^2 = \frac{tg^2(\varphi - \psi)}{tg^2(\varphi + \psi)}, \quad (8)$$

$$R^{\perp} = \left( \frac{E_{omp}^{\perp}}{E_{nad}^{\perp}} \right)^2 = \frac{\sin^2(\varphi - \psi)}{\sin^2(\varphi + \psi)}. \quad (9)$$

Из уравнения (8) следует, что если

$$\varphi + \psi = \frac{\pi}{2}, \quad (10)$$

то  $tg(\varphi + \psi) = \infty$  и  $R^{\parallel} = 0$ .

Нулевой коэффициент отражения ( $R^{\parallel} = 0$ ) для параллельной составляющей означает, что в отраженном свете присутствует только составляющая перпендикулярная плоскости падения, то есть **отраженный луч полностью поляризован**. Угол падения, при котором выполняется условие (10) легко вычислить из закона преломления

$$\frac{\sin \varphi}{\sin(90^\circ - \varphi)} = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = tg \varphi = \frac{n_2}{n_1}. \quad (11)$$

Угол падения, удовлетворяющий условию (11) называют **углом Брюстера**

$$tg \theta_{BP} = \frac{n_2}{n_1}.$$

*Если свет падает на границу раздела двух сред под углом Брюстера, то отраженный луч полностью поляризован в перпендикулярном направлении, преломленный луч частично поляризован с преобладанием колебаний, параллельных плоскости, а угол между преломленным и отраженным лучом составляет  $90^\circ$ .*

#### Указание по технике безопасности:

- 1) при выполнении лабораторной работы не прикладывать усилий при закреплении элементов в стойках и закручивании закрепляющих винтов,
- 2) установки содержат лазер и большое количество отражающих поверхностей, поэтому при проведении измерений следить, чтобы прямые и отраженные лучи не попадали в глаза

## Задание 1.

### Определение степени поляризации излучения полупроводникового лазера

1. Соберите схему установки рис.9.

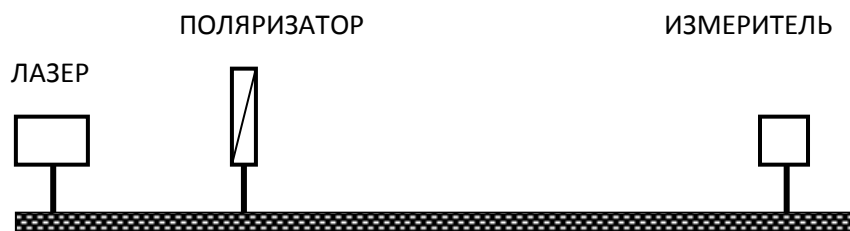


Рис.9

2. Ослабить винт в верхней части поляризатора. Вращая рычажок поляризатора, наблюдать за показаниями измерителя.
3. Найти минимальное  $I_{\min}$  и максимальное  $I_{\max}$  значение показаний измерителя. Занести показания в таблицу.
4. Повторить опыт несколько раз, поворачивая лазер вокруг оси проходящей через его луч.
5. Вычислить степень поляризации лазерного излучения по формуле (1)

| № | $I_{\max}$ | $I_{\min}$ | $P$ | $\sigma_P$ | $\bar{P}$ | $\bar{\sigma}_P$ | $\bar{P} \pm \bar{\sigma}_P$ |
|---|------------|------------|-----|------------|-----------|------------------|------------------------------|
| 1 |            |            |     |            |           |                  |                              |
| 2 |            |            |     |            |           |                  |                              |
| 3 |            |            |     |            |           |                  |                              |
| 4 |            |            |     |            |           |                  |                              |
| 5 |            |            |     |            |           |                  |                              |

6. Оцените погрешность измерения степени поляризации  $\sigma_P$  (формулу вывести самостоятельно как для погрешности косвенных измерений). Занести результаты вычислений в таблицу.
7. Сделать вывод о степени поляризации лазерного излучения.



## Задание 2.

### Проверка закона Малюса

1. Соберите схему установки рис.10.



Рис.10

2. Вращая рычажок поляризатора 1, добиваемся максимальных показаний измерителя. Закрепляем винтом (сверху) положение поляризатора 1.
3. Добавляем в установку поляризатор 2

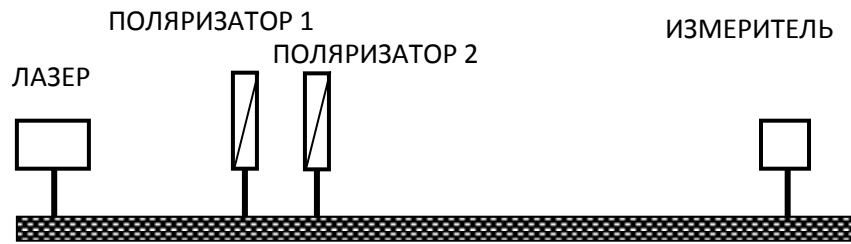


Рис. 11

Добиваемся максимальных значений показаний измерителя. В этом положении поляризатора 2 оси обоих поляризаторов параллельны.

3. Вращая рычажок поляризатора 2, снять зависимость показаний измерителя от угла разориентации осей поляризаторов  $\varphi$ , занести результаты измерений в таблицу

| №  | $\varphi, ^\circ$ | $I$ | $\cos \varphi$ | $\cos^2 \varphi$ | $\frac{I}{I_0}$ |
|----|-------------------|-----|----------------|------------------|-----------------|
| 1  | 0                 |     |                |                  | 1               |
| 2  | 10                |     |                |                  |                 |
| 3  | 20                |     |                |                  |                 |
| 4  | 30                |     |                |                  |                 |
| 5  | 40                |     |                |                  |                 |
| 6  | 50                |     |                |                  |                 |
| 7  | 60                |     |                |                  |                 |
| 8  | 70                |     |                |                  |                 |
| 9  | 80                |     |                |                  |                 |
| 10 | 90                |     |                |                  |                 |

Необходимо отметить, что, когда оси поляризаторов параллельны, то показания измерителя максимальны, и равны  $I_0$

4. Построить график экспериментальной зависимости. В каких осях строить график решите самостоятельно.

### Задание 3.

#### Определение угла Брюстера.

1. Соберите схему установки



Рис.12

Повернуть лазер в оправке так, чтобы на экране его пятно было вытянуто в вертикальном направлении.

2. Соберите схему установки

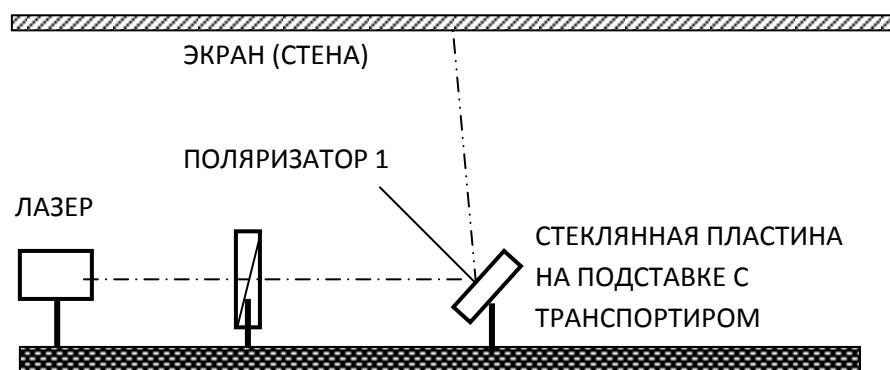


Рис. 13

Поляризатор установить так, чтобы выемка (риска) на вращающейся части совпала с выемкой (риской) на неподвижной части внизу. При этом плоскость колебаний вектора  $\vec{E}$  лазерного луча будет приблизительно горизонтальной. Направляем луч лазера на стекло и следим за отраженным пятном на стене (экране), вращая подставку со стеклом вокруг вертикальной оси. Найти положение подставки, при котором яркость отраженного сигнала будет минимальной. Аккуратно поворачивая ось поляризатора и подставку, добиваемся полного исчезновения светового пятна. В этом случае угол падения лазерного луча на стекло и будет углом Брюстера  $\theta_{БР}$ .

3. Результаты измерений занести в таблицу.

| № | $\theta_{BP}$ | $n = tg\theta_{BP}$ | $\bar{n}$ | $\sigma_n$ | $\bar{n} \pm \sigma_n$ |
|---|---------------|---------------------|-----------|------------|------------------------|
| 1 |               |                     |           |            |                        |
| 2 |               |                     |           |            |                        |
| 3 |               |                     |           |            |                        |

4. Вычислить среднее значение показателя преломления стекла  $\bar{n}$  и погрешность определения показателя преломления  $\sigma_n$ .

5. Сравнить полученные значения показателя преломления стекла с табличным. Сделать вывод.