

**Федеральное агентство связи
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
СибГУТИ**

В.В. Лубский
И.В. Грищенко

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ
ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Новосибирск

2018

УДК–535 (076)

В.В. Лубский, И.В. Грищенко. Волновые свойства электромагнитного поля: Лабораторный практикум по физике/СибГУТИ.–Новосибирск, 2018 г.–65 с.

Лабораторный практикум предназначен для ознакомления студентов с основными понятиями волновой оптики и служит руководством к выполнению соответствующих лабораторных работ. Практикум разработан для студентов направлений 11.01.01, 11.03.02, 11.03.03, 11.03.04, 09.03.01, 09.03.02, 02.03.02, 20.03.01, 11.05.01, 11.05.02, 10.03.01, 10.05.02.

Кафедра физики

Рецензент: к.ф-м.н, доцент Машанов В.И.

Утверждено редакционно-издательским советом СибГУТИ в качестве лабораторного практикума.

© Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики, 2016г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Работа 7.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ.....	6
Работа 7.2 ИЗМЕРЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ МЕТОДОМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ КОЛЕЦ НЬЮТОНА.....	20
Работа 7.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ ФРАУНГОФЕРА.....	29
Работа 7.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА ГЛЮКОЗЫ ПОЛЯРИМЕТРОМ.....	38
Работа 7.5 ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА..	47
Работа 7.6 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН, ПРИ ИХ ОТРАЖЕНИИ ОТ ДИЭЛЕКТРИКА.....	56
Приложение 1 Пример оформления титульного листа.....	63
Приложение 2 Длины волн видимого света.....	64

ВВЕДЕНИЕ

1. ЦЕЛЬ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА И ЕГО СТРУКТУРА

Изучить и экспериментально исследовать интерференцию, дифракцию, поляризацию, вращение плоскости поляризации, дисперсию электромагнитных волн в диапазоне $380 \div 760$ нм. Освоить методику измерений на оптических приборах, физические принципы которых занимают сегодня все более важное место в волоконно-оптических системах связи.

Понимание и грамотное выполнение каждого последующего цикла лабораторных работ предполагает выполнение и защиту предыдущего, а также решение задач по данной теме.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПОДГОТОВКЕ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТ

2.1 Прочитать теоретический материал по рекомендованным учебникам

2.2 Составить отчет, содержащий следующие разделы: а) название работы, б) цель работы, в) краткая теория: основные определения и изучаемые законы; использование законов для вывода расчетной формулы, вывод расчетной формулы; г) рисунок или схема установки с расшифровкой названий основных элементов; д) заготовить таблицы для занесения в них измеряемых и расчетных величин с указанием размерности этих величин.

2.3 Получить допуск к работе (знать и уметь объяснить: а) какое явление изучается и как, б) основные элементы установки, в) что измеряется, и что рассчитывается по экспериментальным данным, г) какие зависимости и законы исследуются, и какие графики надо нарисовать в данной работе.

2.4 Прodelать измерения, выключить установку, и рассчитать результаты одного измерения полностью (расчеты привести после таблицы с обязательным переводом всех величин в СИ).

2.5 Обязательно подписать выполненную работу у преподавателя, проводившего занятие. Без подписи преподавателя работа считается невыполненной.

3. ЗАЩИТА ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

3.1 Результаты измерений должны быть полностью просчитаны и занесены в таблицу.

3.2 Должны быть построены графики с указанием физических величин и размерностей. Если требуется сравнение с экспериментальных данных с теоретическими, то соответствующий график теоретической зависимости строится на том же графическом поле. Графики должны быть построены карандашом с использованием чертежных инструментов, размер графика не может быть меньше 12 см x 12 см.

3.3 Должны быть рассчитаны погрешности полученных величин, используя формулы, приведенные в разделе «ЗАДАНИЕ».

3.4 В конце отчета должен быть записан вывод (краткое резюме по экспериментальным результатам, графическим зависимостям и результатам расчетов).

- 3.5 **После вывода** должны быть письменно выполнены ответы на контрольные вопросы.
- 3.6 Должны быть решены задачи, указанные преподавателем..
- 3.7 Непосредственно защита у преподавателя результатов проделанной работы.
- 3.8 **Обязательно подписать зачетную работу у преподавателя,** проводившего занятие. Без подписи преподавателя работа считается незащищенной.

РАБОТА 7.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с основными характеристиками интерференционных схем. Методом бипризмы Френеля определить длину электромагнитной волны видимого диапазона.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Существует ряд явлений, в которых свет ведёт себя как поток частиц [1] (фотонов). Однако такие явления, как интерференция, дифракция, поляризация и дисперсия света, которые изучаются в данном лабораторном практикуме, могут быть объяснены только на основе волновых представлений. Таким образом, свет обнаруживает корпускулярно-волновой дуализм (двойственность): в одних явлениях проявляется его волновая природа, и он ведёт себя как электромагнитная волна, в других явлениях проявляется корпускулярная природа света, и он ведёт себя как поток фотонов.

Плоская монохроматическая (синусоидальная) электромагнитная волна, распространяющаяся в нейтральной непроводящей среде с постоянными проницаемостями ϵ и μ ($\rho=0$, $j=0$, $\epsilon=\text{const}$, $\mu=\text{const}$) описывается функциями (см. рис.1):

$$\begin{aligned} E_y &= E_0 \cos(\omega t - kx + \alpha) \\ H_z &= H_0 \cos(\omega t - kx + \alpha) \end{aligned} \quad (1)$$

Где: E_0 - амплитуда напряжённости электрического поля в волне;

H_0 - амплитуда напряжённости магнитного поля в волне;

ω - циклическая частота;

λ - длина волны;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число;

t - время;

x - координата, совпадающая с направлением распространения волны, расстояние от источника до данной точки;

α - начальная фаза колебаний в точке с координатой $x=0$.

Колебания векторов напряжённости электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей в электромагнитной волне происходят в одной фазе, а их амплитуды однозначно связаны между собой формулой: $\sqrt{\epsilon_0} E_0 = \sqrt{\mu_0} H_0$. Поэтому принято описывать такую волну лишь с помощью вектора \vec{E} , который иногда называется световым вектором.

При прохождении двух или нескольких электромагнитных волн через среду может сложиться ситуация, когда колебания напряжённостей электрического и магнитного полей разных волн в одних точках пространства будут усиливать друг друга, а в других ослаблять. Это явление называется

интерференцией. В случае электромагнитных волн видимого диапазона вследствие интерференции происходит перераспределение светового потока в интерференционном поле, приводящее к появлению в одних местах максимумов интенсивности излучения, а в других – минимумов.

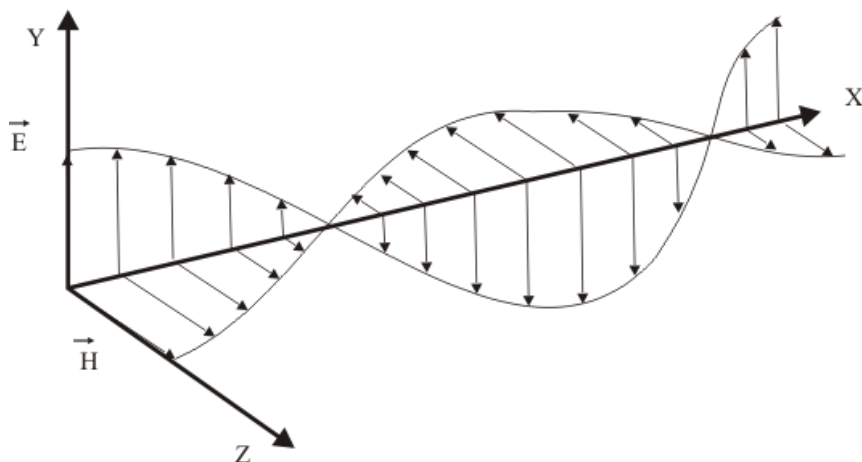


Рис.1
Строение плоской электромагнитной волны.

Необходимым условием наблюдения интерференции является когерентность волн, что означает согласованное протекание во времени и пространстве нескольких колебательных или волновых процессов. При этом разность фаз колебаний в данной области пространства во все время наблюдения остается постоянной. Этому условию удовлетворяют монохроматические (синусоидальные) волны одинаковой частоты и одинакового направления колебаний вектора \vec{E} (одинаковой поляризации).

Найдем результат суперпозиции двух монохроматических волн с одинаковой частотой колебаний и одинаковой поляризацией.

Первый луч распространяется в среде с показателем преломления n_1 от источника S_1 , вторая волна распространяется в среде с показателем преломления n_2 от источника S_2 . Первый луч проходит из S_1 до точки М расстояние $|S_1M| = x_1$, второй луч из S_2 до точки М расстояние $|S_2M| = x_2$.

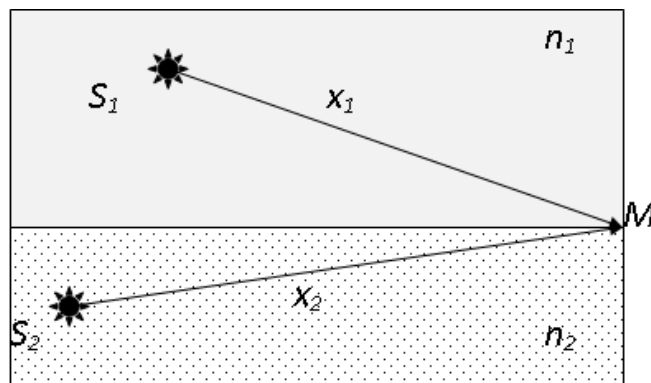


Рис.2
Схема интерференции двух волн.

В точке М, согласно принципу суперпозиции, напряжённость суммы двух волн равна геометрической сумме их напряжённостей: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. Однако приборы, как и наши глаза, регистрируют не напряжённость \vec{E} , а усреднённую по времени плотность потока энергии электромагнитной волны, называемой интенсивностью света I в данной точке пространства. Интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды колебаний $I = \frac{n}{2} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \cdot E_0^2$, где E_0 - амплитуда колебания напряжённости электрического поля \vec{E} суммарной электромагнитной волны (см. формулу (1)).

Найдём I с помощью метода векторных диаграмм (рис. 3). Суть этого метода в следующем. Пусть (см. формулу (1)):

$$\begin{aligned}\vec{E}_1 &= \vec{E}_{10} \cos(\omega_1 t - k_1 x_1 + \alpha_1) = \vec{E}_{10} \cos(\omega_1 t + \delta_1) \\ \vec{E}_2 &= \vec{E}_{20} \cos(\omega_2 t - k_2 x_2 + \alpha_2) = \vec{E}_{20} \cos(\omega_2 t + \delta_2)\end{aligned}\quad (2)$$

Мысленно представим себе, что два вектора \vec{E}_{10} и \vec{E}_{20} совершают вращение с угловой скоростью ω_1 и ω_2 вокруг т. О. Тогда их проекции на ось OX меняются со временем по формулам (2), где $\delta_1 = k_1 x_1 + \alpha_1$ и $\delta_2 = k_2 x_2 + \alpha_2$.

Если вектора \vec{E}_{10} и \vec{E}_{20} вращаются с разными угловыми скоростями ($\omega_1 \neq \omega_2$), то средняя по времени сумма этих векторов будет одинаковой во всех точках поля, интерференции не будет. Потребуем, чтобы $\omega_1 = \omega_2 = \omega$. В этом случае все три вектора \vec{E}_0, \vec{E}_{10} и \vec{E}_{20} вращаются вокруг т. О как единое целое.

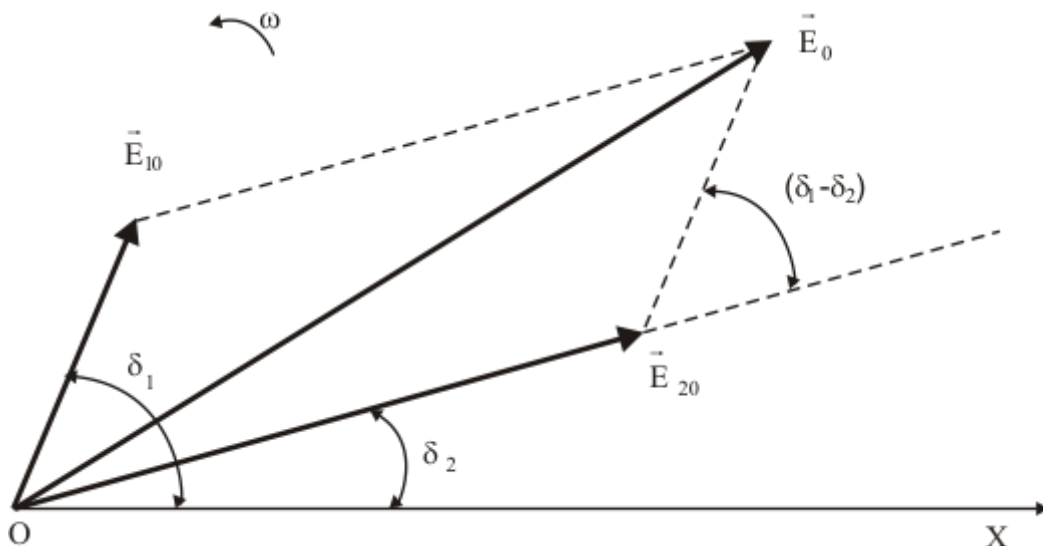


Рис. 3
Векторная диаграмма сложения двух колебаний.

Согласно теореме косинусов (рис. 3):

$$\begin{aligned} |\vec{E}_0|^2 &= |\vec{E}_{10}|^2 + |\vec{E}_{20}|^2 - 2|\vec{E}_{10}| \cdot |\vec{E}_{20}| \cdot \cos(\pi - (\delta_1 - \delta_2)) = \\ &= |\vec{E}_{10}|^2 + |\vec{E}_{20}|^2 + 2|\vec{E}_{10}| \cdot |\vec{E}_{20}| \cdot \cos(\delta_1 - \delta_2) \end{aligned} \quad (3)$$

Если разность фаз $\delta = \delta_1 - \delta_2 = k_2 x_2 - \alpha_2 - k_1 x_1 + \alpha_1$, возбуждаемых волнами с одинаковой частотой ω , остаётся постоянной во времени, то волны называются **когерентными**. Существуют понятия **пространственной и временной когерентности**. Временная когерентность связана разбросом значений модуля волнового вектора $|\vec{k}| = \frac{\omega}{V} = \frac{n\omega}{c}$. Пространственная

когерентность связана с разбросом направлений вектора \vec{k} .

Поскольку интенсивность световой волны пропорциональна квадрату амплитуды напряжённости электрического поля волны, то формулу (3) можно переписать в виде:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos(\delta) \quad (4)$$

Для когерентных волн интерференционный член в (4) $2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos(\delta)$ не равен нулю в среднем по времени. Потребуем, чтобы $\alpha_1 = \alpha_2$, тогда:

$$\delta = k_2 x_2 - k_1 x_1 = \omega \left(\frac{x_2}{V_2} - \frac{x_1}{V_1} \right) = \frac{\omega}{c} (n_2 x_2 - n_1 x_1), \quad (5)$$

где $V_1 = \frac{\omega}{k_1} = \frac{c}{n_1}$ и $V_2 = \frac{\omega}{k_2} = \frac{c}{n_2}$ - фазовые скорости волн, c – скорость света

в вакууме. Назовём величину $\Delta = n_2 x_2 - n_1 x_1 = L_2 - L_1$ **оптической разностью хода** двух лучей, величину $L_1 = n_1 x_1$ - **оптической длиной пути** первого луча из S_1 до точки М (рис. 2). Подставляем в (5), получаем:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \Delta, \quad (6)$$

где $\lambda_0 = \frac{2\pi \cdot c}{\omega}$ - длина волны в вакууме. Из (4) видно, что если разность фаз равна четному числу π , то есть, $\delta = \pm 2\pi \cdot m$, где $m=0,1,2,\dots$, то интерференционный член в (4) будет равен $2\sqrt{I_1 \cdot I_2}$, интенсивность I будет максимальной. Напротив, если разность фаз будет равна нечетному числу π , то есть, $\delta = \pm 2\pi \cdot \left(m + \frac{1}{2}\right)$, где $m=0,1,2,\dots$, то интерференционный член в (4) будет равен $-2\sqrt{I_1 \cdot I_2}$, интенсивность I будет минимальной. Подставляя

последние условия в (6), получаем условия **максимума и минимума интенсивности интерференционной картины**:

$$\Delta = \pm m \cdot \lambda_0 \quad (m=0,1,2,\dots) - \text{условие максимума} \quad (7)$$

$$\Delta = \pm \left(m + \frac{1}{2} \right) \cdot \lambda_0 \quad (m=0,1,2,\dots) - \text{условие минимума} \quad (8)$$

Поскольку два независимых оптических излучателя (например, лампы накаливания) практически всегда некогерентны, для получения когерентных световых потоков пользуются следующим искусственным приёмом. Световой поток от одного излучателя разделяют на два, которые когерентны. После этого потоки вновь объединяют и наблюдают интерференционную картину. Рассмотрим интерференционную схему на примере бипризмы Френеля, используемой в настоящей работе. Бипризма Френеля (рис. 4), представляет собой две призмы с общим основанием «ABCD», изготовленные из одного куска стекла и имеющие малый преломляющий угол θ . Обычно величина преломляющего угла не превышает нескольких десятков угловых минут. Свет падает на бипризму от щели «S», расположенной параллельно ребру «BC» (рис.4 и рис.5). Свет от источника преломляется в обеих призмах, в результате чего за бипризмой распространяются световые пучки, как бы исходящие из мнимых источников S_1 и S_2 , являющихся когерентными. На экране происходит наложение когерентных световых пучков, и наблюдается интерференция.

Можно показать, что в случае, когда преломляющий угол θ призмы очень мал и углы падения лучей на грань призмы не очень велики, все лучи после призмы отклоняются на практически одинаковый угол, равный

$$\varphi = (n - 1) \cdot \theta \quad (9)$$

Где n – показатель преломления призмы. Угол $\chi = 2\varphi$ называется **апертурой перекрывающихся световых пучков**.

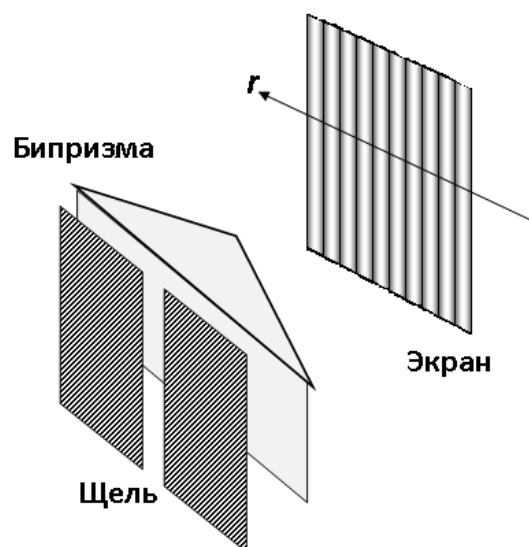


Рис. 4.

Схема наблюдения интерференции при помощи бипризмы Френеля

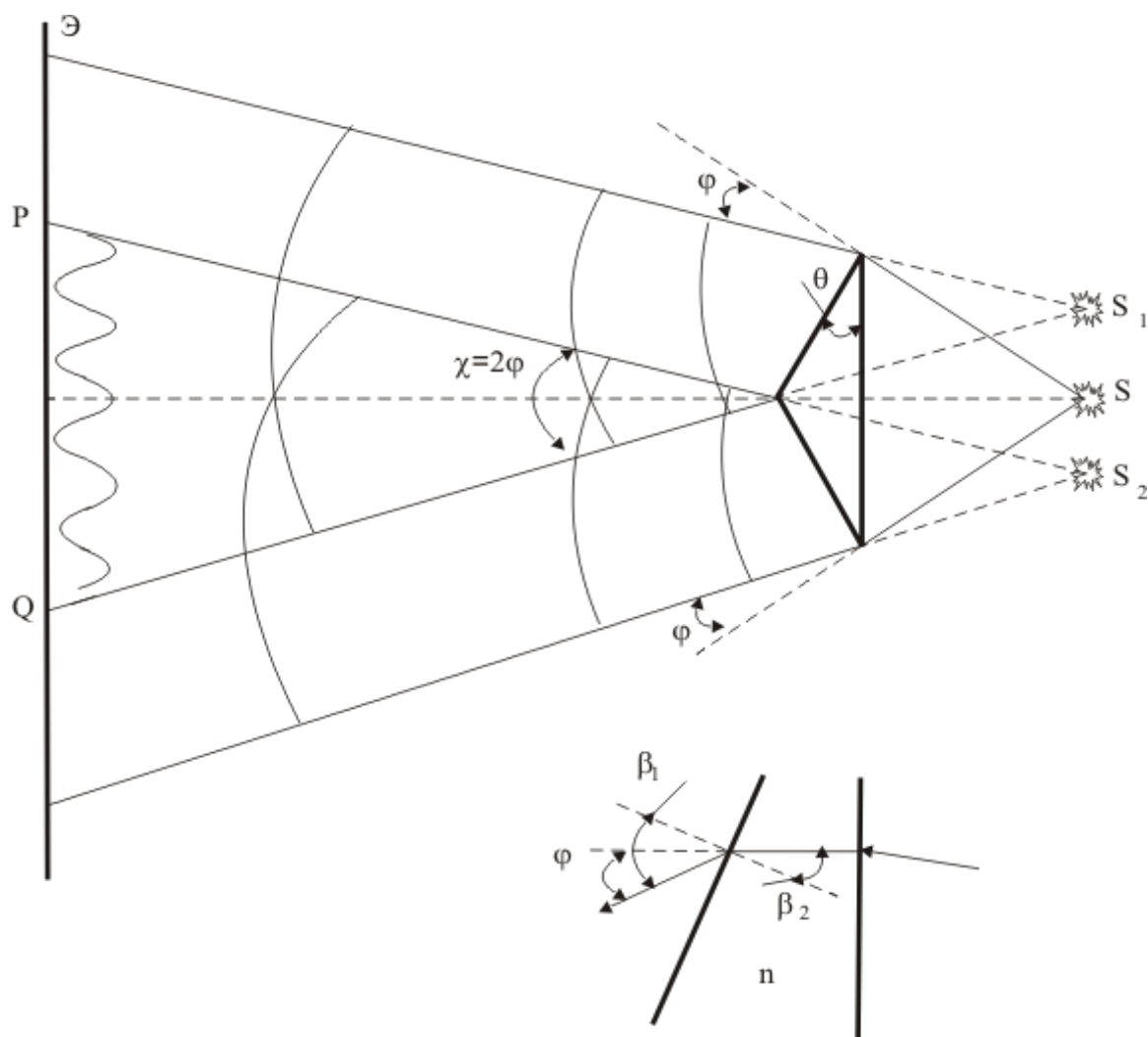


Рис. 5

Поле интерференции бипризмы Френеля (вверху) и отклонение луча бипризмой Френеля (внизу).

Найдём аналитическое выражение для определения длины волны λ . Пусть экран «Э» расположен нормально к оси симметрии (SM) измерительной установки (рис. 6). Пусть в точке Z экрана наблюдается интерференционный максимум от двух плоских когерентных волн, распространяющихся из двух источников S_1 и S_2 вдоль направлений $[S_1Z)$ и $[S_2Z)$. Оптическая разность хода между лучами $[S_1Z)$ и $[S_2Z)$ в точке Z в случае, если экран расположен достаточно далеко от источников и $|S_1S_2| \ll |MS|$, то, согласно рис.6:

$\Delta \approx n \cdot \Delta x = n \cdot |KS_2|$, где n – абсолютный показатель преломления среды, в которой распространяются волны.

Введём следующие обозначения (рис.6).

$$|S_1S_2| = \ell; \quad |MS| = L; \quad |KS_2| = \Delta x; \quad |MZ| = r$$

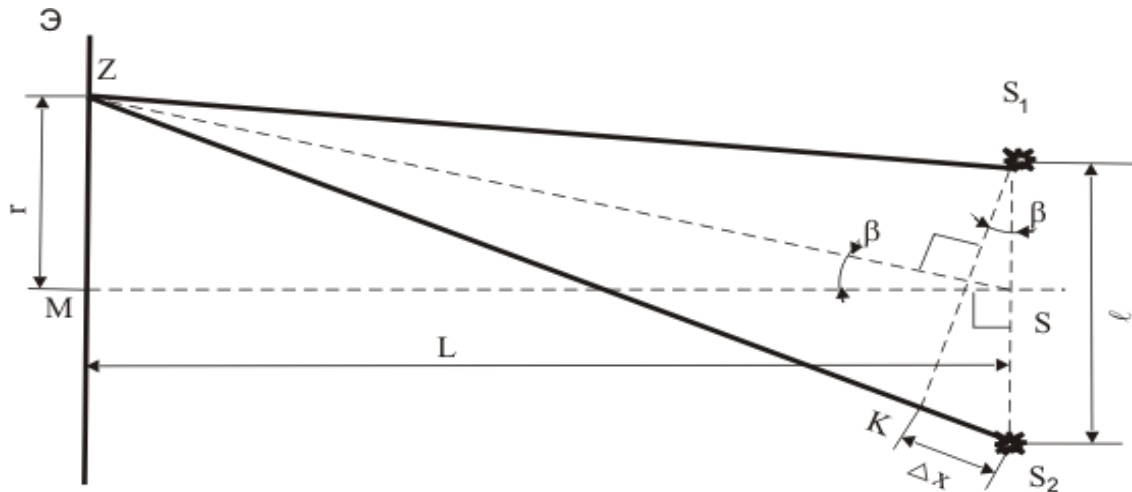


Рис.6.
Схема интерференции от двух источников

При $\ell \ll L$ можно считать, что $\sin \beta \approx \tan \beta \approx \beta$ и

$$\Delta x \approx \ell \cdot \beta$$

$$r \approx L \cdot \beta$$

(10)

Исключая β из системы (10), получаем расстояние между центром интерференционной картины (точкой М) и максимумом произвольного порядка в точке Z:

$$r = \frac{L \cdot \Delta x}{\ell}$$

(11)

Согласно (11), для максимумов различных порядков m и k имеем:

$$r_m = \frac{L \cdot \Delta x_m}{\ell};$$

$$r_k = \frac{L \cdot \Delta x_k}{\ell}$$

(12)

Согласно (7):

$$n \cdot \Delta x_m = m \lambda_0$$

$$n \cdot \Delta x_k = k \lambda_0$$

(13)

Подставляя (13) в (12), можно определить расстояние от центра экрана до максимума произвольного порядка.

$$r_m = \frac{L \cdot m \lambda_0}{\ell}$$

Вычитая уравнения (12) почленно, получаем:

$$r_m - r_k = \frac{L \cdot (\Delta x_m - \Delta x_k)}{\ell}$$

Подстановка (13) в (12) даёт:

$$r_m - r_k = \frac{L \cdot \lambda_0 \cdot (m - k)}{n \cdot \ell}$$

Рассмотрим соседние максимумы, для которых $m=k+1$. Для этого случая

вводится величина Δy , которая называется **шириной интерференционной полосы**.

$$r_{k+1} - r_k = \Delta y = \frac{L \cdot \lambda_0}{n \cdot \ell} \quad (14)$$

Получим из (14) длину электромагнитной волны:

$$\lambda = \frac{\Delta y \cdot \ell}{L}, \quad (15)$$

где $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$ - длина волны в среде, заполняющей пространство между источником и экраном. Если среда – воздух, то $n \approx 1$. Таким образом, чтобы достичь цели данной лабораторной работы и определить длину волны применяемого излучения, нужно узнать три величины: ширину интерференционной полосы Δy , расстояние между мнимыми источниками ℓ и расстояние от источников до экрана наблюдений L .

Поскольку величина Δy даже в оптимальном случае не превышает десятых долей миллиметра, экран не пригоден для наблюдения интерференционной картины и вместо него используется измерительный микроскоп. Величина Δy определяется с помощью измерительной шкалы R , вставленной в окуляр микроскопа (рис. 7). Поскольку максимум и минимум интенсивности не имеют четких границ, то условились шириной светлой интерференционной полосы считать расстояние между серединами соседних темных полос (минимумов), а шириной темной полосы считать расстояние между серединами соседних светлых полос (максимумов). Если на N интерференционных полос в интерференционной картине (рис. 7) приходится N_1 делений измерительной шкалы R , а цена одного деления шкалы равна C , то величину Δy рассчитывают по формуле:

$$\Delta y = \frac{N_1 \cdot C}{N} \quad (16)$$

В качестве примера на рис.7 на $N=3$ светлых полос приходится $N_1 = 12$ делений шкалы.

Для определения расстояния ℓ между мнимыми источниками S_1 и S_2 используют линзу и микроскоп (рис. 8).

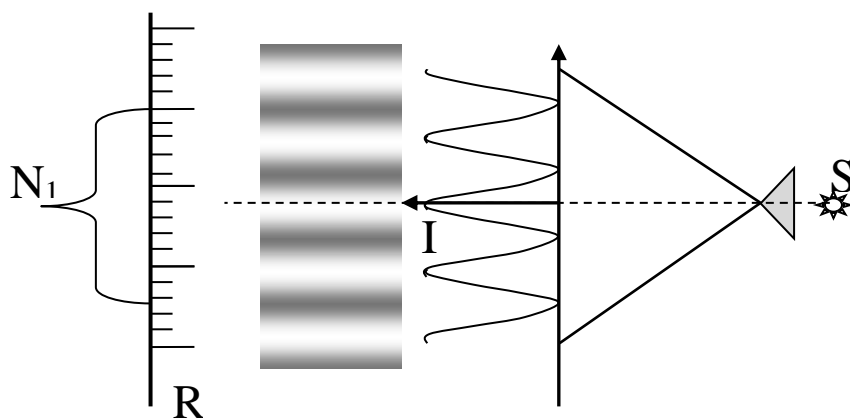


Рис. 7.
Схема измерения Δy

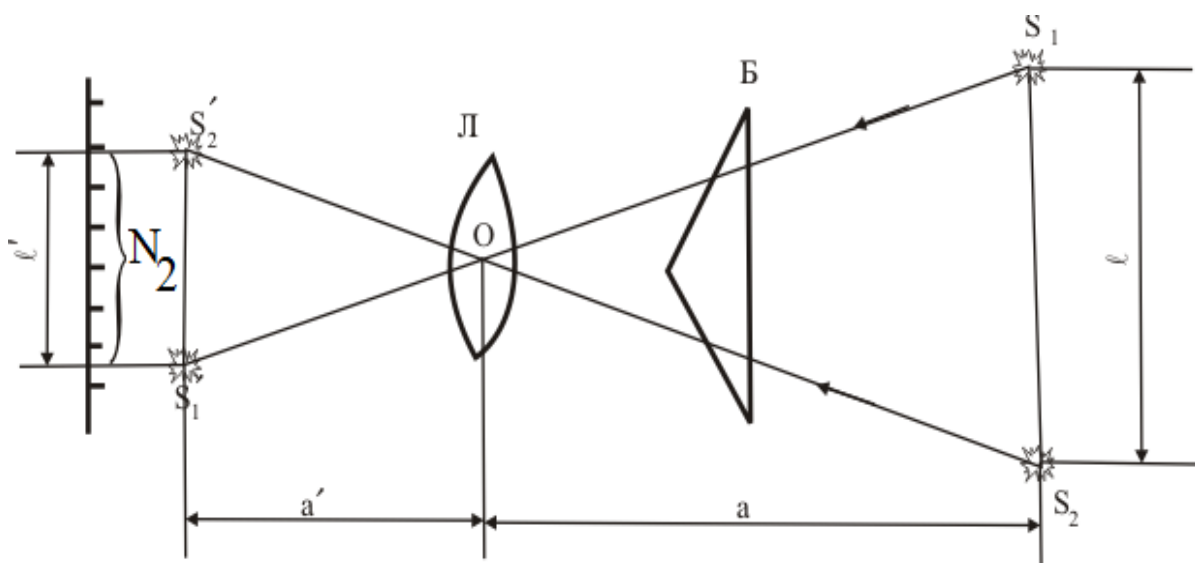


Рис. 8.
Схема измерения расстояния между мнимыми источниками S_1 и S_2

Из подобия $\Delta S_2'OS_1'$ и $\Delta S_2OS_1'$ следует (рис.8), что

$$\frac{l'}{a'} = \frac{l}{a} \text{ и } l = \frac{l' \cdot a}{a'},$$

где a – расстояние от щели до линзы Л, a' – расстояние от линзы Л до окуляра микроскопа, l' – расстояние между изображениями S_1' и S_2' мнимых источников S_1 и S_2 . Если величине l' соответствует N_2 делений измерительной шкалы микроскопа, то

$$l = \frac{N_2 \cdot C \cdot a}{a'}. \quad (17)$$

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка состоит из источника света «И», щели «S», бипризмы «Б», измерительного микроскопа «М» с экраном «Э», линзы и светофильтра (рис. 9). Линза и светофильтр на рисунке не показаны. Все вышеуказанные приборы крепятся на оптической скамье.

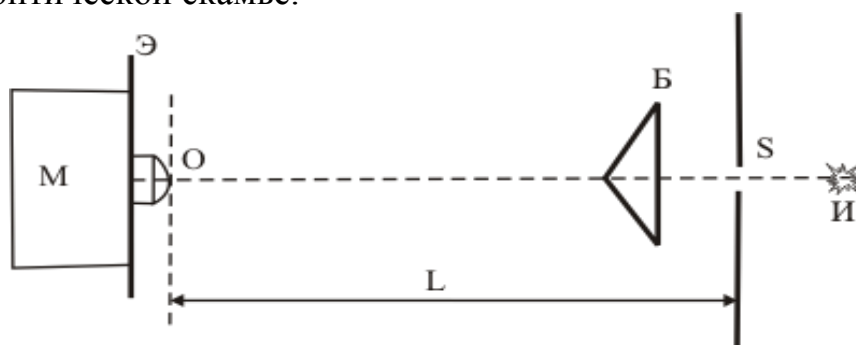


Рис. 9.

Схема лабораторной установки

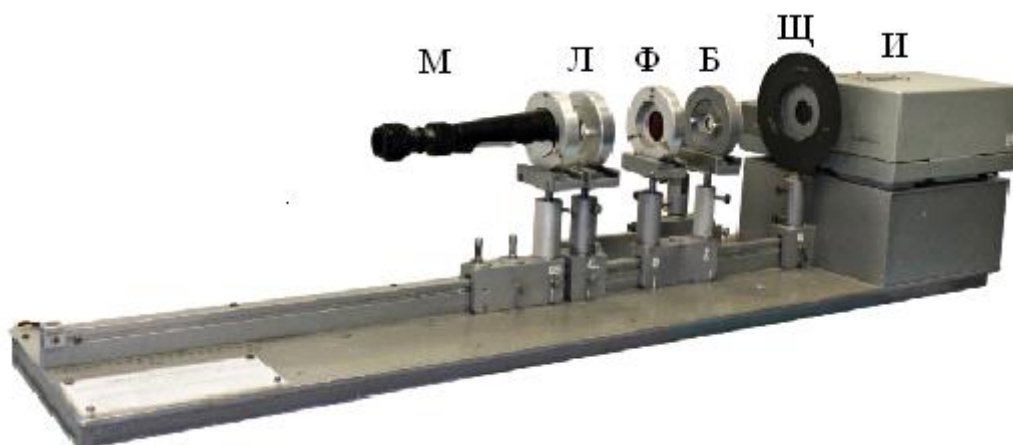


Рис.10

Экспериментальная установка.

М- микроскоп МПБ-3, Л-линза, Ф-светофильтр, Б-бипризма, Щ-щель, И -источник света.

4.ЗАДАНИЕ

4.1 Подготовить таблицу для записи результатов измерений.

N_1	N	$\Delta y, м$	$L, м$	$a, м$	$a', м$	N_2	$\ell, м$	$\lambda, м$

4.2. Настройка лабораторной установки.

4.2.1. Исходное положение приборов соответствует рис.9.

4.2.2. Установить между щелью «S» и объективом микроскопа «О» расстояние $L = 30 \div 40$ см.

4.2.3. Включить источник света.

4.2.4. Установить ширину щели порядка 0,5 мм. Плавное вращение бипризмы вокруг направления «ОИ» (рис. 9), получить резкую белую полосу на экране

микроскопа. Плавно поворачивая микроскоп вокруг вертикальной оси, совместить белую полосу с чёрной визирной линией экрана микроскопа. Зафиксировать стопорные винты штатива микроскопа. Уменьшить ширину щели до 0.

4.2.5. Глядя в окуляр микроскопа, плавно увеличить ширину щели до такого минимального размера, при котором интерференционная картина видна отчётливо. Если картина «смазана», добиться её резкости повторным плавным поворотом бипризмы вокруг оси «ОИ».

4.3. Определение длины электромагнитной волны λ .

4.3.1. Зарисовать в цвете вид полученной интерференционной картины.

4.3.2. Установить на штатив оптической скамьи светофильтр. Зарисовать в цвете вид полученной интерференционной картины.

4.3.3. Измерить ширину Δy максимумов интенсивности. Для этого определить число делений N_1 измерительной шкалы микроскопа, приходящихся на N максимумов интенсивности. Записать значения в таблицу.

4.3.4. Измерить L (рис. 9), записать.

4.3.5. Установить на штатив оптической скамьи линзу «Л» согласно рис. 8. Перемещая линзу, получить резкое изображение мнимых источников S'_1 и S'_2 в центре поля зрения окуляра микроскопа. Изображения S'_1 и S'_2 имеют вид двух светящихся полосок, разделённых тёмным промежутком. Подсчитать число делений N_2 измерительной шкалы R между **центрами** двух светящихся полосок (рис. 8), записать в таблицу. Измерить расстояние «а» между линзой и щелью (рис. 8) и a' между линзой и объективом микроскопа, записать в таблицу.

4.3.6. ВЫКЛЮЧИТЬ ИСТОЧНИК СВЕТА.

4.3.7. По формуле (16) вычислить Δy , по формуле (17) вычислить ℓ , длину волны λ по формуле (15). Цена деления C измерительной шкалы указана на рабочем месте.

4.3.8. Вычислить относительную погрешность измерения электромагнитной

волны [2]: $\sigma = \frac{\delta \lambda}{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{\delta \Delta y}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{\delta \ell}{\ell}\right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L}\right)^2}$, где

$$\frac{\delta \ell}{\ell} = \sqrt{\left(\frac{\delta N_2}{N_2}\right)^2 + \left(\frac{\delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\delta a'}{a'}\right)^2}, \quad \frac{\delta \Delta y}{\Delta y} = \sqrt{\left(\frac{\delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\delta N_1}{N_1}\right)^2}.$$

Относительные погрешности измерения длин L , a , a' зависят от приборных погрешностей линеек, принимаются равными половине цены деления шкалы линейки (δa , $\delta a'$, $\delta \ell$, δL). Для остальных величин: $\delta C = 0,1 \cdot C$, $\delta N_1 = 2$, $\delta N_2 = 0,1 \cdot N_2$.

4.4. Вычислить абсолютную погрешность измерения электромагнитной волны [2]: $\Delta \lambda = \lambda_{рас.} \cdot \sigma$

4.5. Запишите конечный результат для длины электромагнитной волны в виде.

$$\lambda = \lambda_{рас.} \pm \Delta \lambda.$$

4.6. Сравните полученное значение длины волны со справочными значениями (Приложение 2).

4.6. Запишите основные выводы по выполненной работе.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1. Что такое корпускулярно-волновой дуализм? Расскажите о строении электромагнитной волны.

5.2. Что такое интерференция электромагнитных волн? Приведите примеры из повседневной жизни.

5.3. Что регистрируют наши глаза и приборы при попадании в них электромагнитных волн?

5.4. Какие волны называются когерентными? Перечислите условия для создания интерференционной картины. Что такое пространственная и временная когерентность волн?

5.5. Выведите условия максимума и минимума интенсивности интерференционной картины (7) и (8).

5.6. Расскажите об интерференционной схеме с бипризмой Френеля. Что такое апертура перекрывающихся световых пучков?

5.7. Выведите расчётную формулу (15) для вычисления λ .

5.8. Почему после введения линзы «Л» (рис. 8) интерференционная картина на экране разрушается?

5.9. На основе экспериментальных данных и анализа формул (11) и (13) объясните последовательность чередования цветов спектральных линий в спектре, изучаемого в п. 4.3.1.

5.10. Объясните, почему после введения красного фильтра число видимых интерференционных полос увеличивается?

6. ЛИТЕРАТУРА

1. Ташлыкова-Бушкевич И.И. Физика. Часть 2. Оптика. Квантовая физика. Строение и физические свойства вещества [Электронный ресурс]: учебник/ Ташлыкова-Бушкевич И.И.— Электрон. текстовые данные.— Минск: Вышэйшая школа, 2014.— 232 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/35563>,
2. Черевко А.Г. Расчёт неопределённостей результата измерений в физическом эксперименте: Методические указания к лабораторному практикуму. Новосибирск: СИБГУТИ, 2002 г.
3. https://ru.wikipedia.org/wiki/Видимое_излучение
4. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 560с

ЗАДАЧИ

1.1 Расстояние ℓ между мнимыми источниками S_1 и S_2 равно 0,55 мм. Используется зеленый светофильтр с длиной волны 550 нм. Каково расстояние от источников S_1 и S_2 до экрана, если расстояние между соседними темными полосами равно 0,4 мм?

1.2 Свет с длинами волн 520 нм и 680 нм проходит через две щели, расстояния между которыми 0,4 мм. На какое расстояние смещены относительно друг друга интерференционные полосы второго порядка для этих двух волн на экране, расположенном на расстоянии 1,5 м от щелей?

2.1 Найти расстояние между третьим и пятым максимумами на экране, если расстояние от источников до экрана S_1 и S_2 равно 0,5 м, расстояние между источниками равно 0,2 мм. Используется светофильтр с длиной волны 0,6 мкм.

2.2 Одна из двух щелей в опыте Юнга закрыта очень тонким слоем прозрачного пластика с показателем преломления $n = 1,6$. В центре экрана вместо максимума интенсивности – темная полоса. Чему равна минимальная толщина пластика, если используется зеленый свет с длиной волны 510 нм?

3.1 Расстояние ℓ между мнимыми источниками S_1 и S_2 равно 0,2 мм. Источники расположены на расстоянии 0,3 м от экрана. Найти длину световой волны, если третий интерференционный минимум расположен на расстоянии 2,52 мм от центра интерференционной картины. Какого цвета светлые полосы в данной интерференционной картине?

3.2 Видимый свет с длиной волны 400 нм падает на две щели, находящиеся на расстоянии $2,8 \cdot 10^{-2}$ мм друг от друга. Интерференционная картина наблюдается на экране, отстоящем от щелей на расстоянии 18,5 см. Определить расстояние между соседними интерференционными полосами, если щели и экран поместить в воду ($n = 1,33$).

4.1 Найти угловое расстояние между соседними светлыми полосами $\Delta\beta$ (рис. 6), если известно, что экран отстоит от когерентных источников S_1 и S_2 на 0,4 м, а пятая светлая полоса на экране расположена на расстоянии 0,6 мм от центра интерференционной картины.

4.2 Найти длину волны света в опыте Юнга, если при помещении на пути одного из интерферирующих лучей стеклянной пластинки ($n = 1,5$) толщиной 4 мкм картина интерференции на экране сместится на 4 светлые полосы.

5.1 Расстояние ℓ между мнимыми источниками S_1 и S_2 равно 0,45 мм. Светофильтр пропускает красный свет с длиной волны 640 нм на экран, расположенный на расстоянии 35 см от источников. Сколько светлых полос уместится на 1 мм длины экрана?

5.2 Расстояние от бипризмы Френеля до узкой щели и экрана равны соответственно $b=25$ см и $a=100$ см. Бипризма стеклянная с преломляющим

углом $\theta = 20'$. Найти длину волны света, если расстояние между интерференционными полосами $\Delta y = 0,55$ мм. Указание: используйте рис.5 и формулу (9).

6.1 Ширина интерференционной полосы в опыте с бипризмой Френеля равна 0,25 мм. Расстояние от источников S_1 и S_2 до экрана равно 0,5 м. Используется красный светофильтр с длиной волны 0,7 мкм. Чему равно расстояние ℓ между мнимыми источниками S_1 и S_2 ?

6.2 Свет с длинами волн 400 нм (фиолетовый свет) и 700 нм (красный свет) проходит через две щели, расстояния между которыми 0,4 мм. На какое расстояние смещены относительно друг друга интерференционные полосы третьего порядка для этих двух волн на экране, расположенном на расстоянии 1,0 м от щелей?

РАБОТА 7.2

ИЗМЕРЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ МЕТОДОМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Освоить применение интерференционного метода для измерения радиуса кривизны плоско-выпуклой линзы.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Известно, что интерференция является результатом наложения двух или нескольких когерентных волн и сопровождается перераспределением их интенсивности в пространстве (см. раздел 2 работы 7.1 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ»). Интерференция является одним из эффективных методов точного измерения линейных размеров тел, угловых размеров удалённых предметов, шероховатости поверхности, параллельности плоскостей тонких пластин. Приборы, с помощью которых проводятся указанные измерения, носят название интерферометров [1]. Освоение метода измерений на одном из таких приборов и составляет основное содержание данной работы.

Пусть электромагнитная волна «1» (рис. 1), излучаемая источником света, падает под некоторым углом на плоско-выпуклую линзу «Л», приведённую в контакт со стеклянной пластиной «П». Испытав двойное преломление в линзе и воздухе, волна «1» отражается от пластинки «П» и падает на границу раздела «воздух-линза» в точке «С». Если источником света является лампа накаливания, излучающая электромагнитные волны в диапазоне $380 \div 760$ нм, всегда найдётся волна «2», когерентная с волной «1», которая одновременно с ней придёт в точку «С» (см. раздел 2 работы 7.1). В точке «С» волны «1» и «2» будут интерферировать. Для наблюдения интерференционной картины, возникающей на границе раздела «воздушный клин – линза», в работе используется измерительный микроскоп «М» (рис. 1). Интерференционная картина, наблюдаемая в микроскоп «М», имеет вид концентрических колец, симметричных относительно точки «О». Исторически такая картина получила названия колец Ньютона, первая публикация о которых была им сделана в 1675 году.

На рис. 2 в увеличенном виде изображены участки линзы $abck$, пластины $efgh$ и воздушного клина $kscf$, соответствующие области «А» на рис. 1. Из рис. 2 следует, что оптическая разность хода между волнами «1» и «2» равна удвоенной толщине зазора:

$$\Delta = |BD| \cdot n + |DC| \cdot n + \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

Где λ - длина интерферирующих волн, а n – показатель преломления среды, находящейся в зазоре между линзой и пластинкой. Прибавление $\frac{\lambda}{2}$ к оптической длине пути волны «1» связано с тем, что при её отражении от пластины «П» в точке «D» фаза волны изменяется на π [1].

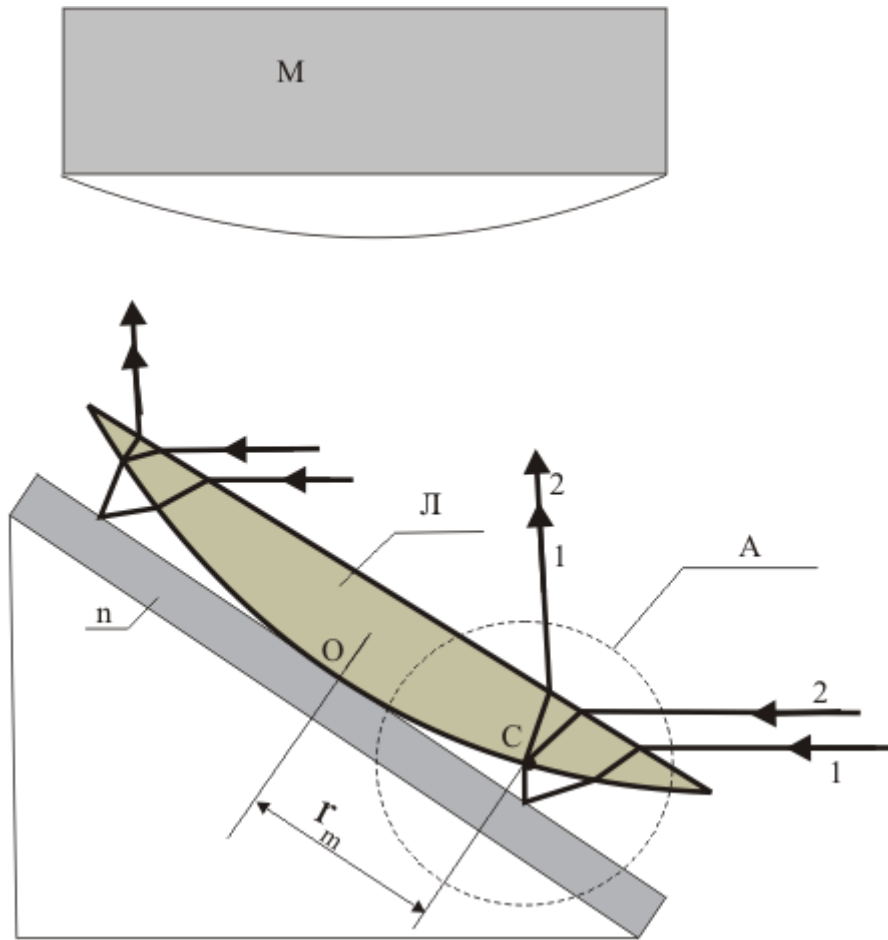


Рис.1.

Схема образования интерференционных колец Ньютона

В рассматриваемой оптической схеме радиус кривизны линзы $R \gg |BD|$, $R \gg |DC|$, поэтому

$$|BD| \approx |DC| \approx d, \quad (2)$$

где d – среднее значение толщины воздушного клина в окрестности точек В, D, С. Из формул (1) и (2) следует, что

$$\Delta = 2dn + \frac{\lambda}{2}. \quad (3)$$

Если в точке «С» интерференционной картины (рис.2) имеет место максимум интенсивности, то оптическая разность хода волн «1» и «2» равна (см. формулу (7) из лаб. 7.1):

$$\Delta = m \cdot \lambda \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

Из (3) и (4) следует, что

$$2dn + \frac{\lambda}{2} = m \cdot \lambda \quad (5)$$

Взаимосвязь толщины воздушного клина d с радиусом кривизны линзы R найдём из $\triangle EMC$ на рис. 3:

$$R^2 = (R - d)^2 + r_m^2, \quad (6)$$

где r_m - радиус концентрического кольца, соответствующего m порядку интерференционного максимума.

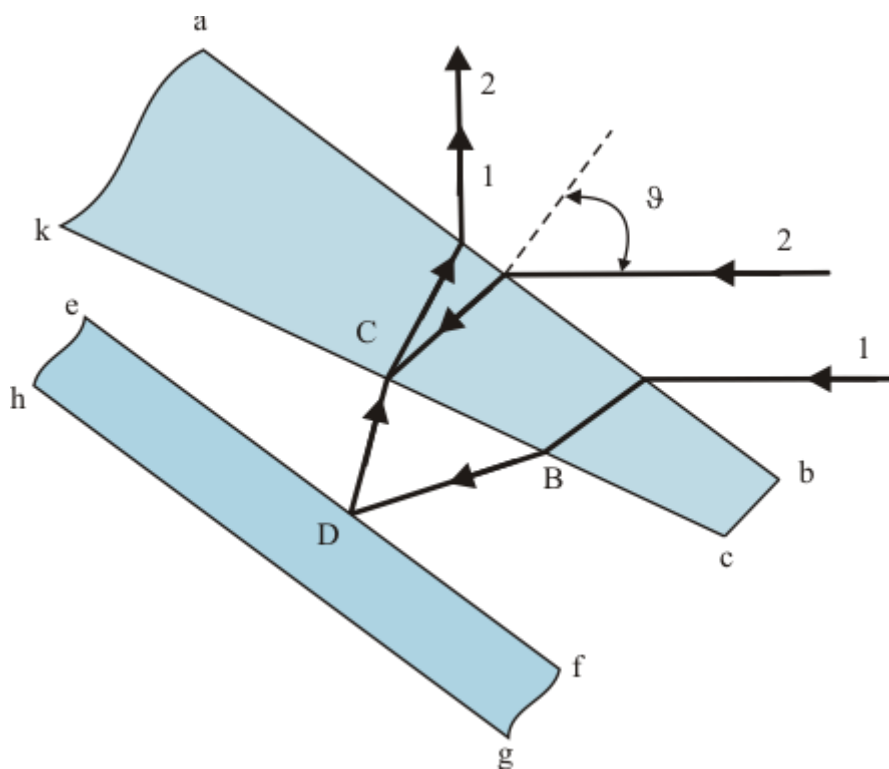


Рис. 2.
Вид А из рис. 1

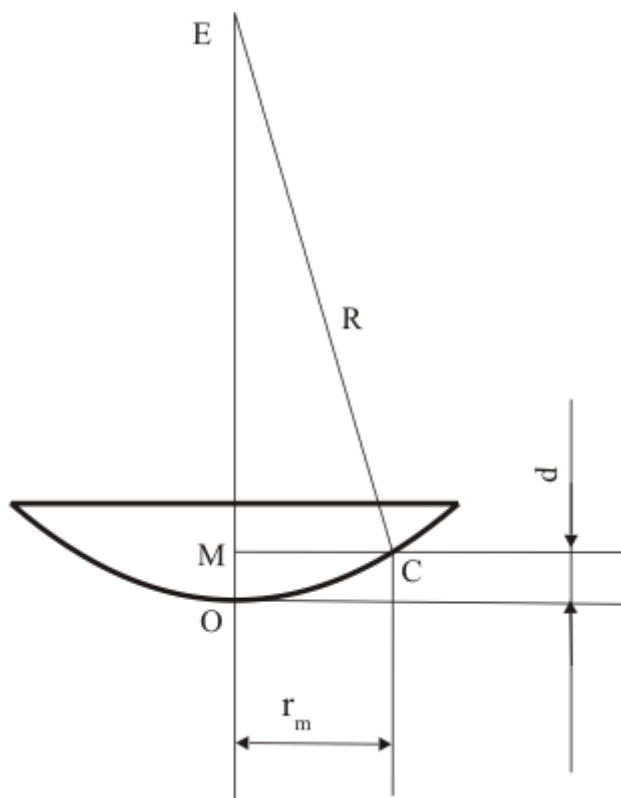


Рис. 3.
Схема для определения d

Согласно (6):

$$R^2 = R^2 - 2Rd + d^2 + r_m^2 \quad (7)$$

В условиях данного эксперимента $r_m \gg d$ и d^2 можно пренебречь по сравнению с r_m^2 . Формула (7) упрощается:

$$d \approx \frac{r_m^2}{2R} \quad (8)$$

Из (5) и (8) следует, что для двух максимумов различных порядков m и ℓ справедливы следующие выражения:

$$\frac{r_m^2}{R} \cdot n + \frac{\lambda}{2} = m\lambda \quad \text{и} \quad \frac{r_\ell^2}{R} \cdot n + \frac{\lambda}{2} = \ell\lambda \quad (9)$$

Вычитая почленно эти уравнения и учитывая, что в данной лабораторной работе между линзой и пластинкой находится воздух ($n \approx 1$), получаем формулу для расчёта радиуса кривизны линзы:

$$R = \frac{r_m^2 - r_\ell^2}{\lambda(m - \ell)} \quad (10)$$

При нормальном падении света ($\vartheta = 0$ на рис. 2) совокупность интерференционных максимумов одного порядка должна иметь форму кольца. Однако из-за того, что в нашей установке $\vartheta \neq 0$, а также из-за неравномерного прижима линзы «Л» к пластине «П» (рис.1), шероховатости поверхностей пластины и линзы, форма максимума несколько отличается от окружности (рис. 4).

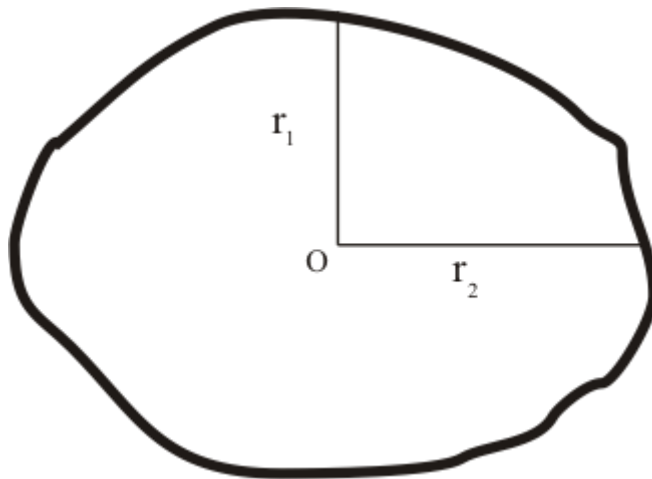


Рис.4

Схема измерения среднего радиуса кольца произвольного порядка.

Поэтому величину радиуса кольца произвольного m - порядка мы определим как

$$r_m = \langle r \rangle = \frac{r_1 + r_2}{2} \quad (11)$$

где r_1 и r_2 значения радиуса, измеренные в двух взаимоперпендикулярных направлениях. Величины r_1 и r_2 находим с помощью измерительной шкалы, вставленной в окуляр микроскопа. Если цена деления шкалы равна C , а значениям r_1 и r_2 соответствуют N_1 и N_2 чисел делений шкалы, величину r_m можно вычислить по формуле (10), переписав её в виде:

$$r_m = \frac{C}{2} \cdot (N_1 + N_2) . \quad (12)$$

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка состоит из измерительного микроскопа МБС – 10 (рис.5), кассеты с линзой и пластинкой «К», светофильтра «СФ», источника света «И». Для определения цены деления измерительной шкалы окуляра служит линейка, закреплённая на одном основании с кассетой «К».

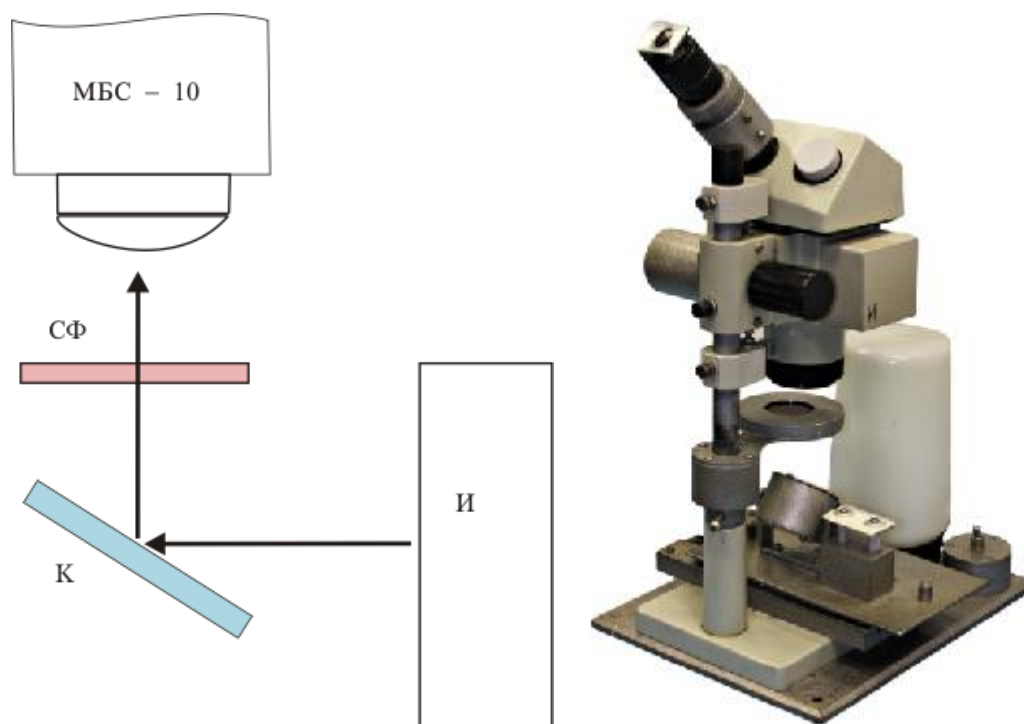


Рис. 5.

Лабораторная установка

4. ЗАДАНИЕ

4.1. Определить цену деления измерительной шкалы окуляра микроскопа.

4.1.1. Вывести из поля зрения микроскопа светофильтр, ввести в поле зрения линейку с миллиметровыми делениями.

4.1.2. ВКЛЮЧИТЬ ИСТОЧНИК СВЕТА.

4.1.3. Плавно перемещая тубус микроскопа по вертикали, получить резкое изображение штрихов линейки на фоне измерительной шкалы микроскопа. Плавно перемещая подставку с линейкой в горизонтальной плоскости, совместить штрихи измерительной шкалы с серединами двух соседних меток линейки (рис. 6). Если между серединами двух соседних миллиметровых меток линейки укладывается Z интервалов измерительной шкалы, то цена деления измерительной шкалы определяется по формуле:

$$C = \frac{10^{-3}}{Z}, [\text{м}] \quad (13)$$

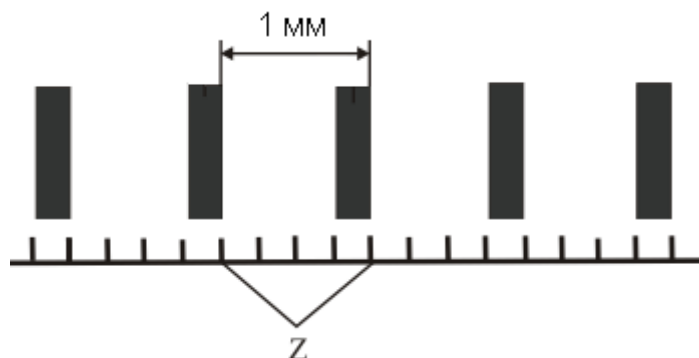


Рис.6

4.1.4. Измерить и записать значение Z .

4.2. Исследование интерференционного спектра.

4.2.1. Убрать из поля зрения линейку, ввести кассету «К» с линзой и пластиной.

4.2.2. Плавно перемещая тубус микроскопа по вертикали, получить резкое изображение интерференционной картины. Перемещая кассету «К» в горизонтальной плоскости, расположить интерференционную картину в центре зрения микроскопа.

4.2.3. Зарисовать в цвете вид интерференционной картины.

4.3. Определение радиуса кривизны линзы.

4.3.1. Подготовить таблицу измерений

Порядок кольца	N_1	N_2	Радиус кольца $r_{m,l}$, м	Радиус кривизны линзы R , м
$\ell = 1$				
$m =$				

4.3.2. Ввести в поле зрения светофильтр («СФ» на рис.5).

4.3.3. Сосчитать число делений измерительной шкалы N_1 между центром интерференционной картины и первым светлым кольцом (для него $\ell = 1$). Развернуть тубус окуляра с измерительной шкалой на 90° и сосчитать аналогичное число делений N_2 для этого же кольца (рис. 4). Записать значения N_1 и N_2 для максимума первого порядка.

4.3.4. Повторить операцию п. 4.3.3 для m -того светлого кольца (значение m задает преподаватель), записать значения N_1 и N_2 для этого максимума.

4.4. ВЫКЛЮЧИТЬ ИСТОЧНИК СВЕТА.

4.5. По формуле (13) вычислить цену деления C .

4.6. Вычислить радиусы максимумов первого и третьего порядков по формуле (12).

4.7. Вычислить радиус кривизны линзы R по формуле (10). Значение длины электромагнитной волны λ , соответствующее используемому светофильтру, приведено на рабочем месте.

4.8. Рассчитайте относительную погрешность радиуса кривизны линзы по формулам [2]:

$$\sigma = \frac{\delta R}{R} = \sqrt{2 \left(\frac{\delta r_m}{r_m} \right)^2 + 2 \left(\frac{\delta r_\ell}{r_\ell} \right)^2 + \left(\frac{\delta \lambda}{\lambda} \right)^2},$$

где $\frac{\delta r_\ell}{r_\ell} = \frac{\delta r_m}{r_m} = \sqrt{\left(\frac{\delta C}{C} \right)^2 + \left(\frac{\delta N_1}{N_1} \right)^2 + \left(\frac{\delta N_2}{N_2} \right)^2}$. При расчётах принять:

$$\delta \lambda = 3 \cdot 10^{-8} \text{ м}, \quad \delta C = 0,1 \cdot C, \quad \delta N_1 = \delta N_2 = 1.$$

4.9. Рассчитайте абсолютную погрешность радиуса кривизны линзы по формулам [2]:

$$\Delta R = R_{\text{рас.}} \cdot \sigma.$$

4.10. Запишите конечный результат для радиуса кривизны линзы в виде:

$$R = R_{\text{рас.}} \pm \Delta R.$$

4.11. Сделать основные выводы по выполненной работе.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1. Дайте понятие волнового процесса, расскажите о структуре электромагнитной волны.

5.2. Дайте определение интерференции. Какие волны называются когерентными? Что такое пространственная и временная когерентность? Почему при $\vartheta \neq 0$ (рис. 2) круг превращается в эллипс?

5.3. Выведите условия максимума и минимума интенсивности интерференционной картины. Дайте определение оптической разности хода двух лучей.

5.4. Почему в данной установке существует интерференция, ведь лампа накаливания испускает некогерентные электромагнитные волны?

5.5. Выведите формулу для расчёта радиуса кривизны линзы (10).

5.6. Получите формулу для расчета радиуса светлого кольца при наблюдении в отраженном свете

5.7. Пользуясь формулой (9), объясните последовательность чередования цветов в спектре произвольного порядка, полученного в п. 4.2.3. ЗАДАНИЯ.

6. ЛИТЕРАТУРА

1. Ташлыкова-Бушкевич И.И. Физика. Часть 2. Оптика. Квантовая физика. Строение и физические свойства вещества [Электронный ресурс] : учебник / И.И. Ташлыкова-Бушкевич. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Вышэйшая школа, 2014. — 232 с. — 978-985-06-2506-9. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/35563.html>
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. — М.: Издательский центр «Академия», 2007. — 560с
3. Черевко А.Г. Расчёт неопределённостей результата измерений в физическом эксперименте: Методические указания к лабораторному практикуму. Новосибирск: СИБГУТИ, 2002 г.

ЗАДАЧИ

1.1 Плосковыпуклая линза лежит выпуклой стороной на плоскопараллельной стеклянной пластинке. Освещая линзу монохроматическим светом с длиной волны 640 нм (красный свет), установили, что расстояние между 4 и 5 светлыми кольцами равно 0,5 мм. Определить радиус кривизны линзы.

1.2 Определить радиус пятого темного кольца Ньютона в отраженном свете, если между линзой с радиусом кривизны 4 м и плоской поверхностью, к которой она прижата, находится вода. Свет с длиной волны 589 нм (желтый свет) падает на плоскую поверхность линзы нормально. Показатель преломления воды $n_B = 1,33$.

2.1 Установка для получения колец Ньютона освещается светом от лампы накаливания, падающим нормально. Наблюдение производится в проходящем свете. Какое по порядку светлое кольцо, соответствующее линии $\lambda_1 = 600 \text{ нм}$, совпадает со следующим светлым кольцом, соответствующим линии $\lambda_2 = 400 \text{ нм}$?

2.2 Между плоской стеклянной пластинкой и линзой введена жидкость, в результате чего радиусы колец Ньютона уменьшились в 1,2 раза. Найти показатель преломления жидкости.

3.1 Установка для получения колец Ньютона освещается белым светом, падающим нормально. Наблюдение производится в проходящем свете. Радиус кривизны линзы равен 5м. Найти:

1) радиус четвертого фиолетового кольца ($\lambda_1 = 400 \text{ нм}$), и

2) радиус третьего красного кольца ($\lambda_2 = 630 \text{ нм}$).

3.2 Плоско-выпуклая стеклянная линза с радиусом кривизны $R=40 \text{ см}$ соприкасается выпуклой поверхностью со стеклянной пластинкой. При этом в отражённом свете радиус некоторого кольца равен $r=2,5 \text{ мм}$. Наблюдая за

данным кольцом, линзу осторожно отодвинули от пластинки на $h=5,0$ мкм. Каким стал радиус этого кольца?

4.1 На вершине сферической поверхности плоско-выпуклой стеклянной линзы имеется сошлифованный плоский участок радиуса $r=3,0$ мм, которым она соприкасается со стеклянной пластинкой. Радиус кривизны выпуклой поверхности линзы $R=150$ см. Найти радиус шестого светлого кольца в отраженном свете с $\lambda=655$ нм.

4.2 В просветлённой оптике для устранения бликов на свободную поверхность линзы наносится тонкая плёнка вещества с показателем преломления $n' = \sqrt{n}$, где $n=1,5$ – показатель преломления стекла. При какой толщине этого слоя отражательная способность стекла в направлении нормали будет равна нулю для света с длиной волны λ ?

5.1 Мыльная плёнка, расположенная вертикально, образуют клин. Интерференция наблюдается в отраженном свете через красное стекло ($\lambda=630$ нм). Расстояние между соседними красными полосами при этом равно 3 мм. Затем та же плёнка наблюдается через синее стекло ($\lambda=400$ нм). Найти расстояние между соседними синими полосами. Считать, что за время измерений форма плёнки не изменяется и свет падает на плёнку нормально.

5.2 Установка для получения колец Ньютона освещается монохроматическим светом. Наблюдение ведётся в отражённом свете. Радиусы двух соседних тёмных колец равны соответственно 4,0 мм и 4,38 мм. Радиус кривизны линзы равен 6,4 м. Найти порядковые номера колец и длину падающего света.

6.1 Найти расстояние между третьим и шестнадцатым тёмными кольцами Ньютона, если расстояние между вторым и двадцатым тёмными кольцами равно 4,8 мм. Наблюдение проводится в отражённом свете.

6.2 В установке для наблюдения колец Ньютона пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнено жидкостью. Определить показатель преломления жидкости, если радиус третьего светлого кольца получился равным 3,65 мм. Наблюдение ведётся в проходящем свете. Радиус кривизны линзы 10 м. Длина волны света 589 нм.

РАБОТА 7.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ ФРАУНГОФЕРА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследовать явление дифракции электромагнитных волн. С помощью дифракционной решетки проходящего света измерить длины электромагнитных волн видимого диапазона.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Дифракцией электромагнитных волн называют отклонения направлений их распространения от законов геометрической оптики. Дифракция световых волн, являющихся частным случаем электромагнитных волн, может быть объяснена с помощью принципа Гюйгенса-Френеля, согласно которому каждая точка среды, до которой дошел волновой фронт, может рассматриваться как точечный источник вторичной сферической волны. Если, например, волна [1] проходит вблизи непрозрачного экрана АВ, то точку В можно считать источником вторичной сферической волны (Рис.1). Согласно принципу Гюйгенса-Френеля, наряду с волной [2], распространяющейся в том же направлении, что и волна [1], могут иметь место волны [3] или [4], которые называют дифрагированными. Следствием дифракции является проникновение волны в область геометрической тени, создаваемой экраном АВ (Рис.1). Угол φ называют углом дифракции.

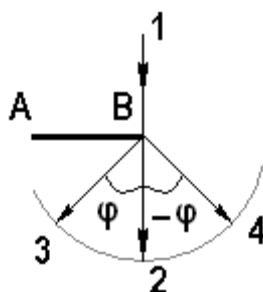


Рис. 1

Проникновение волны в область геометрической тени

Различают два вида дифракции. Первый – дифракция Френеля. В этом случае, размеры неоднородностей b , на которых дифрагирует волна, соизмеримы с длиной волны λ и расстоянием до точки наблюдения L , то есть

$L \approx \frac{b^2}{\lambda}$. Второй вид – дифракция Фраунгофера в параллельных лучах. В этом

случае расстояние от источника до точки наблюдения много больше размеров неоднородностей $L \gg \frac{b^2}{\lambda}$. В данной работе для исследования дифракции

Фраунгофера используется дифракционная решетка проходящего света, которая представляет собой совокупность узких параллельных щелей, расположенных в одной плоскости. Ширина всех щелей одинакова и равна b , расстояние препятствий равно - a . Величину $d=a+b$ называют периодом или постоянной дифракционной решетки (Рис.2). Данная величина показывает, какое количество щелей (штрихов) приходится на единицу длины дифракционной решетки. В данной работе $d = \frac{1\text{мм}}{100}$, то есть, на 1 миллиметр приходится 100 щелей (штрихов). Если число щелей равно N , её длина (ширина) $r = Nd$.

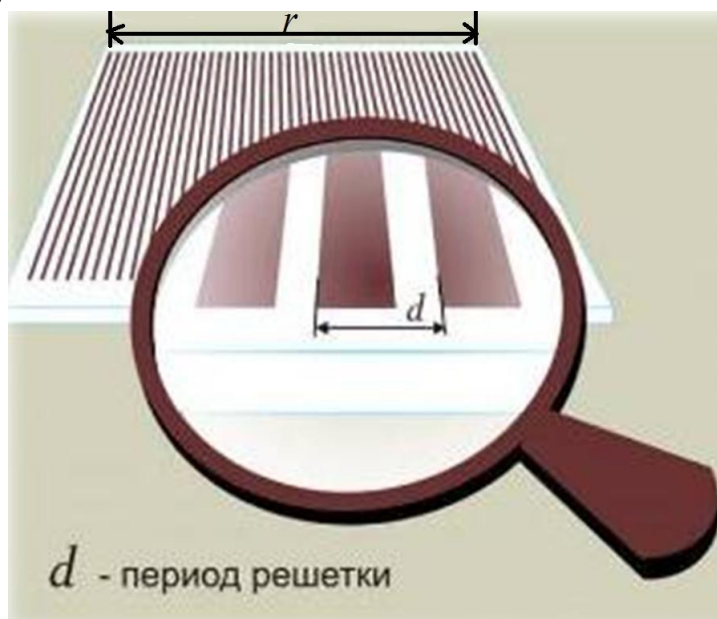


Рис. 2

Устройство дифракционной решетки (<http://rpp.nashaucheba.ru/docs/index-48898.html>)

Одно из назначений дифракционных решеток проходящего света – измерение длин волн электромагнитного излучения, проходящего сквозь них. Найдем аналитическое выражение для определения длины волны с помощью дифракционной решетки.

Пусть когерентные волны 1 и 2 падают на решетку нормально к её поверхности и дифрагируют под углом φ (Рис.3).

Пройдя через дифракционную решетку, волны интерферируют в плоскости экрана «Э» в точке «М». Если в точке «М» наблюдается интерференционный максимум, то разность оптических длин путей проходимых волнами 1 и 2 определяется выражением:

$$\Delta\ell = m\lambda, \quad m=0,1,2,3,\dots, \quad (1)$$

С другой стороны, из рис. 3 видно, что величина

$$\Delta\ell = d \cdot \sin \varphi \quad (2)$$

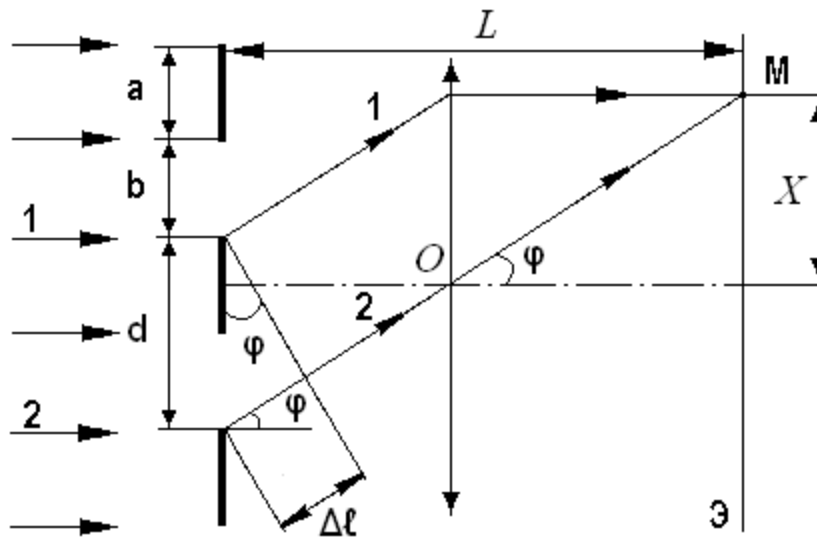


Рис. 3

Схема интерференции дифрагированных лучей

Объединяя эти два условия интерференционного максимума в дифракционном спектре получим:

$$d \cdot \sin \varphi = m\lambda, \quad m=0,1,2,3,\dots, \quad (3)$$

Очевидно, что две любые другие волны, аналогичные волнам 1, 2 и проходящие сквозь дифракционную решетку на расстоянии d друг от друга, дадут вклад в формирование максимума в точке «М», который называют главным дифракционным максимумом. Условие $m=0$ в уравнении (3) главного дифракционного максимума, соответствует значению $\varphi=0$, и определяет интерференционное условие для центрального максимума, формируемого недифрагированными волнами, приходящими в центр экрана в одной фазе.

Из рисунков 1 и 2 следует, что дифракционный спектр должен быть симметричен относительно центрального максимума. Полагая значения углов дифракции φ для максимумов, расположенных справа от центрального, условно положительными, а слева – отрицательными, получаем окончательное выражение для главных максимумов в дифракционном спектре:

$$d \cdot \sin \varphi = \pm m\lambda, \quad m=0,1,2,3,\dots, \quad (4)$$

Значения m называют порядком дифракционного максимума. Главные максимумы различных порядков разделены в дифракционном спектре интерференционными (главными) минимумами, в которых волны складываются в противофазе и гасят друг друга попарно. Наряду с главными максимумами и минимумами в дифракционном спектре присутствуют добавочные максимумы и минимумы, возникающие при интерференции дифрагированных волн, проходящих сквозь дифракционную решетку на расстояниях $d_1 > d$ или $d_2 < d$ одна от другой. В результате, дифракционный спектр имеет форму, схематически показанную на рисунке 4.

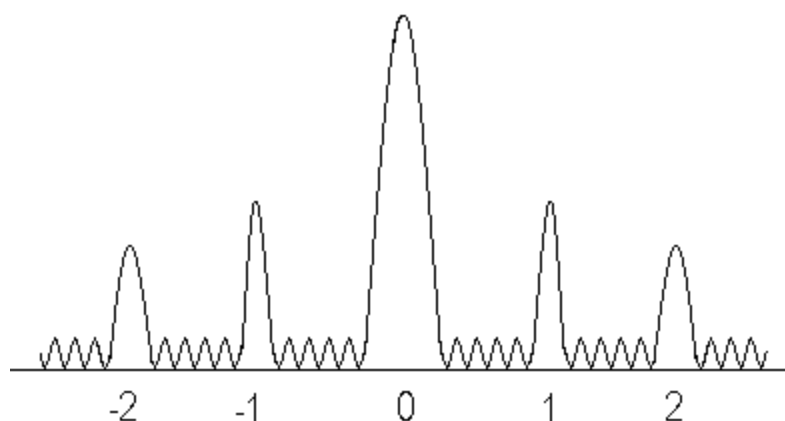


Рис. 4

Схема распределения интенсивности в дифракционном спектре.

В данной лабораторной работе наблюдение добавочных максимумов и минимумов не представляется возможным из-за малой разрешающей способности измерительной установки.

Если освещать решетку белым светом, в максимумах каждого порядка должны наблюдаться спектральные линии различных цветов от фиолетового до красного. В соответствии с формулой (4) линия красного цвета должна располагаться дальше от центра дифракционной картины по сравнению с линией фиолетового цвета в максимуме любого порядка.

Исходя из формулы (4), определим длину волны света

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{m} \quad (5)$$

Дифракционная решетка, как специальный прибор, характеризуется тремя параметрами: угловой дисперсией, линейной дисперсией и разрешающей способностью.

Угловой дисперсией называется величина:

$$D = \frac{\delta \varphi}{\delta \lambda} \quad (6)$$

где $\delta \varphi$ - угловое расстояние между спектральными линиями, отличающимися по длине волны на $\delta \lambda$.

Используя формулу (4), угловую дисперсию можно записать в виде

$$D = \frac{\delta \varphi}{\delta \lambda} = \frac{m}{d \cos \varphi} \quad (7)$$

Линейной дисперсией называют величину:

$$D_{\text{лин}} = \frac{\delta \ell}{\delta \lambda} \quad (8)$$

где $\delta \ell$ - линейное расстояние на экране или фотопластинке между спектральными линиями, отличающимися по длине волны на $\delta \lambda$ (Рис. 5).

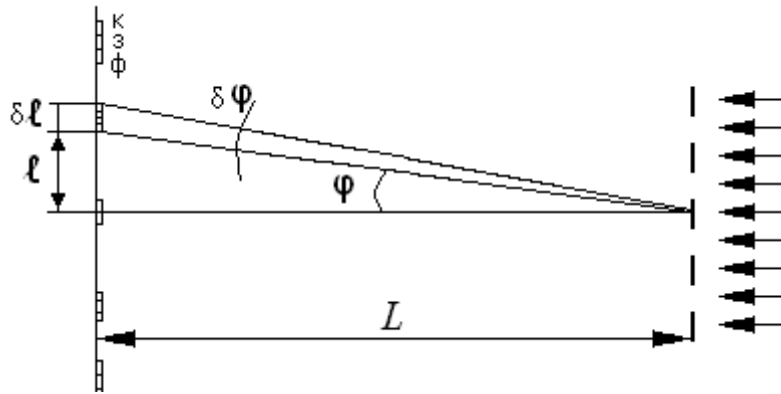


Рис. 5

Определение угловой и линейной дисперсии

Поскольку в первом и втором порядке угол дифракции достаточно мал, а $\ell \ll L$, то можно записать $\ell \approx L \cdot \varphi$ и $\delta\ell \approx L \cdot \delta\varphi$. Отсюда линейная дисперсия связана с угловой дисперсией соотношением

$$D_{\text{лин}} = \frac{\delta\ell}{\delta\lambda} = L \cdot D \quad (9)$$

Разрешающей способностью называют величину:

$$R = \lambda / \Delta\lambda \quad (10)$$

где $\Delta\lambda$ - разница между двумя длинами волн, подчиняющихся критерию Рэлея:

$$R = m \cdot N \quad (11)$$

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка состоит из источника света «И», щели «Щ», линзы «Л», дифракционной решетки «Р», экрана «Э» (Рис. 6).

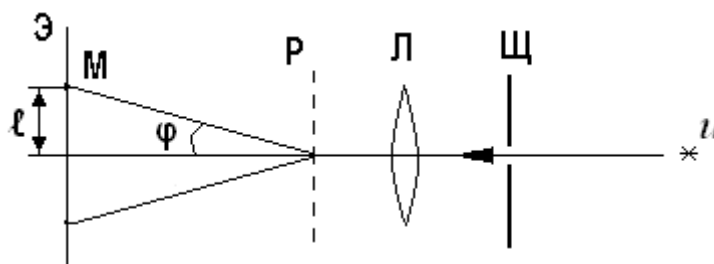


Рис. 6

Схема лабораторной установки.



Рис.7
Экспериментальная установка.

Щель служит для формирования спектральных линий, разрешенных между собой и придания им формы, подобной формы щели. Линза предназначена для устранения расходимости светового пучка и получения резкого изображения спектра на экране.

Для определения угла дифракции φ , исходя из схемы лабораторной установки, сначала находится $tg \varphi = \frac{\ell}{L}$, а затем $\sin \varphi$.

Для выделения монохроматического излучения из светового пучка используется сдвоенный светофильтр. **Внимание!** Дифракционная решетка проходящего света, используемая в данной работе, является дорогостоящим нестандартным прибором. Прикосновение к поверхности решетки пальцами или каким-либо предметом выводит ее из строя!

4. ЗАДАНИЕ

4.1. Измерение длин электромагнитных волн.

4.1.1 Подготовить таблицу измерений №1

Цвет	Порядок максимума m	L , м	ℓ , м	$tg \varphi$	$\sin \varphi$	λ , м	$\lambda_{ср}$, м
красный	1						
	2						
зеленый	1						
	2						
синий	1						
	2						

4.1.2. На оптической скамье установлены: источник света, щель, линза, дифракционная решетка, экран (Рис. 6 и Рис.7). Включить источник света. Плавное перемещение штатива с линзой и решеткой вдоль оптической оси, получить резкое изображение дифракционного спектра на экране. Зарисовать вид спектра в цвете.

4.1.3. Измерить расстояние L между экраном и решеткой по шкале оптической скамьи.

4.1.4. Выделить из спектра линии красного цвета. Измерить расстояние ℓ между серединой максимума первого порядка и серединой центрального максимума по шкале экрана. Повторить измерения для максимума второго порядка.

4.1.5. Повторить измерения согласно п. 4.1.4 для зеленого и для синего света..

4.1.6. ВЫКЛЮЧИТЬ ИСТОЧНИК СВЕТА

4.1.7. Пользуясь полученными данными и рис.6, вычислить $\sin \varphi$ для длин волн красного, зеленого и синего цвета в максимумах первого порядка.

4.1.8. Подставляя значения $\sin \varphi$ в формулу (5), рассчитать значения длин волн для красного, зеленого и синего цвета. Величина периода решетки d приведена на рабочем месте. Окончательные значения длин волн вычислить как средние по максимумам первого и второго порядков одного и того же цвета.

4.2. Определение угловой дисперсии, линейной дисперсии и разрешающей способности дифракционной решетки.

4.2.1. Подготовить таблицу №2

Цвет	Порядок максимума m	$D, \frac{рад}{м}$	$D_{лин}$	R	$\Delta\lambda, м$
Красный	1				
	2				
Зеленый	1				
	2				
Синий	1				
	2				

4.2.1. Рассчитать угловую дисперсию по формуле (7) для максимумов первого и второго порядков.

4.2.2. Рассчитать линейную дисперсию по формуле (9), для максимумов первого и второго порядков.

4.2.3. Измерить ширину дифракционной решетки r , определить число щелей решетки N .

4.2.3. Рассчитать разрешающую способность по формуле (11). Пользуясь формулой (10) оценить разницу между двумя длинами волн, подчиняющихся критерию Рэлея.

4.3. Пользуясь формулой [2]:
$$\sigma = \frac{\delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{\delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\delta\ell}{\ell}\right)^2}$$

рассчитать относительную погрешность измерения длины электромагнитной волны, приняв относительные погрешности измерения длин, **равными половине цены деления измерительной шкалы** (δL , $\delta\ell$).

4.4. Рассчитайте абсолютную погрешность длины электромагнитной волны, пользуясь формулой [2]: $\Delta\lambda = \lambda_{рас.} \cdot \sigma$

4.5. Запишите конечный результат для длины электромагнитной волны для каждого цвета:

$$\lambda = \lambda_{рас.} \pm \Delta\lambda$$

4.6. Сравнить полученные значения со значениями, приведенными в справочных таблицах (например, [5]).

4.7. Сделать основные выводы по выполненной работе.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1. Дайте понятие дифракции. В чем сущность принципа Гюйгенса Френеля. Расскажите об устройстве и назначении дифракционной решетки проходящего света.

5.2. Какое из понятий Вы считаете более правильным:

1. «Дифракционный спектр» или

2. «Интерференционный спектр дифрагированных волн»?

5.3. Сделайте вывод формулы (4).

5.4. В чем сущность критерия Рэлея?

5.5. Объясните последовательность чередования цветов в спектре, полученном в п.4.1.1. ЗАДАНИЯ.

6. ЛИТЕРАТУРА

1. Ташлыкова-Бушкевич И.И. Физика. Часть 2. Оптика. Квантовая физика. Строение и физические свойства вещества [Электронный ресурс] : учебник / И.И. Ташлыкова-Бушкевич. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Вышэйшая школа, 2014. — 232 с. — 978-985-06-2506-9. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/35563.html>

2. Черевко А.Г. Расчёт неопределённостей результата измерений в физическом эксперименте: методические указания к лабораторному практикуму, Новосибирск: СИБГУТИ, 2002г.

3. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 560с

4. https://ru.wikipedia.org/wiki/Видимое_излучение

ЗАДАЧИ

1.1 Дифракционная решетка, освещенная нормально падающим монохроматическим светом, отклоняет спектр второго порядка на угол $\varphi = 14^\circ$. На какой угол отклоняет она спектр третьего порядка?

1.2 Дифракционная решетка содержит $n = 200$ штрихов/мм. На решетку падает нормально монохроматический свет ($\lambda = 0,6$ мкм). Максимум какого наибольшего порядка дает эта решетка?

2.1. На дифракционную решетку, содержащую $n = 400$ штрихов/мм, падает нормально монохроматический свет ($\lambda = 0,6$ мкм).

Найти общее число дифракционных максимумов, которые дает эта решетка.

Определить угол отклонения последнего максимума.

2.2. Сравните наибольшую разрешающую способность для красной линии кадмия ($\lambda = 644$ нм) двух дифракционных решеток одинаковой длины ($\ell = 5$ мм), но разных периодов ($d_1 = 4$ мкм, $d_2 = 8$ мкм). [$R_{1\max} = R_{2\max} = 7500$]

3.1. На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет. В спектре, полученном с помощью этой дифракционной решетки, некоторая спектральная линия наблюдается в первом порядке под углом $\varphi = 11^\circ$. Определите наивысший порядок спектра, в котором может наблюдаться эта линия. [5]

3.2. Какой должна быть толщина плоскопараллельной стеклянной пластинки ($n = 1,55$), при которой в отраженном свете максимум второго порядка для $\lambda = 0,65$ мкм наблюдается под тем же углом, что и у дифракционной решетки с постоянной $d = 1$ мкм?

4.1. Период дифракционной решетки $a + b = 0,01$ мм. Какое наименьшее число штрихов N должна содержать решетка, чтобы две составляющие желтой линии натрия ($\lambda_1 = 5890$ А, $\lambda_2 = 5896$ А) можно было видеть отдельно в спектре первого порядка? Определить наименьшую длину ℓ решетки.

4.2. При освещении дифракционной решетки белым светом спектры второго и третьего порядков отчасти перекрывают друг друга. На какую длину волны в спектре второго порядка накладывается фиолетовая граница ($\lambda = 0,4$ мкм) спектра третьего порядка?

5.1. На дифракционную решетку, содержащую $n = 200$ штрихов/мм, падает в направлении нормали к ее поверхности белый свет.

Спектр проектируется помещенной вблизи решетки линзой на экран.

Определить длину спектра первого порядка на экране, если расстояние от линзы до экрана $d = 3$ м. Границы видимого спектра $\lambda_{кр} = 7800$ А, $\lambda_{ф} = 4000$ А.

5.2. Дифракционная решетка имеет $N = 1000$ штрихов и постоянную $d = 10$ мкм. Определите: 1) угловую дисперсию для угла дифракции $\varphi = 30^\circ$ в спектре третьего порядка; 2) разрешающую способность дифракционной решетки в спектре пятого порядка. [1) $3,46 \times 10^5$ рад/м; 2) 5000]

6.1. Определите длину волны, для которой дифракционная решетка с постоянной $d = 3$ мкм в спектре второго порядка имеет угловую дисперсию $D = 7 \times 10^5$ рад/м. [457 нм]

6.2. Угловая дисперсия дифракционной решетки для $\lambda = 500$ нм в спектре второго порядка равна $4,08 \times 10^5$ рад/м. Определите постоянную дифракционной решетки. [5 мкм]

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА ГЛЮКОЗЫ
ПОЛЯРИМЕТРОМ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить явление вращения плоскости поляризации света. Определить концентрации растворов глюкозы.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Следствием теории Максвелла является поперечность световых волн: векторы напряжённостей электрического \mathbf{E} и магнитного \mathbf{H} полей волны взаимно перпендикулярны и колеблются перпендикулярно вектору скорости распространения волны. Обычно все рассуждения ведутся относительно вектора напряженности \mathbf{E} электрического поля (это обусловлено тем, что при действии света на вещество основное значение имеет электрическая составляющая поля волны, действующая на электроны в атомах вещества). Свет представляет собой суммарное электромагнитное излучение множества атомов. Атомы излучают световые волны независимо друг от друга, поэтому световая волна, излучаемая телом в целом, характеризуется всевозможными равновероятными колебаниями вектора \mathbf{E} и перпендикулярного ему вектора \mathbf{H} . Свет со всевозможными равновероятными ориентациями вектора \mathbf{E} и, следовательно, \mathbf{H} называется **естественным**. Свет, в котором направления колебаний вектора \mathbf{E} происходят только в одном направлении, перпендикулярном лучу, называется **плоскополяризованным или линейно поляризованным**. Плоскополяризованный свет можно получить, пропустив естественный свет через пластинку турмалина, вырезанную параллельно его оптической оси. Турмалин сильно поглощает световые лучи, в которых вектор \mathbf{E} перпендикулярен к оптической оси. Если вектор \mathbf{E} параллелен к оптической оси, то такие лучи проходят через турмалин почти без поглощения. По этому естественный свет, пройдя через пластинку турмалина, наполовину поглощается и становится **плоскополяризованным**, с электрическим вектором, ориентированным параллельно оптической оси турмалина. Всякий прибор, служащий для получения поляризованного света, называют **поляризатором**. Тот же прибор, применяемый для исследования поляризации света, называют **анализатором**. Если линейно поляризованный свет проходит через плоскопараллельный слой вещества, то в некоторых случаях плоскость поляризации света оказывается повернутой относительно своего исходного положения. Это явление называется **вращением плоскости поляризации** или **оптической активностью**.

При прохождении плоскополяризованного света через некоторые вещества наблюдается вращение плоскости колебаний светового вектора или, как принято говорить, вращение плоскости поляризации. Вещества, обладающие такой способностью, называются **оптически активными**. К их числу принадлежат кристаллические тела (например, кварц, киноварь), чистые жидкости (скипидар, никотин) и растворы оптически активных веществ в

активных растворителей (водные растворы сахара, глюкозы, винной кислоты и др.).

Для наблюдения явления можно установить на оптической скамье два скрещенных николя. Такая система не пропускает свет. Однако, если между николями ввести пластинку кварца, вырезанную перпендикулярно к оптической оси, или слой какого-либо другого оптически активного вещества, то свет через систему будет проходить. Но его можно погасить вращением одного из николей (Рис. 1). Отсюда следует, что после прохождения через активное вещество свет остается линейно поляризованным, но его плоскость поляризации оказывается повернутой.

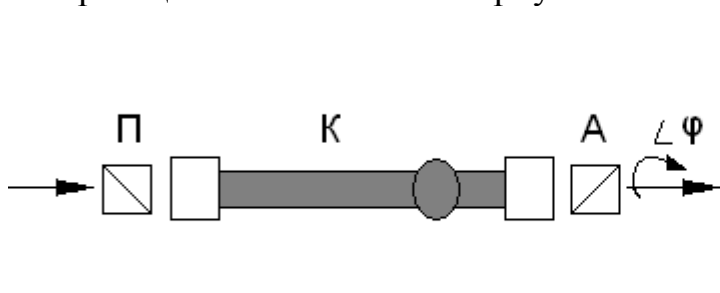


Рис. 1

Схема оптической скамьи с николями

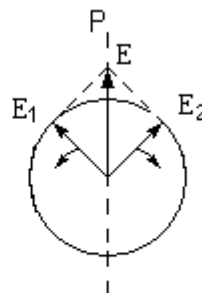


Рис. 2

Вращение плоскости поляризации

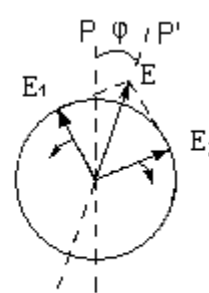


Рис. 3

В зависимости от взятого вещества естественное вращение плоскости поляризации может происходить вправо или влево, причем эти два направления условились относить к наблюдателю, к которому свет приближается. В соответствии с этим различают **право- и левовращающие вещества**. Вращение вправо считается **положительным**, а влево — **отрицательным**.

Явление вращения плоскости поляризации указывает на определенную **дисимметрию**, асимметрию молекул, либо ассиметричное размещение атомов в кристалле, свойственную оптически активным средам. Она выражается в том, что в таких средах направления вращения по и против часовой стрелки физически не эквивалентны. Поэтому в среде не может быть плоскости симметрии, проходящей через направление нормали к фронту волны. Иначе, как это следует из общих соображений симметрии, плоскость поляризации света не могла бы вращаться, если бы она совпадала с любой из плоскостей симметрии. В то же время естественно-активные среды, если они жидкие, **полностью изотропны**, т.е. все направления в них совершенно эквивалентны. Это проявляется, в частности, в том, что естественно-активная жидкость вращает плоскость поляризации **в одну и ту же сторону, независимо от направления распространения света**. Поэтому естественно-активную жидкость можно охарактеризовать как **дисимметрично-изотропную среду**.

Био установил на опыте, что угол поворота φ , плоскости поляризации пропорционален толщине ℓ оптически активного вещества: $\varphi = \alpha \ell$ - для твердых веществ и чистых жидкостей и $\varphi = \alpha c \ell$ - для растворов концентрации c , где коэффициент α называется **вращением на единицу**

длины. Он зависит от длины волны, природы вещества и температуры. Вращение α увеличивается с уменьшением длины волны.

Оптическую активность жидкостей принято характеризовать **удельным вращением** $[\alpha]$.

Согласно Френелю, вращение плоскости поляризации, какова бы ни была его физическая природа, есть проявление особого, так называемого **кругового двойного лучепреломления**. Однако две волны, которые могут распространяться в оптически активной среде с определенными, но различными скоростями, поляризованы не линейно, как при обычном (линейном) двойном лучепреломлении, **а по кругу: одна по левому, другая по правому**.

Для обоснования достаточности такого предположения допустим, что плоская волна с вращающейся плоскостью поляризации распространяется в положительном направлении оси Z . Так как волна поперечна, ее электрический вектор E будет содержать только две компоненты E_x и E_y .

Если A - амплитуда колебаний, то $E_x = A \cos \varphi \cos(\omega t - kz)$,

$E_y = B \sin \varphi \cos(\omega t - kz)$ где φ - угол между направлением электрического вектора E и осью X . Этот угол может зависеть от координаты z , так что можно положить $\varphi = -\alpha z$, где α - введенный ранее коэффициент, определяющий вращение плоскости поляризации. Когда коэффициент α положителен, то при распространении волны угол φ уменьшается, т. е. вращение происходит **по часовой стрелке** (вправо). При отрицательном α плоскость поляризации вращается **против часовой стрелки** (влево). Подставив значение $\varphi = -\alpha z$ в выражения для E_x и E_y и воспользовавшись известными формулами тригонометрии, представим их в виде

$$E_x = \frac{A}{2} \cos(\omega t - kz + \alpha z) + \frac{A}{2} \cos(\omega t - kz - \alpha z),$$

$$E_y = \frac{A}{2} \cos\left(\omega t - kz + \alpha z + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{A}{2} \cos\left(\omega t - kz - \alpha z - \frac{\pi}{2}\right).$$

Разложим полученную волну на две: $E = E^n + E^l$ где компоненты векторов E^n и E^l определяются выражениями

$$E_x^n = \frac{A}{2} \cos(\omega t - k^n z), \quad E_y^n = \frac{A}{2} \cos\left(\omega t - k^n z + \frac{\pi}{2}\right), \quad (1)$$

$$E_x^l = \frac{A}{2} \cos(\omega t - k^l z), \quad E_y^l = \frac{A}{2} \cos\left(\omega t - k^l z - \frac{\pi}{2}\right), \quad (2)$$

и введены обозначения

$$k^n = k - \alpha, \quad k^l = k + \alpha.$$

В волне (1) компонента E_y опережает по фазе компоненту E_x на $\pi/2$, а в волне (2) отстает на такую же величину. Обе волны поляризованы по кругу: в волне (1) электрический вектор вращается от положительного конца оси Y к положительному концу оси X , в волне (2) вращение происходит в противоположном направлении. Иначе говоря, волна (1) поляризована по правому, а волна (2) - по левому кругу. Таким образом, **кинематически волну с вращающейся плоскостью поляризации можно рассматривать как наложение двух волн, поляризованных по кругу: правому и левому.** Скорости этих волн определяются выражениями

$$v^n = \frac{\omega}{k - \alpha}, \quad v^l = \frac{\omega}{k + \alpha},$$

а показатели преломления — выражениями

$$n^n = \frac{c}{v^n} = \frac{c}{\omega}(k - \alpha), \quad n^l = \frac{c}{v^l} = \frac{c}{\omega}(k + \alpha).$$

Отсюда

$$n^n - n^l = \frac{2c}{\omega}\alpha, \quad \alpha = \frac{\omega}{2c}(n^l - n^n),$$

$$\alpha = \frac{2\pi\nu}{2c}(n^l - n^n) = \frac{\pi}{\lambda}(n^l - n^n).$$

Если $n^l - n^n > 0$, то $\alpha > 0$, т. е. вращение плоскости поляризации происходит **вправо**. Если же $n^l - n^n < 0$, то плоскость поляризации вращается влево. Иначе говоря, **плоскость поляризации вращается в ту же сторону, что и электрический вектор поляризованной по кругу волны с меньшим показателем преломления, т. е. с большей фазовой скоростью.**

Приведенное рассуждение отнюдь не доказывает, что каждая из поляризованных по кругу волн (1) и (2) может в отдельности существовать в среде. Мы исходили из опытного факта, что в оптически активной среде может реально существовать волна с вращающейся плоскостью поляризации.

Френель доказал экспериментально, что **при вступлении в оптически активную среду луч света испытывает двойное круговое лучепреломление: лучи, поляризованные по правому и левому кругу, идут внутри оптически активной среды с различными фазовыми скоростями.** Если падающий свет был поляризован линейно, то при выходе из такой среды эти волны складываются снова в линейно поляризованную волну,

но с повернутой плоскостью поляризации (Рис. 2, 3). Тем самым задача объяснения вращения плоскости поляризации была сведена к задаче объяснения кругового двойного лучепреломления.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В качестве лабораторной установки в данной работе используется поляриметр круговой СМ-3, который предназначен для измерения угла вращения плоскости поляризации оптически активными прозрачными растворами и жидкостями (Рис. 6). В поляриметре применён принцип уравнивания яркостей разделённого на две части поля зрения.

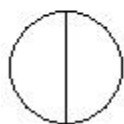


Рис. 4

Разделение поля зрения

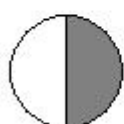


Рис. 5

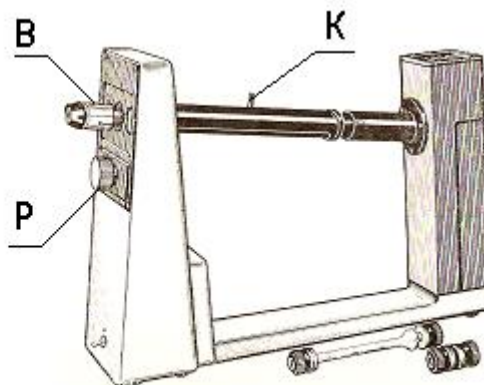


Рис. 6

Вид лабораторной установки СМ-3



Рис.7

Экспериментальная установка.

Разделение поля зрения на части осуществимо введением в оптическую систему поляриметра хроматической фазовой пластинки.

Свет от лампы ДНаС-18 ($\lambda=589$ нм), пройдя через конденсор и поляризатор одной частью пучка проходит через хроматическую фазовую пластинку, защитное стекло, кювету и анализатор, а другой частью пучка только через защитное стекло, кювету и анализатор. Уравнение яркостей полей сравнения

производят путём вращения анализатора. Если между анализатором и поляризатором ввести кювету с оптически активным раствором, то равенство полей сравнения нарушается. Оно может быть восстановлено поворотом анализатора на угол, равный углу поворота плоскости поляризации раствором. Следовательно, разностью двух отсчётов, соответствующих равенству яркостей полей сравнения с оптически активным раствором и без него, определяется угол вращения плоскости поляризации данным раствором.

4. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

4.1. Включить поляриметр с помощью тумблера на задней крышке.

4.2. Вращением втулки (В) получают резкое изображение линии раздела поля зрения.

4.3. Плавным вращением ручки (Р) осуществляется вращение лимба таким образом, чтобы разделение полей зрения, наблюдаемое в окуляре было как на (Рис. 4). Замерить угол поворота анализатора φ_1 по лимбу.

4.4. Открыть крышку (К) и поместить внутрь кювету с известной концентрацией раствора, поле зрения просветлеет (Рис. 5), вращая лимб получить первоначальный вид поля зрения, замерить угол на который повернулась плоскость поляризации φ_2 .

4.5. Определить, на сколько градусов повернута шкала лимба по отношению к шкале первого отсчетного устройства (|), затем по штрихам первого и второго отсчетных устройств (||), совпадающих со штрихами лимба, отсчитать доли градуса. Величина отсчёта по нониусу $0,02^\circ$. К числу градусов взятых по шкале лимба, прибавить средний арифметический отсчёт по шкале первого и второго отсчетного устройства. Таких наводок сделать пять и взять среднее арифметическое из них.

4.6. Зная длину кюветы ℓ и концентрацию раствора C вычислить по формуле $\alpha = \frac{\Delta\varphi}{c\ell}$ удельную постоянную вращения.

4.7. Заменить кювету на кювету с неизвестной концентрацией раствора и провести измерения по пунктам 3 и 4. Вычислить неизвестную концентрацию раствора, считая удельную постоянную вращения одинаковой для всех растворов, $c = \frac{\Delta\varphi}{\alpha\ell}$ данные занести в таблицу № 1.

Таблица № 1

Образцы	φ_1 ,град	φ_2 ,град	ℓ , дм	α , град/дм	C, %
Кювета C=40%					
Кювета № 1					
Кювета № 2					

4.8. Рассчитайте относительную погрешность удельной постоянной

вращения [2]: $\sigma = \frac{\delta\alpha}{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\delta\varphi}{\Delta\varphi}\right)^2 + \left(\frac{\delta\ell}{\ell}\right)^2 + \left(\frac{\delta c}{c}\right)^2}$. В данной работе

принять $\delta\varphi=0,04$; $\delta\ell=0,001\text{дм}$; $\delta C=1\%$.

4.9. Рассчитайте абсолютную погрешность удельной постоянной вращения[2]: $\Delta\alpha=\alpha_{\text{рас.}}\cdot\sigma$.

4.10. Запишите конечный результат для удельной постоянной вращения:

$$\alpha=\alpha_{\text{рас.}}\pm\Delta\alpha.$$

4.11. Рассчитайте относительную погрешность определения концентрации раствора глюкозы:

$$\frac{\delta C}{C} = \sqrt{\left(\frac{\delta\varphi}{\Delta\varphi}\right)^2 + \left(\frac{\delta\alpha}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\delta\ell}{\ell}\right)^2}.$$

4.12. Рассчитайте абсолютную погрешность ΔC определения концентрации раствора глюкозы.

4.13. Запишите конечный результат для концентрации в кюветах №1 и №2:

$$C = C_{\text{рас}} \pm \Delta C.$$

4.14. Сделать основные выводы по выполненной работе.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 5.1. Какой свет называют линейно поляризованным?
- 5.2. Какие вещества называют оптически активными?
- 5.3. Как происходит вращение плоскости поляризации, чем оно обусловлено?
- 5.4. Что называют постоянной вращения, её физический смысл?
- 5.5. Как удельная постоянная вращения зависит от длины волны?
- 5.6. Что называют круговым двойным лучепреломлением?
- 5.7. В чем состоит основной принцип работы установки СМ-3?

6. ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 560с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики, т. 4. М.: Физматлит, 2002 г.
3. Черевко А.Г. Расчёт неопределённостей результата измерений в физическом эксперименте: Методические указания к лабораторному практикуму. Новосибирск: СибГУТИ, 2002 г.

ЗАДАЧИ

1.1 Определите толщину кварцевой пластинки, для которой угол поворота плоскости поляризации монохроматического света определенной длины волны

$\varphi = 180^\circ$. Удельное вращение в кварце для данной длины волны $\alpha = 0,52$ рад/мм. [6,04мм]

1.2 Пластика кварца толщиной $d_1=2$ мм, вырезанная перпендикулярно оптической оси кристалла, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света определенной длины волны на угол $\varphi_1=30^\circ$. Определите толщину d_2 кварцевой пластинки, помещенной между параллельными николями, чтобы данный монохроматический свет гасился полностью. [$d_2=6$ мм]

2.1 Определите массовую концентрацию C сахарного раствора, если при прохождении света через трубку длиной $\ell=20$ см с этим раствором плоскость поляризации света поворачивается на угол $\varphi=10^\circ$. Удельное вращение $[\alpha]$ сахара равно $1,17 \cdot 10^{-2}$ рад·м²/кг. [74,8 кг/м³]

2.2 Раствор глюкозы с массовой концентрацией $C_1=0,21$ г/см³, находящийся в стеклянной трубке, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света, проходящего через раствор, на угол $\varphi_1=24^\circ$. Определите массовую концентрацию C_2 глюкозы в другом растворе в трубке такой же длины, если он поворачивает плоскость поляризации на угол $\varphi_2=18^\circ$. [157 кг/м³]

3.1 Плоскополяризованный монохроматический свет, прошедший через поляризатор, оказывается полностью погашенным. Если же на пути света поместить кварцевую пластинку, то интенсивность прошедшего через поляризатор света уменьшится в 3 раза (по сравнению с интенсивностью света, падающего на поляризатор). Принимая удельное вращение в кварце $[\alpha] = 0,52$ рад/мм и пренебрегая потерями света, определите минимальную толщину кварцевой пластинки. [1,19 мм]

3.2 Пластика кварца толщиной $d=2$ мм, вырезанную перпендикулярно оптической оси, поместили между параллельными николями, в результате чего плоскость поляризации света повернулась на угол $\varphi=53^\circ$. Какова должна быть толщина пластинки, чтобы монохроматический свет, с которым производился опыт, не прошел через анализатор?

4.1 Никотин (чистая жидкость), содержащийся в стеклянной трубе длиной $\ell=8$ см, вращает плоскость поляризации желтого света натрия на угол $\varphi=136,6^\circ$. Плотности никотина $\rho=1,01$ г/см³. Определить удельное вращение $[\alpha]$ никотина.

4.2 Раствор глюкозы с концентрацией $C_1=0,28$ г/см³, налитый в стеклянную трубку, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света, проходящего через этот раствор, на угол $\varphi=32^\circ$. Определить концентрацию C_2 глюкозы в другом растворе в трубке такой же длины, если он вращает плоскость поляризации на угол $\varphi_2=24^\circ$.

5.1 Угол поворота плоскости поляризации желтого света натрия при прохождении через трубку с раствором сахара $\varphi_2=40^\circ$. Длина трубки $\ell=15$ см. Удельное вращение сахара $[\alpha]=66,5$ град/(дм·г/см³). Определить концентрацию C сахара в растворе.

5.2 Определите массовую концентрацию C раствора миндальной кислоты, если при прохождении света через трубку длиной $\ell = 15$ см с этим раствором плоскость поляризации света поворачивается на угол $\varphi = 400^\circ$. Удельное вращение $[\alpha]$ равно 156 град/дм.

6.1 Пластика кварца толщиной $d_1 = 2$ мм, вырезанная перпендикулярно оптической оси кристалла, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света определенной длины волны на угол $\varphi_1 = 30^\circ$. Определите толщину d_2 кварцевой пластинки, которая поворачивает плоскость поляризации на угол $\varphi_2 = 67,5^\circ$.

6.2 Раствор глюкозы с концентрацией $C_1 = 0,50$ г/см³, налитый в стеклянную трубку, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света, проходящего через этот раствор, на угол $\varphi = 53,5^\circ$. Определить концентрацию C_2 глюкозы в другом растворе в трубке такой же длины, если он вращает плоскость поляризации на угол $\varphi_2 = 15^\circ$.

РАБОТА 7.5

ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Провести экспериментальную проверку закона Малюса. Определить коэффициент поглощения электромагнитных волн поляридом.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Следствием теории Максвелла является поперечность световых волн: векторы напряженностей электрического \mathbf{E} и магнитного \mathbf{H} полей волны взаимно перпендикулярны и колеблются перпендикулярно вектору скорости \mathbf{v} распространения волны (перпендикулярно лучу) (рис.1).

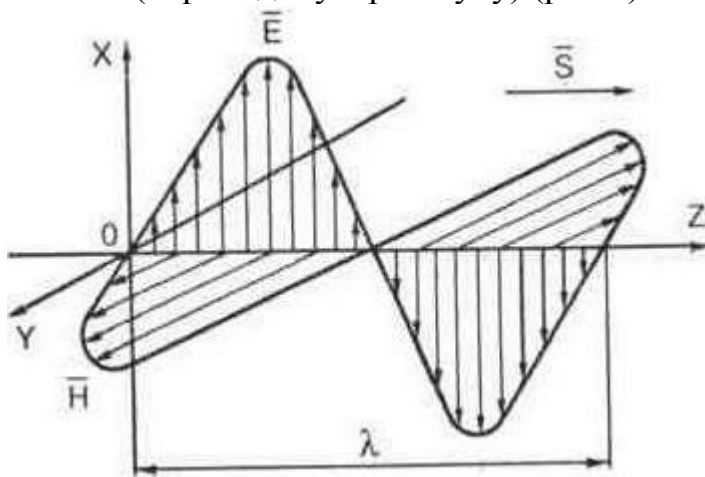


Рис.1

Электромагнитная волна. \mathbf{E} - вектор электрического поля, \mathbf{H} - вектор магнитного поля, \mathbf{S} - направление распространения электромагнитной волны, λ - длина волны

Свет, у которого направления колебаний вектора электрического поля \mathbf{E} упорядочены каким-либо образом, называется поляризованным. Электромагнитная волна, вектор \mathbf{E} которой колеблется в одном направлении, называется плоско (линейно) поляризованной. У такой волны вектор \mathbf{E} лежит все время в одной плоскости, которая называется плоскостью колебаний или плоскостью поляризации, а конец вектора \mathbf{E} описывает в пространстве прямую линию. Волна является циркулярно поляризованной, если конец вектора \mathbf{E} описывает в пространстве окружность. Выбор вектора \mathbf{E} для характеристики поляризации обусловлен тем, что при действии света на вещество основное влияние оказывает электрическое поле волны, которое действует на электроны атомов вещества. Поскольку свет представляет собой электромагнитное излучение множества атомов, которые излучают независимо друг от друга, то световая волна, излучаемая телом в целом, характеризуется всевозможными равновероятными колебаниями вектора электрического поля. Равномерное распределение векторов \mathbf{E} объясняется большим числом атомов. Такой свет называется естественным.

Естественный свет можно представить в виде суммы двух некогерентных линейно поляризованных волн с взаимно перпендикулярными векторами \mathbf{E} и имеющих одинаковую интенсивность. Частично поляризованным называется

свет, если в нём есть преимущественное направление колебаний электрического вектора. Частично поляризованный свет можно рассматривать как смесь одновременно распространяющихся в одном и том же направлении естественного и линейно поляризованного света.

Поляризацией света называется выделение линейно или циркулярно поляризованного света из естественного или частично поляризованного. Для этой цели используются специальные устройства, называемые поляризаторами, которые пропускают колебания только определенного направления. Для определения характера и степени поляризации используют устройства, называемые анализаторами. Поляризатор можно использовать в качестве анализатора. Поляризатор и анализатор чаще всего идентичны по устройству, поэтому для них существует общее название – поляроиды. В качестве поляроидов часто используются кристаллы турмалина, исландского шпата.

Если на поляризатор падает естественный свет, то интенсивность проходящей волны **не изменяется** при вращении анализатора вокруг направления падающего луча вследствие того, что в естественном свете ни одно из направлений плоскости поляризации (плоскости колебаний) не является преобладающим. На выходе из поляроида имеем линейно поляризованную волну (рис. 2) с интенсивностью равной половине интенсивности естественного света (коэффициент поглощения света в поляроиде предполагается незначительным).

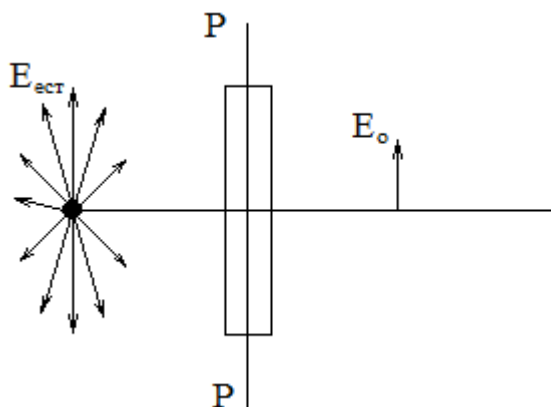


Рис. 2

Получение линейно поляризованного света с помощью поляризатора

Здесь E_0 вектор напряженности электрического поля линейно поляризованной волны. У естественного света направление векторов $E_{ест}$ равновероятны. Через поляризатор проходят только компоненты волн с векторами параллельными оптической оси P-P поляризатора, E_0 вектор напряженности электрического поля линейно поляризованной волны. При отсутствии отражения и поглощения в поляризаторе интенсивность поляризованного света I_0 составляет половину интенсивности естественного света $I_{ест}$ от падающей волны.

Если на пути линейно поляризованного света поставить второй поляризатор-анализатор то через него пройдет лишь волна с вектором электрического поля параллельным оптической оси P- P кристалла $E_{||} = E_0 \cos \varphi$, где φ угол между

оптическими осями Р - Р и Р'- Р' поляризатора и анализатора соответственно (рис. 3).

Так как интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды волны, то интенсивность прошедшей через анализатор волны I пропорциональна квадрату косинуса угла φ между оптическими осями кристаллов поляризатора и анализатора и мы получаем формулу **закона Малюса**

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

который формулируется следующим образом **отношение интенсивностей электромагнитной волны на входе и на выходе анализатора пропорционально квадрату косинуса угла между плоскостями колебаний поляризатора и анализатора.**

Пусть $\varphi = 0$, а $\cos^2 \varphi = 1$, тогда $I = I_0$. В реальном анализаторе $I < I_0$ на величину ΔI т.к. часть интенсивности теряется при поглощении и отражении.

Величину потерь можно определить как $\Delta I = I_0 - I$, Коэффициент относительных потерь обозначим как $k = \frac{\Delta I}{I_0}$, тогда подставив в предыдущее

уравнение получим $k \cdot I_0 = I_0 - I$,

С учетом поглощения света анализатором закон Малюса записывается следующим образом:

$$I = I_0 (1-k) \cos^2 \varphi, \quad (3)$$

где k - коэффициент потерь анализатора, $1-k$ - его коэффициент пропускания, который и является коэффициентом пропорциональности в формуле закона Малюса, φ - угол между плоскостями поляризации поляризатора и анализатора. Коэффициент потерь анализатора показывает, какая часть световой энергии задерживается анализатором, а коэффициент пропускания – какая часть энергии проходит сквозь анализатор.

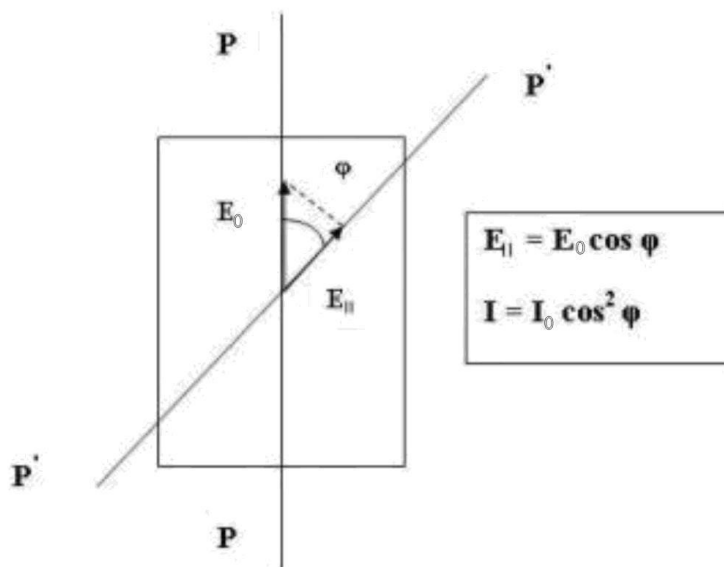


Рис. 3

I_0 - интенсивность линейно поляризованного света, E_0 - вектор напряженности электрического поля линейно поляризованной волны падающей на второй кристалл. Вектор напряженности электрического поля $E_{||}$ и I интенсивность

волны, прошедшей через кристалл анализатора, зависят от угла ϕ между оптическими осями Р-Р поляризатора и Р'-Р' анализатора.

Экспериментальная проверка закона Малюса заключается в установлении линейной зависимости интенсивности света, прошедшего через анализатор, от квадрата косинуса угла между оптическими осями поляризатора и анализатора.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Для проверки закона Малюса в лабораторном практикуме используется следующая установка. Установка состоит из источника света И, диафрагмы Д, поляризатора П, анализатора А, фотоприемника ФП и микроамперметра $\mu\text{А}$. Схема установки изображена на рис. 4.

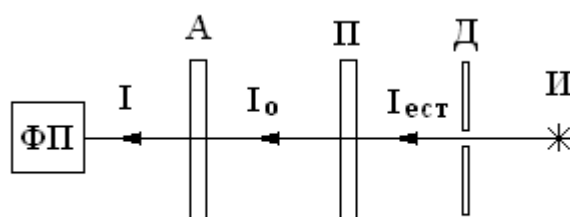


Рис. 4

Структурная схема лабораторной установки для проверки закона Малюса. И- источник естественного света, Д- диафрагма, П- поляризатор, А- анализатор, ФП- фотоприемник, $\mu\text{А}$ - микроамперметр.

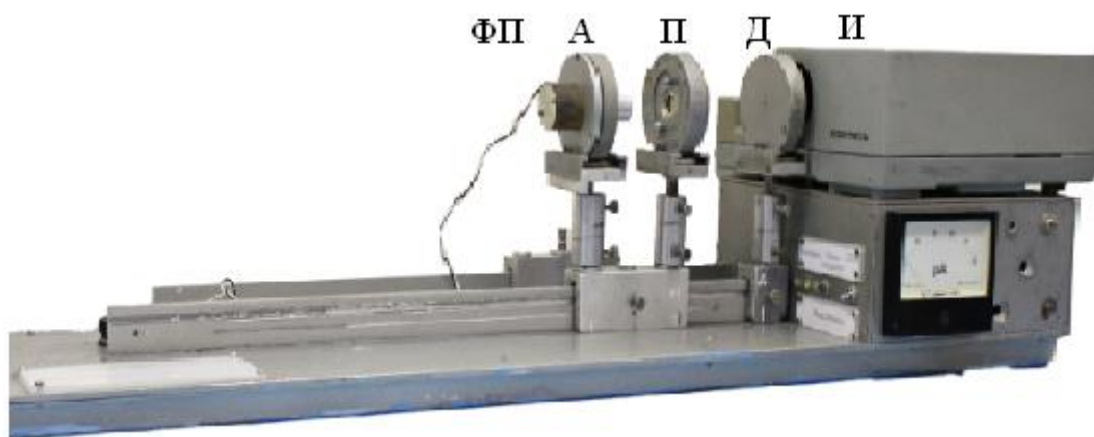


Рис. 5

Экспериментальная установка.

Источником света служит галогенная лампа И. Узкий световой пучок формируется при помощи диафрагмы, установленной на оптической скамье рядом с источником света, затем он поляризуется поляризатором и проходит через анализатор и регистрируется фотоприемником. Фотоприемником является кремниевый фотодиод, преобразующий свет в электрический ток. Ток фотодиода пропорционален интенсивности световой волны и измеряется микроамперметром $\mu\text{А}$. Поляризатор и анализатор закреплены на держателях и могут вращаться в вертикальной плоскости вокруг оптической оси установки.

Измерение интенсивности света в данной работе заменяется измерением фототока в фотоприемнике. Обоснуем данную замену. Известно, что освещенность поверхности $E = I_c / r^2 \cos \alpha$, где I_c - сила света источника, r - расстояние от источника до освещаемой поверхности, α - угол падения лучей на поверхность. Поскольку угол падения $\alpha = 0$ (свет падает по нормали к поверхности), то $E = I_c / r^2$.

Освещенность поверхности E пропорциональна световому потоку Φ , а световой поток пропорционален потоку энергии переносимому волной и, следовательно, пропорционален интенсивности волны $E \sim \Phi \sim I$, $I \sim I_c / r^2$. Поэтому для двух расстояний r_1 и r_2 выполняется соотношение $I_1 / I_2 = r_2^2 / r_1^2$. Если ток в фотоприемнике пропорционален интенсивности света $i \sim I$, то должно выполняться соотношение $i_1 / i_2 = r_2^2 / r_1^2$. Если данное соотношение выполняется, то измерение интенсивностей можно заменить измерением фототоков на фотоприемнике.

Закон Малюса (3) можно переписать следующим образом:

$$I / I_0 = (1 - k) \cos^2 \varphi . \quad (4)$$

Здесь I интенсивность света на выходе анализатора. Поскольку при прохождении поляризатора не происходит полной поляризации света то необходимо вычесть из измеренных интенсивностей интенсивность неполяризованного света I_H .

$$I = \langle I_0 \rangle - I_H , \quad (5)$$

$$I_0 = I_{0\varnothing} - I_H , \quad (6)$$

где I_0 интенсивность света на входе в анализатор, $I_{0\varnothing}$ - измеренная интенсивность света на входе в анализатор, $\langle I_0 \rangle$ среднее значение измеренной интенсивности света на выходе анализатора, I интенсивность света на выходе анализатора, I_H - интенсивность неполяризованного света. Тогда закон Малюса (4) с учетом выражений (5) и (6) запишется в следующем виде:

$$\frac{I}{I_0} = (1 - k) \cos^2 \varphi . \quad (7)$$

Поскольку фототоки пропорциональны интенсивностям света, то выражение приобретет следующий вид:

$$\frac{\langle i_0 \rangle - i_H}{i_{0\varnothing} - i_H} = (1 - k) \cos^2 \varphi . \quad (8)$$

Для вычисления отношения интенсивностей из экспериментальных данных следует пользоваться следующей формулой.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\langle i_0 \rangle - i_H}{i_{0\varnothing} - i_H} . \quad (9)$$

4. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Проверка закона освещенности.

4.1. Соберите схему для измерений. Для этого уберите поляризатор с оптической скамьи на запасной штатив.

4.2. Включите питание источника света и фотоприемника тумблерами «220 В» и «Фотодиод».

4.3. Измерить фототок i на минимальном расстоянии r_1 , затем переместите фотоприемник на 8-12 см от диафрагмы r_2 . Используйте метки на рейтерах оптической скамьи.

4.4. Расстояния выбирайте таким, чтобы ток i_1 при удалении фотоприемника на r_1 был в первой четверти шкалы микроамперметра, а ток i_2 при удалении фотоприемника на r_2 в последней трети шкалы микроамперметра.

4.5. Вычислите и сравните отношения фототоков i_1 / i_2 квадратов расстояний $(r_2 / r_1)^2$ и сделайте вывод о допустимости замены измерений интенсивностей света измерениями соответствующих токов фотоприемника.

Экспериментальная проверка закона Малюса.

4.6. Установите расстояние между фотоприемником и диафрагмой r_1 так, чтобы ток микроамперметра был в последней трети его измерительной шкалы. Закрепите штатив фотоприемника с анализатором нижним стопорным винтом штатива. Запишите данное значение фототока $i_{0э}$, соответствующее интенсивности света на входе в анализатор.

4.7. Снимите поляризатор с запасного штатива и установите его на штатив оптической скамьи перед анализатором в соответствии с рис. 4. Измерительная шкала поляризатора должна быть обращена к шкале анализатора. Закрепите штатив с поляризатором нижним стопорным винтом штатива.

4.8. Вращением анализатора вокруг оптической оси установите его на отметку 0 градусов шкалы.

4.9. Затем плавно вращая поляризатор вокруг оптической оси установите такое его положение, при котором регистрируется максимальный ток фотоприемника. В этом случае плоскости колебаний поляризатора и анализатора совпадают $\varphi=0$ градусов (φ угол между оптическими осями Р-Р поляризатора и Р'-Р' анализатора, см. рис. 3).

4.10. Вращая анализатора по часовой стрелке от 0 до 90 градусов его измерительной шкалы с шагом в 10 градусов, снимите **зависимость фототока от угла φ** . Запишите данные измерений в таблицу №1 как прямые измерения (столбец №2).

4.11. Запишите отдельно значение фототока i_n при угле $\varphi=90$ градусов между оптическими осями поляризатора и анализатора (i_n – **значение фототока, соответствующее неполяризованному свету, регистрируемое фотоприемником**).

4.12. Верните анализатор в исходное положение по углу $\varphi=0$.

4.13. Вращая анализатора против часовой стрелке от 0 до 90 градусов его измерительной шкалы с шагом в 10 градусов, снимите **зависимость фототока от угла φ** . Запишите данные измерений в таблицу №1 как обратные измерения (столбец №3).

4.14. Выключите питание, приведите лабораторную установку в исходное состояние.

4.15. Вычислите средние значения фототоков по результатам прямого и обратного измерений для каждого угла φ от 0 до 90 градусов. Результаты вычислений запишите в таблицу №1 (столбец №4).

4.16. Вычислите значения отношения интенсивностей $\frac{I}{I_0}$ по формуле (9) для всех углов φ . Результаты вычислений запишите в таблицу №1 (столбец №6).

4.17. Вычислите значения квадратов косинусов $\cos^2\varphi$ всех углов φ . Результаты вычислений запишите в таблицу №1 (столбец №5).

4.18. Постройте график зависимости отношения интенсивностей света $\frac{I}{I_0}$ от квадрата косинуса $\cos^2\varphi$ всех углов φ .

Таблица №1

φ , град.	I_0 , мкА	I , мкА	$\cos\varphi$	$\cos^2\varphi$	$\frac{I}{I_0}$
0					
10					
20					

4.19. Аппроксимируйте полученный график прямой линией и по тангенсу угла наклона к оси абсцисс вычислите значения коэффициента пропускания **1-k** анализатора. Вычислите затем значение коэффициента поглощения **k** анализатора.

4.20. Рассчитать абсолютную погрешность измерения величины $\frac{I}{I_0}(\varphi)$ используя формулу (9) и полагая класс точности микроамперметра К=1%.

4.21. Сделать основные выводы по выполненной работе.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое поляризация электромагнитных волн? Как получить линейно поляризованный свет?

2. Возможна ли поляризация для продольных волн? Что называется естественно поляризованным светом?

3. Как получается поляризованный свет в лабораторной установке? Какое назначение поляризатора и анализатора в лабораторной установке?

4. Что такое свет поляризованный по кругу и по эллипсу?

5. Сформулируйте закон Малюса. Объясните, почему при прохождении естественного света через поляризатор интенсивность на выходе поляризатора не зависит от угла его поворота.

6. Что такое степень поляризации? Каким образом измеряется эта величина на лабораторной установке?

7. Расскажите о способе экспериментальной проверки закона Малюса в лабораторной работе.

6. ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 560с.
2. Черевко А.Г. Расчёт неопределённостей результата измерений в физическом эксперименте: методические указания к лабораторному практикуму, Новосибирск: СИБГУТИ, 2002г.

ЗАДАЧИ

- 1.1 Степень поляризации частично поляризованного света составляет 0.75. Определите отношение максимальной интенсивности света, пропускаемого анализатором, к минимальной.
- 1.2 Определите степень поляризации P света, который представляет собой смесь поляризованного света с плоскополяризованным, если интенсивность поляризованного света равна интенсивности естественного.
- 2.1 Определите степень поляризации частично поляризованного света, если амплитуда электрического поля, соответствующая максимальной интенсивности света, в 3 раза больше амплитуды, соответствующей его минимальной интенсивности.
- 2.2 Определите степень поляризации P света, который представляет собой смесь поляризованного света с плоскополяризованным, если интенсивность поляризованного света в 5 раз больше интенсивности естественного.
- 3.1 Угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора составляет 30° . Определите изменение интенсивности прошедшего через них света, если угол между главными плоскостями равен 45° .
- 3.2 Интенсивность естественного света, прошедшего через два николя, уменьшилась в 8 раз. Пренебрегая поглощением света, определите угол между главными плоскостями николей.
- 4.1 Определите, во сколько раз ослабится интенсивность света, прошедшего через два николя, расположенные так, что угол между их главными плоскостями 60° , а в каждом из николей теряется 8% интенсивности падающего на них света.
- 4.2 Определите степень поляризации частично поляризованного света, если амплитуда электрического поля, соответствующая максимальной интенсивности света, в 2 раза больше амплитуды, соответствующей его минимальной интенсивности.

5.1 Степень поляризации частично поляризованного света составляет 0.85. Определите отношение максимальной интенсивности света, пропускаемого анализатором, к минимальной.

5.2 Определите степень поляризации P света, который представляет собой смесь поляризованного света с плоскополяризованным, если интенсивность поляризованного света в 4 раза больше интенсивности естественного.

6.1 Угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора составляет 35° . Определите изменение интенсивности прошедшего через них света, если угол между главными плоскостями равен 55° .

6.2 Определите, во сколько раз ослабится интенсивность света, прошедшего через два николя, расположенные так, что угол между их главными плоскостями 50° , а в каждом из николей теряется 9% интенсивности падающего на них света.

РАБОТА 7.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН, ПРИ ИХ ОТРАЖЕНИИ ОТ ДИЭЛЕКТРИКА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определить угол Брюстера. На основе экспериментальных данных рассчитать абсолютный показатель преломления стекла.

4. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Пусть на границу раздела двух диэлектриков падает под углом α , не равным нулю, естественный свет, то отраженная и преломленная световая волна будут частично поляризованы. Векторы напряженности световой волны можно разложить по базису: компонент перпендикулярной и параллельной плоскости падения. На рис.1 изображены параллельные (стрелками) и перпендикулярные (точками) составляющие векторов напряженности электрического поля. E_0 для падающей волны, E_1 для отраженной, E_2 для преломленной.

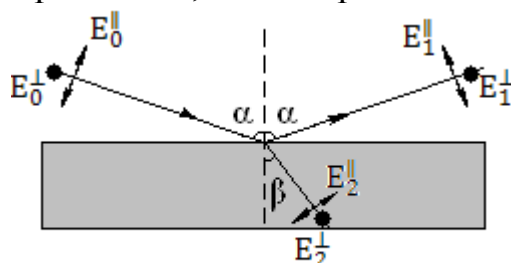


Рис. 1

Значения этих величин следуют из условий на границе раздела двух сред для электрического и магнитного полей световой волны. Формулы выражающие параллельные и перпендикулярные компоненты амплитуды вектора E преломленной и отраженной волны, через соответствующие компоненты падающей названы **формулами Френеля**.

$$E_1^\perp = -E_0^\perp \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (1) \quad E_1^\parallel = E_0^\parallel \frac{\operatorname{tg}(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}(\alpha + \beta)} \quad (2)$$

$$E_2^\perp = E_0^\perp \frac{2\cos\alpha \cdot \sin\beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (3) \quad E_2^\parallel = E_0^\parallel \frac{2\cos\alpha \cdot \sin\beta}{\sin(\alpha + \beta) \cdot \cos(\alpha - \beta)} \quad (4)$$

Так как интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды ($I \sim E^2$) и в естественном (неполяризованном) свете все направления колебаний электрического поля равновероятны, тогда естественный свет можно представить как сумму двух линейно поляризованных волн равной интенсивности, в которых колебания происходят соответственно параллельно и перпендикулярно плоскости падения.

$$I_0 = \frac{1}{2} (I_0^\parallel + I_0^\perp) \quad (5)$$

Выражения для интенсивностей можно записать в виде:

$$I_1^\perp = \frac{1}{2} I_0 \left[\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \right]^2 \quad (6) \quad I_1^\parallel = \frac{1}{2} I_0 \left[\frac{\operatorname{tg}(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}(\alpha + \beta)} \right]^2 \quad (7)$$

$$I_2^\perp = \frac{1}{2} I_0 \left[\frac{2 \cos \alpha \cdot \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \right]^2 \quad (8) \quad I_2^\parallel = \frac{1}{2} I_0 \left[\frac{2 \cos \alpha \cdot \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta) \cdot \cos(\alpha - \beta)} \right]^2 \quad (9)$$

В основе механизма поляризации лежит взаимодействие электромагнитной волны с валентными электронами диэлектрика.

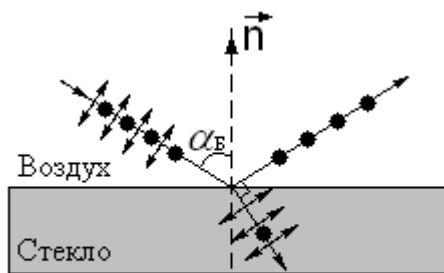


Рис. 2

Схема поляризации при отражении света от диэлектрической пластины под углом Брюстера.

Для некоторого угла падения α_B для которого выполняется соотношение $(\alpha_B + \beta) = \frac{\pi}{2}$ параллельная составляющая интенсивности отраженного луча равна нулю $I_1^\parallel = 0$. Используя закон преломления можно связать α_B с показателями преломления сред. Брюстером впервые было показано, что степень поляризации обеих волн, при условии:

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n_C / n_B, \quad (10)$$

где n_B – абсолютный показатель преломления той среды, из которой проходит электромагнитная волна, n_C – абсолютный показатель преломления диэлектрика. Величина α_B , входящая в закон Брюстера (10), носит название «Угол Брюстера».

Экспериментальное определение величины α_B и расчет значения n_C составляют основное содержание данной лабораторной работы. В условиях проводимого эксперимента, электромагнитная волна падает на диэлектрик из воздуха, для которого среднее значение абсолютного показателя преломления (для электромагнитных волн видимого диапазона - 380 ÷ 760 нм) составляет величину $n_B = 1,000292$. В пределах точности эксперимента, можно принять значение $n_B \approx 1$. В качестве диэлектрика используется набор плоско-параллельных стеклянных пластин с абсолютным показателем преломления n_C , вплотную прижатых одна к другой. Такое устройство обычно называют стеклянной стопой. С учетом сказанного, формула (1) преобразуется к виду:

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n_C. \quad (12)$$

4. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Принципиальная схема установки показана на рис. 3. Электромагнитная волна от источника «И» падает на стеклянную стопу «П» и отражается от нее поляризуясь. Для анализа отраженного поляризованного излучения используется поляроид «А», представляющий собой пленку поливинилена толщиной 0,5 мм. Пройдя через поляроид «А», электромагнитная волна падает на поверхность фотоприемника, в качестве которого используется кремневый фотодиод «ФП». К фотоприемнику подключен микроамперметр « μA », который служит для регистрации тока, возникающего в цепи, под воздействием на фотоприемник поляризованной электромагнитной волны. Поляроид «А» и фотоприемник «ФП» объединены в один блок «Б», способный поворачиваться в вертикальной плоскости вокруг горизонтальной оси.

Стеклянная стопа «П» закреплена на вращающейся платформе горизонтально расположенного гониометра – прибора, предназначенного для отсчета углов падения волн α . Как и блок «Б», стопа «П» может вращаться вокруг вертикальной оси. Стопа «П» в данном эксперименте выполняет функцию **поляризатора** электромагнитного излучения, поляроид «А» служит **анализатором**.

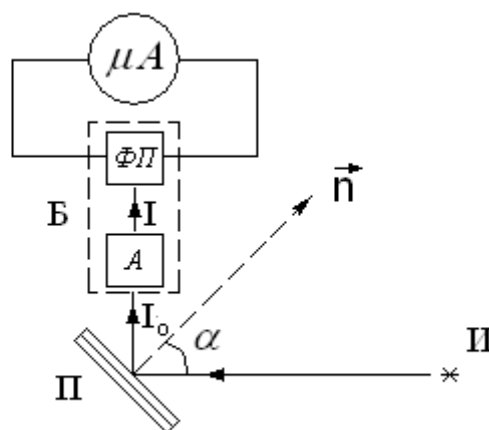


Рис. 3
Схема лабораторной установки.



Экспериментальная установка.

Пусть интенсивность электромагнитной волны, поляризованной при отражении от стопы «П» (рис. 3) равна I_0 , а направление колебаний вектора E в этой волне составляет угол φ с **плоскостью колебаний** анализатора. В этом

случае, согласно закону Малюса, интенсивность электромагнитной волны падающей на поверхность фотоприемника «ФП»

$$I = I_0(1-k) \cos^2 \varphi, \quad (13)$$

где k – коэффициент потерь интенсивности электромагнитной волны анализатором. Согласно (13),

при $\varphi=0$, I стремится к I_{max} ;

при $\varphi=\pi/2$, I стремится к I_{min} ,

Введем параметр, который назовем «**степенью поляризации**» электромагнитной волны, при ее отражении от стопы «П»

$$P(\alpha) = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}. \quad (14)$$

Анализ формулы (14) показывает, что при $\alpha = \alpha_B$, функция $P(\alpha)$ должна иметь **максимум**.

Как было показано в работе (7.5), интенсивность электромагнитной волны в условиях подобного эксперимента пропорциональна величине тока $I \sim i$ фотоприемника «ФП». Следовательно, функцию $P(\alpha)$ можно представить в следующем виде:

$$P(\alpha) = \frac{i_{max} - i_{min}}{i_{max} + i_{min}}, \quad (15)$$

где смысл индексов у значений тока тот же, что и в формуле (14).

4. ЗАДАНИЕ

4.1. Определение угла Брюстера.

4.1.1. Плавно поворачивая платформу гониометра, на которой закреплена стопа «П» (рис. 2), за рукоятку платформы, установить угол падения светового пучка на стопу $\alpha = 30^\circ$ по лимбу гониометра. **За стопу платформу не вращать, прикасаться руками к стопе категорически запрещается.**

4.1.2. Включить тумблеры «220 В» и «фотодиод».

4.1.3. Вращая блок «Б» (рис. 2) вокруг вертикальной оси за **рукоятку** платформы блока, добиться максимального отклонения стрелки микроамперметра « μA ».

4.1.4. **Плавно** поворачивая **анализатор** «А» вокруг оси, добиться повторного максимального отклонения стрелки микроамперметра. Записать в таблицу измерений величину фототока i_{max} .

4.1.5. Повернуть анализатор вокруг оси на угол $\pi/2$. Записать в таблицу измерений величину фототока i_{min} .

4.1.6. Увеличивая угол α от 30° до 70° через 5° повторить измерения токов фотоприемника согласно п.п. 4.1.3 + 4.1.5, в интервале от 50° до 60° приращение угла α задавать через $2,5^\circ$.

4.1.7. **Выключить тумблеры «220 В» и «фотодиод».**

4.1.8. Подставляя значения i_{\max} и i_{\min} в формулу (15), вычислить величины $P(\alpha)$, для всех значений угла α .

4.1.9. Данные занесите в таблицу №1.

Таблица №1

α град	$i_{\max}, \text{мкА}$	$i_{\min}, \text{мкА}$	P

4.1.10. Построить зависимость $P(\alpha)$. Определить по графику α_B угол Брюстера.

4.2. Подставляя значения угла Брюстера α_B в формулу (2), вычислить абсолютный показатель преломления стекла n_c .

4.3. Определить тип среды пользуясь таблицей № 2. Рассчитайте относительную погрешность измерений. (Примите за истинное значение имеющееся табличное значение из таблицы № 2)

4.4. Сделайте основные выводы по выполненной работе.

Таблица № 2

Тип среды	Среда	Температура, $^\circ\text{C}$	Значение
Оптические стёкла	ЛК3 (Лёгкий крон)	20	1,4874
	K8 (Крон)	20	1,5163
	ТК4 (Тяжёлый крон)	20	1,6111
	СТК9 (Сверхтяжёлый крон)	20	1,7424
	Ф1 (Флинт)	20	1,6128
	ТФ10 (Тяжёлый флинт)	20	1,8060
	СТФ3 (Сверхтяжёлый флинт)	20	2,1862

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1. Дайте понятие поляризации электромагнитных волн.

5.2. В чем сущность закона Брюстера?

5.3. Каково назначение **поляризатора** и **анализатора** в данной работе?

5.4. Какие величины связывают формулы Френеля? Для какого света они применимы?

5.5. Дайте качественное объяснение механизма поляризации электромагнитной волны при ее взаимодействии с диэлектриком.

5.6 Сделайте вывод рабочей формулы $\text{tg } \alpha_B = n_c / n_v$.

5.7 Почему для угла Брюстера справедливо выражение $(\alpha_B + \beta) = \frac{\pi}{2}$

6. ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 560с
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. т.4. Оптика. Изд.3. М.,Физматлит, 2005г.
3. Яворский Б. М. и Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985 г.

ЗАДАЧИ.

- 1.1. Определите показатель преломления стекла, если при отражении от него света отраженный луч полностью поляризован при угле преломления 35° .
- 1.2. Предельный угол полного отражения для пучка света на границе кристалла каменной соли с воздухом равен 40.5° . Определите угол Брюстера при падении света из воздуха на поверхность этого кристалла.
- 2.1. Найти угол полной поляризации α_B при отражении света от стекла, показатель преломления которого $n=1.57$.
- 2.2. Под каким углом к горизонту должно находиться Солнце, чтобы его лучи, отраженные от поверхности озера были полностью поляризованы? Показатель преломления воды равен 1.33.
- 3.1. Найти показатель преломления диэлектрика, если при отражении от него света отраженный луч полностью поляризован при угле преломления 30° .
- 3.2. Найти угол полной поляризации α_B при отражении света от диэлектрика, показатель преломления которого $n=1.73$.
- 4.1. Предельный угол полного внутреннего отражения для некоторого вещества $\alpha=45^\circ$. Найти для этого вещества угол Брюстера полной поляризации.
- 4.2. Естественный свет падает на кристалл алмаза ($n=2.42$) под углом α_B полной поляризации. Найти угол преломления света .
- 5.1. Луч света проходит через жидкость, налитую в стеклянный ($n=1.5$) сосуд, и отражается от дна. Отраженный луч полностью поляризован при падении его на дно сосуда под углом $\alpha_B=42^\circ$. Найти показатель преломления жидкости. Под каким углом α должен падать на дно сосуда луч света, распространяющийся в этой жидкости, чтобы наступило полное внутреннее отражение?
- 5.2. Лучи естественного света проходят сквозь плоскопараллельную пластинку ($n=1.54$), падая на нее под углом α_B полной поляризации. Найти степень поляризации χ лучей, прошедших сквозь пластинку

- 6.1. Найти коэффициент отражения и степень поляризации χ_1 лучей отраженных лучей при падении естественного света на стекло ($n=1.5$) под углом $\alpha=45$ градусов. Какова степень поляризации χ_2 преломленных лучей.
- 6.2. Найти коэффициент отражения естественного света, падающего на стекло ($n=1.54$) под углом α_B полной поляризации. Найти степень поляризации χ лучей, прошедших в стекло.

Приложение1

Федеральное агентство связи
СибГУТИ

Кафедра физики

Лабораторная работа №7.1

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ»

Выполнил: студент гр. АБ-65
Иванов И. И.
Преподаватель :
Петров П.П.

Выполнение:

« » « » 2018
дата

подпись

Защита:

оценка

« » « » 2018
дата

подпись

Новосибирск 2018 г.

Приложение 2

Диапазоны длин волн видимого света

Цвет	Диапазон длин волн, нм
Фиолетовый	380-450
Синий	450-480
Голубой	480—500
Зелёный	500—560
Жёлтый	560—590
Оранжевый	590—620
Красный	620—760

Оптическое излучение с длиной волны менее 380 нм относится к УФ диапазону, с длиной волны более 760 нм относится к ИК диапазону.