

ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС. ОПИСАНИЕ.

Данный физический практикум по волновой оптике реализован на базе комплекта оборудования, разработанного на кафедре общей физики МФТИ совместно с НПФ «Эккус». Модульный принцип, лежащий в основе лабораторного комплекса, позволяет выполнять на этом оборудовании разнообразные лабораторные работы по оптике. Использование когерентного лазерного света в качестве источника делает эксперименты весьма наглядными, явно демонстрирующими сущность физического явления.

В качестве источника излучения применяется полупроводниковый лазер мощностью 6 мВт. Длина волны излучения составляет 650 нм, что соответствует красному свету. Излучатель лазера, имеющий небольшие размеры 15x15x25 мм, подключается через адаптер к сети 220 В.

Кроме полупроводникового лазера комплекс включает в себя: оптическую скамью (направляющую) длиной 93 см, держатели – *стойки*, экран со стойкой для наблюдения, плоские дифракционные голографические решетки, имеющие 50, 100 и 350 штрихов на миллиметр, бипризму Френеля, столик вращающийся, поляроиды в оправе, толстую стеклянную пластину, щели для наблюдения дифракции Френеля и Фраунгофера, линейку для измерений, магниты для крепления бумаги на экране, сетку с мелкими и средними ячейками в оправе для наблюдения дифракции, фотоприемное устройство с датчиком, экран со стойкой и оправой для короткофокусной линзы, набор короткофокусных линз,



заклученных в оправу, параметры которых приведены в таблице.

Дополнительно в состав комплекса включена *мира* –

№	Диаметр линзы, мм	Диаметр оправы, мм	Длина оправы, мм	Тип линзы
1	17	24	57	двояковыпуклая
2	25	30	33	двояковыпуклая
3	27	35	38	плосковыпуклая

заклученная в оправу прозрачная пленка с нанесенной на нее миллиметровой шкалой.

В процессе выполнения лабораторной работы принадлежности и оборудование монтируются на оптической скамье. Наблюдение ведется на экране. Элементы оптического изображения переносятся карандашом на бумагу, закрепленную на экране магнитами. В качестве альтернативного способа регистрации оптического изображения предлагается фотографировать экран, используя для этих целей разнообразные держатели. Обработка полученных изображений со снятием количественных характеристик возможна в любом графическом редакторе. Кроме того такой способ позволяет надежно документировать результаты измерений.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТ

Внимание! Лазерное излучение мощностью 6 мВт опасно для сетчатки глаза! Категорически запрещается направлять лазерный луч в глаз! Излучение, отражённое от гладких поверхностей (зеркальных, полированных и пр.), не должно попадать в глаз! Перемещение оптической скамьи, монтаж/демонтаж приспособлений на нее должны осуществляться при выключенном лазере.

Внимание! В процессе выполнения работы категорически запрещается касаться руками или посторонними предметами оптических поверхностей элементов системы: линз, призм, пластин, стекол, поляроидов и пр.

Оптические детали можно держать только за неоптические шлифованные поверхности и ребра. Перед работой оптические детали должны быть заключены в оправы и кассеты. При загрязнении наружных поверхностей оптических систем следует протереть их мягкой чистой тряпочкой.

Используя оптический прибор, необходимо оберегать его от толчков, ударов, падений. Запрещается прилагать значительные усилия при работе с оптическими деталями.

При обнаружении каких-либо неисправностей необходимо обратиться к преподавателю.

Лабораторная работа № ОК-5

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. ЗАКОН МАЛЮСА. УГОЛ БРЮСТЕРА.

Цель работы: Определить степень поляризации излучения лазера; проверить справедливость закона Малюса; 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{H} 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*.

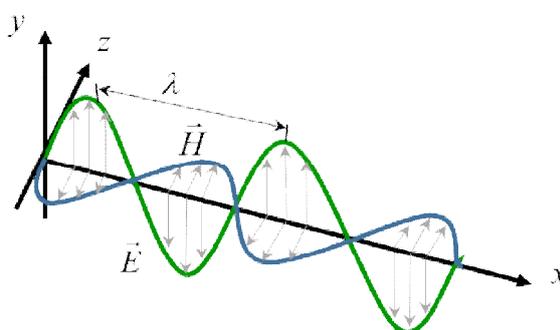


Рис.1

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

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.

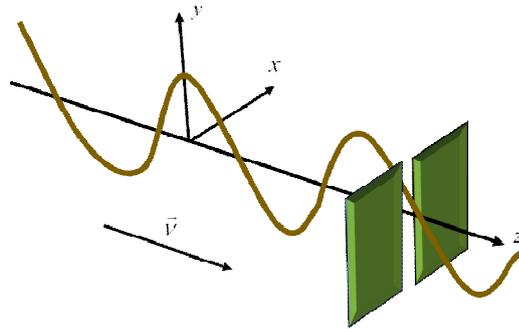


Рис.2

Естественный свет (солнечный свет, свет ламп накаливания) *неполяризован*, то есть вектор напряженности электрического поля \vec{E} не имеет приоритетного направления (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).

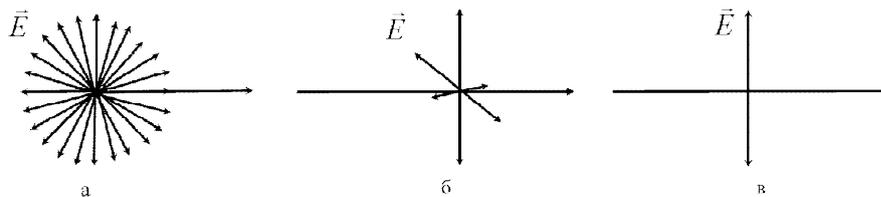


Рис. 3.

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 ($CaCO_3$), когда падающий луч раздваивается на два луча (рис.4).

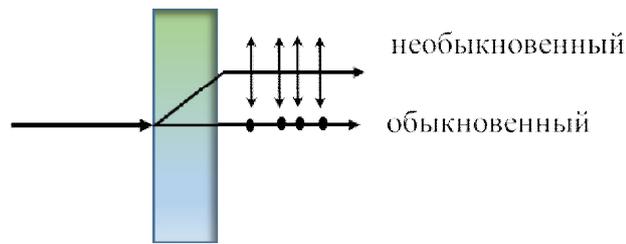


Рис. 4

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):

$$V_o = const$$

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

$$V_e \neq const$$

Показатели преломления соответственно:

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

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. Пластинка 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.

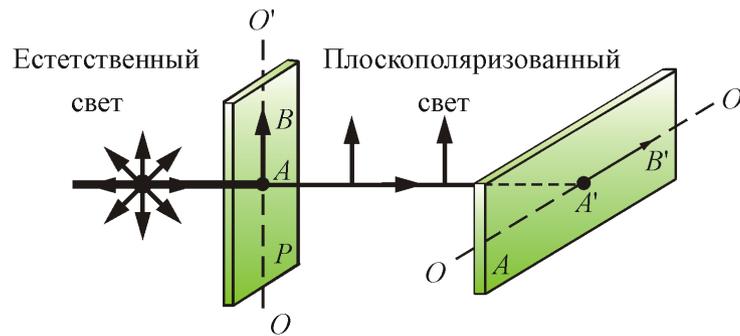


Рис.5

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

$$E_x = \sin \varphi, \quad E_y = E_{OO'} = E \cos \varphi \quad (2)$$

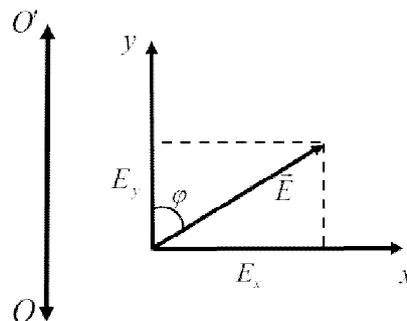


Рис.6

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 φ (рис.7). Тогда через поляризатор пройдет только составляющая вектора напряженности, параллельная оси OO' .

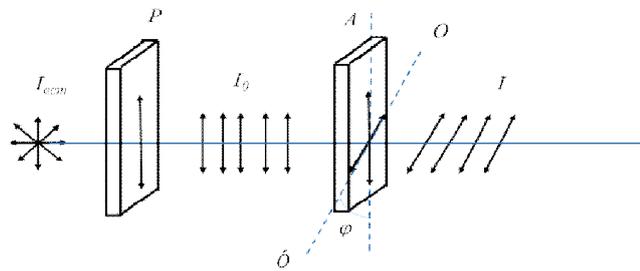


Рис. 7

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 φ – 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_{ecn} соотношением

$$I = I_0^2 / 2 \quad (4)$$

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

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

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

Закон Брюстера

Поляризованный свет можно получить при отражении от границы раздела двух сред с различными показателями преломления. Рассмотрим естественный свет, падающий под углом φ на границу раздела двух сред с различными показателями преломления (рис.8а). На границе раздела часть луча отразится от поверхности под тем же углом φ , а другая часть луча преломится под углом ψ . 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.

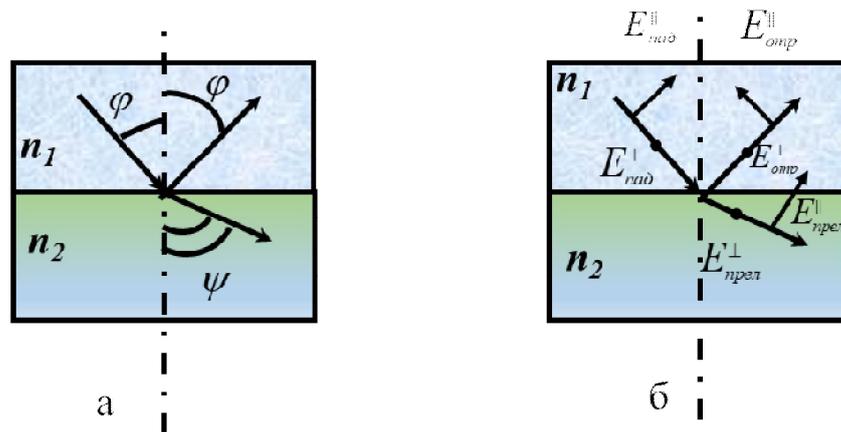


Рис. 8

Введем обозначения: $E_{пад}^{\parallel}$ – колебания вектора напряженности падающего луча параллельные плоскости рисунка; $E_{пад}^{\perp}$ – колебания вектора напряженности падающего луча перпендикулярные плоскости рисунка; $E_{прел}^{\parallel}$ – колебания вектора напряженности преломленного луча параллельные плоскости рисунка; $E_{прел}^{\perp}$ – колебания вектора напряженности преломленного луча перпендикулярные плоскости рисунка; $E_{отр}^{\parallel}$ – колебания вектора напряженности отраженного луча параллельные плоскости рисунка; $E_{отр}^{\perp}$ – колебания вектора напряженности отраженного луча перпендикулярные плоскости рисунка.

Количественные соотношения между интенсивностями падающего, отра-

женного 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**

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

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

Коэффициент отражения

$$R = I_{omp} / I_{nad}.$$

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**:

$$tg \theta_{Бр} = n_2 / n_1.$$

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 90^0 .

Задание 1. Определение степени поляризации излучения полупроводникового лазера

Внимание, перед выполнением лабораторной работы следует ознакомиться с разделом «Техника безопасности и требования к выполнению работ» и получить разрешение преподавателя на выполнение работы.

1. Соберите схему установки согласно рис.9.

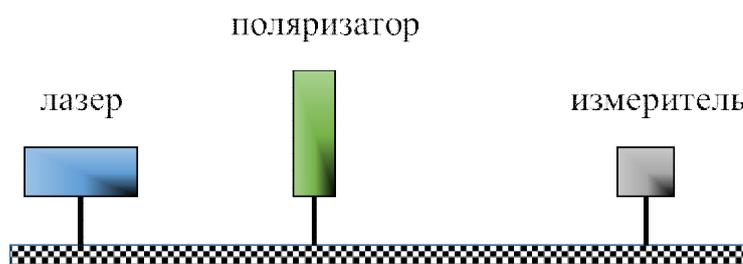


Рис.9

2. Ослабьте винт в верхней части поляризатора. Вращая рычажок поляризатора, наблюдайте за показаниями измерителя. Найдите минимальное I_{\min} и максимальное I_{\max} значение показаний измерителя. Занесите показания в таблицу 1.
3. Повторите опыт несколько раз, поворачивая лазер вокруг оси проходящей через его луч.
4. Вычислите степень поляризации лазерного излучения по формуле (1).
5. Оцените погрешность измерений степени поляризации σ_p (формулу вывести самостоятельно, как для погрешности косвенных измерений).
6. Сделайте вывод о степени поляризации лазерного излучения.

Таблица 1

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

Задание 2. Проверка закона Малюса

1. Соберите установку согласно рис.10.

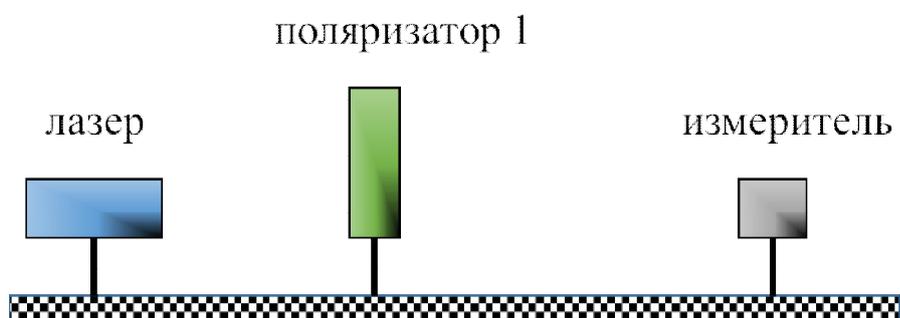


Рис. 10

2. Вращая рычажок поляризатора 1, добейтесь максимальных показаний измерителя. Закрепите винтом (сверху) положение поляризатора 1.
3. Добавьте в установку поляризатор 2, рис. 11. Добейтесь максимальных значений показаний измерителя. В этом случае оси поляризаторов параллельны.

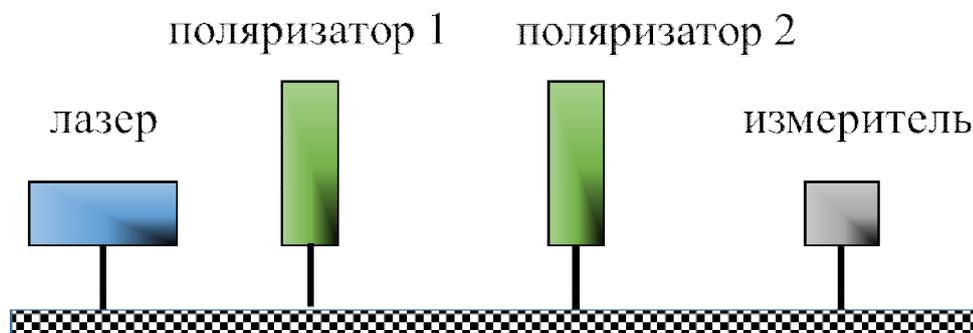


Рис. 11

4. Вращая рычажок поляризатора 2, снимите зависимость показаний измери-

теля от угла разориентации осей поляризации φ . Результаты измерений занесите в таблицу 2.

Таблица 2

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

Отметим, что, когда оси поляризаторов параллельны, то показания измерителя максимальны, и равны I_0 .

5. Постройте график экспериментальной зависимости. В каких осях строить график, решите самостоятельно.

Задание 3. Определение угла Брюстера

1. Соберите установку согласно рис. 12.

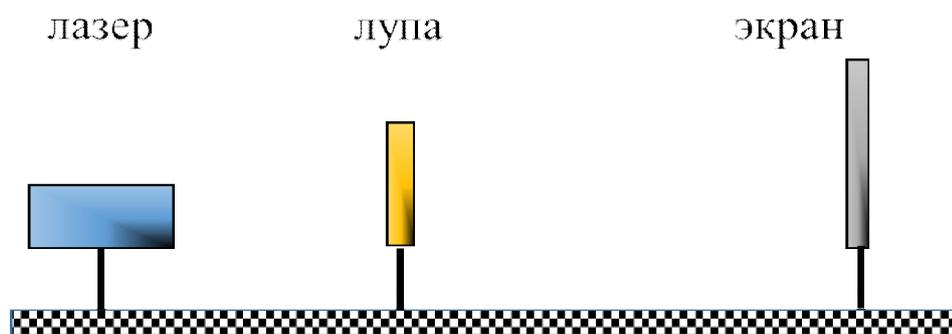


Рис.12

Поворачивайте лазер в оправке до тех пор, пока световое пятно на экране не будет вытянуто в вертикальном направлении.

2. Не изменяя положение лазера, соберите установку согласно рис. 13.

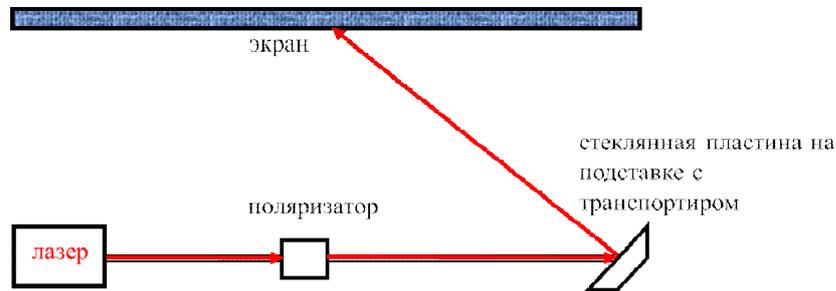


Рис. 13

Поляризатор установите 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. Направьте луч лазера на стеклянную пластину.

3. Вращая подставку со стеклянной пластиной вокруг вертикальной оси, следите за отраженным пятном на стене (экране). Найдите положение подставки, при котором яркость отраженного луча будет минимальной. Аккуратно поворачивая ось поляризатора и подставку, добейтесь полного исчезновения светового пятна. В этом случае угол падения лазерного луча на стеклянную пластину и будет углом Брюстера θ_{Br} . Измерьте его.
4. Прделаете измерения угла Брюстера три раза. Результаты измерений занесите в таблицу 3.

Таблица 3.

№	θ_{Br}	$n = tg \theta_{Br}$	\bar{n}	σ_n	$\bar{n} \pm \sigma_n$
1					
2					
3					

5. Вычислить среднее значение показателя преломления \bar{n} и погрешность определения показателя преломления σ_n .
6. Сравните полученные значения показателя преломления стекла с табличным значение. Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Что такое поляризация света?
2. Какие виды поляризации вы знаете?
3. Как практически можно отличить естественный свет от поляризованного?
4. Что такое степень поляризации? Запишите формул степени поляризации.
5. Что такое поляризатор, анализатор? Как действует призма Николя?
6. Сформулируйте закон Малюса?
7. В чем состоит явление двойного лучепреломления?
8. Сформулируйте закон Брюстера.
9. Докажите, что отраженный и преломленный лучи при соблюдении условия Брюстера будут взаимно перпендикулярны.
10. Почему при любом положении анализатора частично поляризованный свет проходит через него?

Литература

5. Вводное занятие, часть 2, «Обработка результатов измерений». - Механика и термодинамика: Лабораторный практикум по физике. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015 – 79с.
6. Сарина М.П. Колебания, волны, оптика: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 2. Оптика. – 116с.
7. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5-и тт. Том 4. Волны. Оптика [Электронный ресурс]: учебное пособие / И.В. Савельев. – Электрон. дан. – Санкт-Петербург: Лань, 2011. – 256с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/707>.
8. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 4. Оптика [Электронный ресурс]: учебное пособие / Д.В. Сивухин. – Электрон. дан. – Москва : Физматлит, 2002. – 792с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/2314>.