

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

И.В. Грищенко
В.В. Лубский

**ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
И ФОТОМЕТРИЯ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ПО ФИЗИКЕ

Новосибирск

2020

И.В. Грищенко, В.В. Лубский. Волновые свойства электромагнитного поля и фотометрия: Учебное пособие по физике/СибГУТИ.–Новосибирск, 2020 г.–84 с.

Учебное пособие предназначено для ознакомления студентов с основными понятиями и явлениями волновой оптики фотометрии и служит руководством к выполнению соответствующих лабораторных работ. Пособие предназначено 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.т.н., доцент кафедры ЛС СибГУТИ В.М. Деревяшкин, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой физики СГУГиТ И.Н. Карманов

Утверждено редакционно-издательским советом СибГУТИ в качестве учебного пособия.

© Сибирский государственный
университет телекоммуникаций и
информатики, 2020 г.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
Лабораторная работа 7.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ	6
Лабораторная работа 7.2 ИЗМЕРЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ МЕТОДОМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ КОЛЕЦ НЬЮТОНА	20
Лабораторная работа 7.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ ФРАУНГОФЕРА	32
Лабораторная работа 7.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА ГЛЮКОЗЫ ПОЛЯРИМЕТРОМ	42
Лабораторная работа 7.5 ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА.....	53
Лабораторная работа 7.6 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН, ПРИ ИХ ОТРАЖЕНИИ ОТ ДИЭЛЕКТРИКА	64
Лабораторная работа 8.1 ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА ОСВЕЩЕННОСТИ	72
Приложение 1	82
Приложение 2	83

ВВЕДЕНИЕ

1. ЦЕЛЬ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ И ЕГО СТРУКТУРА

Целью данного учебного пособия является изучить и экспериментально исследовать интерференцию, дифракцию, поляризацию, вращение плоскости поляризации электромагнитных волн в диапазоне $380 \div 760$ нм, ознакомиться с основными принципами фотометрических измерений. А также освоить методику измерений на оптических приборах, физические принципы которых занимают сегодня все более важное место в волоконно-оптических системах связи. Лабораторные работы выполняются по индивидуальному графику, по бригадам. График выполнения работ может не совпадать с графиком лекций. Поэтому каждая лабораторная работа предваряется обширным теоретическим материалом, позволяющим студенту самостоятельно ознакомиться с изучаемым явлением.

Данное учебное пособие содержит лабораторные работы по изучению следующих явлений: интерференция света (лабораторные работы 7.1 и 7.2), дифракция света (лабораторная работа 7.3), поляризация света (лабораторные работы 7.4, 7.5 и 7.6). Кроме того, включена лабораторная работа 8.1 по фотометрии.

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, содержащийся в теоретическом введении к лабораторной работе и в рекомендованных учебниках.

2.2 Составить отчет, содержащий следующие разделы: а) титульный лист (смотрите [Приложение 1](#)); б) цель работы; в) краткая теория, которая включает в себя: основные определения и изучаемые законы, обоснование использования законов для вывода расчетной формулы, вывод расчетной формулы; г) описание лабораторной установки, включающее в себя схему установки с расшифровкой названий основных элементов; д) заготовки таблиц 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, какие графики надо нарисовать в данной работе и примерный вид этих графиков.

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 Должны быть полностью произведены все измерения, выполнены все расчеты, и все данные должны быть занесены в таблицы.

3.2 Должны быть построены графики с указанием физических величин и размерностей. Если требуется сравнение с экспериментальными данными 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 х 12 см. Графики выполняются на масштабной-координатной бумаге («миллиметровка»). Должны быть рассчитаны погрешности полученных величин, используя формулы, приведенные в разделе «ЗАДАНИЕ».

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

3.4 **После вывода** должны быть письменно выполнены ответы на контрольные вопросы.

3.5 Должны быть решены **задачи**, указанные преподавателем. Обычно номера задач соответствуют номеру бригады.

3.6 Должна пройти защита непосредственно у преподавателя результатов проделанной работы.

3.7 **Обязательно требуется подписать зачтенную работу у преподавателя**, проводившего занятие. Без подписи преподавателя работа считается незащищенной!

Лабораторная работа 7.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с явлением интерференции света. Методом бипризмы Френеля определить длину электромагнитной волны видимого диапазона.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Существует ряд явлений, в которых свет ведёт себя как поток частиц (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 значениями электрической и магнитной проницаемости ($\epsilon = \text{const}$, $\mu = \text{const}$), описывается функциями (см. рис.1):

$$\begin{aligned} E_y &= E_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0) \\ H_z &= H_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0), \end{aligned} \quad (1)$$

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, прошедшее от начала колебаний в источнике;

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

$\varphi = \omega t - kx + \varphi_0$ – фаза колебаний, зависящая от момента времени и координаты рассматриваемой точки пространства;

φ_0 – начальная фаза колебаний в точке с координатой $x = 0$.

Как видно из формул (1), колебания векторов напряжённости электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей в электромагнитной волне происходят в одной фазе. Их амплитуды однозначно связаны между собой формулой: $\sqrt{\epsilon\epsilon_0}E_0 = \sqrt{\mu\mu_0}H_0$. 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. **Интерференция** является результатом наложения двух или нескольких когерентных волн и сопровождается перераспределением их интенсивности в пространстве. 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.

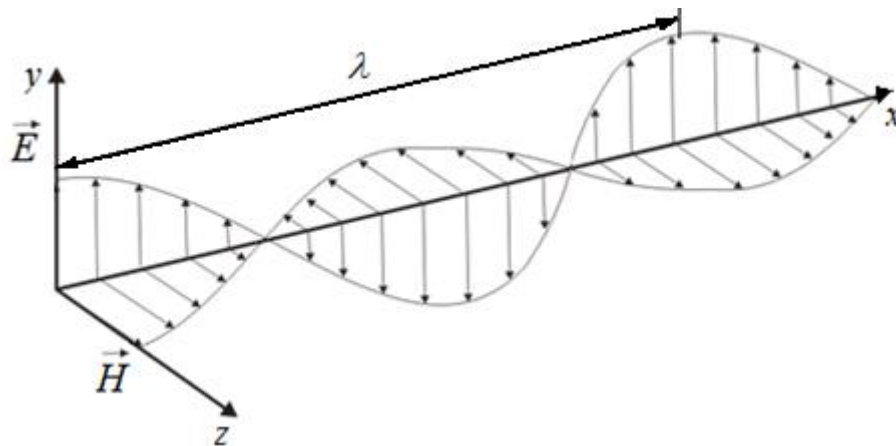


Рис.1
Строение плоской электромагнитной волны

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 (рис.2). Первый луч проходит из S_1 до точки M расстояние $|S_1M| = x_1$, второй луч из S_2 до точки M расстояние $|S_2M| = x_2$.

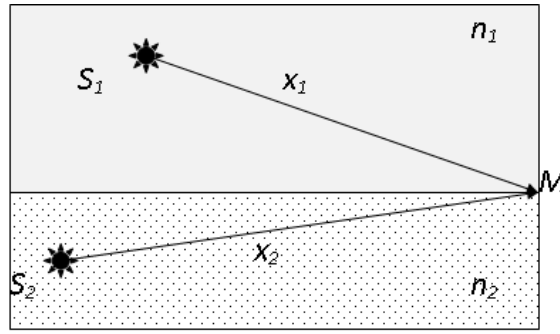


Рис.2

Схема интерференции двух волн

В точке M , 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 $I = \frac{n}{2} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_0^2$, где E_0 - амплитуда колебания напряжённости электрического поля \vec{E} суммарной электромагнитной волны (см. формулу (1)), n – показатель преломления среды.

Найдём I с помощью метода векторных диаграмм (рис. 3). Суть этого метода в следующем. Колебание изображается в виде вектора, длина которого равна амплитуде колебаний. Вектор вращается вокруг начала координат с угловой скоростью ω , численно равной циклической частоте колебаний. Проекция конца вектора на координатную ось будет изменяться со временем по закону синуса или косинуса угла поворота φ , соответствующего фазе колебаний. В точку M приходят две волны от источников S_1 и S_2 (рис.2). Тогда, согласно формуле (1), запишем:

$$\begin{aligned}\vec{E}_1 &= \vec{E}_{10} \cos(\omega_1 t - k_1 x_1 + \varphi_{01}) = \vec{E}_{10} \cos(\omega_1 t + \delta_1) \\ \vec{E}_2 &= \vec{E}_{20} \cos(\omega_2 t - k_2 x_2 + \varphi_{02}) = \vec{E}_{20} \cos(\omega_2 t + \delta_2),\end{aligned}\quad (2)$$

где $\delta_1 = -k_1 x_1 + \varphi_{01}$ и $\delta_2 = -k_2 x_2 + \varphi_{02}$.

В случае, если частоты колебаний равны между собой $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, разность фаз $\varphi_1 - \varphi_2 = k_2 x_2 - \varphi_{02} - k_1 x_1 + \varphi_{01}$ остается постоянной с течением времени. В этом случае все три вектора \vec{E}_0, \vec{E}_{10} и \vec{E}_{20} вращаются вокруг начала координат как единое целое. Такие волны называются **когерентными**. Существуют понятия **пространственной и временной когерентности**. Временная когерентность связана с разбросом значений модуля волнового вектора $|\vec{k}| = \frac{\omega}{v} = \frac{n\omega}{c}$, где v – фазовая скорость волны, c – скорость света в вакууме, $n = \frac{c}{v}$ – абсолютный показатель преломления среды. Пространственная когерентность связана с разбросом направлений вектора \vec{k} .

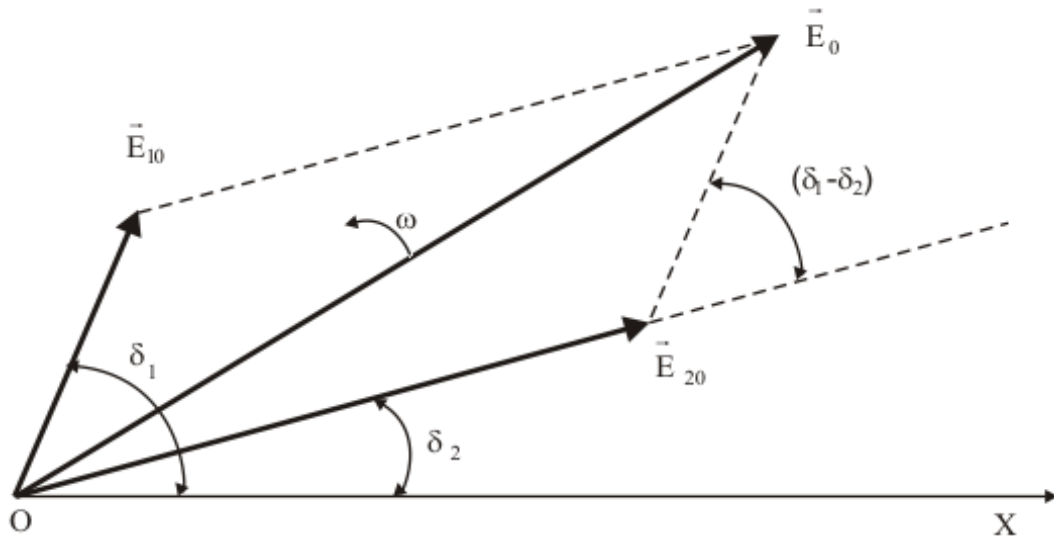


Рис. 3

Векторная диаграмма сложения двух колебаний

Согласно теореме косинусов (рис. 3):

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

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

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

Для когерентных волн интерференционный член в (4) $2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos(\delta)$ не равен нулю в среднем по времени. Потребуем, чтобы $\varphi_{01} = \varphi_{02}$, тогда:

$$\delta = k_2 x_2 - k_1 x_1 = \omega \left(\frac{x_2}{v_2} - \frac{x_1}{v_1} \right) = \frac{\omega}{c} (n_2 x_2 - n_1 x_1). \quad (5)$$

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 M , величину $L_2 = n_2 x_2$ - **оптической длиной пути** второго луча из S_2 до точки M , (рис. 2). Подставляем в (5), получаем:

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

где $\lambda_0 = c \cdot T = \frac{2\pi \cdot c}{\omega}$ - 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, изготовленные из одного куска стекла и имеющие малый преломляющий угол θ .

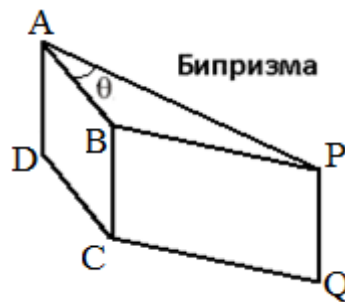


Рис.4
Бипризма Френеля

Обычно величина преломляющего угла θ не превышает нескольких десятков угловых минут. Свет падает на бипризму от щели «S», расположенной параллельно ребру «BC» (рис.5). Свет от источника S 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 (Рис.6). На экране «Э» происходит наложение когерентных световых пучков, и наблюдается интерференция в области PQ.

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.

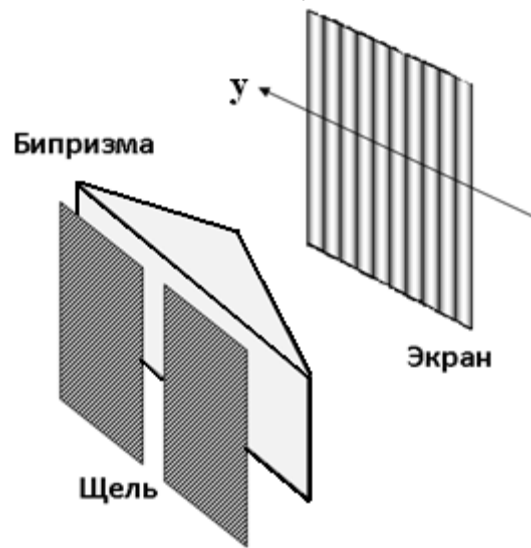


Рис. 5.

Схема наблюдения интерференции при помощи бипризмы Френеля

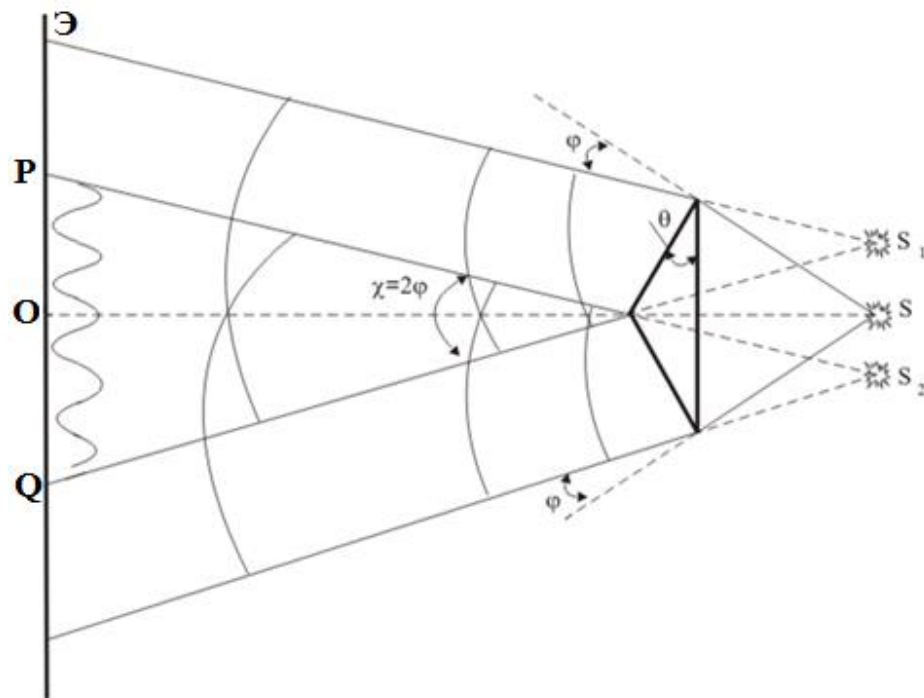


Рис. 6

Поле интерференции бипризмы Френеля

Найдём аналитическое выражение для определения длины волны λ . Пусть экран «Э» расположен нормально к оси симметрии (SO) измерительной установки (рис. 7). Пусть в точке М экрана наблюдается интерференционный максимум от двух плоских когерентных волн, распространяющихся из двух источников S_1 и S_2 вдоль направлений S_1M и S_2M . Расстояние между источниками равно l , а расстояние от источников до экрана равно L .

Оптическая разность хода Δ между лучами S_1M и S_2M в точке M в случае, если экран расположен достаточно далеко от источников и $l \ll L$, согласно рис.7:

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

Введём следующие обозначения (рис.7):

- расстояние между источниками $|S_1S_2| = \ell$,
- расстояние от источников до экрана «Э» $|OS| = L$,
- геометрическая разность хода лучей $|KS_2| = \Delta x$,
- расстояние от центра экрана до точки наблюдения интерференции M (координата точки M) $|OM| = y$.

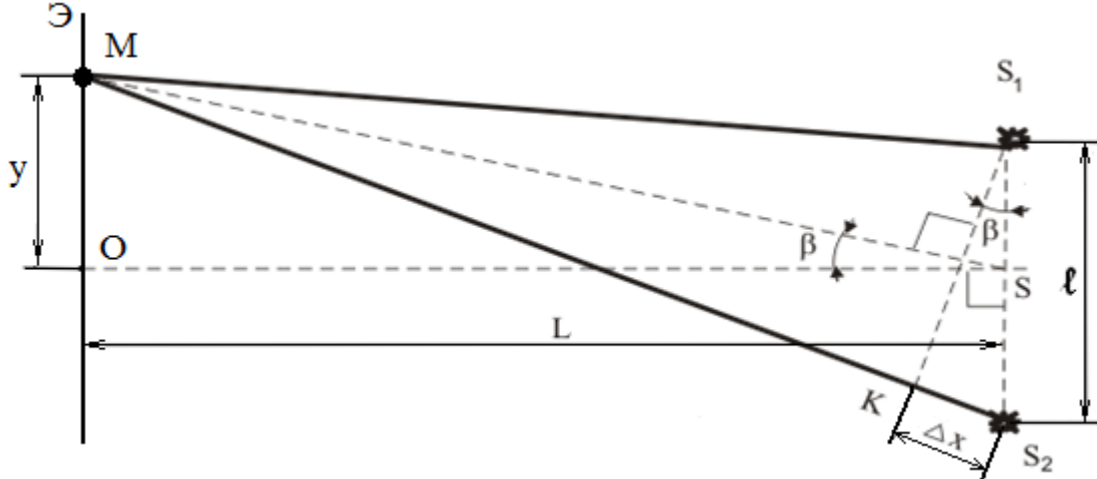


Рис.7

Схема интерференции от двух источников

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

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

$$y \approx L \cdot \beta.$$

(10)

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

$$y = \frac{L \cdot \Delta x}{\ell}.$$

(11)

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

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

$$y_k = \frac{L \cdot \Delta x_k}{\ell}.$$

(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.

$$y_m = \frac{L \cdot m \lambda_0}{n \cdot \ell}; \quad y_k = \frac{L \cdot k \lambda_0}{n \cdot \ell}. \quad (14)$$

Вычитая уравнения (14) почленно, получаем: $y_m - y_k = \frac{L \cdot \lambda_0 (m-k)}{n \cdot \ell}$.

Рассмотрим соседние максимумы, для которых $m = k+1$. Для этого случая вводится величина Δy , которая называется **шириной интерференционной полосы**.

$$y_{k+1} - y_k = \Delta y = \frac{L \cdot \lambda_0}{n \cdot \ell}. \quad (15)$$

Получим из (15) длину электромагнитной волны:

$$\lambda = \frac{\Delta y \cdot \ell}{L}, \quad (16)$$

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. 8). 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. 8) приходится N_1 делений измерительной шкалы R , а цена одного деления шкалы равна C , то величину Δy рассчитывают по формуле:

$$y = \frac{N_1 \cdot C}{N}. \quad (17)$$

В качестве примера на рис.8 на $N=3$ светлых полос приходится $N_1 = 20$ делений шкалы.

Для определения расстояния ℓ между мнимыми источниками S_1 и S_2 используют линзу и микроскоп (рис. 9).

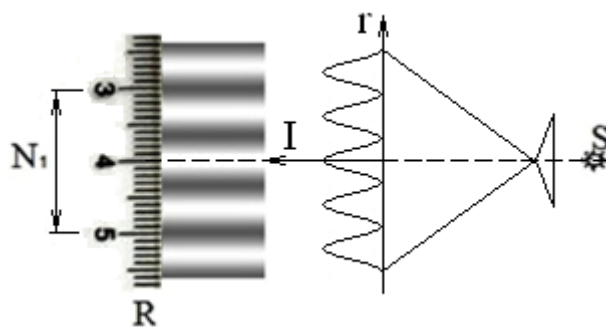


Рис. 8
Схема измерения Δy

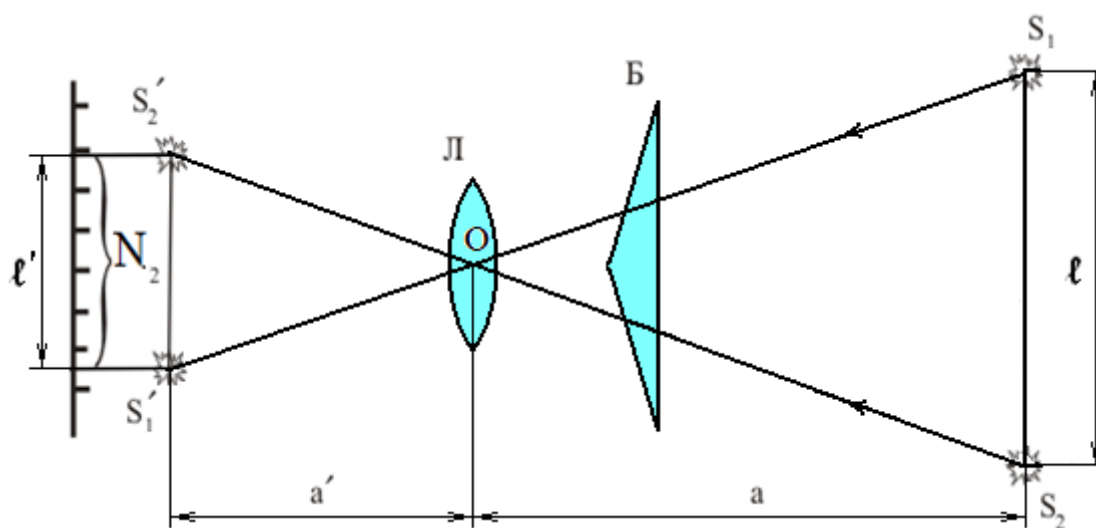


Рис. 9
Схема измерения расстояния между мнимыми источниками S_1 и S_2

Из подобия треугольников $S_2'OS_1'$ и S_2OS_1 следует (рис.9), что

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

где a – расстояние от щели до линзы Л, a' – расстояние от линзы Л до объектива 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

$$\ell = \frac{N_2 \cdot C \cdot a}{a'}. \quad (18)$$

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка состоит из источника света «И», щели «S», бипризмы «Б», измерительного микроскопа «М» с экраном «Э», линзы и светофильтра (рис.

10). Линза и светофильтр на схеме (10) не показаны. Все вышеуказанные приборы крепятся на оптической скамье (рис.11).

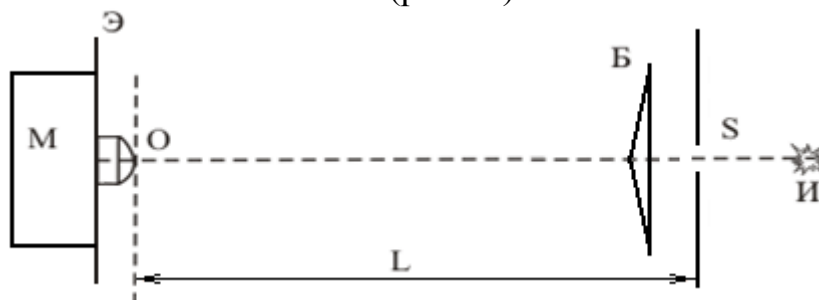


Рис. 10
Схема лабораторной установки

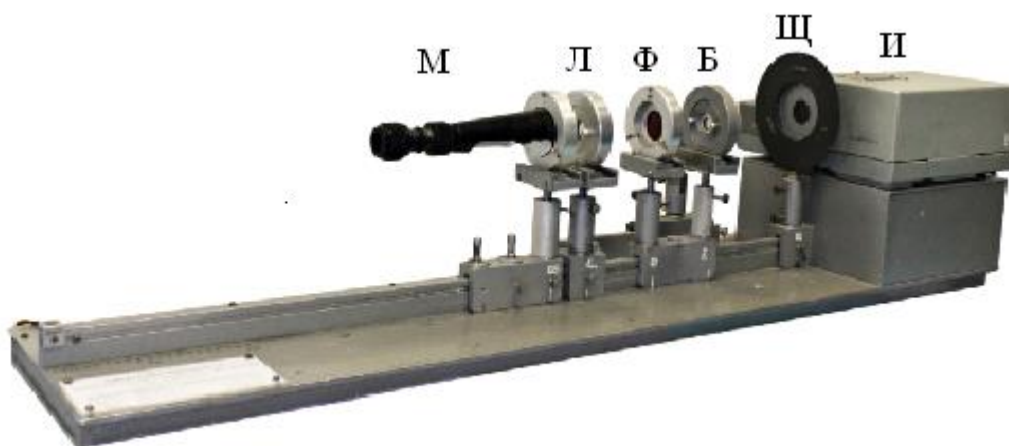


Рис.11
Экспериментальная установка.

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

4.3.ЗАДАНИЕ

4.1. Подготовить таблицу для записи результатов измерений.

Таблица 1

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

4.2. Настройка лабораторной установки **осуществляется преподавателем.**

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. 10), записать.

4.3.5. Установить на штатив оптической скамьи линзу «Л» согласно рис. 11. 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. 9), записать в таблицу. Измерить расстояния: а между линзой и щелью (рис. 9) и а' между линзой и объективом микроскопа, записать в таблицу.

4.3.6. **Выключить источник света.**

4.3.7. По формуле (17) вычислить Δy , по формуле (18) вычислить ℓ , длину волны λ вычислить по формуле (16). Цена деления C измерительной шкалы указана на рабочем месте.

4.3.8. Вычислить относительную погрешность измерения электромагнитной волны [2]:

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

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

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

4.4. Вычислить абсолютную погрешность измерения электромагнитной волны: $\Delta\lambda = \lambda_{рас} \cdot \sigma\lambda$, где $\lambda_{рас}$ – длина волны, полученная в результате расчетов в пункте 4.3.7.

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. ПЕРЕЧЕНЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Одна таблица.
2. Результаты расчетов длины волны.
3. Результаты вычисления погрешностей.
4. Сравнение полученного значения длины волны со справочными значениями (Приложение 2)
5. Выводы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Что такое корпускулярно-волновой дуализм? Расскажите о строении электромагнитной волны.
- 6.2. Что такое интерференция электромагнитных волн? Приведите примеры из повседневной жизни.
- 6.3. Что регистрируют наши глаза и приборы при попадании в них электромагнитных волн?
- 6.4. Какие волны называются когерентными? Перечислите условия для создания интерференционной картины. Что такое пространственная и временная когерентность волн?
- 6.5. Выведите условия максимума и минимума интенсивности интерференционной картины (7) и (8).
- 6.6. Расскажите об интерференционной схеме с бипризмой Френеля. Что такое апертура перекрывающихся световых пучков?
- 6.7. Выведите расчётную формулу (16) для вычисления λ .
- 6.8. Почему после введения линзы «Л» (рис. 9) интерференционная картина на экране разрушается?
- 6.9. На основе экспериментальных данных и анализа формул (14) объясните последовательность чередования цветов спектральных линий в спектре, изучаемого в п. 4.3.1.
- 6.10. Объясните, почему после введения красного фильтра число видимых интерференционных полос увеличивается?

7. ЛИТЕРАТУРА

1. Лисейкина Т.А. Курс физики. Раздел четвертый. Волновая оптика [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Т. А. Лисейкина, Т. Ю. Пинегина, А. Г. Черевко ; Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. - Электрон. дан. (1 файл). - Новосибирск : СибГУТИ, 2007. - 144 с. : ил. - Библиогр.: с. 143. - Загл. с титул. экрана. - Электрон. версия печ. публикации. - Режим доступа: <http://ellib.sibsubtis.ru/ellib/2007/25-Liseykina.rar>, по паролю. - : Б. ц. Авт. договор № 387 от 22.06.2015 г.
2. Черевко А.Г. Расчёт неопределённостей результата измерений в физическом эксперименте: методические указания к лабораторному практикуму. – Новосибирск: СибГУТИ, 2002.
3. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 560с

8. 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? [0,4 м]

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? [1,2 мм]

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. [3 мм]

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? [425 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? [560 нм]

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 ($n = 1,33$). [2 мм]

4.1 Найти угловое расстояние между соседними светлыми полосами $\Delta\beta$ (рис. 7), 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. [$3 \cdot 10^{-4}$ рад]

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. [500 нм]

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? [20]

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 $\theta = 10'$. Найти длину волны света, если расстояние между

интерференционными полосами $\Delta y = 0,55 \text{ мм}$. Указание: используйте рис.6 и формулу (9). [640 нм]

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 ? [1,4 мм]

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? [2,25 мм]

Лабораторная 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

Наблюдение колец Ньютона объясняется волновой теорией света. В соответствии с ней свет есть электромагнитные волны, имеющие длины от примерно 380 до 780 нм. В световой волне происходят колебания векторов напряженности электрического и магнитного полей. Эти вектора перпендикулярны друг другу, и оба они перпендикулярны направлению распространения света.

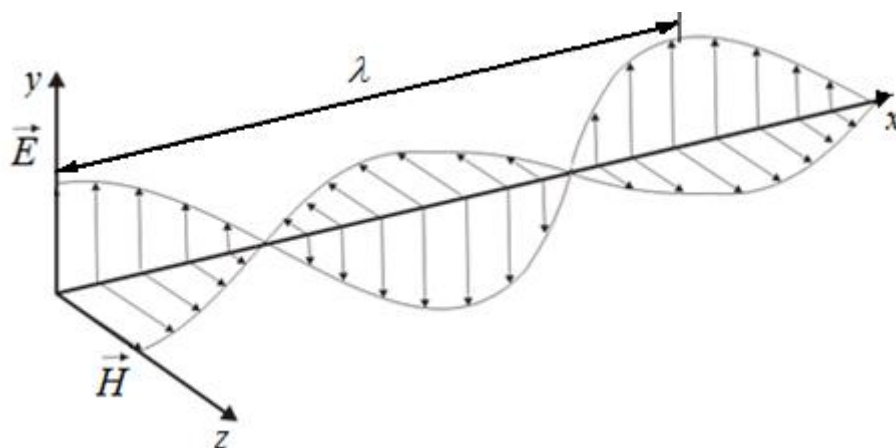


Рис. 1

Строение плоской синусоидальной электромагнитной волны.

Для плоской электромагнитной синусоидальной волны эти колебания описывается функциями (см. рис.1):

$$\begin{aligned} E_y &= E_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0) \\ H_z &= H_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0) \end{aligned} \quad (1)$$

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, прошедшее от начала колебаний в источнике;

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

$\varphi = \omega t - kx + \varphi_0$ – фаза колебаний, зависящая от момента времени и координаты рассматриваемой точки пространства;

φ_0 – начальная фаза колебаний в точке с координатой $x = 0$.

Колебания векторов напряженности электрического и магнитного полей происходят в одной фазе, и их амплитуды однозначно связаны между собой $\sqrt{\varepsilon_0} E_0 = \sqrt{\mu\mu_0} H_0$. Как правило, рассматриваются колебания только напряженности электрического поля, ее называют световым вектором. Напряженность магнитного поля отбрасывается, поскольку магнитное поле практически не взаимодействует с веществом.

Явление интерференции света возникает при наложении двух или большего числа световых волн и заключается в том, что интенсивность результирующей волны не равняется сумме интенсивностей волн, которые накладываются. В одних точках пространства интенсивность оказывается большей, чем сумма, в других – меньшей, т.е. возникает система максимумов и минимумов интенсивности, которая называется интерференционной картиной. Необходимым условием интерференции волн является их когерентность. Необходимо также, чтобы колебания светового вектора происходили в одном направлении, или в близких направлениях (имели одинаковую или близкую поляризацию).

Когерентными называются волны, которые в каждой точке пространства создают колебания с постоянной разностью фаз. При наложении света от двух независимых источников интерференции не происходит, интенсивность света во всех точках равна сумме интенсивностей, созданных каждым источником. Это объясняется тем, что свет от обычного источника состоит из цугов волн (кратковременных импульсов), которые независимо излучаются отдельными атомами. Время излучения одного атома имеет порядок величины 10^{-8} с. В результате этого в световой волне происходят через краткие промежутки времени случайные изменения начальной фазы колебаний светового вектора, изменяется также случайным образом направление колебаний. Две когерентные световые волны для наблюдения интерференции можно получить, разделив каким-либо образом одну световую волну. Если две части одной световой волны снова наложить друг на друга, возникает интерференционная картина. При этом разность хода волн от точки разделения до точки наложения не должна превышать расстояние, которое проходит свет за время когерентности $l_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}}$. Величина $l_{\text{ког}}$ называется длиной когерентности. За время $\tau_{\text{ког}}$ излучение перестает быть когерентным самому себе, а значит части излучения одного источника, разделенные расстоянием большим, чем $l_{\text{ког}}$, не когерентны. Для световых волн это расстояние порядка 10^{-6} м. Когерентными будут синусоидальные волны одинаковой частоты и близкого направления колебаний вектора \vec{E} (одинаковой поляризации).

Пусть в данную точку пространства приходят две синусоидальные волны одинаковой циклической частоты ω , полученные из одного источника с начальной фазой $\varphi_0 = 0$, прошедшие разные расстояния x_1 и x_2 .

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

Амплитуда результирующего колебания при сложении колебаний одного направления с одинаковой частотой определяется выражением:

$$|\vec{E}_0|^2 = |\vec{E}_{10}|^2 + |\vec{E}_{20}|^2 + 2|\vec{E}_{10}| \cdot |\vec{E}_{20}| \cdot \cos(kx_1 - kx_2). \quad (3)$$

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

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos(kx_1 - kx_2). \quad (4)$$

В случае, если разность фаз равна $\Delta\varphi = kx_1 - kx_2 = 2\pi \cdot m$, где m – целое число, то значение выражения (4) максимально, и в данной области наблюдается максимум интенсивности света. В случае, если разность фаз $\Delta\varphi = kx_1 - kx_2 = (2m \pm 1)\pi$, где m – целое число, то значение выражения (4) минимально, и в данной области наблюдается минимум интенсивности света. Выразим разность фаз колебаний через оптическую разность хода волн:

$$\Delta\varphi = kx_1 - kx_2 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n_1 x_1 - \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n_2 x_2 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot (n_1 x_1 - n_2 x_2) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta, \quad (5)$$

где $\Delta = n_1 x_1 - n_2 x_2 = L_2 - L_1$ **оптическая разность хода** двух волн, величина $L_1 = n_1 x_1$ – **оптическая длина пути** первой волны от места разделения лучей до данной области, величина $L_2 = n_2 x_2$ – **оптическая длина пути** второй волны от места разделения лучей до данной области, λ_0 – длина волны света в вакууме, n – абсолютный показатель преломления среды, в которой распространялась волна до точки наложения волн.

Подставляя условия максимума и минимума для (4) в выражение для разности фаз (5) получаем условия **максимума и минимума интенсивности интерференционной картины**:

$$\Delta = \pm m \cdot \lambda_0, \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \text{ – условие максимума} \quad (6)$$

$$\Delta = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda_0, \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \text{ – условие минимума} \quad (7)$$

Разделение одной волны на две когерентные волны можно проделать различными способами. В частности, разделение на две когерентные волны происходит и при падении света на пластинку (пленку), отличающуюся по своим оптическим свойствам от окружающей среды. При отражении падающей световой волны от верхней и нижней поверхностей пластинки получаются две когерентные волны. Чтобы в обеих волнах присутствовали излучения одинаковых атомов, пластинка (пленка) должна быть тонкой. Поэтому явление

интерференции в этом случае получило название интерференции света в тонких пленках.

При падении на тонкую пленку плоской волны угол падения во всех точках одинаковый, интерференция в этом случае приводит к зависимости интенсивности отраженной волны от толщины пленки d . Если толщина пленки в разных местах не одинакова, точки, для которых выполняются условия возникновения максимума (6) и минимума (7) образуют линии. Эти линии наблюдаются в тех местах пленки, где толщина пленки одинакова и соответствует либо условию (6), либо условию (7). Вдоль этих линий наблюдаются темные и светлые полосы, которые называются полосами равной толщины. Частным случаем полос равной толщины являются кольца Ньютона.

Кольца Ньютона наблюдаются при отражении света от соприкасающихся друг с другом плоскопараллельной стеклянной пластинки и плоско-выпуклой линзы с большим радиусом кривизны (рис. 2). Роль тонкой пленки, от поверхности которой отражаются волны, играет зазор между пластинкой и линзой вблизи точки соприкосновения пластинки и линзы (вследствие большой толщины пластинки и линзы за счет отражений от других поверхностей интерференционные полосы не возникают). При нормальном падении света полосы равной толщины имеют вид окружностей, при наклонном – эллипсов.

Используя метод колец Ньютона, можно определить радиус кривизны поверхности линзы, обнаружить дефекты полировки ее поверхности (сколы и шероховатости), этот метод является одним из основных при изготовлении и контроле качества линз.

Пусть электромагнитная волна «1» (рис. 2), излучаемая источником света, падает перпендикулярно плоской поверхности на плоско-выпуклую линзу, приведённую в контакт со стеклянной пластиной. В точке «С» происходит разделение волны «1» на две: отраженную от нижней поверхности линзы (волна «1'») и отраженную от верхней поверхности стеклянной пластинки (волна «2'»). Эти волны будут интерферировать. Для наблюдения интерференционной картины, возникающей на границе раздела «воздушный клин – линза», в работе используется измерительный микроскоп «М». Интерференционная картина, наблюдаемая в микроскоп «М», имеет вид концентрических колец, симметричных относительно точки соприкосновения линзы и пластины. Исторически такая картина получила названия колец Ньютона, первая публикация о которых была им сделана в 1675 году.

Из рис. 2 следует, что оптическая разность хода между волнами «1'» и «2'» равна удвоенной толщине зазора:

$$\Delta = |CD| \cdot n + |DC| \cdot n + \frac{\lambda}{2} \quad (8)$$

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 «2'» связано с тем, что при её отражении от

пластины «П» в точке «D» (отражение от оптически более плотной среды) фаза волны изменяется на π .

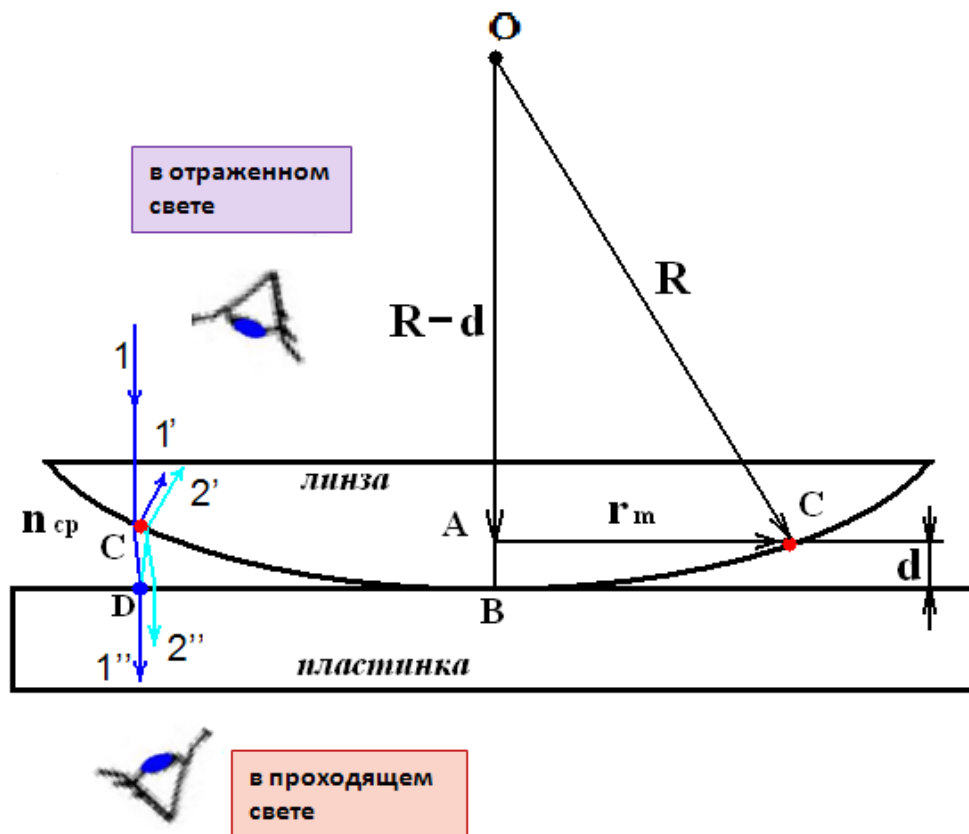


Рис.2

Схема образования интерференционных колец Ньютона

Из формулы (8) следует, что

$$\Delta = 2d \cdot n + \frac{\lambda}{2}. \quad (9)$$

В случае, если в точке С выполняется условие максимума интенсивности (6), то формулу (9) можно переписать в виде:

$$2d \cdot n + \frac{\lambda}{2} = m\lambda, \quad (10)$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$ - порядок максимума.

Взаимосвязь толщины воздушного клина d с радиусом кривизны линзы R найдём из треугольника AOC . $OB = OC = R$ - радиусу кривизны линзы. Толщина зазора $d = AB = OB - OA$. Длина катета $OA = R - d$. По теореме Пифагора:

$$R^2 = (R - d)^2 + r_m^2, \quad (11)$$

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

Раскроем скобки в выражении (11).

$$R^2 = R^2 - 2Rd + d^2 + r_m^2 \quad (12)$$

В условиях данного эксперимента радиус кривизны линзы R по порядку величины соответствует метрам, радиус колец Ньютона r_m примерно соответствует миллиметрам, толщина зазора d , где наблюдаются кольца Ньютона – микрометрам. Таким образом, $r_m \gg d$ и d^2 можно пренебречь по сравнению с r_m^2 . Формула (12) упрощается:

$$d \approx \frac{r_m^2}{2R}. \quad (13)$$

Из (10) и (13) следует, что для двух максимумов различных порядков m и ℓ справедливы следующие выражения:

$$\frac{r_m^2}{R} \cdot n + \frac{\lambda}{2} = m\lambda \text{ и } \frac{r_\ell^2}{R} \cdot n + \frac{\lambda}{2} = \ell\lambda. \quad (14)$$

А радиус светлого кольца Ньютона порядка m в отраженном свете равен:

$$r_m = \sqrt{\frac{(m - \frac{1}{2})\lambda R}{n}}. \quad (15)$$

Вычитая почленно уравнения (14) и учитывая, что в данной лабораторной работе между линзой и пластинкой находится воздух ($n \approx 1$), получаем формулу для расчёта радиуса кривизны линзы:

$$R = \frac{r_m^2 - r_\ell^2}{\lambda(m - \ell)} \quad (16)$$

При нормальном падении света на плоскую поверхность линзы совокупность интерференционных максимумов одного порядка должна иметь форму кольца. Однако из-за того, что в нашей установке угол падения не равен нулю (наклонное падение), а также из-за неравномерного прижима линзы к пластине (рис.2), шероховатости поверхностей пластины и линзы, форма максимума несколько отличается от окружности (рис. 3).

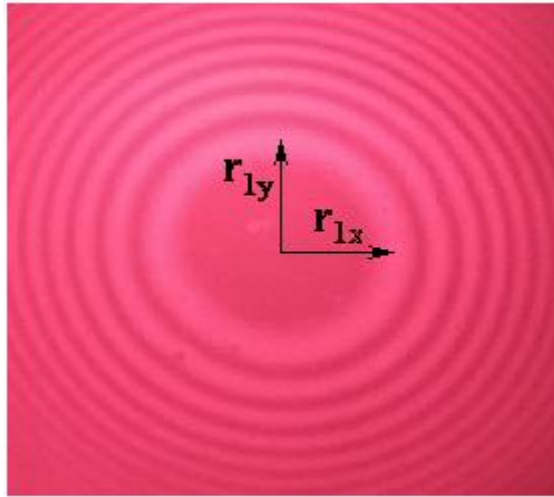


Рис.3

Схема измерения среднего радиуса кольца произвольного порядка.

Радиусы колец, измеренные в разных направлениях, будут иметь разные значения. На рис. 3 отмечены радиусы первого светлого кольца во взаимно перпендикулярных направлениях. Величину радиуса кольца произвольного m - порядка мы определим как среднее арифметическое радиусов, измеренных во взаимно перпендикулярных направлениях

$$r_m = \langle r \rangle = \frac{r_{mX} + r_{mY}}{2} . \quad (17)$$

Величины r_{mX} и r_{mY} находим с помощью измерительной шкалы, вставленной в окуляр микроскопа. Если цена деления шкалы равна C , а значениям r_{mX} и r_{mY} соответствуют N_{mX} и N_{mY} чисел делений шкалы, величину r_m можно вычислить по формуле (17), переписав её в виде:

$$r_m = \frac{C}{2} \cdot (N_{mX} + N_{mY}) . \quad (18)$$

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка состоит из измерительного микроскопа МБС – 10 (рис.4), 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».

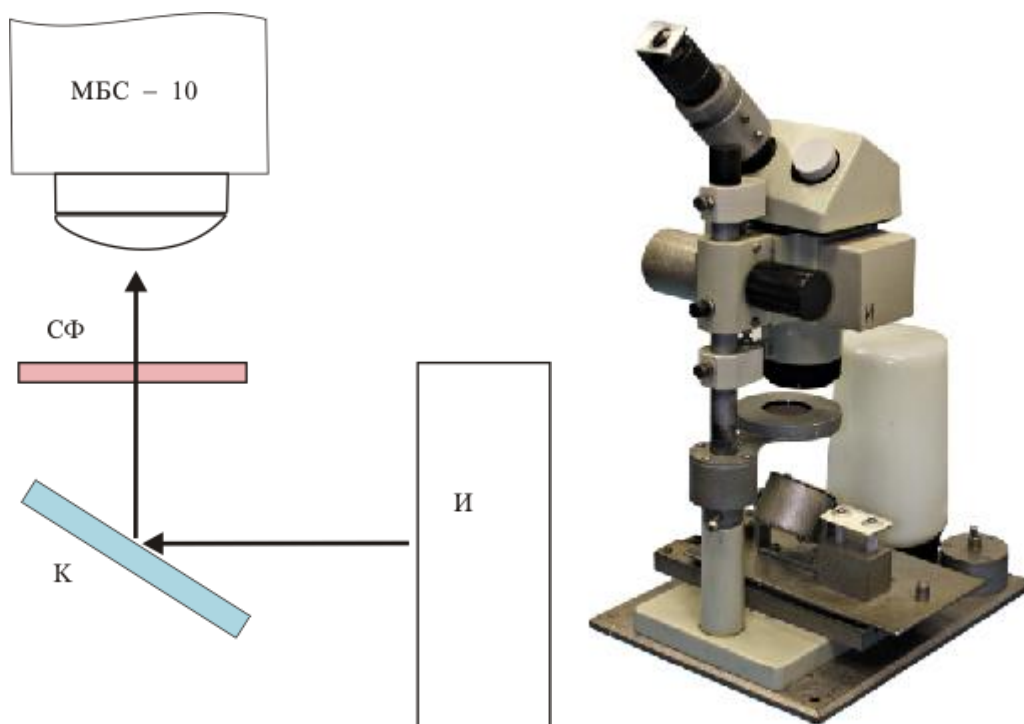


Рис. 4.
Лабораторная установка

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. 5). Если между серединами двух соседних миллиметровых меток линейки укладывается Z интервалов измерительной шкалы, то цена деления измерительной шкалы определяется по формуле:

$$C = \frac{10^{-3}}{Z} \text{ [м]}, \quad (19)$$

4.1.4. Измерить и записать значение Z .

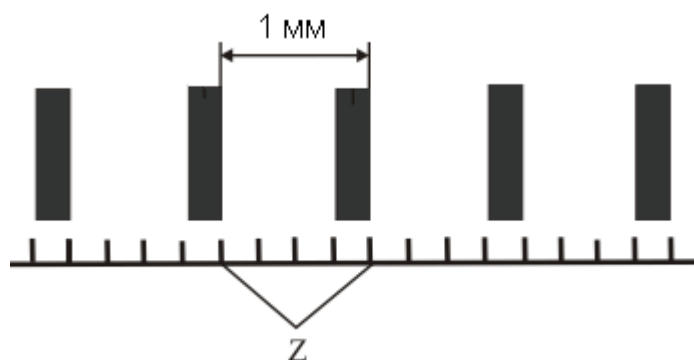


Рис.5

Определение цены деления микроскопа

4.2. Исследование интерференционного спектра.

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

4.2.2. Плавнo 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

Таблица 1

Порядок кольца	N_{mX}	N_{mY}	Радиус кольца r_m , м	Радиус кривизны линзы R , м
$\ell = 1$				
$m =$				

4.3.2. Ввести в поле зрения светофильтр («СФ» на рис.4).

4.3.3. Сосчитать число делений измерительной шкалы N_{mX} 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_{mY} для этого же кольца (рис. 3). Записать значения N_{mX} и N_{mY} 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_{mX} и N_{mY} для этого максимума.

4.4. Выключить источник света.

4.5. По формуле (19) вычислить цену деления C .

4.6. Вычислить радиусы максимумов первого и третьего порядков по формуле (18).

4.7. Вычислить радиус кривизны линзы $R_{\text{рас}}$ по формуле (16). Значение длины электромагнитной волны λ , соответствующее используемому светофильтру, приведено на рабочем месте.

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

$$\sigma R = \frac{\delta R}{R} = \sqrt{4 \left(\frac{\delta r_m}{r_m} \right)^2 + 4 \left(\frac{\delta r_\ell}{r_\ell} \right)^2 + \left(\frac{\delta \lambda}{\lambda} \right)^2},$$

$$\text{где } \frac{\delta r_\ell}{r_\ell} = \frac{\delta r_m}{r_m} = \sqrt{\left(\frac{\delta C}{C} \right)^2 + \left(\frac{\delta N_{mX}}{N_{mX}} \right)^2 + \left(\frac{\delta N_{mY}}{N_{mY}} \right)^2}.$$

При расчётах принять: $\delta \lambda = 3 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, $\delta C = 0,1 \cdot C$, $\delta N_{mX} = \delta N_{mY} = 1$.

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. ПЕРЕЧЕНЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Одна таблица.
2. Результаты расчетов радиуса кривизны линзы.
3. Результаты вычисления погрешностей.
4. Выводы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Дайте понятие волнового процесса, расскажите о структуре электромагнитной волны.
- 6.2. Дайте определение интерференции. Какие волны называются когерентными? Что такое пространственная и временная когерентность?
- 6.3. Выведите условия максимума и минимума интенсивности интерференционной картины. Дайте определение оптической разности хода двух лучей.
- 6.4. Почему в данной установке существует интерференция, ведь лампа накаливания испускает некогерентные электромагнитные волны?
- 6.5. Выведите формулу для расчёта радиуса кривизны линзы (16).
- 6.6. Получите формулу для расчета радиуса светлого кольца при наблюдении в отраженном свете (15).

6.7. Пользуясь формулой (15), объясните последовательность чередования цветов в спектре произвольного порядка, полученного в п. 4.2.3. ЗАДАНИЯ.

7. ЛИТЕРАТУРА

1. Лисейкина Т.А. Курс физики. Раздел четвертый. Волновая оптика [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Т. А. Лисейкина, Т. Ю. Пинегина, А. Г. Черевко; Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. – Электрон. дан. (1 файл). - Новосибирск: СибГУТИ, 2007. - 144 с. : ил. – Библиогр.: с. 143. – Загл. с титул. экрана. - Электрон. версия печ. публикации. - Режим доступа: <http://ellib.sibsutis.ru/ellib/2007/25-Liseykina.rar>, по паролю. – : Б.ц. Авт. договор № 387 от 22.06.2015 г.
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

8. 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. [2,5 м]

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 $n_B = 1,33$. [2,98 мм]

2.1 Плосковыпуклая стеклянная линза ($n_{\text{стекла}} = 1,5$) с оптической силой $D = 1$ Дптр лежит выпуклой стороной на стеклянной пластине. Радиус пятого светлого кольца Ньютона в отраженном свете равен 1,2 мм. Определить длину световой волны. [640 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. [1,44]

3.1 Установка для получения колец Ньютона освещается белым светом, падающим нормально. Наблюдение производится в проходящем свете. Радиус кривизны линзы равен 5 м. Найти: 1) радиус четвертого фиолетового кольца ($\lambda_{\text{ф}} = 400$ нм), 2) радиус третьего красного кольца ($\lambda_{\text{кр}} = 700$ нм). [2,83 мм, 3,24 мм]

3.2 Плоско-выпуклая стеклянная линза с радиусом кривизны $R=40$ см соприкасается выпуклой поверхностью со стеклянной пластинкой. При этом в отражённом свете радиус некоторого кольца равен $r=2,5$ мм. Наблюдая за данным кольцом, линзу осторожно отодвинули от пластинки на $h=5,0$ мкм. Каким стал радиус этого кольца? [1,5 мм]

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. [3,8 мм]

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 ? [1,5 мм]

5.1 Между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плосковыпуклой линзой находится жидкость. Найти показатель преломления жидкости, если радиус пятого светлого кольца Ньютона при наблюдении в отраженном свете равен 1,1 мм, длина волны света 600 нм, радиус кривизны выпуклой поверхности линзы равен 0,6 м. [1,34]

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. [498 нм, 5, 6]

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. [1,5 мм]

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. [1,33]

Лабораторная 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 отклонения света от первоначального направления называют углом дифракции.

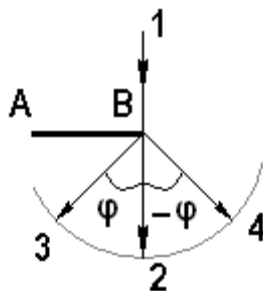


Рис. 1

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 , ширина каждого препятствия равна 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)

$$r = Nd. \quad (1)$$



Рис. 2
Устройство дифракционной решетки¹

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:

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

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

$$\Delta \ell = d \cdot \sin \varphi \quad (3)$$

¹ <http://rpp.nashaucheba.ru/docs/index-48898.html>

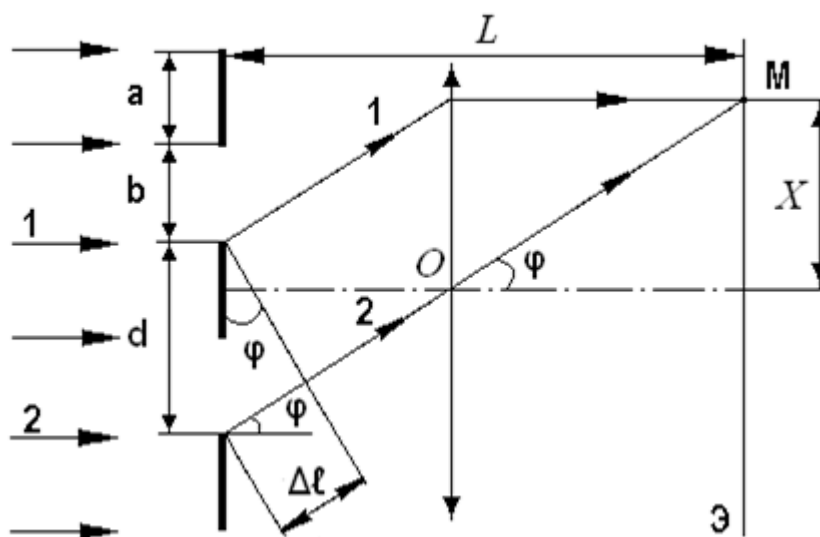


Рис. 3

Схема интерференции дифрагированных лучей

Объединяя эти два условия интерференционного максимума в дифракционном спектре, получим:

$$d \cdot \sin \varphi = m\lambda, \text{ где } m = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (4)$$

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 (4) 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:

$$d \cdot \sin \varphi = \pm m\lambda, \text{ где } m = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (5)$$

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 $d_1 > d$ одна от другой. В результате, дифракционный спектр имеет форму, схематически показанную на рисунке 4, где I – интенсивность света на экране.

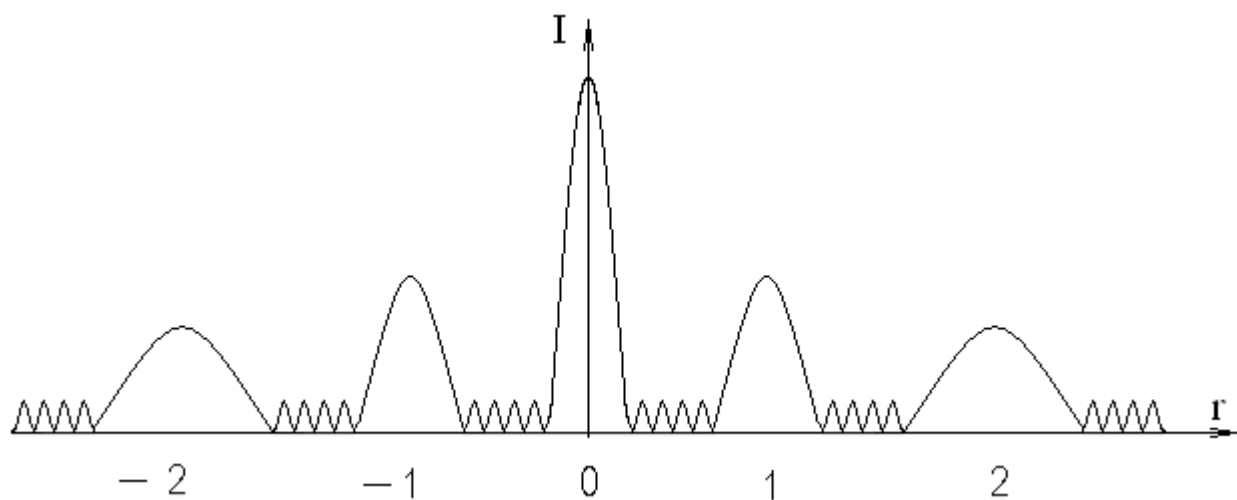


Рис. 4

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 (5) линия красного цвета должна располагаться дальше от центра дифракционной картины по сравнению с линией фиолетового цвета в максимуме любого порядка.

Исходя из формулы (5), определим длину волны света

$$\lambda = \frac{d \cdot \sin \varphi}{m}. \quad (6)$$

Таким образом, дифракционную решетку можно использовать для исследования спектрального состава электромагнитных излучений по длинам волн, т.е., как спектральный прибор. Дифракционная решетка, как спектральный прибор, характеризуется тремя параметрами: угловой дисперсией, линейной дисперсией и разрешающей способностью.

Угловой дисперсией называется величина:

$$D = \frac{\delta\varphi}{\delta\lambda}, \quad (7)$$

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

Используя формулу (5), угловую дисперсию можно записать в виде

$$D = \frac{\delta\varphi}{\delta\lambda} = \frac{m}{d \cos \varphi}. \quad (8)$$

Линейной дисперсией называют величину:

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

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

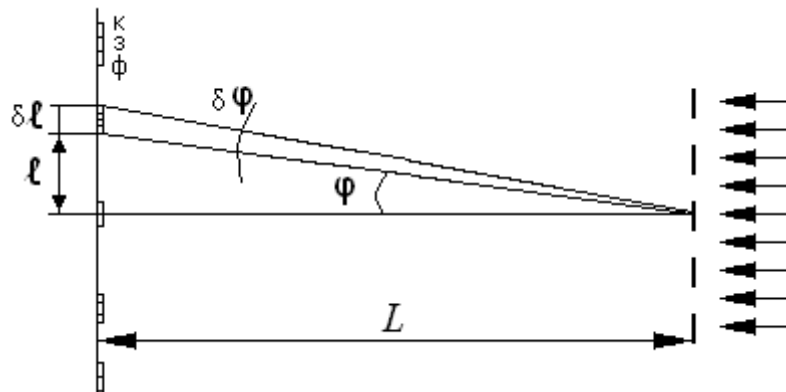


Рис. 5

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

$$D_{\text{лин}} = \frac{\delta\ell}{\delta\lambda} = L \cdot D. \quad (10)$$

Разрешающей способностью называют величину:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda_p}, \quad (11)$$

где $\Delta\lambda_p$ – разница между двумя длинами волн, подчиняющихся критерию Рэлея: две линии разных длин волн на экране все еще видны отдельно (разрешены), если главный максимум одной из них совпадает с ближайшим

минимумом другой. Если линии расположены ближе друг к другу, то на экране наблюдается одна линия. Можно показать, что разрешающая способность дифракционной решетки определяется числом щелей решетки и порядком максимума, в котором ведется наблюдение.

$$R = m \cdot N. \quad (12)$$

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

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

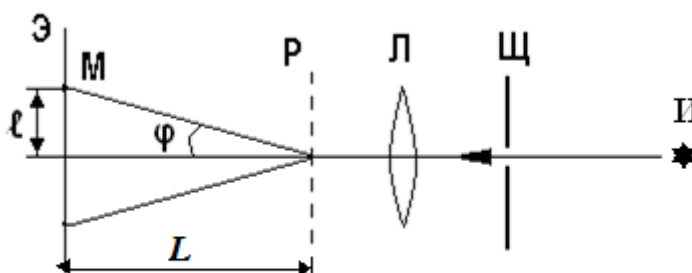


Рис. 6
Схема лабораторной установки.



Рис.7
Экспериментальная установка.

На оптической скамье установлены: источник света, щель, линза, дифракционная решетка, экран (Рис. 6 и Рис.7). Щель служит для формирования спектральных линий, разрешенных между собой и придания им формы, подобной формы щели. Щель находится в фокальной плоскости линзы. 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 $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\ell}{L}$, а затем $\sin \varphi$.

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

Таблица 1

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

4.1.2. Включить источник света. Плавно перемещая штатив 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

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\ell}{L},$$

а затем $\sin\varphi$ для длин волн красного, зеленого и синего цвета в максимумах первого порядка. Повторить расчеты для максимумов второго порядка.

4.1.8. Подставляя значения $\sin\varphi$ в формулу (6), 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

Таблица 2

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

4.2.1. Рассчитать угловую дисперсию по формуле (8) для максимумов первого и второго порядков.

4.2.2. Рассчитать линейную дисперсию по формуле (10), для максимумов первого и второго порядков.

4.2.3. Измерить ширину дифракционной решетки r , определить число щелей решетки N по формуле (1).

4.2.3. Рассчитать разрешающую способность по формуле (12). Пользуясь формулой (11) оценить разницу между двумя длинами волн, подчиняющихся критерию Рэлея $\Delta\lambda_p$.

4.3. Пользуясь формулой [2]: $\sigma\lambda = \frac{\delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{\delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\delta\ell}{\ell}\right)^2}$ рассчитать относительную погрешность измерения длины электромагнитной волны, приняв относительные погрешности измерения длин, **равными половине цены деления измерительной шкалы** ($\delta L, \delta\ell$).

4.4. Рассчитайте абсолютную погрешность длины электромагнитной волны, пользуясь формулой [2]: $\Delta\lambda = \lambda_{\text{рас}} \cdot \sigma\lambda$, где $\lambda_{\text{рас}}$ – длина волны, полученная в результате расчетов в пункте 4.1.8.

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

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

4.6. Сравнить полученные значения со значениями, приведенными в справочных таблицах ([Приложение 2](#)).

4.7. Сделать основные выводы по выполненной работе.

5. ПЕРЕЧЕНЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Две таблицы.
2. Результаты вычисления погрешностей.

3. Результаты определения длин волн и их сравнение со справочными величинами

4. Выводы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Дайте понятие дифракции. В чем сущность принципа Гюйгенса Френеля. Расскажите об устройстве и назначении дифракционной решетки проходящего света.
- 6.2. Какое из понятий Вы считаете более правильным: «Дифракционный спектр» или «Интерференционный спектр дифрагированных волн»?
- 6.3. Сделайте вывод формулы (4).
- 6.4. В чем сущность критерия Рэлея?
- 6.5. Объясните последовательность чередования цветов в спектре, полученном в п.4.1.1. ЗАДАНИЯ.

7. ЛИТЕРАТУРА

1. Лисейкина Т.А. Курс физики. Раздел четвертый. Волновая оптика [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Т. А. Лисейкина, Т. Ю. Пинегина, А. Г. Черевко ; Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. - Электрон. дан. (1 файл). - Новосибирск : СибГУТИ, 2007. - 144 с. : ил. - Библиогр.: с. 143. - Загл. с титул. экрана. - Электрон. версия печ. публикации . - Режим доступа: <http://ellib.sibsutis.ru/ellib/2007/25-Liseykina.rar>, по паролю. - : Б. ц. Авт. договор № 387 от 22.06.2015 г.
2. Черевко А.Г. Расчёт неопределённостей результата измерений в физическом эксперименте: методические указания к лабораторному практикуму. – Новосибирск: СибГУТИ, 2002.
3. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 560с
4. https://ru.wikipedia.org/wiki/Видимое_излучение

8. 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? [21,3⁰]

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

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. [9; 73,7°]

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). [$R_{1max} = R_{2max} = 7500$]

3.1. На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет. В спектре, полученным 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 $d = 10$ мкм? [0,316 мкм].

4.1. Период дифракционной решетки $d = 0,01$ мм. Какое наименьшее число штрихов N должна содержать решетка, чтобы две составляющие желтой линии натрия ($\lambda_1 = 589,0$ нм, $\lambda_2 = 589,6$ нм) можно было видеть отдельно в спектре первого порядка? Определить наименьшую длину ℓ решетки. [982, 9,82 мм].

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? [0,6 мкм].

5.1. На дифракционную решетку, содержащую $n = 200$ штрихов/мм, падает в направлении нормали к ее поверхности белый свет. Спектр проецируется помещенной вблизи решетки линзой на экран. Определить длину спектра первого порядка на экране, если расстояние от линзы до экрана $L = 3$ м. Границы видимого спектра $\lambda_{кр} = 0,78$ мкм, $\lambda_{ф} = 0,40$ мкм. [0,233 м]

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) $3,46 \cdot 10^5$ 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 $D = 7 \cdot 10^5$ рад/м. [457 нм]

6.2. Дифракционная решетка содержит $n = 200$ штрихов/мм. На решетку падает нормально монохроматический свет ($\lambda = 0,6$ мкм). Максимум какого наибольшего порядка дает эта решетка? [8]

Лабораторная работа 7.4

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 \vec{E} и магнитного \vec{H} полей волны взаимно перпендикулярны и колеблются перпендикулярно вектору скорости распространения волны. Обычно все рассуждения ведутся относительно вектора напряженности \vec{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 \vec{E} и перпендикулярного ему вектора \vec{H} . Свет со всевозможными равновероятными ориентациями вектора \vec{E} и, следовательно, \vec{H} называется **естественным**. Свет, в котором направления колебаний вектора \vec{E} происходят только в одном направлении, перпендикулярном лучу, называется **плоско поляризованным или линейно поляризованным** (рис.1). Плоско поляризованный свет можно получить, пропустив естественный свет через пластинку турмалина, вырезанную параллельно его оптической оси. Турмалин сильно поглощает световые лучи, в которых вектор \vec{E} перпендикулярен к оптической оси. Если вектор \vec{E} параллелен к оптической оси, то такие лучи проходят через турмалин почти без поглощения.

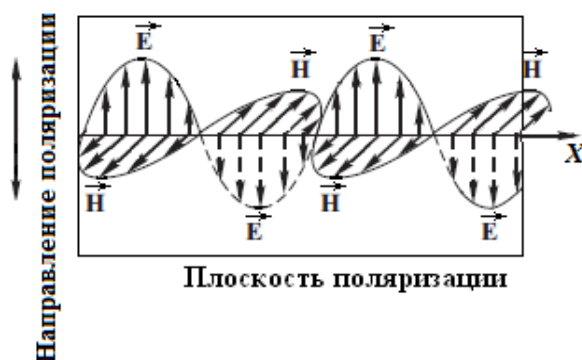


Рис.1

Плоско поляризованная волна

Следовательно, естественный свет, пройдя через пластинку турмалина, наполовину поглощается и становится **плоско поляризованным**, 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** (рис.2).

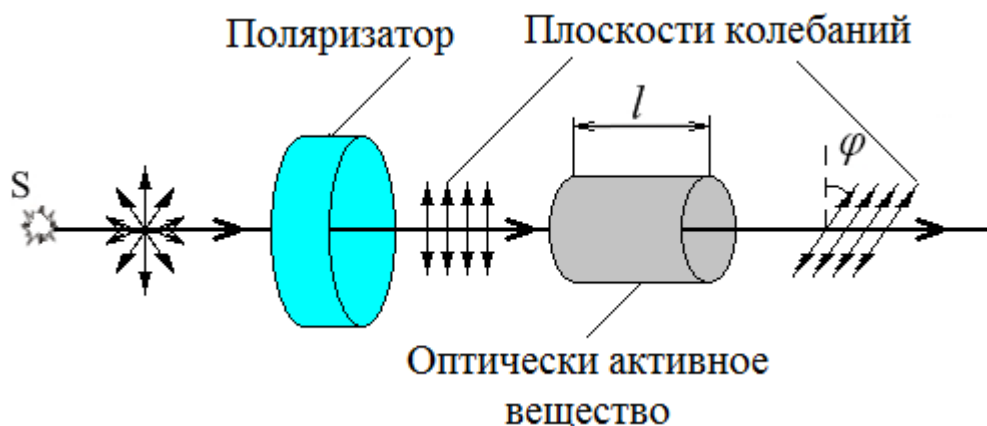


Рис. 2

Схема оптической активности

Вещества, обладающие способностью поворачивать плоскость поляризации света, называются **оптически активными**. К их числу принадлежат кристаллические тела (например, кварц, киноварь), чистые жидкости (скипидар, никотин) и растворы оптически активных веществ в активных растворителях (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 слой какого-либо оптически активного вещества (твердого или кювету с жидкостью), то свет через систему будет проходить. Но его можно погасить вращением одного из николей (Рис. 3).



Рис.3

Схема оптической скамьи с николями (К - кювета с жидкостью)

Отсюда следует, что после прохождения через активное вещество свет остается линейно поляризованным, но его плоскость поляризации оказывается повернутой.

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**.

Био установил на опыте, что угол поворота φ , плоскости поляризации пропорционален толщине ℓ оптически активного вещества:

$$\varphi = \alpha \ell. \quad (1)$$

- для твердых веществ и чистых жидкостей и

$$\varphi = \alpha c \ell. \quad (2)$$

- 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. Для жидкостей коэффициент α называется **удельным вращением**

Френель предложил качественное объяснение явлению вращения плоскости поляризации света. По его гипотезе, в оптически активном веществе плоско поляризованный свет можно представить как суперпозицию двух волн той же частоты, но поляризованных по кругу во взаимно противоположных направлениях (рис.4).

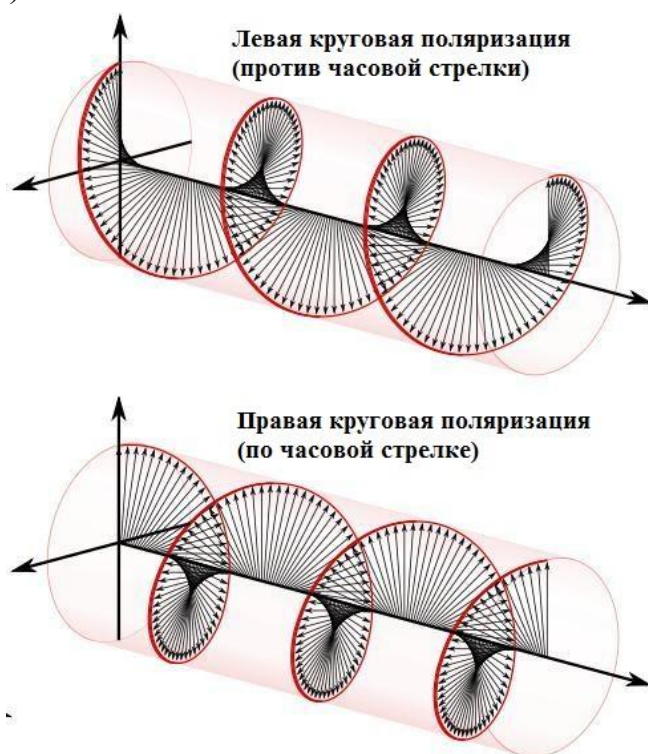


Рис.4
Волны с левой и правой круговой поляризацией²

² <http://www.arnoldsat.com/deutsch.htm>

Амплитуды векторов напряженности левой и правой волн равны половине амплитуды плоско поляризованной волны (рис.5).

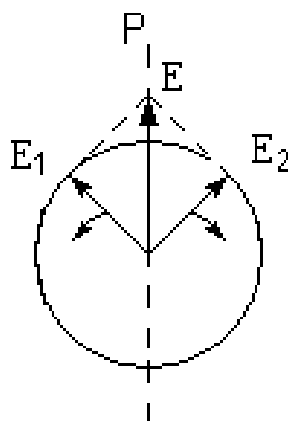


Рис. 5
Гипотеза Френеля

В оптически неактивной среде скорости распространения волн с круговой поляризацией равны, результирующий вектор будет направлен вдоль оси P.

В оптически активной среде скорости распространения левой и правой волн различны. При прохождении этих волн через слой толщиной ℓ между волнами возникнет оптическая разность хода и разность фаз:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \ell \cdot (n_1 - n_2), \quad (3)$$

где n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления волн с левой и правой поляризацией соответственно.

Предположим, что скорость распространения волны с правой поляризацией больше. Тогда на выходе из вещества вектор \vec{E}_2 будет опережать по фазе вектор \vec{E}_1 , и результирующий вектор окажется повернутым по часовой стрелке на угол $\varphi = \frac{\Delta\varphi}{2}$ (рис.6).

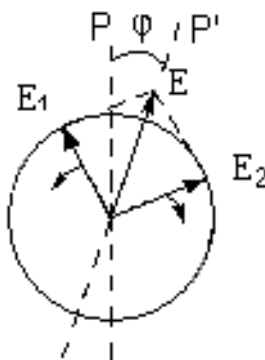


Рис.6
Поворот плоскости поляризации

Из формулы (3) найдем угол поворота:

$$\varphi = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \ell \cdot (n_1 - n_2). \quad (4)$$

Сравнив с формулой (1), получим постоянную вращения:

$$\alpha = \frac{\pi}{\lambda} \cdot (n_1 - n_2) \quad (5)$$

Если $(n_1 - n_2) > 0$, то $\alpha > 0$, т. е. вращение плоскости поляризации происходит **вправо**. Если же $(n_1 - n_2) < 0$, 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.**

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. 5, 6). Тем самым задача объяснения вращения плоскости поляризации была сведена к задаче объяснения кругового двойного лучепреломления.

В данной лабораторной работе концентрации растворов глюкозы определяются по формуле (2). Для этого нужно знать удельное вращение растворов глюкозы α . Значение удельного вращения найдем, используя раствор с известной концентрацией глюкозы (40 %). Тогда из формулы (2) можем найти удельное вращение:

$$\alpha = \frac{\varphi}{c \cdot \ell}, \quad (6)$$

где φ - угол поворота плоскости поляризации, c - концентрация раствора глюкозы, ℓ - длина кюветы. Считая удельную постоянную вращения одинаковой для всех растворов, можно найти неизвестную концентрацию:

$$c = \frac{\varphi}{\alpha \cdot \ell}. \quad (7)$$

2. 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. 7). На рис.7 отмечены: В – втулка окуляра, Р – ручка анализатора, К – место расположения кюветы с раствором исследуемой жидкости, закрывающееся крышкой.

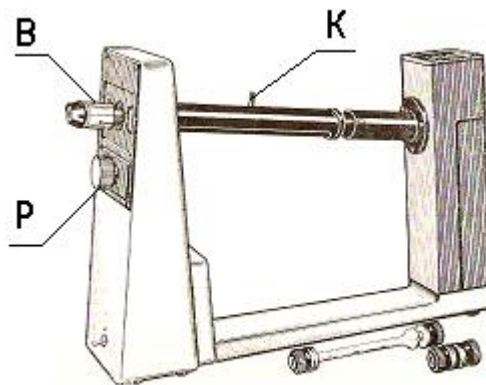


Рис.7
Вид лабораторной установки СМ-3

В поляриметре применён принцип уравнивания яркостей разделённого на две части поля зрения (рис.8).



Рис.8
Разделение поля зрения

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.

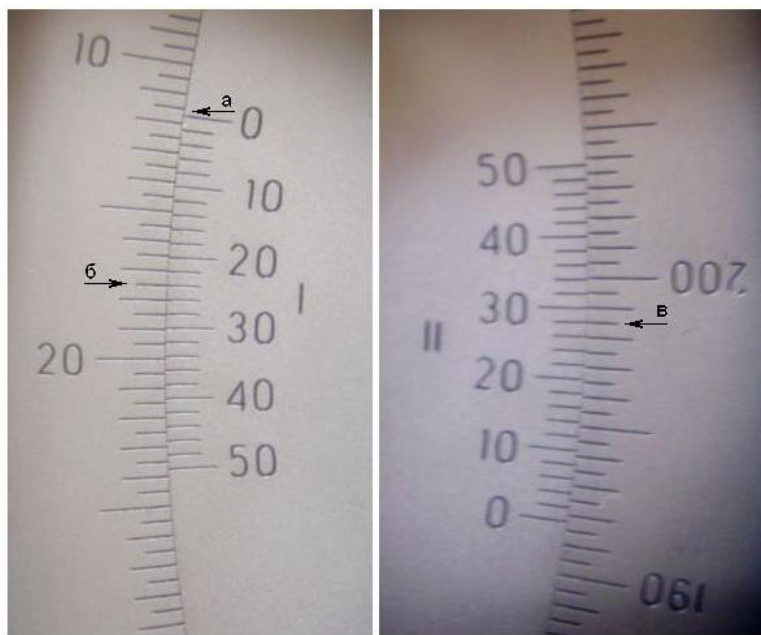
Внешний вид установки приведен на рис.9



Рис.9
Экспериментальная установка.

Подвижная часть шкалы называется лимбом, неподвижная часть — нониусом. По левой лупе на круговой шкале лимба поляриметра определить угол в градусах против нуля нониуса (нониус расположен справа), цена деления лимба $0,5^\circ$. Цена деления нониуса $0,02^\circ$. Определите, на сколько градусов повернута шкала лимба по отношению к нулевому делению отсчётного устройства, а затем по делениям нониуса, совпадающим с делениями шкалы лимба, отсчитайте доли градуса. К числу градусов, взятых по шкале лимба, прибавьте отсчёт по нониусу.

Рассмотрим пример определения угла поворота анализатора.



а)

б)

Рис.10
Пример определения угла поворота анализатора

Определяем, на сколько градусов повернута шкала лимба по отношению к шкале первого отсчётного устройства (Рис. 10а стрелка **а**). В нашем случае $11,5^0$. Далее по штрихам первого и второго отсчётных устройств, совпадающих со штрихами лимба (Рис. 10а стрелка **б**), 12 делений и для второго отсчётного устройства (Рис. 2 стрелка **в**), 14 делений, отсчитываем доли градуса. К числу градусов взятых по шкале лимба, прибавляем средний арифметический отсчёт по шкале первого и второго устройства.

$$\varphi = 11,5^0 + \frac{12+14}{2} \cdot 0,02^0 = 11,5^0 + 0,26^0 = 11,76^0$$

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.8. Измерить угол поворота анализатора φ_1 по лимбу. Это значение является начальным, от которого отсчитывается угол поворота плоскости поляризации.

4.4. Открыть крышку (К) и поместить внутрь кювету с известной концентрацией раствора, поле зрения изменится. Вращая лимб получить первоначальный вид поля зрения, измерить угол, на который повернулась плоскость поляризации φ_2 .

4.5. Таких измерений сделать пять и взять среднее арифметическое из них.

4.6. Угол поворота плоскости поляризации $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$.

4.7. Зная длину кюветы ℓ и концентрацию раствора C вычислить по формуле (6) удельную постоянную вращения.

4.8. Заменить кювету с известной концентрацией раствора на кювету с неизвестной концентрацией раствора и провести измерения по пунктам 4.2 - 4.6.

4.9. Вычислить неизвестную концентрацию раствора по формуле (7), данные занести в таблицу № 1.

Таблица № 1

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

4.10. Рассчитайте относительную погрешность удельной постоянной

вращения [3]: $\sigma = \frac{\delta\alpha}{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\delta\varphi}{\Delta\varphi}\right)^2 + \left(\frac{\delta\ell}{\ell}\right)^2 + \left(\frac{\delta c}{c}\right)^2}$. В данной работе принять

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

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

4.12. Запишите конечный результат для удельной постоянной вращения:

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

4.13. Рассчитайте относительную погрешность определения концентрации раствора глюкозы:

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

4.14. Рассчитайте абсолютную погрешность ΔC определения концентрации раствора глюкозы.

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

$$C = C_{\text{рас}} \pm \Delta C.$$

4.16. Сделать основные выводы по выполненной работе.

5. ПЕРЕЧЕНЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Одна таблица.
2. Результаты расчетов неизвестной концентрации в двух кюветах.
3. Результаты вычисления погрешностей.
4. Выводы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Какой свет называют линейно поляризованным?
- 6.2. Какие вещества называют оптически активными?
- 6.3. Как происходит вращение плоскости поляризации, чем оно обусловлено?
- 6.4. Что называют постоянной вращения, её физический смысл?
- 6.5. Как удельная постоянная вращения зависит от длины волны?
- 6.6. В чем суть гипотезы Френеля?

7. 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.

4. Лисейкина Т.А. Курс физики. Раздел четвертый. Волновая оптика [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Т. А. Лисейкина, Т. Ю. Пинегина, А. Г. Черевко ; Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. - Электрон. дан. (1 файл). - Новосибирск : СибГУТИ, 2007. - 144 с. : ил. - Библиогр.: с. 143. - Загл. с титул. экрана. - Электрон. версия печ. публикации . - Режим доступа: <http://ellib.sibsutis.ru/ellib/2007/25-Liseykina.rar>, по паролю. - : Б. ц. Авт. договор № 387 от 22.06.2015 г.

8. 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 Плоско поляризованный 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 Угол поворота плоскости поляризации желтого света натрия при прохождении через трубку с раствором сахара $\varphi=40^\circ$. Длина трубки $\ell=15\text{ см}$. Удельное вращение сахара $[\alpha]=66,5$ (град·см³)/(дм·г). Определить концентрацию C сахара в растворе. [0,401 г/см³]

4.1 Никотин (чистая жидкость), содержащийся в стеклянной трубе длиной $\ell=8$ см, вращает плоскость поляризации желтого света натрия на угол $\varphi=136,6^\circ$. Плотность никотина $\rho=1,01$ г/см³. Определить удельное вращение $[\alpha]$ никотина. [169 (град·см³)/(дм·г)]

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 $\varphi_1=32^\circ$. Определить концентрацию C_2 глюкозы в другом растворе в трубке такой же длины, если он вращает плоскость поляризации на угол $\varphi_2=24^\circ$. [0,21 г/см³]

5.1 Пластинку 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? [3,4 мм]

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 $\varphi=40^\circ$. Удельное вращение $[\alpha] = 156$ (град·см³)/(дм·г). [0,17 г/см³]

6.1 Пластинка 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 $\varphi_2=67,5^\circ$. [4,5 мм]

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 $\varphi_2=15^\circ$. [0,14 г/см³]

Лабораторная 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 \vec{E} и магнитного \vec{H} полей волны взаимно перпендикулярны и колеблются перпендикулярно вектору скорости \vec{v} распространения волны (перпендикулярно лучу) (рис.1).

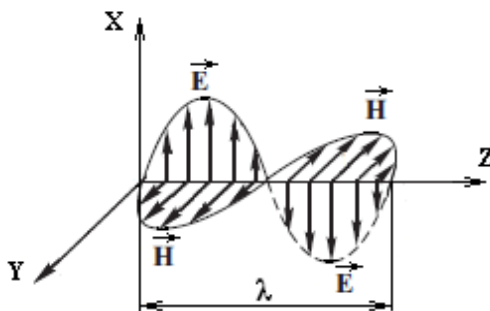


Рис.1

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

Свет, у которого направления колебаний вектора электрического поля \vec{E} упорядочены каким-либо образом, называется поляризованным. Электромагнитная волна, вектор \vec{E} которой колеблется в одном направлении, называется плоско (линейно) поляризованной. У такой волны вектор \vec{E} лежит все время в одной плоскости, которая называется плоскостью колебаний или плоскостью поляризации, а конец вектора \vec{E} описывает в пространстве прямую линию. Волна является циркулярно поляризованной, если конец вектора \vec{E} описывает в пространстве окружность. Выбор вектора \vec{E} для описания поляризации обусловлен тем, что при действии света на вещество основное влияние оказывает электрическое поле волны, которое действует на электроны атомов вещества (рис.2).

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 \vec{E} объясняется большим числом атомов. Такой свет называется естественным.

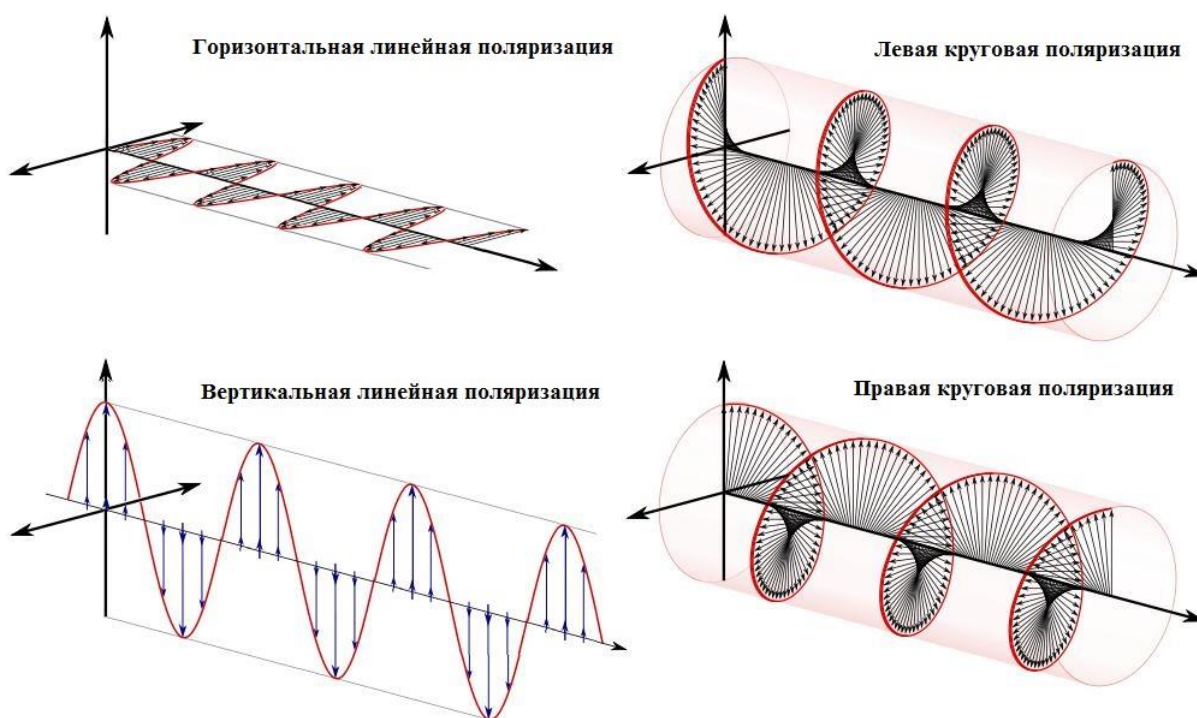


Рис. 2
Поляризованные волны³

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

³ <http://www.arnoldsat.com/deutsch.htm>

преобладающим. На выходе из поляроида имеем линейно поляризованную волну (рис. 3) с интенсивностью равной половине интенсивности естественного света (коэффициент поглощения света в поляроиде предполагается незначительным).

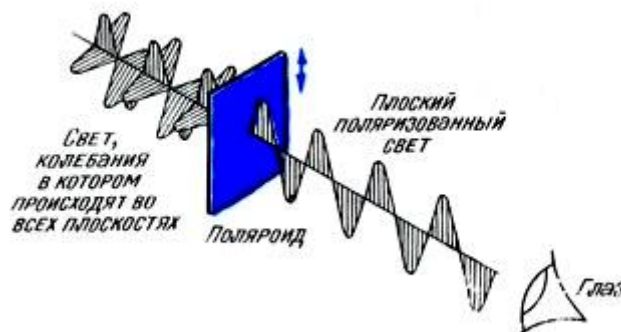


Рис. 3

Получение плоско поляризованного света при помощи поляризатора⁴

Рассмотрим пропускание света через два поляроида: поляризатор и анализатор. Первый поляроид (поляризатор) выделяет из естественного света плоско поляризованный (рис.4).

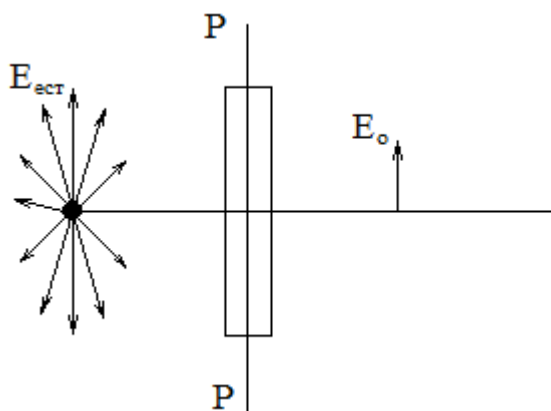


Рис.4

Прохождение естественного света через поляризатор

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.

⁴ <http://globalphysics.ru/physics/svet/264-svoystva-elektromagnitnogo-izlucheniya.html>

Если на пути линейно поляризованного света поставить второй поляроид - анализатор то через него пройдет лишь волна с вектором электрического поля параллельным оптической оси Р- Р кристалла $E_{\parallel} = E_0 \cos \varphi$, где φ угол между оптическими осями Р - Р и Р'- Р' поляризатора и анализатора соответственно (рис. 5).

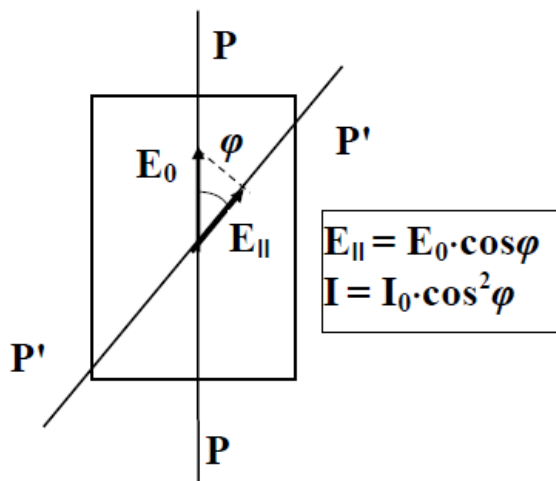


Рис. 5

Прохождение поляризованного света через анализатор

На рис.5: I_0 - интенсивность линейно поляризованного света, E_0 - вектор напряженности электрического поля линейно поляризованной волны падающей на второй кристалл (вышедшей из поляризатора). Вектор напряженности электрического поля E_{\parallel} и I интенсивность волны, прошедшей через кристалл анализатора, зависят от угла φ между оптическими осями Р-Р поляризатора и Р'-Р' анализатора. Через анализатор проходит компонента вектора напряженности E_{\parallel} , являющаяся проекцией вектора E_0 на ось пропускания анализатора $E_{\parallel} = E_0 \cdot \cos(\varphi)$.

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**

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

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 $k = \frac{\Delta I}{I_0}$, выразим ΔI , подставим в предыдущее уравнение $k \cdot I_0 = I_0 - I$.

С учетом поглощения света анализатором закон Малюса записывается следующим образом:

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

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.

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

Закон Малюса (3) можно переписать следующим образом:

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

Здесь I – интенсивность света на выходе анализатора, I_0 – интенсивность света на входе в анализатор. Поскольку и поляризатор, и анализатор не являются идеальными, то при прохождении поляризатора и анализатора не происходит полной поляризации света. Следовательно, необходимо вычесть из измеренных интенсивностей интенсивность неполяризованного света I_H .

Пусть $I_{0Э}$ – экспериментально измеренное значение интенсивности света на выходе из поляризатора. Тогда интенсивность *поляризованного* света, падающего на анализатор, равна $I_0 = I_{0Э} - I_H$. Если $\langle I_Э \rangle$ – среднее значение измеренной интенсивности света на выходе анализатора, то, вычитая из нее интенсивность неполяризованного света I_H , получим I – интенсивность поляризованного света на выходе анализатора.

$$\begin{cases} I = \langle I_Э \rangle - I_H \\ I_0 = I_{0Э} - I_H \end{cases} \quad (4)$$

Тогда закон Малюса (3) с учетом выражений (4) запишется в следующем виде:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\langle I_Э \rangle - I_H}{I_{0Э} - I_H} = (1 - k) \cos^2 \varphi. \quad (5)$$

В данной лабораторной работе интенсивность света фиксируется при помощи фотоприемника. Фотоприемник – прибор, преобразующий падающий на него оптический сигнал (свет) в электрический (электрический ток). Поскольку фототок фотоприемника i прямо пропорционален интенсивности падающего на него света, то измерение интенсивности света в данной работе заменяется измерением фототока в фотоприемнике

Выражение (5) приобретет следующий вид:

$$\frac{\langle i_{\text{Э}} \rangle - i_{\text{Н}}}{i_{0\text{Э}} - i_{\text{Н}}} = (1 - k) \cos^2 \varphi. \quad (6)$$

Таким образом, для вычисления отношения интенсивностей из экспериментальных данных следует пользоваться формулой:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\langle i_{\text{Э}} \rangle - i_{\text{Н}}}{i_{0\text{Э}} - i_{\text{Н}}}. \quad (7)$$

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. 6.

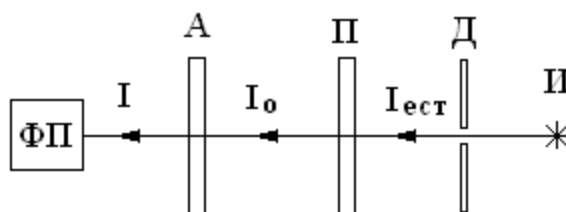


Рис.6

Схема лабораторной установки для проверки закона Малюса

На данной схеме введены следующие обозначения: И - источник естественного света, Д - диафрагма, П - поляризатор, А - анализатор, ФП - фотоприемник, $\mu\text{А}$ - микроамперметр.

Источником света служит галогенная лампа И (рис.7). 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. Фотоприемник служит для преобразования оптического сигнала в электрический. В данной работе 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.

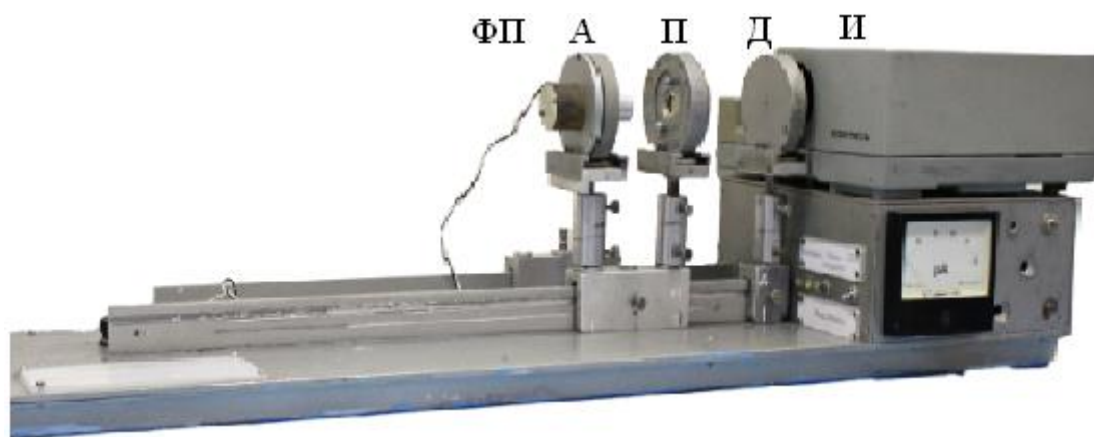


Рис. 7
Экспериментальная установка.

4. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Экспериментальная проверка закона Малюса.

4.1. 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.

4.2. Снимите поляризатор с запасного штатива и установите его на штатив оптической скамьи перед анализатором в соответствии с рис. 6. Измерительная шкала поляризатора должна быть обращена к шкале анализатора (рис.7). Закрепите штатив с поляризатором нижним стопорным винтом штатива.

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

4.4. 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. 5).

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 стрелки 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 (7)

для всех углов φ . Результаты вычислений запишите в таблицу №1 (столбец №7).

4.17. Вычислите значения квадратов косинусов $\cos^2\varphi$ всех углов φ . Результаты вычислений запишите в таблицу №1 (столбец №6).

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

4.19. Аппроксимируйте полученный график $\frac{I}{I_0}$ от квадрата косинуса $\cos^2\varphi$ прямой линией.

Таблица №1 – Экспериментальные данные

φ , град.	$I_{\text{Эправ}}$, мкА	$I_{\text{Элев}}$, мкА	$\langle I_{\text{Э}} \rangle$, мкА	$\cos\varphi$	$\cos^2\varphi$	$\frac{I}{I_0}$
0						
10						
20						
...						
90						

4.20. Определение коэффициента поглощения анализатора

4.20.1. Из формулы (6) и (7) выразите коэффициент поглощения анализатора k и вычислите его для каждого измерения. Результаты внесите в таблицу 2 (столбик №2)

Таблица №2 – Определение коэффициента поглощения

n	k_i	k_{cp}	$k_i - k_{cp}$	$(k_i - k_{cp})^2$	Δk_{cp}	$\delta k, \%$
1						
2						
3						
...						
10						

4.20.2. Вычислите и внесите в таблицу 2 среднее значение коэффициента поглощения k_{cp} , где n - количество произведенных измерений (столбик №3).

$$k_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i = \frac{k_1 + k_2 + \dots + k_n}{n} . \quad (8)$$

4.20.3 Рассчитать значения $k_i - k_{cp}$ и $(k_i - k_{cp})^2$ для каждого значения k_i и внести в таблицу 2 (столбики №4 и №5).

4.20.4. Вычислить среднеквадратическую погрешность Δk_{cp} и внести в таблицу 2 (столбик №6)

$$\Delta k_{cp} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_i - k_{cp})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(k_1 - k_{cp})^2 + (k_2 - k_{cp})^2 + \dots + (k_n - k_{cp})^2}{n(n-1)}} . \quad (9)$$

4.20.5. Вычислить относительную погрешность δk полученного результата и внести в таблицу 7.52 (столбик №6).

$$\delta k_{cp} = \frac{\Delta k_{cp}}{k_{cp}} \cdot 100\% . \quad (10)$$

4.20.6. Записать результат в виде $k = k_{cp} \pm \Delta k_{cp}$, $\delta k = \dots$

4.21. Сделать основные выводы по выполненной работе.

5. ПЕРЕЧЕНЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Одна таблица.
2. График зависимости отношения интенсивностей света на выходе и входе анализатора $\frac{I}{I_0}$ от квадрата косинуса $\cos^2 \varphi$.
3. Результаты расчета коэффициента поглощения анализатора.
4. Результаты вычисления погрешностей.
5. Выводы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Что такое поляризация электромагнитных волн? Как получить линейно поляризованный свет?
- 6.2. Возможна ли поляризация для продольных волн? Что называется естественно поляризованным светом?
- 6.3. Как получается поляризованный свет в лабораторной установке? Какое назначение поляризатора и анализатора в лабораторной установке?
- 6.4. Что такое свет, поляризованный по кругу и по эллипсу?
- 6.5. Сформулируйте закон Малюса. Объясните, почему при прохождении естественного света через поляризатор интенсивность на выходе поляризатора не зависит от угла его поворота.
- 6.6. Что такое степень поляризации? Каким образом измеряется эта величина на лабораторной установке?
- 6.7. Расскажите о способе экспериментальной проверки закона Малюса в лабораторной работе.

7. ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 560с.
2. Лисейкина Т.А. Курс физики. Раздел четвертый. Волновая оптика [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Т. А. Лисейкина, Т. Ю. Пинегина, А. Г. Черевко ; Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. - Электрон. дан. (1 файл). - Новосибирск : СибГУТИ, 2007. - 144 с. : ил. - Библиогр.: с. 143. - Загл. с титул. экрана. - Электрон. версия печ. публикации . - Режим доступа: <http://ellib.sibsutis.ru/ellib/2007/25-Liseykina.rar>, по паролю. - : Б. ц. Авт. договор № 387 от 22.06.2015 г.
3. Черевко А.Г. Расчёт неопределённостей результата измерений в физическом эксперименте: методические указания к лабораторному практикуму, Новосибирск: СИБГУТИ, 2002г.

8. ЗАДАЧИ

1.1. Степень поляризации частично поляризованного света составляет 0.75. Определите отношение максимальной интенсивности света, пропускаемого анализатором, к минимальной. [7]

1.2. Угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора составляет 30° . Определите изменение интенсивности прошедшего через них света, если угол между главными плоскостями равен 45° . [0,33]

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. [0,8]

2.2. 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. [7,38]

3.1. Определите степень поляризации P света, который представляет собой смесь поляризованного света с плоско поляризованным, если интенсивность поляризованного света равна интенсивности естественного. [0,33]

3.2. Интенсивность естественного света, прошедшего через два николя, уменьшилась в 8 раз. Пренебрегая поглощением света, определите угол между главными плоскостями николей. [60°]

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. [9,45]

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. [0,6]

5.1. Степень поляризации частично поляризованного света составляет 0.85. Определите отношение максимальной интенсивности света, пропускаемого анализатором, к минимальной. [12,33]

5.2. Определите, во сколько раз ослабится интенсивность света, прошедшего через два николя, расположенные так, что угол между их главными плоскостями 45° , а в каждом из николей теряется 10% интенсивности падающего на них света. [4,94]

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° . [0,49]

6.2. Определите степень поляризации P света, который представляет собой смесь поляризованного света с плоско поляризованным, если интенсивность поляризованного света в 4 раза больше интенсивности естественного. [0,8]

Лабораторная 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.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

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 **плоско поляризованным** или **линейно поляризованным** (рис.1).

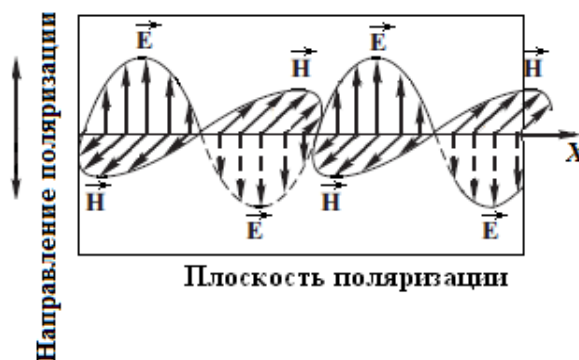


Рис.1

Плоско поляризованный свет

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

Если на границу раздела двух диэлектриков падает под углом α , не равным нулю, естественный свет, то отраженная и преломленная световая волны будут частично поляризованы. Векторы напряженности световой волны можно разложить по базису: компонент перпендикулярной и параллельной плоскости падения. На рис.2 изображены параллельные плоскости падения (стрелками) и перпендикулярные плоскости падения (точками) составляющие

векторов напряженности электрического поля. E_0 для падающей волны, E_1 для отраженной, E_2 для преломленной.

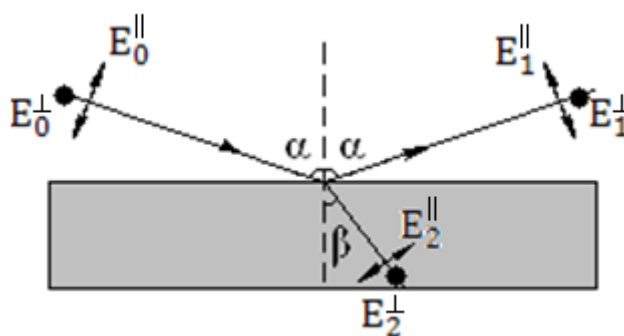


Рис.2

Разложение колебаний по базису

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**.

$$E_1^\perp = -E_0^\perp \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)}, \quad (1)$$

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

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

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

Так как интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды ($I \sim E^2$) и в естественном (неполяризованном) свете все направления колебаний электрического поля равновероятны, то 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:

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

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

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

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

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

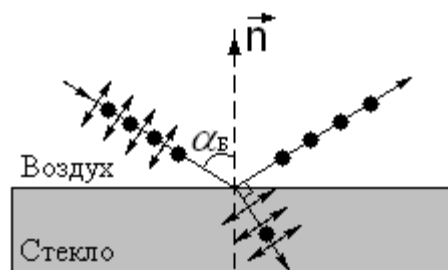


Рис.3

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 $I_1^{\parallel} = 0$ (рис.3). Используя закон преломления, можно связать α_B с показателями преломления сред. Брюстером впервые было показано, что степень поляризации обеих волн, при условии:

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

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 плоскопараллельных стеклянных пластин с абсолютным показателем преломления n_C , вплотную прижатых одна к другой. Такое устройство обычно называют стеклянной стопой. С учетом сказанного, формула (10) преобразуется к виду:

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n_C \quad (11)$$

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Принципиальная схема установки показана на рис. 4. Электромагнитная волна от источника «И» падает на стеклянную стопу «П» и отражается от не

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. Фотоприемник служит для преобразования светового сигнала в электрический. Сила тока i , возникающая в цепи при освещении фотоприемника, пропорциональна интенсивности светового излучения I , падающего на фотоприемник ($I \sim i$).

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**.

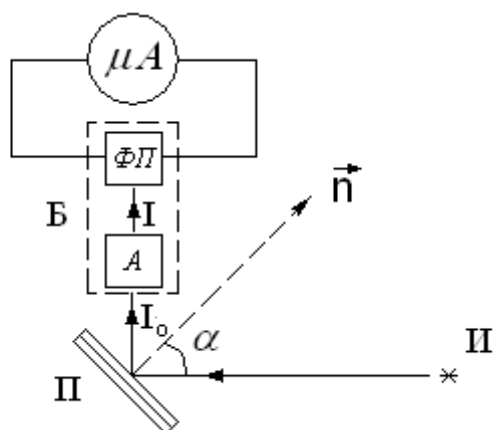


Рис.4

Схема лабораторной установки.



Рис.5

Экспериментальная установка.

Методика измерений

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»

$$I = I_0(1 - k) \cdot \cos^2 \varphi, \quad (12)$$

где k – коэффициент потерь интенсивности электромагнитной волны анализатором. Согласно (12),

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

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

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

$$P(\alpha) = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}. \quad (13)$$

Анализ формулы (13) показывает, что при $\alpha = \alpha_B$, функция $P(\alpha)$ должна иметь **максимум**.

Поскольку интенсивность электромагнитной волны в условиях подобного эксперимента пропорциональна величине тока фотоприемника «ФП» $I \sim i$, то функцию $P(\alpha)$ можно представить в следующем виде:

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

где смысл индексов у значений тока тот же, что и в формуле (13).

4. ЗАДАНИЕ

4.1. Определение угла Брюстера.

4.1.1. Плавнo поворачивая платформу гониометра, на которой закреплена стопа «П» (рис. 5), 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. 5) вокруг вертикальной оси за **рукоятку** платформы блока, добиться максимального отклонения стрелки микроамперметра « μA ».

4.1.4. **Плавнo** 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 (14), 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
30			
35			
...			
70			

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

4.2. Подставляя значения угла Брюстера α_B в формулу (11), 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, °С	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. ПЕРЕЧЕНЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Одна таблица.
2. График зависимости степени поляризации отраженных лучей от угла падения.
3. Значение угла Брюстера.
4. Значение коэффициента преломления материала.
5. Результаты определения типа среды
6. Результаты вычисления погрешностей.
7. Выводы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Дайте понятие поляризации электромагнитных волн.
- 6.2. В чем сущность закона Брюстера?
- 6.3. Каково назначение **поляризатора** и **анализатора** в данной работе?
- 6.4. Какие величины связывают формулы Френеля? Для какого света они применимы?
- 6.5. Дайте качественное объяснение механизма поляризации электромагнитной волны при ее взаимодействии с диэлектриком.
- 6.6. Сделать вывод рабочей формулы $\operatorname{tg} \alpha_{\text{Б}} = n_{\text{с}} / n_{\text{в}}$.
- 6.7. Почему для угла Брюстера справедливо выражение $(\alpha_{\text{Б}} + \beta) = \frac{\pi}{2}$

7. ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 560с
2. Лисейкина Т.А. Курс физики. Раздел четвертый. Волновая оптика [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Т. А. Лисейкина, Т. Ю. Пинегина, А. Г. Черевко ; Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. - Электрон. дан. (1 файл). - Новосибирск : СибГУТИ, 2007. - 144 с. : ил. - Библиогр.: с. 143. - Загл. с титул. экрана. - Электрон. версия печ. публикации . - Режим доступа: <http://ellib.sibsubtis.ru/ellib/2007/25-Liseykina.rar>, по паролю. - : Б. ц. Авт. договор № 387 от 22.06.2015 г.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. т.4. Оптика. Изд.3. М., Физматлит, 2005г.
4. Яворский Б. М. и Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985 г.

8. ЗАДАЧИ

- 1.1. Определите показатель преломления стекла, если при отражении от него света отраженный луч полностью поляризован при угле преломления 35° . [1,43]
- 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. [57⁰]
- 2.1. Найти угол полной поляризации $\alpha_{\text{Б}}$ при отражении света от стекла, показатель преломления которого $n=1.57$. [57,5⁰]
- 2.2. Найти коэффициент отражения естественного света, падающего на стекло ($n=1.54$) под углом $\alpha_{\text{Б}}$ полной поляризации. [0,083]

3.1. Найти показатель преломления диэлектрика, если при отражении от него света отраженный луч полностью поляризован при угле преломления 30° . [1,73]

3.2. Естественный свет падает на кристалл алмаза ($n=2.42$) под углом α_B полной поляризации. Найти угол преломления света. [22,45⁰]

4.1. Предельный угол полного внутреннего отражения для некоторого вещества $\alpha=45^\circ$. Найти для этого вещества угол Брюстера полной поляризации. [54,7⁰]

4.2. 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? [1,67; 64,2⁰]

5.1. Найти угол полной поляризации α_B при отражении света от диэлектрика, показатель преломления которого $n=1.73$. [60⁰]

5.2. Лучи естественного света проходят сквозь плоскопараллельную пластинку ($n=1.54$), падая на нее под углом α_B полной поляризации. Найти степень поляризации P лучей, прошедших в пластинку. [0,091]

6.1. Найти коэффициент отражения лучей, отраженных при падении естественного света на стекло ($n=1.5$) под углом $\alpha=45$ градусов. [0,052]

6.2. Под каким углом к горизонту должно находиться Солнце, чтобы его лучи, отраженные от поверхности озера были полностью поляризованы? Показатель преломления воды равен 1.33. [36,9⁰]

Лабораторная работа 8.1 ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА ОСВЕЩЕННОСТИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с основными фотометрическими величинами. Изучить закон освещенности. Определить силу света источника

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Световые волны включают в себя инфракрасное излучения, видимый свет и ультрафиолетовое излучения и являются электромагнитными волнами (рис.1).

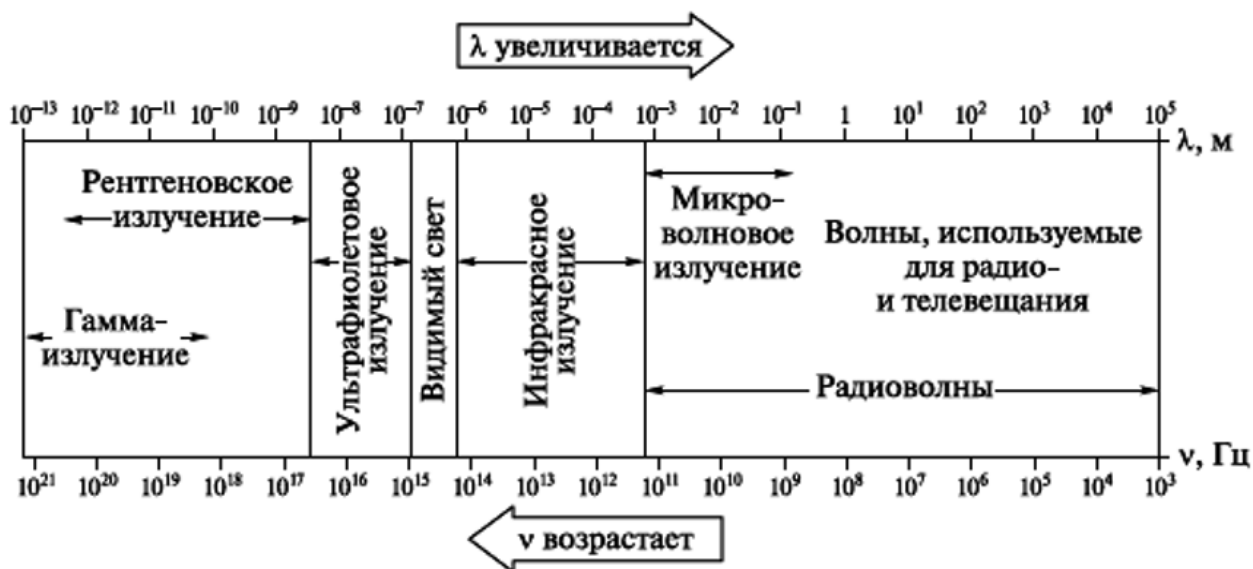


Рис.1

Шкала электромагнитных волн⁵

Световые волны, так же, как и остальные виды электромагнитных волн, переносят энергию и могут характеризоваться энергетическими параметрами, не зависящими от свойств приемников излучения.

К таким параметрам, например, относятся: энергетический поток излучения $\Phi_{\text{э}}$, энергетическая светимость $R_{\text{э}}$ и энергетическая освещенность $E_{\text{э}}$.

Энергетический поток излучения $\Phi_{\text{э}}$ – это энергия dW , переносимая волной в единицу времени dt перпендикулярно данной поверхности

$$\Phi_{\text{э}} = \frac{dW}{dt}, \text{ Вт.} \quad (1)$$

Энергетическая светимость $R_{\text{э}}$ – это поток энергии $\Phi_{\text{э, изл}}$, излучаемый с единицы поверхности dS источника по всем направлениям во всем интервале частот

⁵ Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов/ - 13-е изд. стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – стр. 296

$$R_{\text{Э}} = \frac{d\Phi_{\text{Э изл}}}{dS}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (2)$$

Энергетической освещенностью $E_{\text{Э}}$ называется поток энергии $\Phi_{\text{Э пад}}$, падающий на единицу освещаемой поверхности dS .

$$E_{\text{Э}} = \frac{d\Phi_{\text{Э пад}}}{dS}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (3)$$

Чувствительность человеческого глаза зависит от длины волны света. Достаточно вспомнить, например, что УФ излучение и ИК излучение человек не видит, а область видимого света занимает довольно узкий диапазон длин волн⁶ между 380 нм и 780 нм. Чувствительность среднего нормального человеческого глаза к излучению различной длины волны описывается кривой относительной спектральной чувствительности $V(\lambda)$ (рис.2).

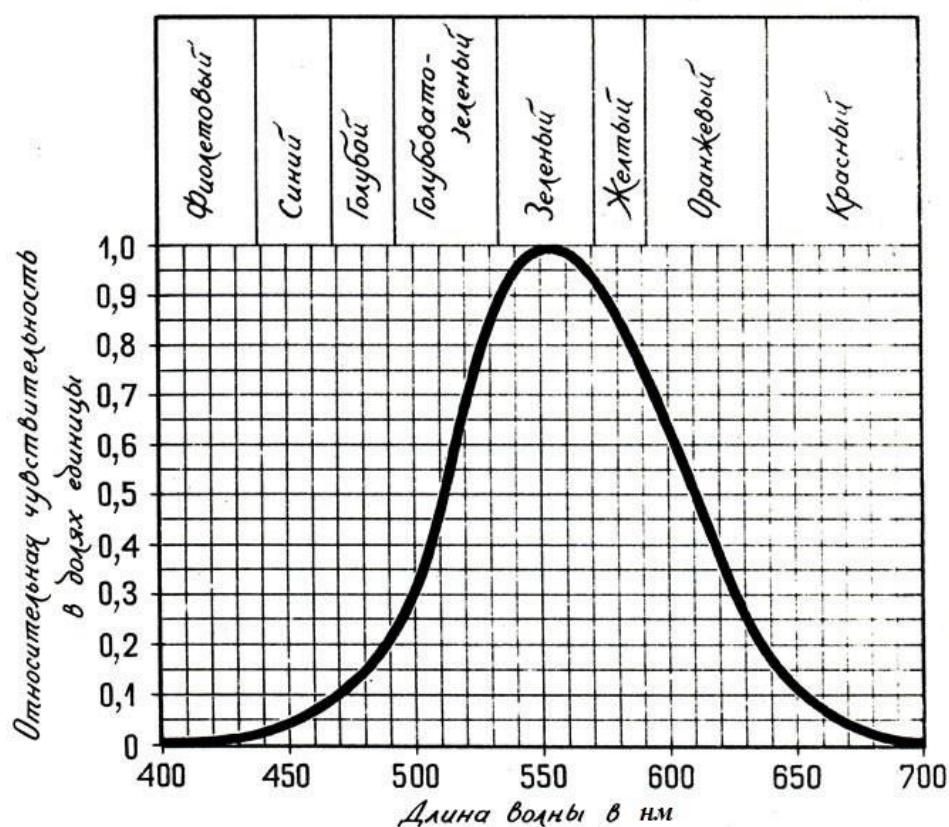


Рис.2

Кривая относительной спектральной чувствительности человеческого глаза (функция видности глаза)⁷

⁶ ГОСТ 8.332-78. Государственная система обеспечения единства измерений. Световые измерения. Значения относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения. Таблица 2.

⁷ Штейнгауз А.И. Девять цветов радуги – М.: Детгиз, 1963г, стр.103

Видно, что наибольшую чувствительность глаз имеет к длине волны 555 нм, соответствующей зеленому цвету. При этом же потоке энергии оцениваемая зрительно интенсивность для других длин волн оказывается меньшей. Соответственно, и $V(\lambda)$ для этих длин волн меньше единицы. Например, для света с длиной волны $\lambda = 610$ нм (оранжевая часть спектра) значение функции $V(\lambda) = 0,5$. Это означает, что для получения зрительного ощущения такой же интенсивности, как и для 555 нм, свет с длиной волны 610 нм должен иметь плотность потока энергии в два раза больше.

Характеристики света, учитывающие чувствительность человеческого глаза (и фотоприемных устройств), называются световыми характеристиками. **Фотометрией** называется раздел оптики, занимающийся измерением световых потоков и величин, связанных с такими потоками

Основными являются: световой поток Φ , сила света I , светимость источника R , освещенность поверхности E .

Световой поток Φ – поток световой энергии, оцениваемой по зрительному ощущению, измеряется в люменах (лм). При дневном зрении для излучения с длиной волны $\lambda = 555$ нм энергетическому потоку $\Phi_{\lambda} = 1$ Вт соответствует световой поток $\Phi = 680$ лм (или световому потоку $\Phi = 1$ лм соответствует поток энергии $\Phi_{\lambda} = 0,0016$ Вт). Световому потоку, образованному излучением с другой длиной волны λ , соответствует поток энергии

$$\Phi_{\lambda} = \frac{0,0016}{V(\lambda)} \Phi. \quad (4)$$

Телесный угол Ω – пространственный угол, образованный в центре сферы вершиной конуса, основание которого находится на поверхности сферы. Единица измерения телесного угла –стерадиан (ср). 1 ср соответствует телесному углу, вырезающему на поверхности сферы участок площадью $S = r^2$, где r – радиус сферы (рис.3).

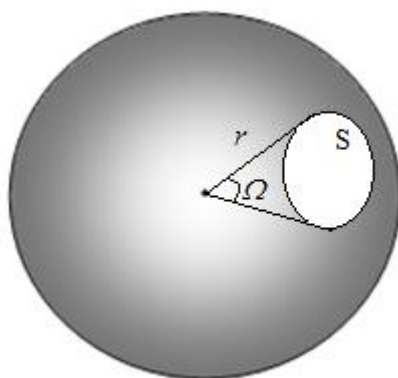


Рис.3
Телесный угол

Сила света I – световой поток, изучаемый точечным источником в единицу телесного угла. Единица измерения силы света – кандела (кд), являющейся одной из основных единиц системы СИ.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}, \text{ кД.} \quad (5)$$

Если сила света не зависит от направления, то источник называется изотропным, для изотропного точечного источника сила света равна

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}, \text{ кД,} \quad (6)$$

где Φ – полный световой поток, излучаемый источником по всем направлениям.

Светимость источника R – световой поток, испускаемый с единицы площади поверхности источника по всем направлениям

$$R = \frac{d\Phi_{\text{изл}}}{dS}, \frac{\text{лм}}{\text{м}^2}. \quad (7)$$

Освещенность поверхности E – световой поток, падающий на единицу освещаемой поверхности. Освещенность измеряется в люксах.

$$E = \frac{d\Phi_{\text{пад}}}{dS}, \text{ лк.} \quad (8)$$

Выясним, как освещенность поверхности зависит от расстояния до источника и его силы света. Пусть на площадку dS падает световой поток от источника с силой света I (рис.4). Площадка заключена в телесном угле $d\Omega$. Следовательно, в этот телесный угол попадает световой поток

$$d\Phi = I \cdot d\Omega. \quad (9)$$

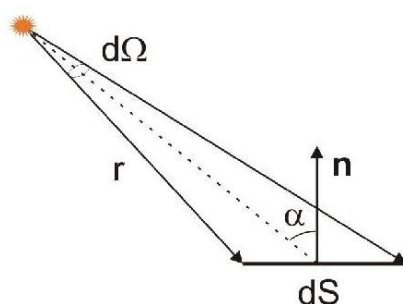


Рис.5

Вывод закона освещенности

Площадь основания конуса $dS \cdot \cos\alpha$. Таким образом, телесный угол $d\Omega$ равен

$$d\Omega = \frac{dS \cdot \cos\alpha}{r^2}. \quad (10)$$

Подставив выражения (9) и (10) в формулу (8), получим закон освещенности.

$$E = \frac{I \cdot \cos \alpha}{r^2}. \quad (11)$$

Проверка данного закона и составляет цель лабораторной работы. Для измерения освещенности используется люксметр (рис.6). В люксметре воспринимающим свет устройством является фотоэлемент (2). Под действием света фотоэлемент вырабатывает электрический ток, сила тока прямо пропорциональна освещенности. Сила тока измеряется при помощи гальванометра, причем шкала гальванометра (1) проградуирована непосредственно в люксах, а не в микроамперах. Фотоэлемент может быть защищен специальной насадкой (3), уменьшающей освещенность фотоэлемента. В таком случае измеренное значение освещенности необходимо умножить на соответствующий коэффициент.

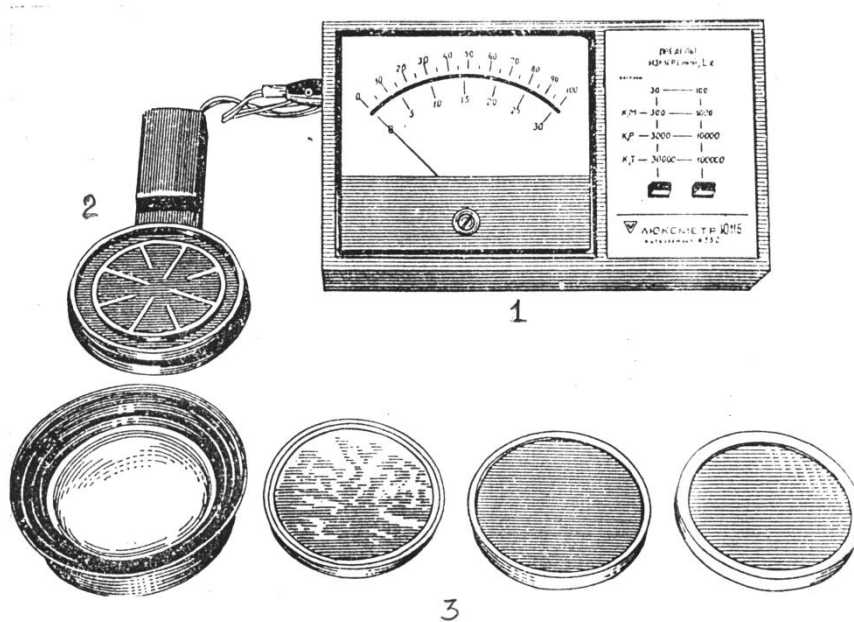


Рис.6
Люксметр Ю-116

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Для проверки закона освещенности используется установка, изображенная на рис.7.

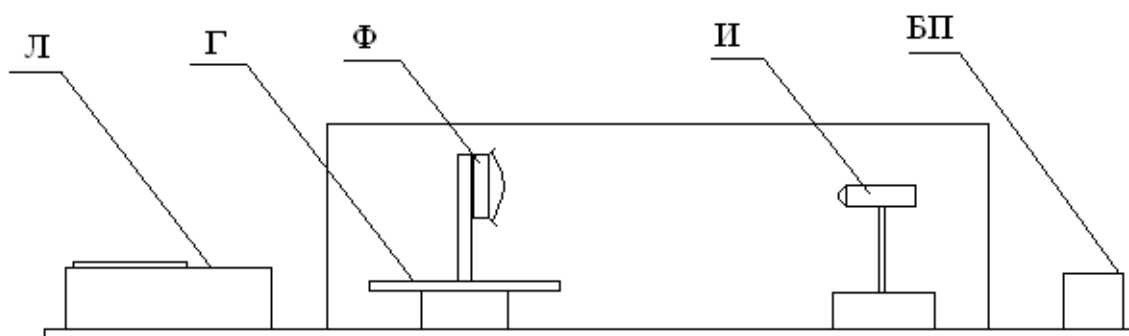


Рис.7

Схема установки для измерения освещенности

На оптической скамье находятся: источник света «И»; селеновый фотоприемник «Ф», закрепленный на гониометре, позволяющем изменять угол падения света на фотоприемник; блок питания к источнику света «БП» и измерительный блок люксметра «Л». Источник и фотоэлемент помещены в закрывающийся контейнер, позволяющий исключить попадание на фотоэлемент света, не связанного с лабораторным источником. Внешний вид установки показан на рис.8.

Фотоприемник защищен насадкой, ослабляющей падающий на него световой поток в 100 раз. Поэтому измеренные значения освещенности необходимо увеличить в 100 раз.

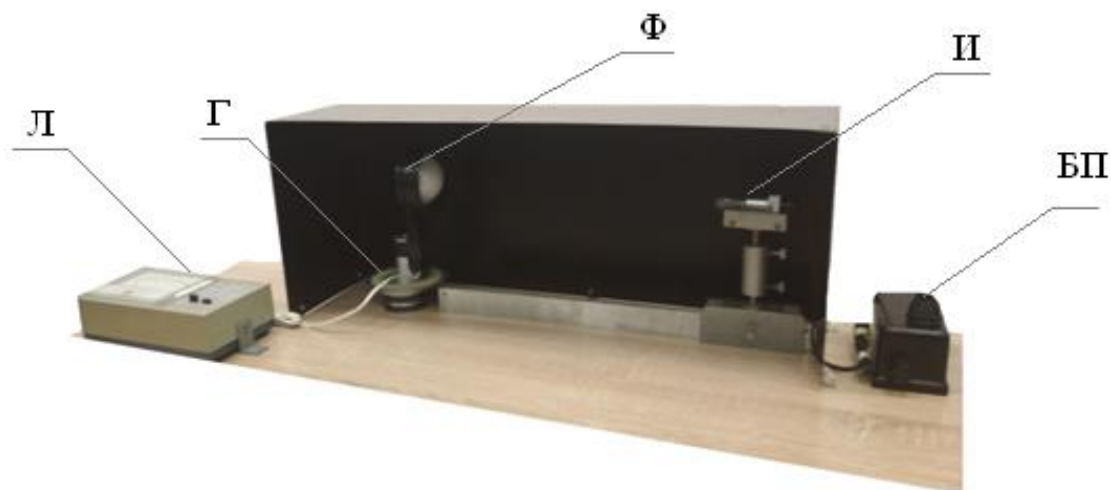


Рис.8

Экспериментальная установка

4. ЗАДАНИЕ

4.1 Исследование зависимости освещенности от расстояния

4.1.1 Подготовить таблицу измерений №1

- 4.1.2 Установить гониометр в положение «0», плоскость фотоприемника должна быть перпендикулярна оптической оси (нормальное падение света).
- 4.1.3 Отодвинуть источник света на максимальное расстояние от фотоэлемента
- 4.1.4 Включить блок питания «БП» для источника света.
- 4.1.5 Измерить освещенность на максимальном расстоянии от источника, записать данные в таблицу.
- 4.1.6 Уменьшая расстояние от источника света до фотоэлемента, произвести не менее пяти измерений освещенности.
- 4.1.7 Рассчитать квадраты расстояний от источника до фотоэлемента.
- 4.1.8 Рассчитать по формуле (11) силу света I источника, данные занести в таблицу №1.
- 4.1.9 Определить среднее значение силы света источника $\langle I \rangle$.
- 4.1.10 Построить график зависимости освещенности от $\frac{1}{r^2}$.

Таблица № 1

№	r , м	E , лк	r^2 , м ²	$\frac{1}{r^2}$, м ⁻²	I , кд	$\langle I \rangle$, кд
1						
2						
3						
4						
5						

4.2 Исследование зависимости освещенности от косинуса угла падения света

- 4.2.1 Приготовить таблицу №2.
- 4.2.2 Поставить источник примерно посередине оптической скамьи.
- 4.2.3 Изменять угол падения света от нуля до 80° с шагом 5° .
- 4.2.4 Для каждого угла падения измерить освещенность, занести данные в таблицу.
- 4.2.5 Рассчитать косинус угла падения.
- 4.2.6 Построить график зависимости освещенности от косинуса угла падения

Таблица № 2

№	α , градус	E , лк	$\cos \alpha$
	0		
	...		
	80		

- 4.3 Сделать основные выводы по результатам исследований.

5. ПЕРЕЧЕНЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Две таблицы.

2. Два графика.
3. Расчет силы света.
4. Результаты вычисления погрешностей.
5. Выводы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Какие энергетические параметры световых волн Вы знаете? Приведите соответствующие формулы
- 6.2. Какие световые параметры световых волн Вы знаете? Приведите соответствующие формулы.
- 6.3. Выведите формулу закона освещенности (11).
- 6.4. В чем состоит проверка закона освещенности?

7. ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 560с
2. Лисейкина Т.А. Курс физики. Раздел четвертый. Волновая оптика [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Т. А. Лисейкина, Т. Ю. Пинегина, А. Г. Черевко ; Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. - Электрон. дан. (1 файл). - Новосибирск : СибГУТИ, 2007. - 144 с. : ил. - Библиогр.: с. 143. - Загл. с титул. экрана. - Электрон. версия печ. публикации . - Режим доступа: <http://ellib.sibsutis.ru/ellib/2007/25-Liseykina.rar>, по паролю. - : Б. ц. Авт. договор № 387 от 22.06.2015 г.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. т.4. Оптика. Изд.3. М., Физматлит, 2005г.
4. Яворский Б. М. и Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985 г.

8. ЗАДАЧИ

- 1.1. Определите, на какую высоту необходимо повесить лампочку мощностью 300 Вт, чтобы освещенность расположенной под ней доски была 50 лк. Наклон доски составляет 35° , а световая отдача лампочки составляет 15 лм/Вт. Лампочку считать точечным изотропным источником. [2,42 м]
- 1.2. Чувствительность фотозлемента $\gamma = 200$ мкА/лм. Фотозлемент освещается лампой с силой света 20 кд, находящейся на расстоянии 40 см от фотозлемента. Площадь фоточувствительной поверхности фотозлемента составляет 5 см². Какую силу тока покажет гальванометр, подключенный к фотозэлементу? [12,5 мкА]
- 2.1. Два источника с полным световым потоком 380 лм и 610 лм соответственно, расположены на расстоянии 50 см друг от друга. Где нужно

поместить экран на прямой, соединяющей источники, чтобы освещенность экрана с обеих сторон была одинаковой? [22 см и 28 см]

2.2. Чувствительность фотоэлемента $\gamma = 360$ мкА/лм. Фотоэлемент освещается лампой с полным световым потоком 500 лм, находящейся на расстоянии 80 см от фотоэлемента. Площадь фоточувствительной поверхности фотоэлемента составляет 5 см². Какую силу тока покажет гальванометр, подключенный к фотоэлементу? [11,2 мкА]

3.1. Рабочая поверхность стола освещается двумя лампами, находящимися на высоте 2 м от поверхности стола. Световой поток первого светильника равен 1256 лм, второго 628 лм. Расстояние между лампами 2 м. Чему равна освещенность стола под лампами на середине расстояния между ними? [26,8 лк]

3.2. Гальванометр фотоприемника показывает силу тока 20 мкА. Чувствительность фотоприемника 200 мкА/лм, его площадь поверхности 8 см². На каком расстоянии от фотоприемника находится лампа с силой света 40 кд? [57 см]

4.1. Определите, на какую высоту необходимо повесить люминесцентную лампочку мощностью 20 Вт, чтобы освещенность расположенной под ней доски была 40 лк. Наклон доски составляет 30°, а световая отдача лампочки составляет 60 лм/Вт. Лампочку считать точечным изотропным источником. [2,07 м]

4.2. Гальванометр фотоприемника показывает силу тока 50 мкА. Чувствительность фотоприемника 200 мкА/лм, его площадь поверхности 8 см². Какова сила света лампы, освещающей фотоприемник, расположенной на расстоянии 60 см от него? [112,5 кд]

5.1. По обе стороны от точечного источника света на одинаковых расстояниях, равных 0,5 м, помещены экран и плоское зеркало, плоскости которых параллельны. Какова освещенность, создаваемая в центре экрана, если сила света источника 40 кд? [178 лк]

5.2. Чувствительность фотоэлемента $\gamma = 200$ мкА/лм. Фотоэлемент освещается лампой с полным световым потоком 628 лм, находящейся на расстоянии 50 см от фотоэлемента. Площадь фоточувствительной поверхности фотоэлемента составляет 5 см². Какую силу тока покажет гальванометр, подключенный к фотоэлементу? [20 мкА]

6.1. По обе стороны от точечного источника света на одинаковых расстояниях помещены экран и плоское зеркало, плоскости которых параллельны. Освещенность, создаваемая в центре экрана, равна 100 лк, сила света источника 90 кд. На каком расстоянии от источника находятся экран и зеркало? [1 м]

6.2. Гальванометр фотоприемника показывает силу тока 30 мкА. Чувствительность фотоприемника 300 мкА/лм, его площадь поверхности 4 см². Какова сила света лампы, освещающей фотоприемник, расположенной на расстоянии 20 см от него? [10 кд]

Приложение 1

Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций
Российской Федерации
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.

Измерения сняты

дата

подпись

Отчет принят

Защита:

оценка

дата

подпись

Новосибирск 2020 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 и человеческому глазу не доступно.

Ст. преподаватель Грищенко И.В.
Ст. преподаватель Лубский В.В.

ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
И ФОТОМЕТРИЯ
(учебное пособие)

Редактор:
Корректор:

Подписано в печать