

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования «Витебский государственный  
университет имени П.М. Машерова»  
Кафедра инженерной физики

# ОБЩАЯ ФИЗИКА (ОПТИКА)

*Рабочая тетрадь*

*Витебск  
ВГУ имени П.М. Машерова  
2022*

УДК 535(076.5)

ББК 22.34я73

О-28

Печатается по решению научно-методического совета учреждения образования «Витебский государственный университет имени П.М. Машерова». Протокол № 2 от 05.01.2022.

Составители: доцент кафедры инженерной физики ВГУ имени П.М. Машерова, кандидат физико-математических наук **И.Ф. Кашевич**; старший преподаватель кафедры инженерной физики ВГУ имени П.М. Машерова **Т.И. Сапелко**

Р е ц е н з е н т :

профессор кафедры геометрии и математического анализа  
ВГУ имени П.М. Машерова, доктор физико-математических наук,  
профессор *Ю.В. Трубников*

**Общая физика (оптика) : рабочая тетрадь / сост.:**  
**О-28** И.Ф. Кашевич, Т.И. Сапелко. – Витебск : ВГУ имени П.М. Машерова,  
2022. – 52 с.

Рабочая тетрадь для выполнения лабораторных работ студентами факультета математики и информационных технологий написана в соответствии с учебной программой по дисциплине «Общая физика (оптика)» для специальности 1-98 01 01-02 Компьютерная безопасность (радиофизические методы и программно-технические средства). Содержит теорию, методику выполнения, контрольные вопросы, материалы для самостоятельной работы и список литературы. Издание предназначено для студентов физических специальностей.

УДК 535(076.5)

ББК 22.34я73

© ВГУ имени П.М. Машерова, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>СВОДНАЯ ТАБЛИЦА УЧЕТА ВЫПОЛНЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ .....</b>	<b>4</b>
<b>ГРАФ-СХЕМА ПОДСЧЕТА ПОГРЕШНОСТЕЙ .....</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1. ФОТОМЕТРИЯ И ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА ..</b>	<b>6</b>
Лабораторная работа № 1. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА ОСВЕ- ЩЁННОСТИ И ЗАВИСИМОСТИ СИЛЫ СВЕТА И УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ЛАМПОЧКИ НАКАЛИВА- НИЯ ОТ НАПРЯЖЕНИЯ НА НЕЙ .....	6
Лабораторная работа № 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНОГО ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ ЛИНЗ И ИЗУЧЕНИЕ АБЕРРАЦИЙ ТОЛСТОЙ ЛИНЗЫ .....	13
<b>ГЛАВА 2. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА .....</b>	<b>21</b>
Лабораторная работа № 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ И ДЛИНЫ ВОЛНЫ СВЕТА ПРИ ПОМОЩИ КОЛЕЦ НЬЮТОНА .....	21
Лабораторная работа № 4. ДИФРАКЦИЯ ФРАУНГОФЕРА, ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ .	26
Лабораторная работа № 5. ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ СВЕТ. ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА. ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПЛАСТИНОК В 1/2 И 1/4 ДЛИНЫ ВОЛНЫ .....	30
Лабораторная работа № 6. ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ТРЕХГРАННОЙ ПРИЗМЫ .....	36
Лабораторная работа № 7. ИЗУЧЕНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИ- ЧЕСКОГО КОНЦЕНТРАЦИОННОГО КОЛОРИМЕТРА. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА ПРИ ПОМОЩИ КФК-2 .....	41
<b>ГЛАВА 3. КВАНТОВАЯ ОПТИКА.....</b>	<b>46</b>
Лабораторная работа № 8. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА .....	46

## СВОДНАЯ ТАБЛИЦА УЧЕТА ВЫПОЛНЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

студента \_\_\_\_\_ группы \_\_\_\_\_ курса \_\_\_\_\_ факультета

(Ф. И. О. студента)

№ л/р	Название лабораторной работы	Дата выполнения	Роспись преподавателя о выполнении и оформлении л/р	Оценка и роспись преподавателя о защите л/р
1	Изучение закона освещённости и зависимости силы света и удельной мощности лампочки накаливания от напряжения на ней			
2	Определение главного фокусного расстояния линз и изучение аберраций толстой линзы			
3	Определение радиуса кривизны линзы и длины волны света при помощи колец Ньютона			
4	Дифракция Фраунгофера, изучение свойств дифракционной решетки			
5	Поляризованный свет. Проверка закона Малюса. Изучение свойств пластинок в $1/2$ и $1/4$ длины волны			
6	Изучение свойств трехгранной призмы			
7	Изучение фотоэлектрического концентрационного колориметра. Исследование поглощения света при помощи КФК-2			
8	Изучение законов внешнего фотоэффекта и определение постоянной Планка			

## ГРАФ-СХЕМА ПОДСЧЕТА ПОГРЕШНОСТЕЙ

1. Подсчитать среднее арифметическое  $\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
2. Определить случайные отклонения  $\Delta x = x_i - \langle x \rangle$ .
3. Подсчитать случайную погрешность  $\Delta x_{сл}$  (при  $P = 0,95$ ):

$$\Delta x_{сл} = t_{n,P} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2},$$

где  $t_{n,P}$  – коэффициент Стьюдента.

4. Определить приборную погрешность  $\Delta x_{пр}$  по формулам:

$$\Delta x_{пр} = \frac{\lambda_P}{3,0} \delta = \frac{\lambda_P}{3,0} k x_{\max},$$

где  $\delta$  – предельная абсолютная погрешность прибора,  $k$  – класс точности прибора,  $\lambda_P$  – коэффициент, который зависит от доверительной вероятности  $P$ . При  $P = 0,95$   $\lambda_P = 2,0$ .

5. Определить погрешность округления  $\Delta x_{окр}$  ( $P = 0,95$ ):

$$\Delta x_{окр} = P \frac{h}{2},$$

где  $h$  – интервал округления. Если измерение производится с точностью до целого деления, то интервал округления равен цене деления прибора.

При округлении констант интервал округления приравнивается к последнему разряду константы ( $P = 1,0$ ). Например, если  $\pi = 3,14$ , то  $h = 0,01$ , следовательно  $\Delta \pi = 0,005$ .

6. Определить полную погрешность прямого измерения:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{сл}^2 + \Delta x_{пр}^2 + \Delta x_{окр}^2}.$$

7. Вычислить относительную погрешность прямого измерения:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} 100\% = \sqrt{\Delta \varepsilon_{сл}^2 + \Delta \varepsilon_{пр}^2 + \Delta \varepsilon_{окр}^2} 100\%.$$

8. Записать окончательный результат в виде:

$$x = (\langle x \rangle \pm \Delta x); \quad \varepsilon\%.$$

**Расчёт по приведенной схеме проводится для каждой физической величины, измеренной прямым методом.**

9. Вычислить абсолютную и относительную погрешности косвенных измерений по формулам:

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{y} = \sqrt{\frac{1}{y^2} \sum_{k=1}^N \left( \frac{\partial y}{\partial x_k} \Delta x_k \right)^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left( \frac{\partial \ln y}{\partial x_k} \Delta x_k \right)^2}, \quad \Delta y = \varepsilon_y y$$

или

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left( \frac{\partial y}{\partial x_k} \Delta x_k \right)^2}, \quad \varepsilon_y = \Delta y / y.$$

10. Окончательный результат записать в виде:

$$y = (y_{изм} \pm \Delta y); \quad \varepsilon_y\%.$$

# ГЛАВА 1. ФОТОМЕТРИЯ И ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

## Лабораторная работа № 1

### Изучение закона освещённости и зависимости силы света и удельной мощности лампочки накаливания от напряжения на ней

**Цель работы:** изучить зависимость освещённости от расстояния до источника и от угла падения лучей, убедиться в выполнении закона освещённости; исследовать, как зависит сила света лампочки накаливания от напряжения на лампочке.

**Оборудование:** прибор по фотометрии, микроамперметр или люксметр, выпрямитель ВС-4-12, реостат, выключатели, оптическая скамья, фотометр Жоли, эталонная лампочка с трансформатором, исследуемая лампочка, амперметр, вольтметр.

#### Теория работы и описание установки

Раздел оптики, который изучает методы измерения энергетических и световых (визуальных) характеристик электромагнитного излучения, называется *фотометрией*.

Электромагнитная волна, в том числе и световая, при распространении переносит определенное количество энергии. Количество энергии, которая переносится волной за единицу времени через площадь  $\Delta S$ , перпендикулярную к скорости  $v$  распространения волны, называется потоком излучения:

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

Единица потока излучения – 1 Вт.

Источник света, размеры которого можно не учитывать по сравнению с расстоянием от места наблюдения до источника, называется *точечным*. В однородной и изотропной среде волна, которая излучается точечным источником, будет сферической. Для характеристики точечных источников применяется *сила света  $J$* , которая определяется как поток излучения источника, который распространяется внутри телесного единичного угла:

$$J_{\text{э}} = \frac{d\Phi_{\text{э}}}{d\Omega} . \quad (2)$$

Единица силы света – 1 Вт/ср.

Рассмотрим точечный источник, сила света которого  $J$ , и выделим телесный угол  $d\Omega$  с вершиной в точке  $O$  (рис. 1). Если на пути потока излучения поместить площадку  $dS$ , то отношение потока  $d\Phi_{\text{э}}$  к площади освещаемой площадки  $dS$  называется *освещённостью*:

$$E_{\text{э}} = \frac{d\Phi_{\text{э}}}{dS} . \quad (3)$$

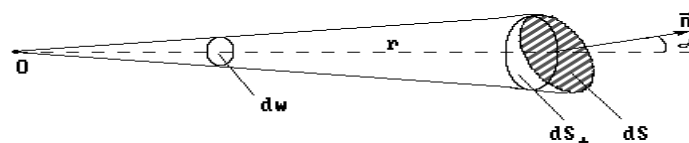


Рис. 1

Единица освещенности – 1 Вт/м<sup>2</sup>.

Из рисунка видно, что телесный угол равен:

$$d\Omega = \frac{dS_{\perp}}{r^2} = \frac{dS \cos \alpha}{r^2}$$

Из формулы (2) следует:

$$d\Phi_{\ominus} = J_{\ominus} \cdot d\Omega,$$

и для освещенности получим следующую формулу:

$$E_{\ominus} = \frac{J_{\ominus} \cdot \cos \alpha}{r^2} \quad (4)$$

– **закон освещенности для точечного источника света.** По этому закону величина освещенности площадки прямо пропорциональна силе света источника, обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до освещаемой поверхности и прямо пропорциональна косинусу угла падения лучей.

Если в одном из направлений от данного источника, сила света которого  $J_{\ominus}$ , освещенность на расстоянии  $r_1$  будет  $E_1$ , а на расстоянии  $r_2$  –  $E_2$ , то, применяя закон освещенности, получим:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{J_{\ominus} \cdot \cos \alpha}{r_1^2} : \frac{J_{\ominus} \cdot \cos \alpha}{r_2^2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (5)$$

Для проверки закона освещенности используется прибор по фотометрии (рис. 2). Он состоит из кругового корпуса, закрепленного на двух стойках, которые установлены на общем основании.

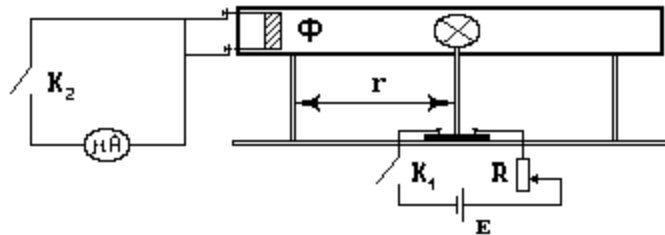


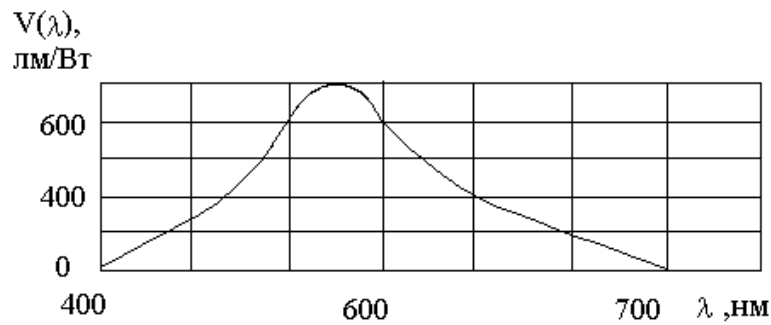
Рис. 2

Корпус состоит из двух частей: камеры 1, внутри которой находится селеновый фотоэлемент, и разборного цилиндра 2. На торце камеры 1 находятся две клеммы, к которым подведены выводы от фотоэлемента. К этим же клеммам подсоединяется микроамперметр или люксметр. При помощи рукоятки фотоэлемент можно повернуть вокруг оси в пределах от 0 до 90°. Внутри трубы имеется лампочка определенной силы света, которая питается от выпрямителя и может перемещаться вдоль трубы по измерительной линейке. Величина фототока пропорциональна освещенности фотоэлемента  $E$ . Поэтому исследование освещенности  $E$  сводится к измерению фототока  $I$  в зависимости от расстояния лампочки от фотоэлемента и угла падения  $\varphi$  лучей на фотоэлемент. При наличии измерителя освещенности – люксметра измерение освещенности  $E$  осуществляется непосредственно по шкале прибора.

Одной из особенностей света является его воздействие на человеческий глаз, который обладает избирательной чувствительностью к энергии световых волн разной длины  $\lambda$ . Поэтому, кроме энергетических, вводятся **световые** характеристики.

Чувствительность глаза к свету разных длин волн можно характеризовать с помощью кривой, которая определяет его спектральную чувствительность – так называемую **видность излучения**.

Видность представляет собой функцию, которая показывает зависимость величины светового потока, создаваемого энергетическим потоком в 1 Вт, от длины волны (рис. 3).



$$V(\lambda)^{\max} = 683 \text{ лм/Вт}$$

Рис. 3

Она обозначается символом  $V(\lambda)$  и измеряется в лм/Вт (люмен – единица светового потока). Функция видности  $V(\lambda)$  имеет максимум при длине волны 555 нм и равна для этого участка спектра  $V(\lambda)^{\max} = 683$  лм/Вт. На других участках спектра  $V(\lambda)$  уменьшается и при длине волны, равной соответственно 380 и 770 нм, она становится равной нулю. Отношение

$$k(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{V(\lambda)^{\max}} \quad (6)$$

называется **относительной видностью**, при  $\lambda = 555$  нм  $k(\lambda) = 1$ .

Для характеристики интенсивности света с учетом избирательной (селективной) чувствительности глаза вводится понятие **светового потока**:

$$d\Phi_c = V(\lambda) \cdot d\Phi_\varepsilon.$$

Полный световой поток

$$\Phi_c = \int V(\lambda) \cdot d\Phi_\varepsilon = V(\lambda)^{\max} \int k(\lambda) \cdot d\Phi_\varepsilon.$$

Таким образом, фотометрическая величина **световой поток** может быть определена как мощность светового излучения, которое оценивается по зрительным ощущениям.

Все остальные световые (визуальные) характеристики света и его источников определяются так же, как и энергетические. Они связаны аналогичными соотношениями, но для них применяются специальные единицы. В качестве основной единицы в СИ принята **кандела**. По определению кандела равна силе света источника, который испускает монохроматическое излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, энергетическая сила света которого в заданном направлении составляет  $1/683$  Вт/ср.

Единицей светового потока  $\Phi_c$  является **люмен**. Он равен световому потоку, излучаемому изотропным точечным источником света с силой света в 1 кд в пределах телесного угла в 1 стерадиан:

$$d\Phi_c = J_c d\Omega \Rightarrow [\Phi_c] = \text{кдср} = \text{лм}. \quad (7)$$

Известно, что при длине волны зеленого цвета  $\lambda = 555$  нм световой поток в 1 лм равен энергетическому потоку 0,00146 Вт.

Единицей освещенности  $E_c$  является **люкс**:

$$E_c = \frac{d\Phi_c}{dS} \Rightarrow [E_c] = \text{лм/м}^2 = \text{лк}. \quad (8)$$

Светимость  $M_c$  и яркость  $L_c$  измеряются соответственно в люменах и канделах на квадратный метр:



$$M_c = \frac{d\Phi_c^{изл}}{dS} \Rightarrow [M_c] = \text{лм/м}^2. \quad (9)$$

$$L_c = \frac{d\Phi_c^{изл}}{\Delta S \cdot \cos \alpha \cdot d\Omega} = \frac{J_c}{\Delta S_{\perp}} \Rightarrow [L_c] = \text{кд/м}^2 = \text{нт}. \quad (10)$$

Для измерения световых величин применяются специальные приборы – **фотометры**. Они делятся на два класса – субъективные (визуальные), где приемником света является глаз человека, и объективные, где свет падает на фотоземлет. Существует несколько разновидностей фотометров, но в основу всех их положен принцип сравнения неизвестного светового потока  $\Phi_x$  с эталонным. Для определения основной характеристики лампы накаливания – силы света фотометр помещается на оптической скамье между исследуемым и эталонным источниками света  $J_x$  и  $J_{\text{э}}$  (рис. 4). Световой поток, который падает на левую грань призмы фотометра от эталонного источника света, создает на ней освещенность

$$E_{\text{э}} = \frac{J_{\text{э}}}{r_{\text{э}}^2},$$

а поток, который падает на правую грань призмы от неизвестного источника  $J_x$ , создает соответственно освещенность

$$E_x = \frac{J_x}{r_x^2}.$$

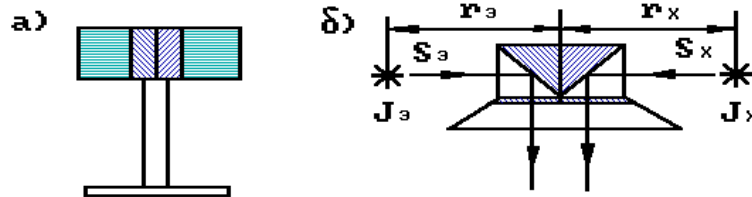


Рис. 4

Перемещая фотометр вдоль оптической скамьи, можно получить одинаковые освещенности граней призмы фотометра, это значит, что

$$\frac{J_x}{r_x^2} = \frac{J_{\text{э}}}{r_{\text{э}}^2}. \quad (11)$$

**Потребляемая мощность** находится по формуле:

$$W = U \cdot I, \quad (12)$$

где  $U$  и  $I$  – напряжение и сила тока в цепи исследуемого источника света.

**Удельной мощностью** источника называют мощность, которая необходима для получения средней силы света в 1 кд:

$$\eta = \frac{W}{J} = \frac{UI}{J}. \quad (13)$$

Для проведения эксперимента используются оптическая скамья с измерительной линейкой, на которой установлены на одинаковой высоте две лампочки и фотометр Жоли (рис. 5). Эталонная лампочка ( $J_{\text{э}} = 21$  кд) питается от трансформатора, включенного в цепь напряжением 220 В, исследуемая лампочка питается от ЛАТРа. Напряжение на исследуемой лампочке измеряется вольтметром  $V$ , сила тока в нити накала – амперметром  $A$ .

На оптической скамье между лампочками устанавливают фотометр Жоли так, чтобы освещенность, создаваемая эталонной лампочкой на левой грани, была равна освещенности, создаваемой исследуемой лампочкой на правой грани фотометра Жоли. Тогда, применяя уравнение (11), можно найти силу света исследуемой лампочки.

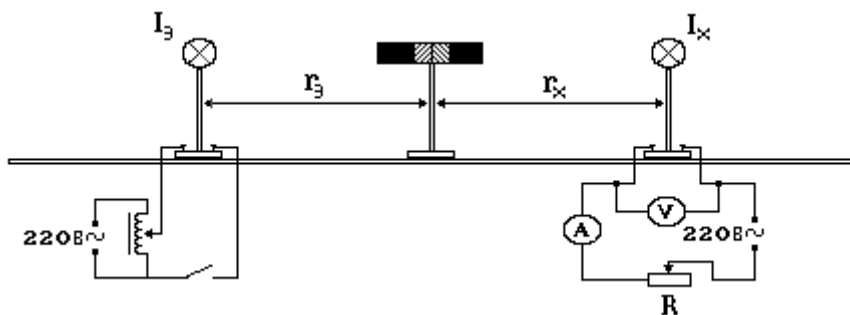


Рис. 5

### Порядок выполнения работы

#### Задание 1. Исследовать зависимость освещенности от расстояния лампочки до освещаемой поверхности фотоэлемента.

1.1. Установить фотоэлемент нормально к лучам света, а лампочку поместить на таком расстоянии от фотоэлемента, чтобы стрелка гальванометра (люксметра), который измеряет фототок, возникающий в цепи фотоэлемента, не выходила за пределы шкалы.

1.2. Измерить фототок  $I_1$  при расстоянии  $r_1$  от лампочки до фотоэлемента. Потом, увеличивая расстояние в два, три, четыре, пять раз ( $r_2=2r_1$ ,  $r_3=3r_1, \dots$ ), измерить фототок  $I_2, I_3, \dots$  (в делениях шкалы прибора).

Таблица 1

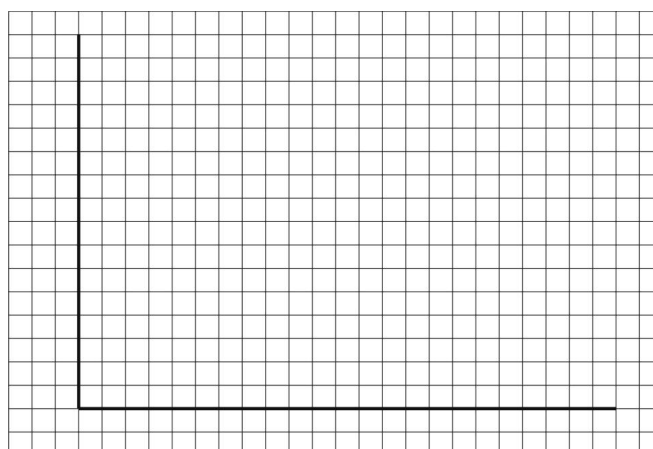
$r$ , см						
$I$ , дел.шкалы						

1.3. Закон зависимости освещенности от расстояния проверить по соотношениям:

$$\frac{I_2}{I_1}, \frac{I_3}{I_1}, \frac{I_4}{I_1}, \frac{I_5}{I_1}, \quad \text{которые должны быть равными} \quad \frac{1}{4}, \frac{1}{9}, \frac{1}{16}, \frac{1}{25}.$$

#### Вычисления:

1.4. Построить график зависимости освещенности  $E$  (в условных единицах) от расстояния  $r^2$  и сделать вывод.



#### Вывод:

**Задание 2. Исследовать зависимость освещенности от угла падения лучей.**

2.1. Установить указатель наклона поверхности фотоэлемента на 0, а лампочку на таком расстоянии от фотоэлемента, чтобы стрелка микроамперметра не зашкаливала. Измерить фототок  $I_0$ .

2.2. Поверхность фотоэлемента установить под углом 30°, 60°, 90°, измерить фототок  $I_{30^\circ}$ ,  $I_{60^\circ}$ ,  $I_{90^\circ}$ .

Таблица 2

$\alpha$ , град				
$I$ , дел.шкалы				

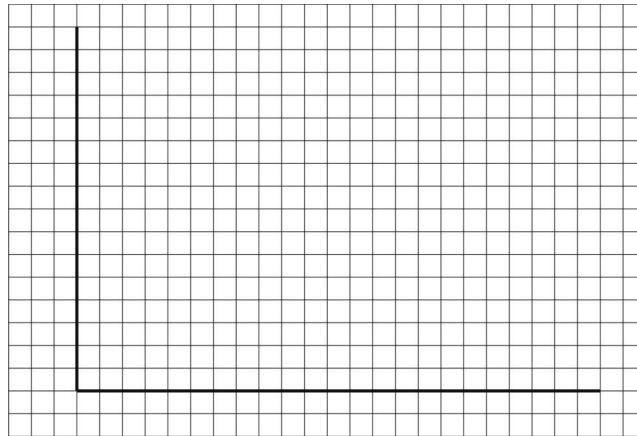
2.3. Закон зависимости освещенности от угла падения лучей проверить по соотношениям:

$$\frac{I_0}{I_{30^\circ}}, \frac{I_0}{I_{60^\circ}}, \frac{I_0}{I_{90^\circ}}, \quad \frac{\cos \varphi_0}{\cos \varphi_{30^\circ}}, \frac{\cos \varphi_0}{\cos \varphi_{60^\circ}}, \frac{\cos \varphi_0}{\cos \varphi_{90^\circ}}.$$

которые должны быть равными

**Вычисления:**

2.4. Построить график зависимости освещенности  $E$  от  $\cos \varphi$  и сделать вывод.



**Вывод:**

**Задание 3. Исследовать, зависимость сила света лампочки накаливания от напряжения на лампочке.**

3.1. Собрать цепь по схеме (рис. 5).

3.2. Включить ЛАТР и трансформатор в цепь переменного тока. Установить на ЛАТРе напряжение 180 В.

3.3. Перемещая фотометр Жоли вдоль оптической скамьи, добиться равной освещенности граней призмы фотометра. С помощью масштабной линейки измерить расстояния  $r_0$  и  $r_x$ .

3.4. Уменьшая напряжение на лампе от 180 В до 0 через 10 В, повторить измерения согласно п.3.3. При этом для каждого напряжения записать значение силы тока в цепи исследуемой лампы.

3.5. Данные измерений занести в таблицу.

**Обработка результатов измерений**

1. По формуле (11) определить силу света  $J_x$  неизвестного источника при каждом напряжении, результаты занести в таблицу 3.

Таблица 3

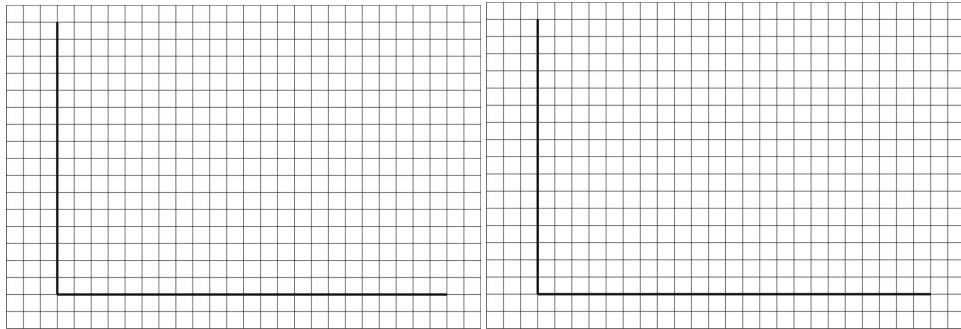
№ п/п	$U$ , В	$I$ , А	$r_x$ , м	$r_э$ , м	$J_x$ , Кд	$\eta$ , Вт/кд
1						
2						
3						
4						
...						

2. По формуле (10) для максимального значения  $U$  вычислить яркость лампы. Колбу считать сферической, ее диаметр измерить штангенциркулем.

**Вычисления:**

3. По формуле (13) для каждого напряжения определить удельную мощность  $\eta$  лампочки, результаты занести в таблицу 3.

4. Построить графики зависимости силы света и удельной мощности лампочки от напряжения ( $J=f(U)$ ,  $\eta=f(U)$ ).



**Вывод:**

**Контрольные вопросы:**

1. Что называется потоком излучения, силой света, освещенностью? В каких единицах они измеряются?
2. Дайте определение телесного угла  $\Omega$ . В каких единицах он измеряется?
3. Сформулируйте закон освещенности. Сделайте математическое обоснование этого закона.
4. Что называется яркостью, в каких единицах она измеряется?
5. Объясните принцип измерения фотометрических величин с помощью фотометра. Покажите ход лучей.
6. Что называется удельной мощностью лампочки?
7. Сделайте математическое обоснование метода определения силы света источника при помощи фотометра.

**Литература:**

1. И.В. Савельев. Курс общей физики. т. II. – М.: «Наука», 1988 г.– гл. XVI, §§113, 114.
2. Г.С. Ландсберг. Оптика. М.: – «Наука», 1976 г. – гл. III, §§ 7–10.
3. Ф.А. Королев. Курс физики. – М.: «Просвещение», 1974. – гл. III, §§10, 11.

## Лабораторная работа № 2

### Определение главного фокусного расстояния линз и изучение aberrаций толстой линзы

**Цель работы:** а) освоить методы определения фокусных расстояний; б) ознакомиться с явлениями искажения изображений в линзах (абберациями) и определить сферическую aberrацию, астигматизм и хроматическую aberrацию собирающей линзы.

**Оборудование:** оптическая скамья с проекционным фонарём, собирающая и рассеивающая линзы, экран, объект, диафрагмы разного диаметра, миллиметровая сетка на стекле, экран.

#### Теория работы и описание установки

**Сферической линзой** называется прозрачное тело, образованное пересечением двух сферических поверхностей или сферической поверхности с плоской. Линза называется **тонкой** при условии, если расстояние между поверхностями линзы, взятое вдоль главной оптической оси, значительно меньше радиусов кривизны её поверхностей. Линзы разделяются на два класса: **собирающие** или выпуклые, когда сферическая поверхность выпуклая, и **рассеивающие** или вогнутые, когда сферическая поверхность вогнутая. Эти определения применимы для линз, которые имеют больший показатель преломления, чем среда, из которой падают лучи.

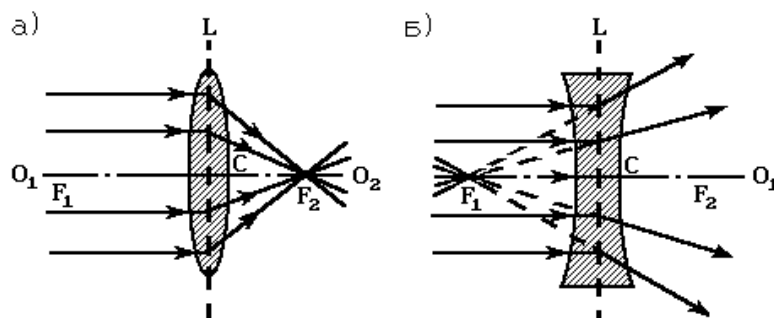


Рис. 1

Рассмотрим тонкую собирающую линзу (рис. 1а). Точка  $C$ , проходя которую лучи не изменяют своё направление, называют **оптическим центром** линзы. Любая прямая, проходящая через оптический центр, называется оптической осью, а если она, кроме этого, проходит через центры кривизны  $O_1$  и  $O_2$  – главной **оптической осью**. Плоскость  $L$ , которая перпендикулярна к главной оптической оси и проходит через оптический центр, называется главной плоскостью линзы. **Главным фокусом** линзы называется точка  $F_2$ , в которой сходятся лучи, которые падают на линзу параллельно главной оптической оси. Расстояние от оптического центра до главного фокуса называется **главным фокусным расстоянием**. Для собирающих линз главное фокусное расстояние – величина положительная.

Для построения изображения предмета в линзе пользуются лучами, ход которых через линзу известен (рис. 2):

- 1) луч, который идёт через оптический центр, не изменяет своего направления;
- 2) луч, который идёт параллельно главной оптической оси, после преломления проходит через фокус;
- 3) луч, который проходит через фокус, после преломления идёт параллельно главной оптической оси.

Изображение предмета  $AB$  в зависимости от того, на каком расстоянии от линзы находится предмет, может получиться действительным или мнимым, прямым или обратным (перевернутым), увеличенным, равным или уменьшенным.

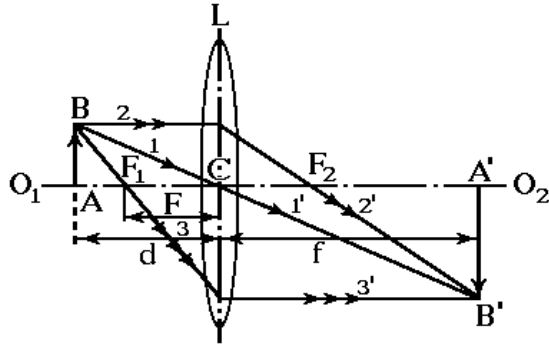


Рис. 2

Для тонкой линзы отрезки вдоль главной оптической оси  $d$ ,  $f$  и  $F$ , соответственно равные расстояниям от оптического центра линзы до предмета, его изображения и фокуса линзы (рис.2), связаны зависимостью, которую называют **уравнением тонкой линзы**:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}. \quad (1)$$

Величина  $D = 1/F$  называется **оптической силой**. Для линзы она равна:

$$D = (n_{21} - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где  $n_{21}$  – относительный показатель преломления вещества линзы относительно окружающей среды,  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны поверхностей линзы,  $D$  – оптическая сила линзы. Единица оптической силы – диоптрия.

В случае рассеивающей линзы (рис. 1б) фокусы мнимые, потому что в них сходятся продолжения вышедших из линзы лучей. Поэтому фокусные расстояния  $F$  отрицательные. Изображения на экране в этом случае нет, оно также мнимое.

Формула рассеивающей линзы имеет вид:

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = -\frac{1}{F}. \quad (2)$$

Одним из наиболее точных методов определения фокусных расстояний является **метод Бесселя**, который заключается в следующем. На оптической скамье помещается линза Л, предмет П и на расстоянии  $L$  от него экран Э, на котором подучается изображение предмета П. Если расстояние  $L$  от предмета до экрана больше  $4F$ , то, перемещая линзу вдоль оптической скамьи, можно найти два таких положения линзы I и II, расстояние между которыми равно  $l$ , при которых на экране получают увеличенное и уменьшенное изображения предмета.

Фокусное расстояние в этом случае будет равно:

$$F = \frac{L^2 - l^2}{4L}. \quad (3)$$

Установка (рис. 3) состоит из оптической скамьи, на одном конце которой

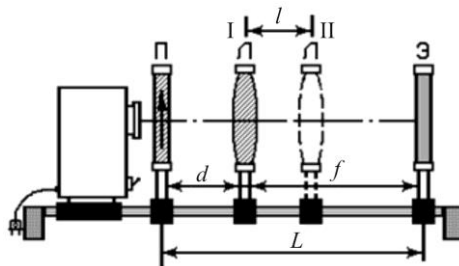


Рис. 3

находится проекционный фонарь с электрической лампой и предметом (нанесенной на стекло сеткой или крестовиной), на другом – экран. Линзы, закреплённые в специальную оправу, размещаются между экраном и предметом. Измерение расстояний делается с помощью линейки, закреплённой на оптической скамье.

В оптике существует понятие об идеальной оптической системе. Такая система должна соответствовать следующим **трьём условиям Максвелла**:

- 1) гомоцентрический пучок после прохождения оптической системы остаётся гомоцентрическим;
- 2) изображение плоского предмета в идеальной оптической системе остаётся по форме подобным предмету;
- 3) изображение плоскости, перпендикулярной оптической оси, является плоскостью, перпендикулярной оптической оси.

Все реальные линзы и оптические системы дают изображения, которые имеют отклонения от идеального: точка, прямая, плоскость получаются в виде пятна, кривой, изогнутой поверхности. Кроме этого, стекло обладает дисперсией (показатели преломления линз для лучей разных длин волн разные), в результате чего изображения разного цвета не совпадают между собой по величине и положению, создавая окрашенность изображения. Все эти отступления реального изображения от идеального называются **абберациями**. Абберации оптических систем разделяются на **монохроматические** и **хроматические**.

**Монохроматические абберации** – это искажения изображений, которые возникают для лучей определённой длины волны.

**Хроматические абберации** – это появление окрашенности изображений, которая возникает в результате того, что лучи разных длин волн могут проходить оптическую систему разными путями.

Монохроматическими абберациями являются **сферическая абберация** (продольная и поперечная), **кома**, **астигматизм**, **кривизна поля**, **дисторсия**. При наблюдении абберации в белом свете на выше перечисленные абберации накладывается хроматическая абберация.

Рассмотрим отдельные виды аббераций:

1) **Сферическая абберация**. Пусть диафрагма  $BB'$  с небольшим круглым отверстием в центре (рис.4а) выделяет узкий (параксиальный) пучок лучей, которые сходятся в точке  $A'$ . Если вместо диафрагмы  $BB'$  поставить диафрагму  $DD'$  с кольцевым отверстием, то краевые лучи отклонятся к линзе больше и пересекутся в точке  $A''$ , которая находится ближе к линзе.

Величина

$$\Delta f = f - f_0 \quad (4)$$

называется **продольной сферической абберацией**. Для собирающей линзы она отрицательная, а для рассеивающей – положительная. Это дает возможность ликвидировать сферическую абберацию путем комбинирования собирающих и рассеивающих линз. Ослабить сферическую абберацию можно также путём введения диафрагм, которые ограничивают световой пучок.

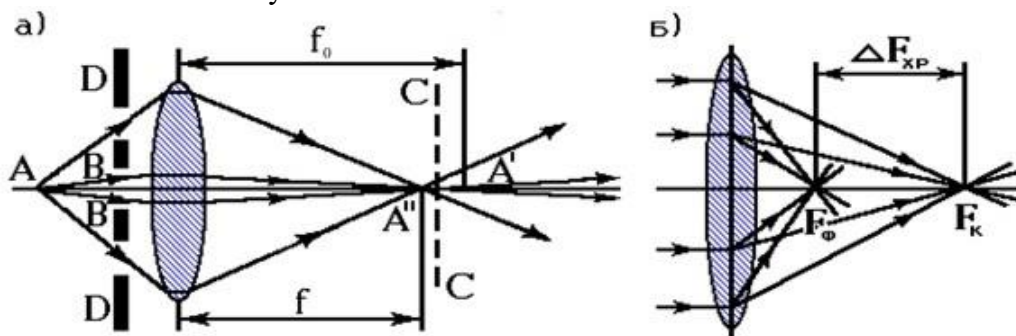


Рис. 4

2) **Хроматическая aberrация.** Она обусловлена зависимостью фокусного расстояния  $F$  линзы от длины волны, т.е. дисперсией показателя преломления стекла ( $n = n(\lambda)$ ). Красные лучи имеют меньший показатель преломления, чем фиолетовые лучи, поэтому изображение предмета на экране получается окрашенным (рис. 4б). Степенью хроматической aberrации называется величина:

$$\Delta F_{xp} = F_{\kappa} - F_{\phi}. \quad (5)$$

3) **Астигматизм.** Он наблюдается при получении предмета, который посылает лучи под значительным углом к главной оптической оси. При этом все лучи собраться в одной точке не могут и изображение получается в виде двух взаимно перпендикулярных линий, которые находятся в разных местах. Это ведёт к размытости изображения. Такая погрешность линзы называется астигматизмом. Астигматизм ликвидируется подбором разных линз.

4) **Дисторсия.** При больших углах наклона узкого пучка лучей к главной оптической оси осуществляется неравномерное увеличение центра и периферии изображения, что приводит к дефекту, который называют **дисторсией**. Дисторсию можно наблюдать на предмете, который представляет собой равномерную сетку (рис. 5а). Если линейное увеличение уменьшается при удалении от центра к периферии, то наблюдается бочкообразная дисторсия (рис. 5б), а если оно увеличивается при удалении от центра, то наблюдается подушкообразная дисторсия (рис. 5в).

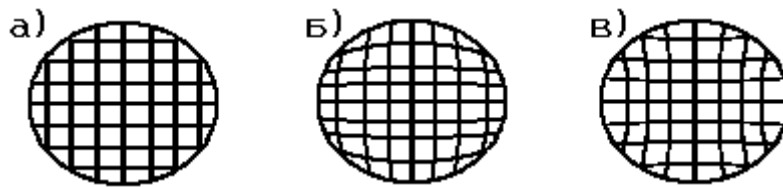


Рис. 5

### Порядок выполнения работы

#### Задание 1. Определение фокусного расстояния собирающей линзы.

1.1. Включить проекционный фонарь. Установить между экраном и предметом собирающую линзу и отцентрировать её.

1.2. Изменяя положение линзы относительно экрана, добиться отчётливого изображения предмета на экране. С помощью линейки измерить расстояния  $d$  и  $f$ . Таких измерений сделать не меньше трех.

$d$ , м	1	2	3
$f$ , м	1	2	3
$F$ , м	1	2	3

1.3. По формуле (1) для каждого измерения найти фокусное расстояние  $F$ .

#### Вычисления:

$$F_1 = \dots ; F_2 = \dots ; F_3 = \dots ; \langle F \rangle = \dots$$

1.4. Вычислить оптическую силу  $D$ :

$$D = 1/\langle F \rangle =$$

1.5. Для одного из измерений произвести обработку погрешностей при нахождении фокусного расстояния  $F$ .



## Расчет погрешностей:

Окончательный результат записать в виде:

$$F = (F_{изм} \pm \Delta F) = \quad \varepsilon_F = \quad \%$$

### Задание 2. Определение фокусного расстояния собирающей линзы по методу Бесселя.

2.1. Установить экран на расстоянии  $L > 4F$  от предмета. С помощью линейки измерить расстояние  $L$ .

2.2. Изменяя положение линзы относительно экрана, найти два таких положения, при которых на экране наблюдаются резкие увеличенное и уменьшенное изображения предмета. Измерить расстояние  $l$  между этими положениями линзы.

2.3. Изменить расстояние  $L$  между предметом и экраном. Измерения п.п.2.1–2.2 повторить не менее трех раз.

$L$ , м	1	2	3
$l$ , м	1	2	3
$F$ , м	1	2	3

2.4. По формуле (3) для каждого измерения найти фокусное расстояние  $F$ .

#### Вычисления:

$$F_1 = \text{-----} = \quad ; F_2 = \text{-----} = \quad ; F_3 = \text{-----} = \quad ; \quad \langle F \rangle = \quad .$$

2.5. Вычислить оптическую силу  $D$  собирающей линзы:

$$D = 1 / \langle F \rangle =$$

2.6. Построить изображение предмета (стрелки) для следующих расстояний предмета до линзы: а)  $d > 2F$ ; б)  $d = 2F$ ; в)  $2F < d < F$ ; г)  $0 < d < F$  и проанализировать характер изменения изображения предмета в собирающей линзе в зависимости от расстояния  $d$ .

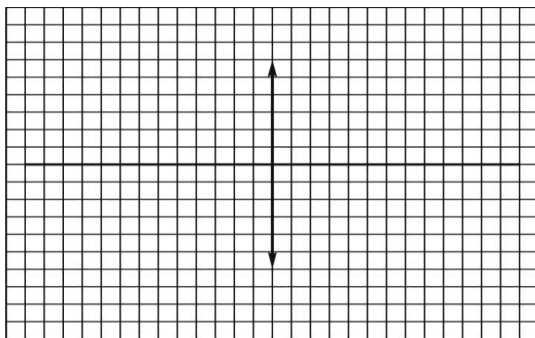


Рис. а

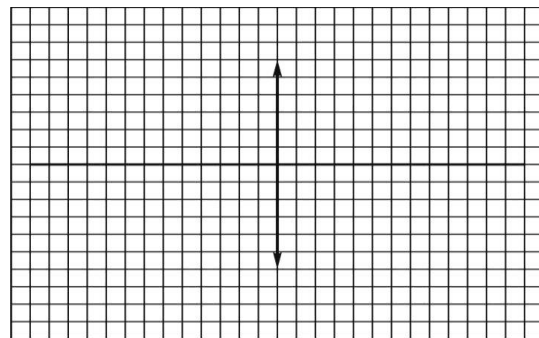


Рис. б

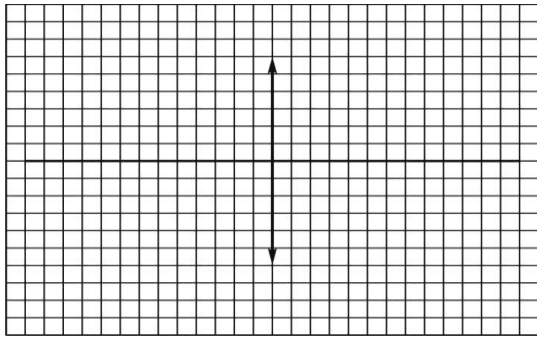


Рис. в

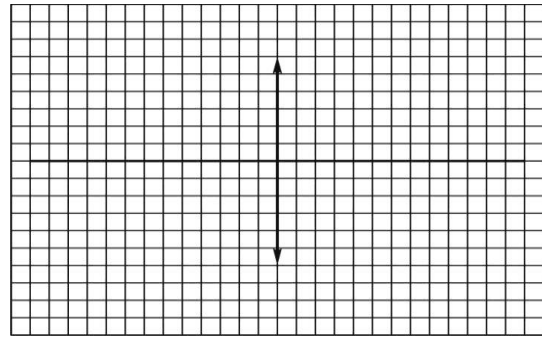


Рис. г

**Задание 3. Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы с помощью собирающей линзы.**

3.1. На оптическую скамью поставить вместо выпуклой линзы вогнутую и, перемещая предмет, линзу или экран, убедиться в том, что действительного изображения на экране вогнутая линза не даёт.

3.2. Для определения фокусного расстояния рассеивающей линзы с помощью собирающей линзы установить сначала на оптической скамье собирающую линзу и получить на экране резкое изображение предмета (рис.6). Отметить положение Э экрана. Потом между собирающей линзой и экраном установить рассеивающую линзу и, перемещая экран, найти его новое положение Э', когда снова получится резкое изображение предмета. Если обозначить расстояние между рассеивающей линзой и положением экрана Э через  $d$ , а расстояние между рассеивающей линзой и положением экрана Э' через  $f$ , то формула линзы примет вид:

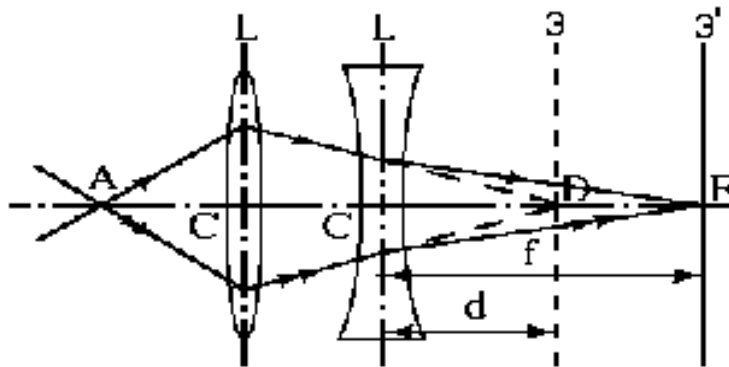


Рис. 6

$$-\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = -\frac{1}{F}, \quad \Rightarrow \quad F = \frac{f \cdot d}{f - d}. \quad (6)$$

3.3. Измерить с помощью линейки расстояния  $d$  и  $f$  и определить фокусное расстояние рассеивающей линзы.

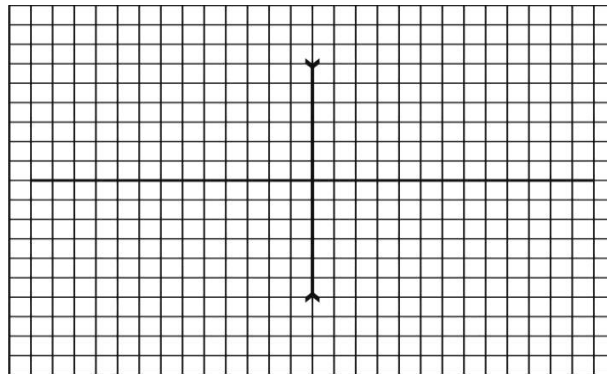
$d$ , м	1	2	3
$f$ , м	1	2	3
$F$ , м	1	2	3

3.4. По формуле (6) для каждого измерения найти фокусное расстояние  $F$ .

**Вычисления:**

$F_1 = \dots = \dots$  ;  $F_2 = \dots = \dots$  ;  $F_3 = \dots = \dots$  ;  $\langle F \rangle = \dots$  .

- 3.5. Вычислить оптическую силу  $D$  рассеивающей линзы:  
 3.6. Построить изображение предмета (стрелки) в рассеивающей линзе и проанализировать характер изменения изображения предмета в зависимости от расстояния  $d$ .



**Вывод:**

**Дополнительное задание:**  
 Вывести формулу Бесселя.

**Задание 4. Исследование продольной сферической аберрации.**

- 4.1. Включить проекционный фонарь.  
 4.2. На оптической скамье установить толстую линзу и отцентрировать её (рис. 7).  
 4.3. Установить предмет. На оправе исследуемой линзы закрепить диафрагму с небольшим отверстием, которая выделяет узкий параксиальный пучок. Перемещая экран, добиться чёткого изображения предмета.

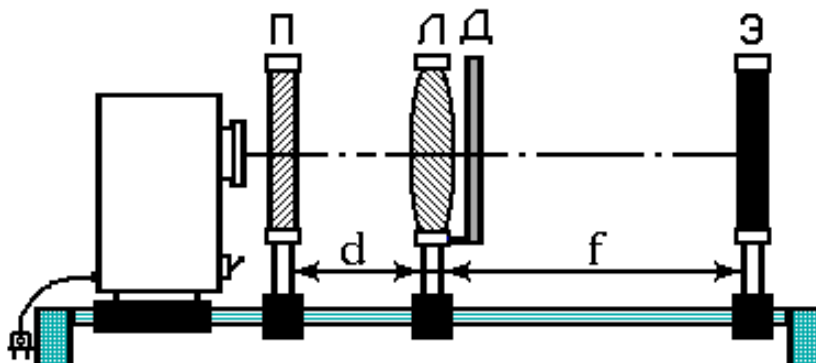


Рис. 7

- 4.4. Повторить опыт, который указан в п.4.3, для разных диафрагм.

### **Задание 5. Исследование хроматической аберрации.**

5.1. Перед толстой линзой установить стекло с миллиметровой сеткой, получить её изображение, наблюдать окрашенность линий на экране.

5.2. Вставить в оправу диафрагму с небольшим круглым отверстием, которая выделяет узкий параксиальный пучок.

5.3. Измерить фокусные расстояния линзы, устанавливая разные светофильтры.

5.4. Проанализировать полученные данные.

### **Задание 6. Исследование дисторсии изображения.**

6.1. В качестве предмета на оптической оси установить стеклянную пластинку с прямоугольной сеткой.

6.2. Изменяя взаимное положение пластинки, линзы и экрана, получить сначала достаточно резкое изображение. Проанализировать полученное изображение.

### **Задание 7. Исследование астигматизма.**

7.1. В качестве предмета на оптической оси установить стеклянную пластинку с прямоугольной сеткой.

7.2. Перемещая линзу, добиться чёткого изображения вертикальных линий сетки.

7.3. Снова перемещая линзу, добиться чёткого изображения горизонтальных линий сетки.

7.4. Проанализировать данные

### **Контрольные вопросы:**

1. Что называется линзой? Какие бывают линзы? Что называется фокусом линзы?

2. Назовите лучи, которые используются при построении изображения предмета.

3. Запишите формулы тонкой собирающей и рассеивающей линз.

4. Что называется оптической силой линзы, в каких единицах она измеряется?

4. От чего зависит характер получаемых изображений в выпуклой и вогнутой линзах?

5. Назовите и объясните известные виды аберраций и методы их устранения.

### **Литература:**

1. И.В. Савельев. Курс общей физики, т. II. – М.: «Наука». – 1988. – гл. XVI, §§116, 117.

2. Г.С. Ландсберг. Оптика. – М.: «Наука», 1976. – гл. XII, §§71-73, 75-78.

3. Е.М. Гершензон. Курс общей физики. Оптика и атомная физика. – М.: «Просвещение», 1981.– §5, 6.

4. М.И. Корсунский. Оптика. Строение атома. Атомное ядро. – М.: «Наука», 1967. – гл. III, §5.

## ГЛАВА 2. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

### Лабораторная работа № 3

#### Определение радиуса кривизны линзы и длины волны света с помощью колец Ньютона

**Цель работы:** изучение интерференции на прозрачной пластинке переменной толщины.

**Оборудование:** прибор для наблюдения колец Ньютона, осветитель с красным светофильтром, стереомикроскоп.

#### Теория работы и описание установки

Свет, согласно классической электродинамике, представляет собой поперечные электромагнитные волны в диапазоне длин волн от  $4 \cdot 10^{-4}$  м до  $10^{-10}$  м, которые распространяются в вакууме со скоростью  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с.

Если разность фаз двух световых волн одной и той же частоты с течением времени остаётся постоянной, то такие волны называются *когерентными*. Если в одну и ту же точку пространства приходят две когерентные световые волны, то они при сложении усиливают или ослабляют друг друга. Это явление называется *интерференцией*. Характер интерференционной картины зависит от способов получения когерентных волн.

Выражение для разности фаз  $\delta$  складываемых когерентных волн имеет вид:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta, \quad (1)$$

где  $\Delta = n_2 s_2 - n_1 s_1 = L_2 - L_1$  есть величина, равная разности оптических длин путей, пройденных волнами, и называемая *оптической разностью хода*.

Из формулы (2) видно, что если *оптическая разность хода равна целому числу длин волн в вакууме (чётному числу длин полуволен)*

$$\Delta = \pm m \lambda_0 = \pm 2m \cdot \frac{\lambda_0}{2}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$

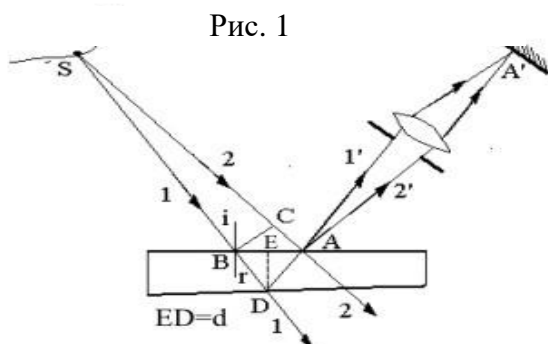
то разность фаз  $\delta$  оказывается кратной  $2\pi$  и колебания, возбуждаемые в точке наблюдения обеими волнами, будут происходить с одинаковой фазой. Таким образом, выражение (2) есть *условие интерференционного максимума*.

Если оптическая разность хода  $\Delta$  равна *полуцелому числу длин волн в вакууме (нечётному числу длин полуволен)*

$$\Delta = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda_0 = \pm (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

то  $\delta = (2m + 1)\pi$ , так что колебания в точке наблюдения находятся в противофазе. Таким образом, выражение (3) есть *условие интерференционного минимума*.

Рассмотрим явление интерференции при освещении тонких прозрачных плёнок переменной толщины (рис. 1), если разделение на когерентные волны происходит путём отражения света от передней и задней поверхностей плёнки. Пусть на прозрачную плёнку с показателем преломления  $n_2$  в виде клина с малым углом  $\alpha$  падает пучок света. Часть света отразится от верхней поверхности



плёнки, вторая часть, преломившись, отразится от нижней поверхности и вернется обратно в первую среду с показателем преломления  $n_1$ .

Оптическая разность хода  $\Delta$  между двумя отраженными когерентными лучами 1' и 2' будет равна:

$$\Delta = 2d\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} \pm \frac{\lambda_0}{2} \quad \text{или} \quad \Delta = 2dn_2 \cos r \pm \frac{\lambda_0}{2}, \quad (4)$$

где  $d$  – толщина пленки;  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления окружающей среды и материала пленки соответственно,  $i$  – угол падения лучей на плёнку,  $r$  – угол преломления,  $\lambda_0/2$  – **дополнительная разность хода, обусловленная отражением света от оптически более плотной среды.**

Результат интерференции зависит от значения  $\Delta$ . При  $\Delta = m\lambda_0$  получаются максимумы интенсивности, а при  $\Delta = (m + 1/2)\lambda_0$  – минимумы интенсивности. Полученная интерференционная картина носит название **полос равной толщины.**

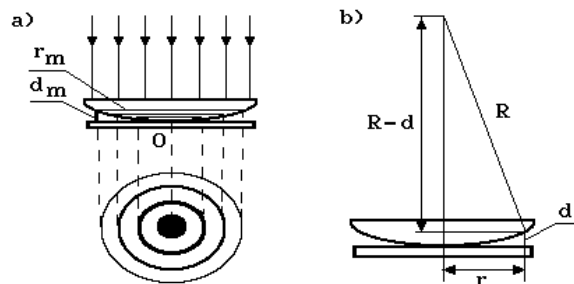


Рис. 2

Классическим примером полос равной толщины является **кольца Ньютона.** Они наблюдаются при отражении света от соприкасающихся плоскопараллельной стеклянной пластинки и плосковыпуклой линзы с большим радиусом кривизны  $R$  (рис. 2а). При освещении монохроматическим светом и наблюдении в отражённом свете интерференционная картина представляет собой систему тёмных и светлых колец с темным кругом в центре. Цвет колец соответствует длине волны монохроматического излучения. При освещении белым светом каждое кольцо представляет собой спектр. При наблюдении колец в проходящем свете максимумы и минимумы меняются местами, в центре интерференционной картины при этом располагается светлый круг.

Радиус **тёмных колец Ньютона**, которые получаются в отражённом свете при его падении по нормали к пластинке, определяется выражением:

$$r_m = \sqrt{m\lambda_0 R / n} = \sqrt{m\lambda R}. \quad (5)$$

Соответственно для **светлых колец Ньютона**, наблюдаемых в отражённом свете, можно записать:

$$r_m = \sqrt{(m - 1/2)\lambda_0 R / n} = \sqrt{(m - 1/2)\lambda R}. \quad (6)$$

При наблюдении колец Ньютона в проходящем свете, формулы (5) и (6) меняются местами.

Записав последовательно формулу (5) для  $m_1$  и  $m_2$  тёмных колец Ньютона и решив полученные уравнения относительно  $R$ , получим:

$$R = \frac{r_{m1}^2 - r_{m2}^2}{(m_1 - m_2)\lambda},$$

а если измерить диаметры колец, то

$$R = \frac{D_{m1}^2 - D_{m2}^2}{4(m_1 - m_2)\lambda}. \quad (7)$$

### Порядок выполнения работы

#### Задание 1. Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона.

1.1. Установить прибор для наблюдения колец Ньютона перед объективом стереоскопического микроскопа. Вращая рукоятку увеличений объективной части микроскопа, добиться, чтобы в поле зрения находилось 7-10 тёмных колец. Фокусируя микроскоп, добиться чёткой видимости периферийных колец интерференционной картины.

1.2. Установить крестообразную метку окулярного микрометра в центре тёмного пятна так, чтобы кольца были размещены симметрично относительно метки. При увеличении  $0,6\times$  объективной части микроскопа цена деления окулярного микрометра будет 0,2 мм, а при увеличении  $1\times$  – 0,1 мм.

1.3. Измерить диаметры нескольких (5–7) тёмных колец при освещении красным светом ( $\lambda = 0,7$  мкм). Отсчёт удобно начинать с наибольшего кольца, отмечая сначала координаты правых концов диаметров, а потом левых (или наоборот).

1.4. Данные измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1

№ кольца	Координаты концов диаметров колец		Цена деления окулярной шкалы м	Диаметр колец	
	слева	справа		в дел.шк.	м
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

1.5. Результаты измерений из таблицы 1 перенести в таблицу 2, группируя кольца произвольно ( $m_1 = 7, m_2 = 1; m_1 = 6, m_2 = 2; m_1 = 5, m_2 = 1$ ; и т.д.).

Таблица 2

№ п/п \ Величины	$m_1$	$m_2$	$m_1 - m_2$	$D_{m1}, \text{м}$	$D_{m2}, \text{м}$	$\lambda, \text{м}$	$R, \text{м}$	$R_{\text{ср}}, \text{м}$
1								
2								
3								
4								
5								

#### Порядок обработки результатов

1.6. По формуле (7) рассчитать радиус кривизны линзы (3-5 раз), группируя кольца произвольно (см. п.5).

#### Вычисления:

$$R_1 = \text{-----} = \quad ; \quad R_2 = \text{-----} = \quad ;$$

$$R_3 = \text{-----} = \quad ; \quad R_4 = \text{-----} = \quad ;$$

$$R_5 = \text{-----} = \quad ; \quad \langle R \rangle = \quad .$$

1.7. Результаты вычислений занести в таблицу 2.

1.8. Для одного из измерений произвести обработку погрешностей при вычислении  $R$ .

**Расчет погрешности измерений:**

Окончательный результат записать в виде:

$$R = (R_{\text{изм}} \pm \Delta R) = \quad ; \quad \varepsilon = \frac{\Delta R}{R_{\text{изм}}} = \quad \%$$

**Задание 2. Определение длины волны света с помощью колец Ньютона.**

1. Заменить красный светофильтр на зелёный. Измерить несколько (3–5) диаметров тёмных колец и рассчитать длину волны зелёного света. Радиус кривизны линзы считать известным из упражнения 1.

Таблица 3

№ Кольца	Координаты концов диаметров колец		Цена деления окулярной шкалы м	Диаметр колец	
	слева	справа		в дел.шк.	м
1					
2					
3					
4					
5					

Таблица 4

№ п/п \ Величины	$m_1$	$m_2$	$m_1 - m_2$	$D_{m1}$ , м	$D_{m2}$ , м	$R$ , м	$\lambda$ , м	$\lambda_{\text{ср}}$ , м
1.								
2.								
3.								

**Вычисления:**

$$\lambda_1 = \text{-----} = \quad ;$$

$$\lambda_2 = \text{-----} = \quad ; \quad \langle \lambda \rangle = \quad .$$

$$\lambda_3 = \text{-----} = \quad ;$$



**Дополнительное задание 1.**

Вывести условие максимума и минимума при интерференции света в тонких пленках (получить формулу (4)):

**Дополнительное задание 2.**

Вывести формулу для радиусов темных колец Ньютона в отраженном свете и получить с помощью ее расчетную формулу (7):

**Вывод:**

**Контрольные вопросы:**

1. Что называется интерференцией волн?
2. Что собой представляют когерентные волны? Как можно получить когерентные волны?
3. При каких условиях происходит усиление или ослабление когерентных колебаний?
4. Объясните явление образования полос равной толщины.
5. Как можно использовать кольца Ньютона для определения радиуса кривизны линзы?
6. Приведите примеры применения интерференции света.

**Литература:**

1. Г.С. Ландсберг. Оптика. – М.: «Наука», 1976.– гл. IV, §§12–16, 20, 25–26.
2. Ф.А. Королев. Курс физики. – М.: «Просвещение», 1974.– гл. IV, §§12–15.
3. И.В. Савельев. Курс общей физики, т. III. – М.: «Наука», 1988. – гл. XVII, §§119–122.

## Лабораторная работа № 4

### Дифракция Фраунгофера, изучение свойств дифракционной решетки

**Цель работы:** наблюдать дифракцию Фраунгофера на дифракционной решётке; определить постоянную дифракционной решётки, её угловую дисперсию и разрешающую способность.

**Оборудование:** гониометр, две дифракционные решётки с разными постоянными, ртутный осветитель.

#### Теория работы и описание установки

Большое практическое значение имеет второй вид дифракции – **дифракция Фраунгофера**, которая наблюдается при прохождении света через дифракционную решётку. Под **дифракционной решёткой** понимают систему параллельных щелей одинаковой ширины, которые отделены друг от друга равными непрозрачными промежутками. Обычно дифракционную решётку делают из полированной стеклянной пластинки, на которую с помощью делительного механизма наносят ряд параллельных равноудалённых штрихов. Штрихи рассеивают свет и выполняют роль непрозрачных промежутков, между ними остаются прозрачные области стекла, которые выполняют роль щелей. Если ширина щелей  $a$ , расстояние между ними  $b$ , то величину  $d = a + b$  называют **постоянной дифракционной решётки**.

Пусть нормально на дифракционную решётку, содержащую  $N$  штрихов, падает параллельный пучок монохроматических лучей. Параллельно дифракционной решётке за ней расположена линза, в фокальной плоскости которой находится экран (рис. 1).

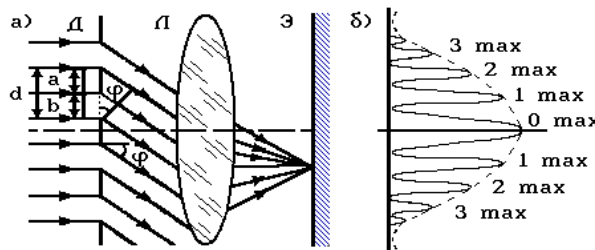


Рис. 1

Из рис.1 видно, что разность хода лучей, которые идут от двух соседних щелей решётки, равна:

$$\Delta = d \cdot \sin \varphi. \quad (1)$$

Когда в разность хода  $\Delta$  укладывается чётное число полуволн или целое число длин волн, то волны от всех щелей будут усиливать друг друга и в соответствующих направлениях  $\varphi_m$  появятся максимумы интенсивности, которые называются **главными максимумами** для дифракционной решётки:

$$d \cdot \sin \varphi_m = \pm m\lambda, \quad (2)$$

где  $d = a + b$  – постоянная решётки,  $\varphi_m$  – угол дифракции,  $\lambda$  – длина волны света,  $m = 0, 1, 2, \dots$  – порядок главного максимума. Максимум нулевого порядка один, максимумов 1-го, 2-го и т.д. порядков имеется по два.

Предельное число возможных максимумов для решётки определяется из условия  $|\sin \varphi| \leq 1$ . Поэтому при заданных значениях длины волны  $\lambda$  и постоянной решётки  $d$  количество максимумов равно:

$$m_{\max} = \frac{d}{\lambda}. \quad (3)$$

Если при некотором угле  $\varphi_m$  для одной щели выполняется условие минимума интенсивности, т.е.  $a \cdot \sin \varphi_m = \pm m\lambda$  ( $I_\varphi = 0$ ), то это условие будет одновременно определять положения основных минимумов и для всей решётки. Кроме того, по некоторым направлениям колебания, посылаемые разными щелями, могут гасить друг друга. Это так называемые дополнительные минимумы, которые соответствуют условию:

$$d \cdot \sin \varphi = \pm \frac{m'}{N} \lambda, \quad (4)$$

где  $m' = 1, 2, \dots, N-1, N+1, \dots, 2N-1, 2N+1, \dots$ , т.е.  $m'$  может принимать все целые значения, кроме  $m' = N, 2N, 3N$  и т.д.

Основными характеристиками дифракционной решётки являются **дисперсия и разрешающая способность**.

**Дисперсия решетки D** равна отношению углового  $d\varphi$  или линейного  $dl$  расстояния между двумя спектральными линиями с длинами волн  $\lambda$  и  $\lambda + d\lambda$  к величине этого интервала  $d\lambda$ . Поэтому отличают угловую ( $D_{\text{угл}}$ ) и линейную ( $D_{\text{лин}}$ ) дисперсии:

$$D_{\text{угл}} = \frac{d\varphi}{d\lambda} \quad \text{и} \quad D_{\text{лин}} = \frac{dl}{d\lambda}. \quad (5)$$

Для конечных величин можно записать:

$$D_{\text{угл}} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda} \quad \text{и} \quad D_{\text{лин}} = \frac{\Delta l}{\Delta\lambda}. \quad (6)$$

Формулу для угловой дисперсии решётки можно получить путём дифференцирования формулы (1):

$$D_{\text{угл}} = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{m}{d \cdot \cos \varphi}. \quad (7)$$

При небольших углах дифракции  $\cos \varphi \approx 1$  и  $D_{\text{угл}} \approx m/d$ . Таким образом, угловая дисперсия тем больше, чем выше порядок  $m$  спектра и чем меньше период  $d$  дифракционной решётки.

Так как расстояние  $l$  до спектральной линии на экране, который находится в фокальной плоскости линзы, связано с углом  $\varphi$  соотношением:

$$l = F \cdot \text{tg} \varphi \quad (\text{см. рис.1}),$$

то между линейной и угловой дисперсиями существует связь:

$$D_{\text{лин}} = \frac{dl}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{F}{\cos^2 \varphi} \cdot D_{\text{угл}}. \quad (8)$$

При малых углах дифракции приблизительно можно считать:

$$D_{\text{лин}} = F \cdot D_{\text{угл}}. \quad (9)$$

Так как дифракционные спектры высоких порядков накладываются друг на друга, то для дифракционной решётки вводится ещё одна характеристика – **разрешающая способность R**. Она связана с минимальной разностью  $\delta\lambda$ , при которой две спектральные линии с длинами  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  зрительно воспринимаются отдельно. Согласно Д.Релею, разрешающая способность  $R$  спектрального прибора равна:

$$R = \frac{\langle \lambda \rangle}{\Delta\lambda}, \quad (10)$$

Где  $\langle \lambda \rangle = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$ . Можно показать, что в случае дифракционной решетки разрешающая способность  $R$  равна произведению порядка спектра  $m$  на количество щелей  $N$ :

$$R = \frac{\langle \lambda \rangle}{\Delta\lambda} = m \cdot N. \quad (11)$$

Для определения углов дифракции используется гониометр-спектрометр (рис.2). Свет от источника проходит через щель коллиматора 2. Из объектива коллиматора 3 параллельный пучок лучей падает на дифракционную решётку 4, расположенную на предметном столе гониометра таким образом, чтобы щели решётки были параллельны щели 2. Дифракционный спектр наблюдается через окуляр 6, который расположен в фокальной плоскости объектива зрительной трубы 5. Отсчёт углов осуществляется по лимбу с нониусом 7 гониометра.

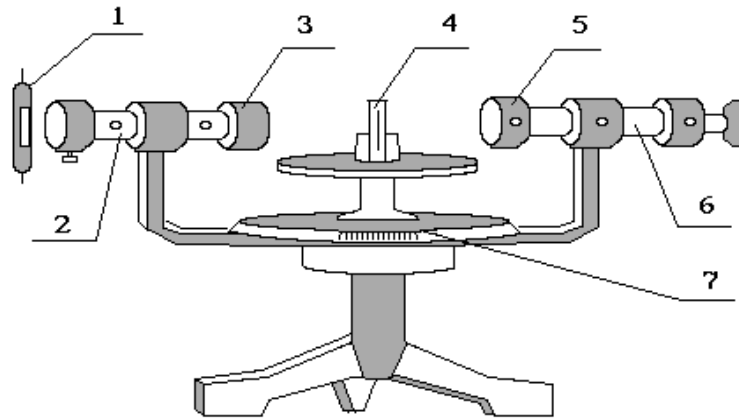


Рис. 2

### Порядок выполнения работы

#### Задание 1. Определение постоянной дифракционной решетки.

- 1.1. Ознакомиться с устройством гониометра и правилами пользования.
- 1.2. Включить ртутную лампу. Проверить резкость изображения щели и нити в поле зрения зрительной трубы.
- 1.3. Установить зрительную трубу так, чтобы нить в поле зрения трубы совпала с нулевым максимумом. По лимбу с нониусом определить угол  $\varphi_0$  (это есть ноль прибора).
- 1.4. Установить зрительную трубу на первый максимум зелёной волны ( $\lambda = 546,1$  нм) и снова по лимбу с нониусом записать угол  $\varphi'_m$ . Тогда угол дифракции будет:
 
$$\varphi_m = \varphi'_m - \varphi_0$$
- 1.5. Измерить углы дифракции  $\pm\varphi_m$  для зелёной линии справа и слева от центрального максимума для всех видимых порядков  $m$ .

$\varphi_0$	Слева		справа	
	спектр 2-го порядка	спектр 1-го порядка	спектр 1-го порядка	спектр 2-го порядка
$\varphi'_m$				
$\varphi_m = \varphi'_m - \varphi_0$				

- 1.6. По формуле (2) рассчитать постоянную  $d$  дифракционной решётки.

#### Вычисления:

$$d_1 = \text{-----} = \quad ; \quad d_2 = \text{-----} = \quad ;$$

$$d_3 = \text{-----} = \quad ; \quad d_4 = \text{-----} = \quad ;$$

$$\langle d \rangle = \text{-----} = \quad .$$

## Задание 2. Определение угловой дисперсии решетки.

2.1. Измерить углы дифракции для каких-нибудь двух линий (например, зеленой и фиолетовой) в обоих порядках спектра, расположенных слева или справа от нулевого положения.

$\varphi_0$	спектр 1-го порядка		спектр 2-го порядка	
	зеленая-1	фиолетовая-1	зеленая-1	фиолетовая-1
$\varphi'_m$				
$\varphi_m = \varphi'_m - \varphi_0$				

2.2. По формуле (2) вычислить длину волны фиолетовой линии.

**Вычисления:**

$$\lambda_\phi =$$

2.3. По формуле (6) рассчитать угловую дисперсию  $D_{\text{угл}}$ .

**Вычисления:**

$$D'_{\text{угл}} = \text{-----} = \quad ; \quad D''_{\text{угл}} = \text{-----} = \quad .$$

## Задание 3. Определение разрешающей способности решетки.

3.1. Измерить углы дифракции для каких-нибудь двух соседних линий (например, фиолетовых или зеленых) в обоих порядках спектра, расположенных слева или справа от нулевого положения.

$\varphi_0$	спектр 1-го порядка		спектр 2-го порядка	
	зеленая-1 (фиолетовая-1)	зеленая-2 (фиолетовая-2)	зеленая-1 (фиолетовая-1)	зеленая-2 (фиолетовая-2)
$\varphi'_m$				
$\varphi_m = \varphi'_m - \varphi_0$				

3.2. По формуле (2) вычислить длину волны вторых линии в обоих порядках спектра.

**Вычисления:**

$$\lambda'_2 = \text{-----} = \quad ; \quad \lambda''_2 = \text{-----} = \quad .$$

3.3. По формуле (10) рассчитать разрешающую способность  $R$  в обоих порядках спектра.

**Вычисления:**

$$R' = \text{-----} = \quad ; \quad R'' = \text{-----} = \quad .$$

**Выводы:**

### Контрольные вопросы:

1. Что такое дифракция света?
2. В чём заключается принцип Гюйгенса–Френеля?
3. Чему равен период дифракционной решётки?
4. В чём заключаются условия максимума и минимума в дифракции Фраунгофера?
5. Дать определение угловой дисперсии и разрешающей способности дифракционной решётки?
6. Обоснуйте возникновение дифракционного спектра.

### Литература:

1. Г.С. Ландсберг. Оптика. – М.: «Наука», 1976. – гл. VIII, §§33–36, 46, 50.
2. Ф.А. Королёв. Курс физики. – М.: «Просвещение», 1974. – гл. IV, §§19, 21, 22, 23.
3. И.В. Савельев. Курс общей физики. Т. II. – М.: «Наука», 1988. – гл. XVIII, §§126–130.

## Лабораторная работа № 5

### Поляризованный свет. Проверка закона Малюса. Изучение свойств пластинок в $1/2$ и $1/4$ длины волны

**Цель работы:** проверить закон Малюса, изучить свойства пластинок (пленок) в  $1/2$  и  $1/4$  длины волны и их влияние на характер поляризации линейно поляризованного света.

**Оборудование:** источник света, два поляроида, фотоэлемент, выпрямитель, микроамперметр, источник света с красным светофильтром, поляризатор и анализатор, экран, набор целлофановых плёнок в  $1/2$  и  $1/4$  длины волны, набор плёнок с неизвестными свойствами.

#### Теория работы и описание установки

Как известно, плоская электромагнитная световая волна является поперечной и представляет собой распространение взаимно перпендикулярных колебаний вектора напряжённости электрического поля  $\vec{E}$  и вектора напряжённости магнитного поля  $\vec{H}$  (рис.1 а).

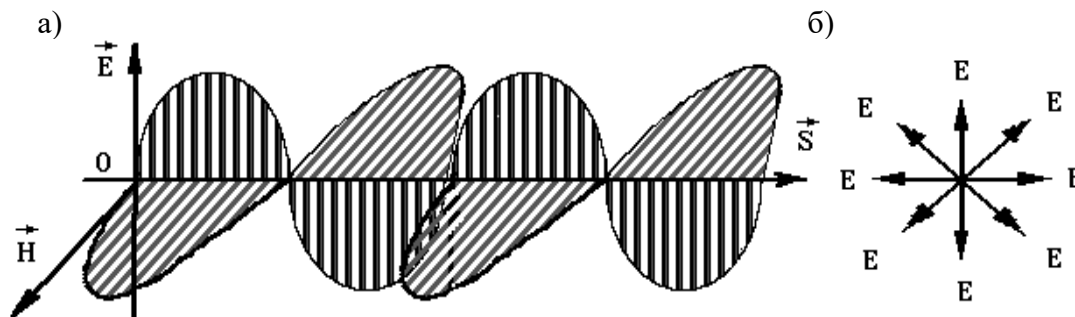


Рис. 1

Основное воздействие на человеческий глаз оказывает электрическая составляющая электромагнитной волны, поэтому вектор  $\vec{E}$  является главным и носит название *светового вектора*.

Световой пучок, в котором разные направления вектора  $\vec{E}$  в поперечной к направлению распространения плоскости равновероятны, т.е., направлены произвольно хаотически, называется *естественным*.

Свет, у которого направления колебаний вектора  $\vec{E}$  упорядочены каким-нибудь образом и подчиняются некоторой закономерности, называется *поляризованным*. Если колебания вектора  $\vec{E}$  могут выполняться только в одной плоскости, то свет называется *линейно- или плоскополяризованным* (рис. 2а). Если при распространении вектор  $\vec{E}$  поворачивается вокруг направления распространения и его конец описывает при этом окружность или эллипс, то свет называется соответственно *поляризованным по кругу* или *эллиптически-поляризованным* (рис. 2б, в).

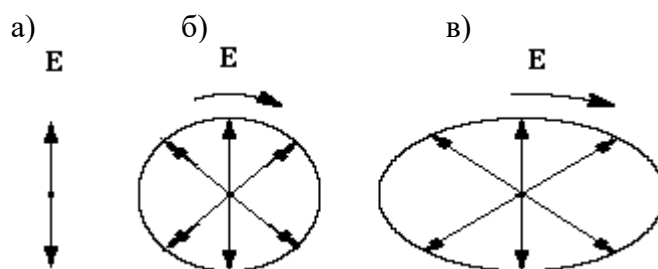


Рис. 2.

Для получения линейно поляризованного света применяются специальные оптические приспособления – *поляризаторы*. Плоскость поляризатора, в которой происходят колебания вектора  $\vec{E}$  световой волны, прошедшей через поляризатор, называется *главной плоскостью (главным сечением) поляризатора*. Линия, расположенная в главной плоскости поляризатора, называется *оптической осью поляризатора*.

У некоторых двоякопреломляющих кристаллов (например, у турмалина) коэффициенты поглощения света для двух взаимно перпендикулярных линейно поляризованных лучей отличаются настолько сильно, что уже при небольшой толщине кристалла один из лучей (луч "о") гасится практически полностью и из кристалла выходит линейно поляризованный свет. Это явление называется *дихроизмом*. В настоящее время дихроические пластинки изготавливаются в виде тонких пленок – *поляроидов*, которые имеют широкое применение. В большинстве случаев они состоят из множества маленьких (толщиной до 0,3 мм) параллельно ориентированных кристаллов сернокислого йодистого хинина – геропатита, которые находятся внутри связывающей среды – прозрачной плёнки. Поляроид, который используется для получения линейно поляризованного света, называется *поляризатором*, а поляроид, с помощью которого исследуют поляризованный свет, – *анализатором*.

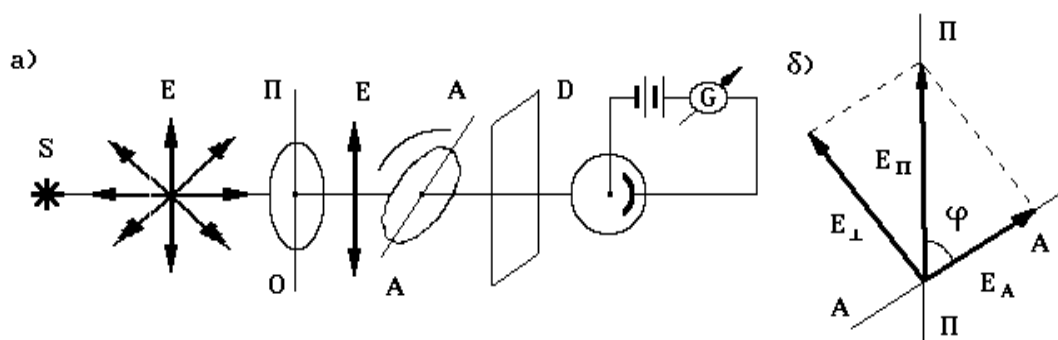


Рис. 3

Рассмотрим установку, которая состоит из источника света  $S$ , двух поляроидов  $\Pi$  и  $A$ , фотоэлемента (рис. 3а). Пройдя через первый поляроид (поляризатор), свет становится плоскополяризованным. Вторым поляроид (анализатор) может пропускать только те волны, направления колебаний вектора напряжённости которых совпадают с его главным направлением  $AA$ . Если главные плоскости (оптические оси) поляризатора и анализатора совпадают, то интенсивность проходящего света будет максимальной. Если анализатор повернуть таким образом, что его оптическая ось составит угол  $90^\circ$  с оптической осью поляризатора, то интенсивность проходящего света будет равна нулю. Такое положение поляризаторов называют *скрещенным*. В случае, когда главные плоскости поляризатора и анализатора составляют между собой некоторый угол  $\varphi$ , интенсивность пропускаемого света будет принимать промежуточные значения.

Пусть  $E_{\Pi}$  – амплитуда вектора напряжённости колебаний, которые пропускаются поляризатором,  $AA$  – главное сечение анализатора. Амплитуду  $E_{\Pi}$  можно разложить на две взаимно перпендикулярные составляющие  $E_{\Pi}$  и  $E_{\perp}$ , одна из которых совпадает с главным сечением анализатора. Колебания  $E_{\perp}$ , перпендикулярные направлению  $AA$ , не проходят через анализатор. Амплитуда световой волны, которая выйдет из анализатора (рис. 3б), равна:

$$E_A = E_{\Pi} \cdot \cos\varphi.$$

Так как интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды светового вектора, то

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

где  $I_0$  – интенсивность падающего на анализатор света,  $I$  – интенсивность вышедшего из анализатора света,  $\varphi$  – угол между плоскостями колебаний светового вектора падающего на анализатор и вышедшего из анализатора плоскополяризованного света. Выражение (1) носит название *закона Малюса*.

Некоторые кристаллы обладают свойством двойного лучепреломления. Преломляясь в таком кристалле, световой луч разделяется на два линейно поляризованных луча с взаимно перпендикулярными направлениями колебаний (рис. 4). Один из лучей называется *обыкновенным* и обозначается буквой «о», второй – *необыкновенным* и обозначается буквой «е». Обыкновенный луч подчиняется закону преломления и лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью. Для необыкновенного луча отношение синусов углов падения, и преломления не остается постоянным при изменении угла падения. Кроме этого, необыкновенный луч, как правило, не лежит в плоскости падения и отклоняется от луча «о» даже при нормальном падении света.

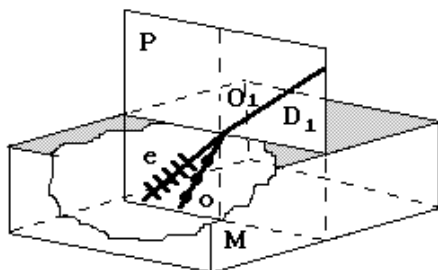


Рис. 4

Кристаллы, которые обладают двойным лучепреломлением, делятся на одноосные и двухосные. В одноосных кристаллах есть направление, вдоль которого обыкновенный и необыкновенный лучи распространяются не разделяясь и с одинаковой скоростью. Это направление называется *оптической осью кристалла*.



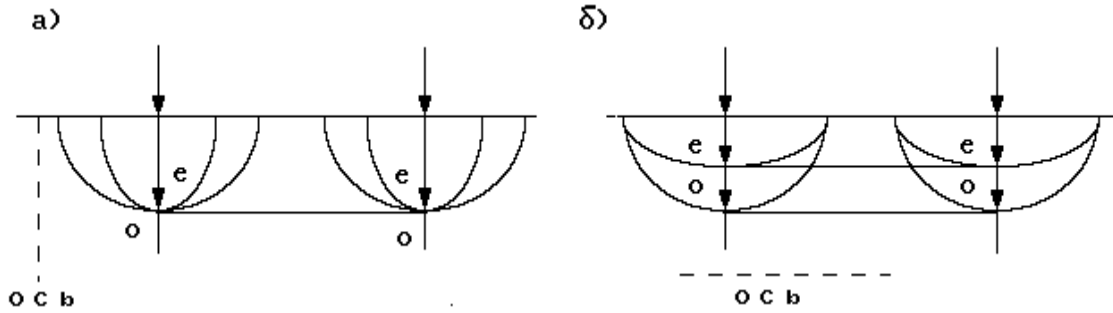


Рис. 5

На рис. 5 показаны случаи нормального падения света на поверхность кристалла при различных направлениях оптической оси. В случае а) лучи «о» и «е» распространяются вдоль оптической оси и идут не разделяясь. На рис.5б оптическая ось кристалла параллельна преломляющей поверхности. В этом случае при нормальном падении света обыкновенный и необыкновенный лучи идут по одному и тому же направлению, но распространяются с различной скоростью. За время прохождения через пластинку между лучами возникает разность хода

$$\Delta = (n_o - n_e) \cdot d \quad \text{и соответствующая разность фаз} \quad \delta\varphi = \frac{(n_o - n_e) \cdot d}{\lambda_0} \cdot 2\pi. \quad (2)$$

Вырезанная параллельно оптической оси пластинка, у которой

$$(n_o - n_e) \cdot d = \lambda_0 / 4 + m\lambda_0, \quad \text{где } m = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

называется **пластинкой в четверть волны**.

Пластинка, у которой

$$(n_o - n_e) \cdot d = \lambda_0 / 2 + m\lambda_0 \quad (4)$$

называется **пластинкой в полволны**.

Как известно, сложение двух взаимно перпендикулярных колебаний с разными амплитудами ( $E_x = E_e \sin \alpha$ ,  $E_y = E_o \cos \alpha$ ) и с определённой разностью фаз приводит к формированию эллиптического колебания, описываемого уравнением:

$$\frac{E_x^2}{E_e^2} + \frac{E_y^2}{E_o^2} - 2 \frac{E_x E_y}{E_e E_o} \cdot \cos \delta\varphi = \sin^2 \delta\varphi \quad (5)$$

При прохождении плоскополяризованной волны через пластинку в четверть волны обыкновенный и необыкновенный лучи приобретают разность фаз  $\delta\varphi = \pi/2 \pm m\pi$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ). В этом случае  $\cos \delta\varphi = 0$ ,  $\sin \delta\varphi = 1$ , следовательно, уравнение эллипса примет вид:

$$\frac{E_x^2}{E_e^2} + \frac{E_y^2}{E_o^2} = 1, \quad (6)$$

т.е. получится эллипс, ориентированный относительно оптической оси пластинки (свет **эллиптически поляризован**).

При  $E_e = E_o$  конец вектора  $\vec{E}$  движется по окружности. В этом случае говорят, что свет **поляризован по кругу** (круговая поляризация). Уравнение траектории будет иметь вид:

$$E_x^2 + E_y^2 = E^2 \quad (7)$$

Если разность фаз равна  $\delta\varphi = \pm m\pi$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ), то  $\cos \delta\varphi = \pm 1$ ,  $\sin \delta\varphi = 0$ , следовательно,

$$\frac{E_x^2}{E_e^2} + \frac{E_y^2}{E_o^2} - 2 \frac{E_x E_y}{E_e E_o} = 0 \Rightarrow E_y = \pm \frac{E_o}{E_e} \cdot E_x \quad (8)$$

Колебания вектора  $\vec{E}$  происходят по прямой с угловым коэффициентом  $k = E_o/E_e = \text{tg } \alpha$ , следовательно, свет будет **линейно-поляризованным**. Плоскость, в которой колеблется световой вектор в плоскополяризованной волне, называется **плоскостью колебаний**.

*Таким образом, при прохождении через пластинку в 1/4 длины плоскополяризованной волны, свет на выходе из нее может быть эллиптически-поляризованным ( $0 < \alpha < 45^\circ$ ,  $45^\circ < \alpha < 90^\circ$ ), поляризованным по кругу ( $\alpha = 45^\circ$ ) или линейно-поляризованным ( $\alpha = 0$  и  $\alpha = 90^\circ$ ).*

*При прохождении плоскополяризованного света через пластинку в полволны свет на выходе из пластинки будет также плоскополяризованным, но направление колебаний вектора  $\vec{E}$  изменится на угол  $180^\circ - 2\alpha$  или  $2\alpha$ .*

### Порядок выполнения работы

#### Задание 1. Проверка закона Малюса.

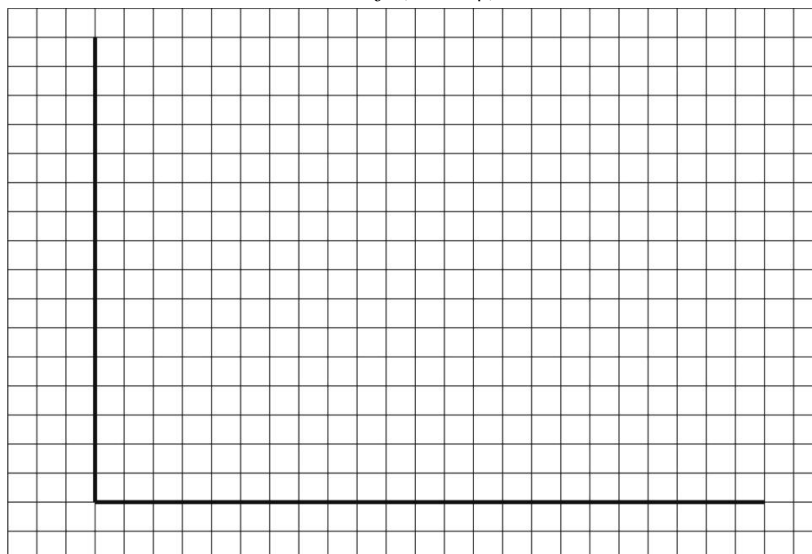
1.1. Включить источник света и выпрямитель, питающий фотоэлемент (рис.3). Вращая анализатор, добиться максимального отклонения стрелки микроамперметра. Записать показание лимба анализатора и показание микроамперметра.

1.2. Затем повернуть анализатор на  $20^\circ$  и записать показание микроамперметра. Измерения повторить через каждые  $20^\circ$  до  $360^\circ$ , включая значения  $90^\circ$  и  $270^\circ$ .

угол $\varphi$ , град	0	20	40	60	80	90	100	120	140	160	180
$\cos^2 \varphi$											
$I$ , в дел.шкалы											
угол $\varphi$ , град	200	220	240	260	270	280	300	320	340	360	
$\cos^2 \varphi$											
$I$ , в дел.шкалы											

1.3. Построить график зависимости силы фототока, пропорциональной интенсивности проходящего света, от квадрата косинуса угла поворота  $\varphi$ :

$$I = f(\cos^2 \varphi).$$



## Вывод:

### Задание 2. Изучение свойств пластинок в $1/2$ и $1/4$ длины волны.

Установка (рис. 6) для исследования вида поляризации при прохождении плоскополяризованного света через пластинку представляет собой последовательно расположенные: S - источник света, СФ – светофильтр красный, П и А – поляризатор и анализатор в скрещенном положении, Р – исследуемая пластинка, Э – экран (рис. 6).

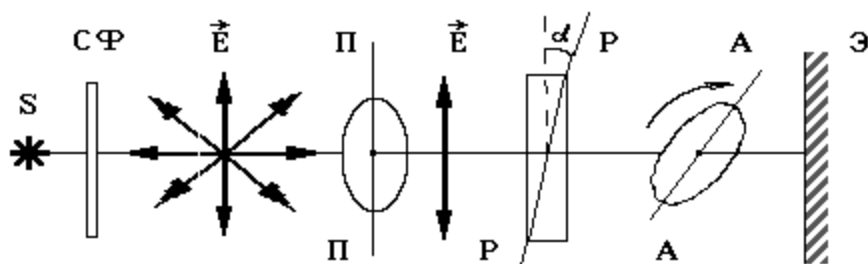


Рис. 6

**Исследуемые пластинки (целлофановые пленки) являются двухосными, т.е. имеют две взаимно перпендикулярные оптические оси!**

#### 2.1. Изучение свойств пластинки в $1/2$ длины волны.

Для этого:

1) Определить направление одной из оптических осей пластинки в  $1/2$  длины волны.

Для этого поставить целлофановую пленку между скрещенными поляризатором и анализатором и повернуть её так, чтобы на экране исчезло светлое пятно. При таком положении пленки оптическая ось совпадает с осью поляризатора или осью анализатора. При вращении пленки темнота на экране появляется естественно дважды: когда ось пленки совпадает либо с осью анализатора, либо с осью поляризатора. Заметить положение оптической оси по лимбу анализатора или поляризатора.

2) Определить угол поворота пленкой плоскости колебания светового вектора линейно поляризованного света.

Если между скрещенными поляризатором и анализатором поставить пластинку в  $1/2$  длины волны, то на экране появится светлое пятно некоторой интенсивности. Это произошло потому, что пленка является оптически активной. Вращением анализатора добиться темноты на экране. При этом заметить по лимбу анализатора, на какой угол он будет повернут. Это и будет угол поворота плоскости колебаний плоско поляризованного света пленкой в  $1/2$  длины волны.

3) Определить влияние пленки в  $1/2$  длины волны на характер поляризации света, вышедшего из нее.

Для этого между скрещенными поляризатором и анализатором установить пленку так, чтобы оптическая ось пленки была расположена под углом  $0^\circ$  к оптической оси поляризатора. Вращая анализатор на  $360^\circ$  и наблюдая за изменением интенсивности на экране, сделать вывод о том, какую поляризацию имеет свет, вышедший из пленки.

#### 2.2. Изучение свойств пластинки в $1/4$ длины волны.

1) Взять пленку в  $1/4$  длины волны и выполнить с ней задание пункта 2.1.1.

2) Устанавливая оптическую ось пленки под углами  $\alpha_1=0^\circ$  (или  $90^\circ$ ),  $\alpha_2=45^\circ$  и  $0^\circ < \alpha_3 < 45^\circ$  (или  $45^\circ < \alpha_3 < 90^\circ$ ) и вращая анализатор на  $360^\circ$ , наблюдать за пятном на

экране. Сделать вывод о свойствах этой пленки и её влиянии на характер поляризации вышедшего из неё света.

Сравнить свойства исследованных плёнок в  $1/2$  и  $1/4$  длины волны.

2.3. Идентифицировать тип неизвестной пластинки.

Для этого:

1) Взять неизвестную плёнку, поставить её между скрещенными поляризатором и анализатором. Определить направление её оптической оси.

2) Установить плёнку так, чтобы угол между осью поляризатора и осью плёнки был равен  $\alpha_1=0^\circ$  (или  $90^\circ$ ),  $\alpha_2=45^\circ$  и  $0^\circ<\alpha_3<45^\circ$  (или  $45^\circ<\alpha_3<90^\circ$ ) и вращая анализатор на  $360^\circ$ , наблюдать за пятном на экране. По характеру изменения яркости пятна на экране, установить тип идентифицированной пластики.

Опыт повторить для всех неизвестных пластинок.

### Контрольные вопросы:

1. Чем отличается естественный свет от плоскополяризованного света?
2. Как зависит интенсивность света  $I$  от амплитуды вектора напряжённости  $\vec{E}$ ?
3. Какие направления в поляризаторе называются главными?
4. Сформулируйте закон Малюса.
5. Естественный свет проходит через поляризатор и анализатор. Коэффициент поглощения поляризатора и анализатора равен  $k$ . Чему равна интенсивность света, прошедшего через оба поляризатора?
6. В чём суть явления двулучепреломления?
7. Какие плёнки называются плёнками в  $1/4$  и  $1/2$  длины волны, какую разность фаз они вносят?
8. Как получить свет линейной, эллиптической и круговой поляризации?

### Литература:

1. Г.С. Ландсберг. Оптика. –М.: «Наука», 1976. – гл XVI, §§101, 102, 105, 106, гл. XVII, §§ 107, 108.

## Лабораторная работа № 6

### Изучение свойств трёхгранной призмы

**Цель работы:** освоить методику определения показателя преломления вещества трёхгранной призмы, исследовать её дисперсию и определить разрешающую способность.

**Оборудование:** гониометр, трёхгранная призма, осветитель.

#### Теория работы и описание установки

Рассмотрим ход лучей в трёхгранной призме (рис. 1).

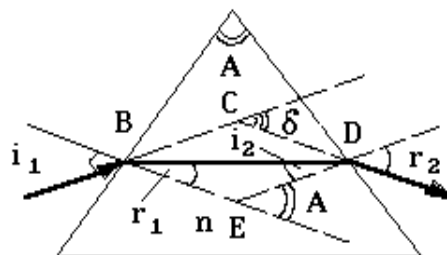


Рис. 1

Пусть луч падает под углом  $i_1$  на одну из преломляющих граней прозрачной трёхгранной призмы. После двукратного преломления (на левой и правой гранях) луч отклонится на угол  $\delta$ , который называется *углом отклонения*. Угол  $A$ , заключённый между преломляющими гранями, называется *преломляющим углом* призмы. Угол отклонения  $\delta$  зависит от преломляющего угла  $A$  и показателя преломления призмы  $n$  следующим образом:

$$n = \frac{\sin \frac{A + \delta_{\min}}{2}}{\sin \frac{A}{2}} \quad (1)$$

Таким образом, для определения показателя преломления вещества призмы, необходимо измерить наименьший угол отклонения лучей призмой  $\delta_{\min}$  и преломляющий угол призмы  $A$ .

*Дисперсией света* называются явления, обусловленные зависимостью показателя преломления вещества от длины световой волны. Эту зависимость можно охарактеризовать функцией

$$n = f(\lambda), \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина световой волны в вакууме.

*Дисперсией вещества* называется производная  $n$  по  $\lambda$ :

$$D = \frac{dn}{d\lambda} \quad (3)$$

Зависимость  $n$  от  $\lambda$  существенно нелинейная, т.е. производная

$$\frac{dn}{d\lambda} \neq \text{const}$$

Поэтому часто пользуются понятием средней дисперсии:

$$\langle D \rangle = \frac{\Delta n}{\Delta \lambda} \quad (4)$$

С уменьшением длины волны показатель преломления увеличивается со все возрастающей скоростью, так что дисперсия вещества  $dn/d\lambda$  отрицательна и растет по модулю с уменьшением  $\lambda$ . Дисперсия, для которой  $dn/d\lambda < 0$ , называется *нормальной дисперсией*.

Если вещество поглощает часть лучей, то в области поглощения и вблизи нее ход дисперсии обнаруживает аномалию. На некотором участке дисперсия вещества оказывается положительной. Дисперсия, для которой  $dn/d\lambda > 0$ , называется *аномальной*.

Явление дисперсии используется для разложения сложного света на монохроматические составляющие. Например, при прохождении пучка белого света сквозь трёхгранную призму из вещества, обладающей достаточной дисперсией, он разлагается в дисперсионный (есть дифракционный) спектр: лучи разной длины волны отклоняются на различные углы (поговорка: к.о.ж.з.г.с.ф.). Отличие спектров – дифракционная решетка сильнее отклоняет красные лучи, а призма больше фиолетовые.

Так как призма даёт разные углы отклонения для различных длин волн, то это даёт возможность вычислить среднюю дисперсию трёхгранной призмы:

$$D_{\text{приз}} = \frac{\Delta \delta}{\Delta \lambda} = \frac{2 \cdot \frac{\Delta n}{\Delta \lambda} \cdot \sin \frac{A}{2}}{\cos \frac{A + \delta_{\min}}{2}}, \quad (5)$$

и разрешающую способность призмы:

$$R = b \cdot \Delta n / \Delta \lambda, \quad (6)$$

где  $b$  – размеры основания призмы,  $\Delta n / \Delta \lambda$  – дисперсия вещества призмы.

Измерение преломляющего угла призмы и угла наименьшего отклонения луча осуществляется при помощи гониометра (рис. 2).

Свет от источника проходит через щель коллиматора 2. С объектива 3 коллиматора 2 параллельный пучок лучей падает на трёхгранную призму 4, расположенную на предметном столике гониометра таким образом, чтобы ребро призмы было параллельно щели коллиматора. Изображение щели либо дисперсионный спектр, создаваемый призмой, наблюдается через окуляр, который расположен в фокальной плоскости объектива 5 зрительной трубы 6. Отсчёт углов осуществляется по лимбу с нониусом 7 гониометра.

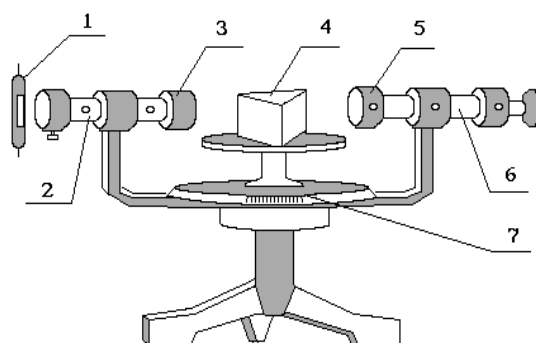


Рис. 2

### Порядок выполнения работы

#### Задание 1. Определение преломляющего угла призмы.

1.1. Установить трёхгранную призму на столик гониометра чтобы ее ребро было напротив щели коллиматора (рис. 3а).

1.2. Поворачивая зрительную трубу, совместить изображение при отражении от правой грани призмы с визирной линией зрительной трубы. Записать по лимбу и нониусу гониометра значение угла  $\varphi_1$ .

1.3. Найти изображение щели при отражении от левой грани и записать значение угла  $\varphi_2$ .

1.4. Определить преломляющий угол призмы  $A$ . Для этого вычислить угол  $\Psi = \varphi_2 - \varphi_1$  между двумя изображениями щели при отражении от левой и правой граней призмы. Из рис.3 видно, что

$$\begin{aligned} \angle CAD &= \angle CAE; & \angle FAB &= \angle BAE \\ \angle FAD &= \angle FAB + \angle BAE + \angle CAE + \angle CAD = 2(\angle BAE + \angle CAE) = 2A \end{aligned}$$

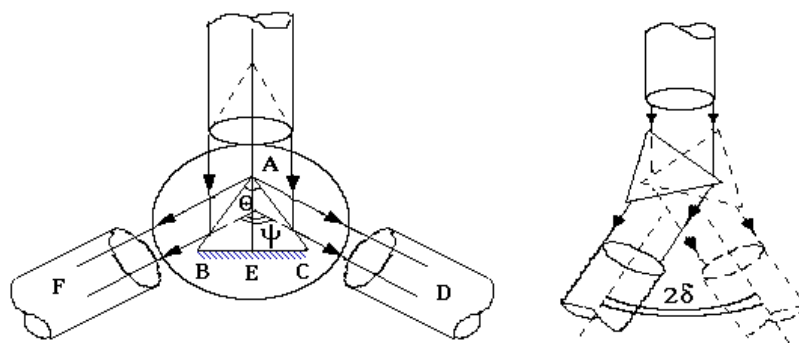


Рис. 3

Тогда преломляющий угол призмы будет равен:

$$A = \frac{\psi}{2} = \frac{\phi_2 - \phi_1}{2} = \text{-----} =$$

**Задание 2. Определение угла наименьшего отклонения.**

2.1. Столик с призмой повернуть так, чтобы свет попадал на одну из трёх граней призмы и выходил из другой отклоненным на некоторый угол  $\delta$ . Поворачивая зрительную трубу, найти дисперсионный спектр от щели и совместить его красный край с визирной линией. Затем, вращая столик гониометра и одновременно перемещая зрительную трубу, добиться такого положения, когда дисперсионное изображение щели будет находиться на минимальном угловом расстоянии от оси коллиматора. Зафиксировав зажимным винтом зрительную трубу, с помощью винта нониуса точнее установить визирную линию на красный край спектра и снять показания  $\phi_1'$  по лимбу и нониусу гониометра.

2.2. Задание п. 2.1 повторить для второй грани призмы, когда дисперсионное изображение щели находится на минимальном угловом расстоянии с другой стороны от оси коллиматора. Записать по лимбу и нониусу гониометром показание угла  $\phi_2'$ .

2.3. Определить угол наименьшего отклонения  $\delta$ . Из рис. 3б видно, что

$$\delta_{\min} = \frac{\phi_2' - \phi_1'}{2} = \text{-----} =$$

**Задание 3. Определение показателя преломления вещества призмы.**

3.1. По формуле (1) вычислить показатель преломления вещества призмы.

**Вычисления:**

$$n = \frac{\sin \frac{A + \delta_{\min}}{2}}{\sin \frac{A}{2}} = \text{-----} =$$

**Задание 4. Исследование дисперсии призмы.**

4.1. Установив за щелью коллиматора красный светофильтр, по вышеуказанной методике определить угол наименьшего отклонения для данного монохроматического света.

$$\delta_{\min}^{\text{кр}} = \frac{\phi_2' - \phi_1'}{2} = \text{-----} =$$

4.2. Повторить задание п.4.1 для фиолетового светофильтра.

$$\delta_{\min}^{\text{фиол}} = \frac{\phi_2' - \phi_1'}{2} = \text{-----} =$$

4.3. По формуле (1) вычислить показатели преломления  $n$  для красного и фиолетового светофильтров.

**Вычисления:**

$$n_{\text{кр}} = \frac{\sin \frac{A + \delta_{\min}^{\text{кр}}}{2}}{\sin \frac{A}{2}} = \text{-----} = \quad n_{\text{ф}} = \frac{\sin \frac{A + \delta_{\min}^{\text{фиол}}}{2}}{\sin \frac{A}{2}} = \text{-----} =$$

4.4. Определить среднюю дисперсию вещества призмы и сделать вывод о характере дисперсии.

**Вычисления:**

$$\langle D \rangle = \frac{\Delta n}{\Delta \lambda} = \frac{n_{\text{кр}} - n_{\text{ф}}}{\lambda_{\text{кр}} - \lambda_{\text{ф}}} = \text{-----} =$$

**Вывод:**

4.5. Вычислить среднюю дисперсию трехгранной призмы.

**Вычисления:**

$$D_{\text{приз}} = \frac{\Delta \delta}{\Delta \lambda} = \frac{2 \cdot \frac{\Delta n}{\Delta \lambda} \cdot \sin \frac{A}{2}}{\cos \frac{A + \delta_{\text{min}}}{2}} = \text{-----} =$$

**Задание 5. Определение разрешающей способности призмы.**

5.1. С помощью штангенциркуля измерить длину основания  $b$  призмы и по формуле (6) вычислить разрешающую способность  $R$ .

**Вычисления:**

$$R = b \cdot \frac{\Delta n}{\Delta \lambda} =$$

**Дополнительное задание.**

Вывести расчетную формулу (1) для нахождения показателя преломления вещества трехгранной призмы.

**Вывод:****Контрольные вопросы:**

1. Сформулируйте законы преломления и отражения света.
2. Каков ход лучей в трехгранной призме?
3. Что называется дисперсией вещества?
4. Что называется дисперсией трехгранной призмы?
5. Чем будут отличаться спектры, полученные от одного и того источника излучения при помощи дифракционной решетки и призмы?

**Литература:**

1. Г.С. Ландсберг. Оптика. – М.: «Наука», 1976. – гл. XIII, §86, гл. XXVIII, §§155, 156.
2. Ф.А. Королёв. Курс физики. – М.: «Просвещение», 1974. – гл. V, §29.
3. И.В. Савельев. Курс общей физики, т. II. – М.: «Наука», 1988.–гл. XX, §142.



## Лабораторная работа № 7

### Изучение фотоэлектрического концентрационного колориметра. Исследование поглощения света при помощи КФК-2

**Цель работы:** изучить устройство и принцип действия КФК-2, проверить закон Бера; исследовать спектральную зависимость коэффициента поглощения вещества; проверить зависимость интенсивности вышедшего света от толщины слоя.

**Оборудование:** фотоколориметр концентрационный КФК-2, набор кювет, набор растворов медного купороса, растворитель (дистиллированная вода).

#### Теория работы и описание установки

При прохождении света через вещество часть его энергии затрачивается на возбуждение колебаний электронов атомов вещества. Частично эта энергия возвращается в виде вторичных волн, излучаемых электронами, а частично переходит во внутреннюю энергию вещества. Поэтому интенсивность света при прохождении через вещество уменьшается – происходит поглощение света. Поглощение наиболее сильно в случае, когда частота света равна частоте собственных колебаний электронов.

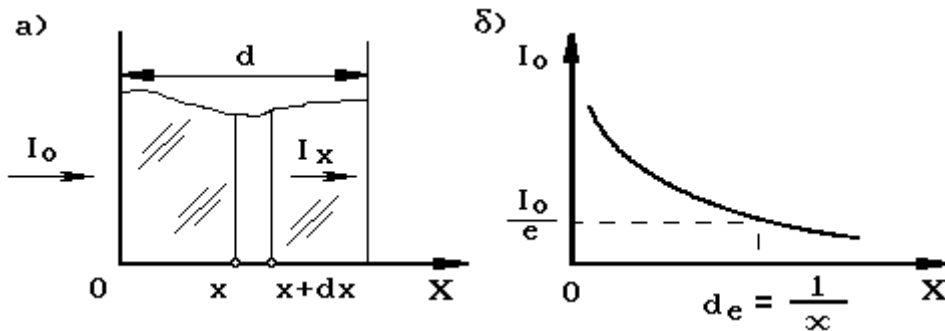


Рис. 1

Поглощение света характеризуется экспоненциальным законом убывания его интенсивности при увеличении толщины слоя вещества, через которое прошел свет. Пусть на слой вещества толщиной  $d$  падает параллельный монохроматический пучок света интенсивностью  $I_0$  (рис. 1а). После прохождения поглощающего слоя вещества толщиной  $x$  интенсивность света станет равной  $I_x$ . Опыт показывает, что ослабление пропорционально толщине слоя и интенсивности падающего на него светового потока. Поэтому при прохождении светом слоя толщиной  $dx$  изменение интенсивности будет:

$$dI_x = -\chi_\lambda I_x dx, \quad (1)$$

где  $\chi_\lambda$  - коэффициент поглощения, зависящий от рода вещества и длины волны. Физический смысл коэффициента поглощения  $\chi_\lambda$  легко определить из того условия, что уменьшение интенсивности света в  $e$  раз ( $I = I_0/e$ ) происходит при длине поглощающего слоя  $d_e = 1/\chi_\lambda$ .

Разделив в (1) переменные и проинтегрировав полученное равенство от 0 до  $d$ , получим, что интенсивность излучения, прошедшего через весь слой вещества, будет:

$$I = I_0 e^{-\chi_\lambda d}. \quad (2)$$

Эта формула носит название **закона Бугера-Ламберта** (рис. 1б).

Для случая раствора поглощающего вещества в прозрачном растворителе коэффициент поглощения  $\chi_\lambda$  прямо пропорционален концентрации  $C$  растворённого вещества, т.е.

$$\chi_{\lambda} = k_{\lambda} C, \quad (3)$$

где  $k_{\lambda}$  – постоянная, не зависящая от концентрации величина – молекулярный коэффициент поглощения. Формула (3) носит название **закона Бера**.

С учётом (3) выражение (2) можно переписать в виде:

$$I = I_0 e^{-k_{\lambda} C d} \quad (4)$$

Равенство (4), носящее название **закона Бугера-Ламберта-Бера**, имеет ограниченный характер, так как оно справедливо лишь для растворов малых концентраций  $C$ .

При экспериментальном исследовании ослабления света веществом обычно измеряют коэффициент пропускания  $\tau$  и оптическую плотность  $D$ . По определению

$$\tau = \frac{I}{I_0} \quad (5)$$

$$D = \lg \frac{I_0}{I} = \lg \frac{1}{\tau} \quad (6)$$

и

Из формул (2) и (6) получим:

$$\chi_{\lambda} = \frac{D}{0,43 \cdot d} \quad (7)$$

Для измерения коэффициента пропускания  $\tau$  и оптической плотности  $D$  в данной работе используется колориметр фотоэлектрический концентрационный КФК-2 (рис. 2).

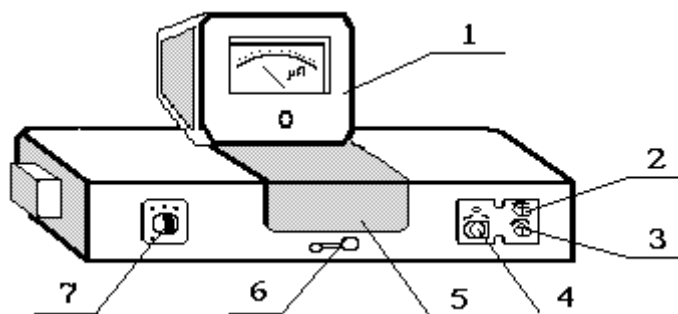


Рис. 2

При измерении спектральной зависимости коэффициента пропускания светофильтры, вмонтированные в диск, вводятся в световой поток с помощью ручки 7. Максимумы пропускания светофильтров приходятся на следующие длины волн: 315 нм – 1-й светофильтр, 364 нм – 2-й, 400 нм – 3-й, 440 нм – 4-й, 490 нм – 5-й, 540 нм – 6-й, 590 нм – 7-й, 670 нм – 8-й, 750 нм – 9-й, 870 нм – 10-й, 980 нм – 11 светофильтр.

### Порядок выполнения работы

#### Задание 1. Проверка закона Бера.

- 1.1. Внимательно изучить техническое описание и инструкцию по эксплуатации.
- 1.2. Колориметр включить в сеть и в течение 15 минут дать ему прогреться (кюветное отделение во время прогрева должно быть открытым!).
- 1.3. Ввести необходимый светофильтр (540 или 440 нм).
- 1.4. В кюветное отделение установить две кюветы одинаковой длины (50 мм) с растворителем или контрольным раствором и исследуемым раствором так, чтобы на пути светового пучка находилась кювета с контрольным раствором. Закрыть крышку

кюветного отделения и произвести измерение коэффициента пропускания  $\tau$  и оптической плотности  $D$  исследуемого раствора согласно.

1.5. Измерить (см. п. 1.4.) коэффициент пропускания  $\tau$  и оптическую плотность  $D$  всех имеющихся концентраций растворов  $\text{CuSO}_4$  в воде при заданном светофильтре.

$C, \%$	1	2	3	4	$C_{1x} =$	$C_{2x} =$
$D$	1	2	3	4	5	6
$\tau, \%$	1	2	3	4	5	6
$\chi$	1	2	3	4	5	6

1.6. Построить график зависимости коэффициента пропускания  $\tau$  от концентрации растворов  $C$  (рис.а). С помощью графика определить неизвестные концентрации  $C_{1x}$  и  $C_{2x}$ .

1.7. Построить график зависимости оптической плотности  $D$  от концентрации  $C$  растворов (рис. б).

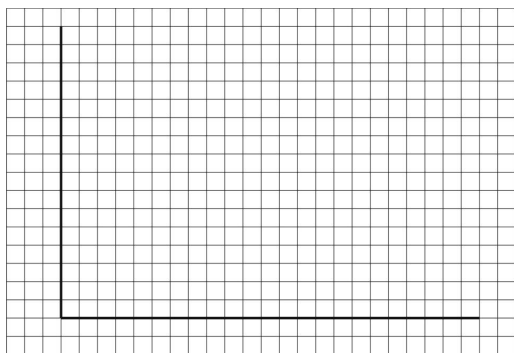


Рис. а

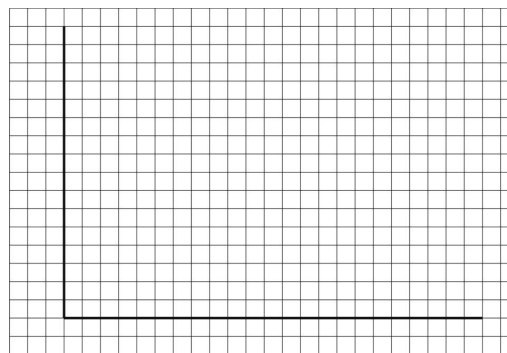


Рис. б

1.8. По формуле (7) рассчитать коэффициент поглощения  $\chi_\lambda$  для всех растворов и построить график зависимости  $\chi_\lambda = f(C)$ . Сделать вывод о выполнимости закона Бера.

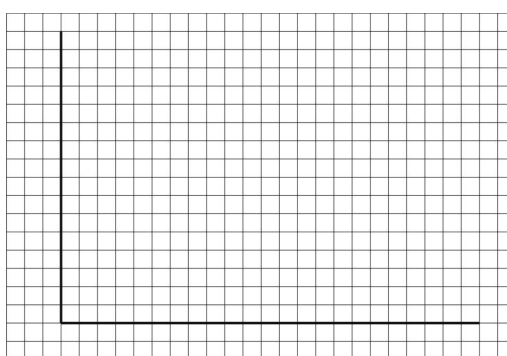


Рис. в

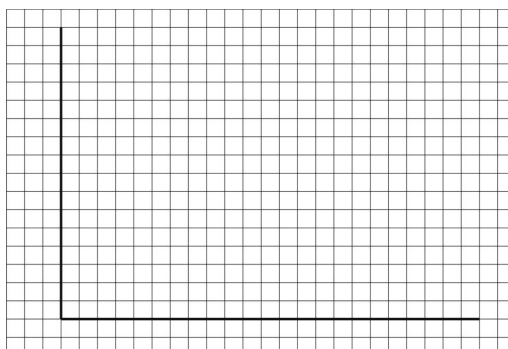
**Вывод:**

**Задание 2. Исследование спектральной зависимости коэффициента поглощения.**

2.1. Установить кювету длиной 50 мм с раствором  $\text{CuSO}_4$  и с дистиллированной водой в кюветодержатель. Вводя различные светофильтры, дающие монохроматические пучки света с длиной волны в пределах от 315 до 750 нм, измерить коэффициент пропускания  $\tau$  и оптическую плотность  $D$  (см.п.1.4.). При измерении по черной шкале светофильтров пользоваться чёрной шкалой ручки 4 "Чувствительность", а при измерении по красной шкале светофильтров – красной шкалой ручки 4.

$\lambda$ , нм	315	364	400	440	490	540
$D$	1	2	3	4	5	6
$\tau$ , %	1	2	3	4	5	6
$\chi$	1	2	3	4	5	6
$\lambda$ , нм	590	670	750	870	980	
$D$	7	8	9	10	11	
$\tau$ , %	7	8	9	10	11	
$\chi$	7	8	9	10	11	

2.2. По формуле (7) вычислить коэффициент поглощения  $\chi_\lambda$  для каждого монохроматического пучка света. Построить спектральную кривую  $\chi_\lambda = f(\lambda)$  и сделать вывод.



**Вывод:**

**Задание 3. Исследование зависимости коэффициента пропускания от толщины слоя вещества.**

3.1. Установить переключатель светофильтров на значение 540 нм.

3.2. Наполнить одну кювету длиной 50 мм дистиллированной водой, а вторую кювету другой длины – одним из измеренных растворов медного купороса. Измерить (см. п. 1.4) коэффициент пропускания  $\tau$ .

3.3. Используя кюветы разной длины, повторить измерение  $\tau$  для различных толщин поглощающего слоя данного раствора.

$d$ , мм	1	2	3	4	5	6
$\tau$ , %	1	2	3	4	5	6

3.4. Построить график зависимости  $\tau = f(d)$ , сделать вывод.

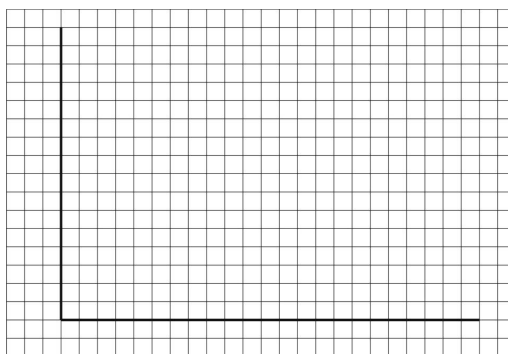


Рис. г

**Вывод:**

**Контрольные вопросы:**

1. Чем объясняется ослабление света при прохождении через вещество?
2. Сформулируйте закон поглощения света. Дайте его математическое обоснование.
3. Каков физический смысл коэффициента поглощения света?
4. Как связаны между собой коэффициенты поглощения, пропускания, оптическая плотность вещества?
5. Объясните на примере КФК-2 принцип измерения поглощения света фотокориметрическим методом.

**Литература:**

1. Г.С. Ландсберг. Оптика. – М.: «Наука», 1976. – гл. XXVIII, §157.
2. И.В. Савельев. Курс общей физики, т. II. – М.: «Наука», 1988. – гл. XX, §145.
3. Техническое описание и инструкция к КФК-2. – стр. 3–6, 16–19.

## ГЛАВА 3. КВАНТОВАЯ ОПТИКА

### Лабораторная работа № 8

#### Изучение законов внешнего фотоэффекта

**Цель работы:** изучить явление внешнего фотоэффекта, установить зависимость силы фототока насыщения от освещённости фотокатода, получить вольтамперные характеристики фотоэлемента.

**Оборудование:** оптическая скамья, источник света, фотоэлемент ФЭУ-1, микроамперметр, стабилизированный источник питания Б5-50.

#### Теория работы и описание установки

**Внешним фотоэффектом** называется явление испускания поверхностью тела электронов во внешнее пространство под действием падающего на поверхность излучения. Для изучения фотоэффекта используется вакуумный фотоэлемент ФЭ (рис. 1), который включается в цепь источника электрического напряжения. Излучение через прозрачную часть (окно) баллона попадает на катод К. Испущенные катодом фотоэлектроны под действием электрического поля перемещаются к аноду А, обеспечивая ток в цепи.

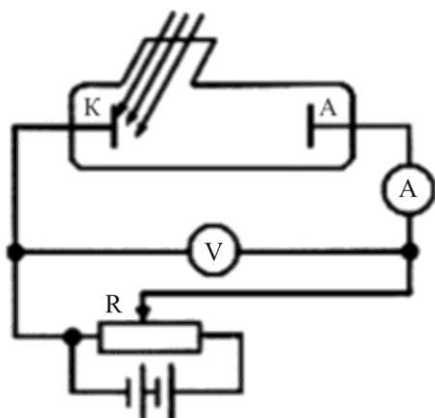


Рис. 1

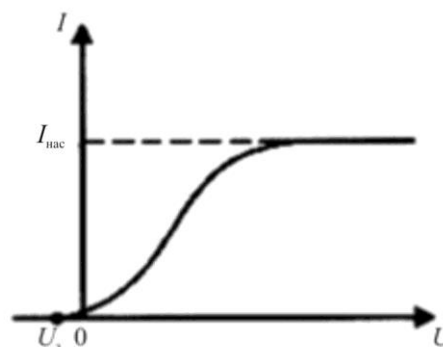


Рис. 2

Вольтамперная характеристика фотоэлемента (рис. 2) отражает зависимость силы фототока  $I$  от напряжения  $U$  при постоянном световом потоке, падающем на катод К. При напряжении  $U = 0$  сила тока  $I \neq 0$ . Это означает, что даже при отсутствии напряжения часть испущенных катодом К электронов достигает анода А. Для того, чтобы сила фототока стала равной нулю, необходимо на электроды подать задерживающее напряжение  $U_0$ . Увеличение ускоряющего напряжения приводит к возрастанию фототока, а затем к его насыщению. При насыщении практически все электроны, испущенные катодом, попадают на анод.

#### **Внешний фотоэффект характеризуется тремя законами:**

1. Сила фототока насыщения, а следовательно, и количество фотоэлектронов, вылетающих в единицу времени с поверхности фотокатода, прямо пропорциональны энергетической освещённости падающего излучения, если его спектральный состав остаётся неизменным (закон Столетова).

2. Для данного фотокатода максимальная начальная скорость фотоэлектронов зависит от частоты света и не зависит от его интенсивности.

3. Для каждого фотокатода существует красная граница внешнего фотоэффекта (порог фотоэффекта) – такая наименьшая частота  $\omega_0$ , при которой еще возможен фотоэффект.

Второй и третий законы внешнего фотоэффекта не удаётся истолковать на основе классической электромагнитной теории света. Согласно этой теории вырывание электронов проводимости из металла является результатом их «раскачивания» в электромагнитном поле световой волны, которое должно усиливаться при увеличении интенсивности света.

Лишь квантовая теория света позволила успешно объяснить законы внешнего фотоэффекта. Развивая идеи Планка о квантовании энергии излучения, Эйнштейн высказал гипотезу о том, что свет не только излучается, но и поглощается в виде отдельных дискретных квантов электромагнитного излучения – фотонов, энергия которых определяется **формулой Планка**  $E_\phi = \hbar\omega$ , где  $\hbar$  – постоянная Планка. При внешнем фотоэффекте электрон проводимости металла, поглощая фотон, получает его энергию  $\hbar\omega$ . Для выхода из металла электрон должен совершить работу выхода  $A$ . Поэтому **уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта**, выражающее закон сохранения энергии при фотоэффекте, имеет вид:

$$\hbar\omega = A + E_{max}, \quad (1)$$

где  $E_{max}$  – максимальная кинетическая энергия вылетевшего электрона.

Свободные электроны в металле обладают разными энергиями – они располагаются на разных энергетических уровнях. Поэтому даже при монохроматическом облучении катода энергия разных фотоэлектронов неодинакова. Работа выхода характеризует энергию, необходимую для выхода электрона с верхнего заполненного энергетического уровня. Для выхода электронов с ниже расположенных уровней необходима энергия, большая чем  $A$ . Кроме того, часть фотоэлектронов теряет энергию при движении из глубины катода к его поверхности.

В уравнении (1) под  $E_{max}$  надо понимать кинетическую энергию наиболее быстрых фотоэлектронов. Если учесть, что

$$E_{max} = \frac{mv_{max}^2}{2},$$

где  $v_{max}$  – максимальная скорость фотоэлектронов, то из уравнения Эйнштейна непосредственно вытекает второй закон фотоэффекта:

$$\frac{mv_{max}^2}{2} = \hbar\omega - A, \quad (2)$$

т.е. действительно  $v_{max} = f(\omega)$ .

Если  $E_{max} = 0$ , то

$$\hbar\omega_0 = A, \quad (3)$$

откуда и следует существование красной границы фотоэффекта (третий закон фотоэффекта):

$$\omega_0 = \frac{A}{\hbar}. \quad (4)$$

Для многих металлов работа выхода составляет 3,5-5 эВ (частота  $\omega_0$  соответствует ультрафиолетовой области спектра). У щелочных металлов ( $Na, K, Rb, Cs$ ) и их окислов работа выхода равна 1-2,5 эВ (красная граница лежит в видимой или ближней инфракрасной области).

Энергию  $E_{max}$  фотоэлектронов можно определять методом задерживающего потенциала. Если на фотоэлемент подать некоторое отрицательное напряжение  $U$ , то фотоэлектроны будут тормозиться, и анода смогут достичь только те электроны, энергия которых  $E \geq e_0U$  ( $e_0$  – заряд электрона). Поэтому анодный ток в цепи уменьшится. При

некотором значении задерживающего напряжения  $U_3$  даже самые быстрые фотоэлектроны не смогут достичь анода и анодный ток в цепи прекратится. По закону сохранения энергии:

$$E_{max} = e_0 U_3, \quad (5)$$

тогда из (1) получаем:

$$\hbar\omega = A + e_0 U_3. \quad (6)$$

В данной работе для выполнения задания используется входная часть вакуумного однокаскадного фотоэлектронного умножителя ФЭУ-1. В качестве фотокатода используется полупрозрачное покрытие, а динод накоротко соединяется с анодом. ФЭУ-1 помещён в светозащитный кожух и установлен на оптической скамье (рис.3). На этой же скамье устанавливается осветитель с маленькой лампочкой накаливания. Линейные размеры спирали лампочки малы по сравнению с минимальным расстоянием лампочки до ФЭУ-1. Поэтому лампочка может рассматриваться как точечный источник света. Сила фототока измеряется микроамперметром  $mA$ , напряжение – вольтметром  $V$ .

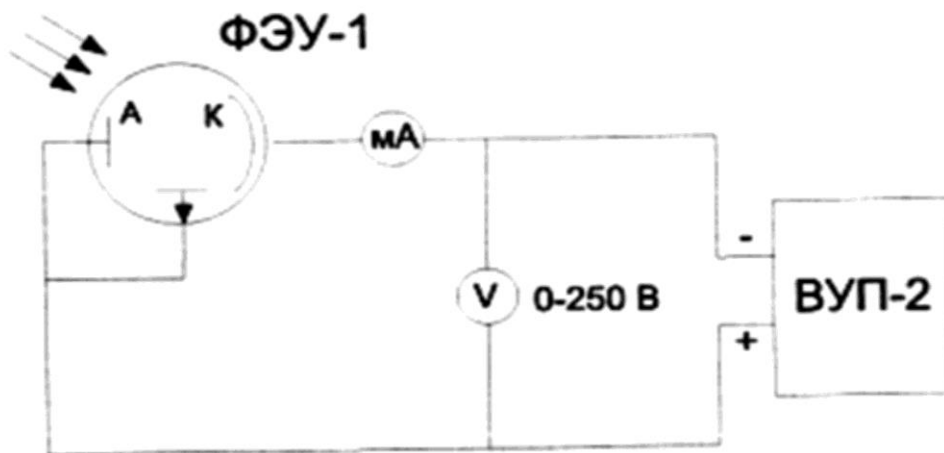


Рис. 3

### Порядок выполнения работы

**Задание 1. Изучение зависимости силы фототока насыщения от освещённости фотокатода.**

Таблица 1

№ измерения	$I$ , мА	$r$ , см	$\frac{r_{max}^2}{r_i^2}$
1			
2			
3			
4			
4			
6			
7			

1. Включить лампочку, предварительно установив её на расстоянии 40 см от ФЭУ-1.



2. Включить ВУП-2 и подать напряжение около 150 В, чтобы заведомо обеспечить его работу в режиме тока насыщения.

3. Выбрать такой предел микроамперметра, чтобы зайчик-указатель отклонялся на всю шкалу.

4. Удаляя от лампочки ФЭУ-1, через каждые 5 см измерить силу фототока.

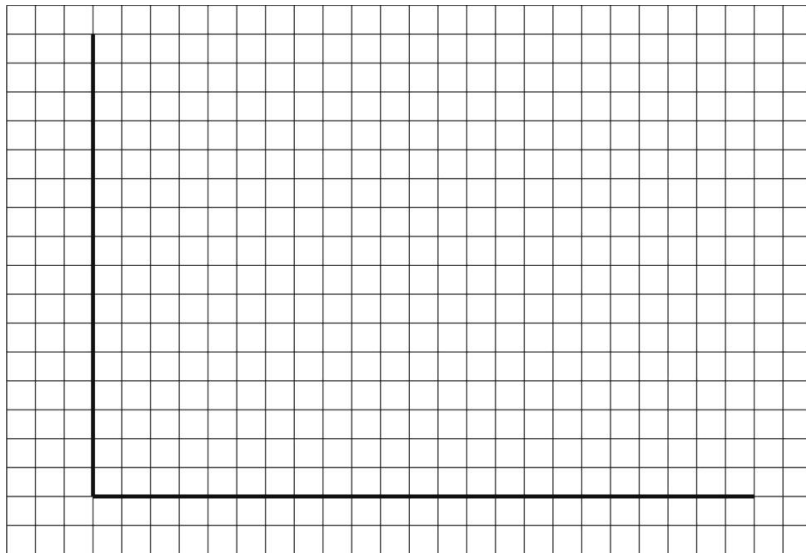
5. Результаты занести в таблицу 1.

6. Построить график зависимости силы тока от величины  $\frac{r_{max}^2}{r_i^2}$ , где  $r_{max}$  – максимальное расстояние ФЭУ-1 от лампочки,  $r_i$  – расстояние от лампочки до  $i$ -го положения

ФЭУ-1. Зависимость  $I = f\left(\frac{r_{max}^2}{r_i^2}\right)$  эквивалентна зависимости силы фототока от относительной освещённости фотокатода  $I = f\left(\frac{E_i}{E_{min}}\right)$ . Действительно, принимая лампочку за

точечный источник света, можно записать:  $\frac{E_i}{E_{min}} = \frac{r_{max}^2}{r_i^2}$ ,

где  $E_{min}$  – освещённость фотокатода при максимальном удалении ФЭУ-1 от лампочки.



**Вывод:**

### **Задание 2. Получение вольтамперной характеристики ФЭУ-1.**

1. Установить ФЭУ-1 на расстоянии 35 см от лампочки и, изменяя напряжение (начиная от нуля) через каждые 10 В, снять показания микроамперметра. По достижении насыщения (сила фототока не меняется с ростом напряжения) провести измерения в обратном порядке.

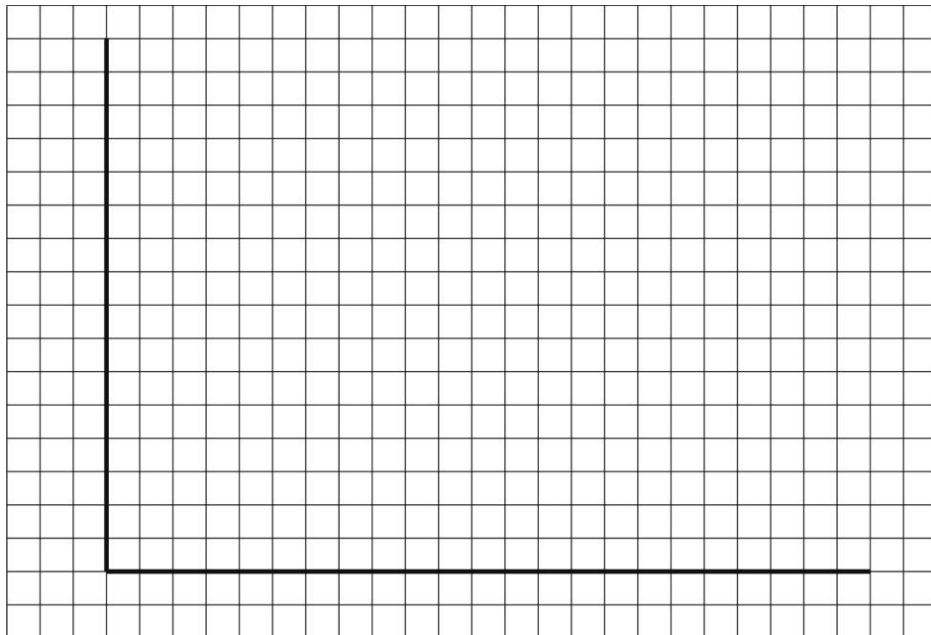
2. Повторить опыт для расстояния 45 см и 60 см между лампочкой и ФЭУ-1.

3. Результаты занести в таблицу 2.

Таблица 2

№ измерения	$r_1$		$r_2$		$r_3$	
	$U, В$	$I, мА$	$U, В$	$I, мА$	$U, В$	$I, мА$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

4. Построить графики зависимости  $I = f(U)$  для каждого значения  $r$ .



**Вывод:**

**Контрольные вопросы:**

1. В чем состоит явление фотоэффекта?
2. Каковы основные законы внешнего фотоэффекта?
3. Чем отличаются между собой вольтамперные характеристики фотоэлемента, полученные при его облучении спектром различных длин волн?
4. Объясните с помощью уравнения Эйнштейна законы внешнего фотоэффекта.
5. Какие свойства света проявляются при фотоэффекте?

### **Литература:**

1 Ташлыкова-Бушкевич, И.И. Физика: учеб. пособие для студ. учреждений, обеспечивающих получение высш. образования по техническим спец.: в 2 ч. Ч. 2: Оптика. Квантовая физика. Строение и физические свойства вещества / И.И. Ташлыкова-Бушкевич. – 2-е изд., испр. – Минск: АСАР, 2010. – 236 с.

2. Трофимова, Т.И. Курс физики: учеб. пособие для инженерно-технических спец. высш. учеб. заведений / Т.И. Трофимова. – 13-е изд., стер. – Москва: Академия, 2007. – 558 с.

3. Бобрович О.Г., Кленецкий Д.В., Крук Н.Н., Мисевич А.В., Тульев В.В. Физика. Лабораторный практикум. В 3 ч. Ч. 3. Оптика и строение вещества: учеб.-метод. пособие. – Минск: БГТУ, 2018. – 222 с.

Учебное издание

**ОБЩАЯ ФИЗИКА  
(ОПТИКА)**

Рабочая тетрадь

Составители:

**КАШЕВИЧ** Ирина Федоровна

**САПЕЛКО** Татьяна Ивановна

Технический редактор

*Г.В. Разбоева*

Компьютерный дизайн

*Л.И. Ячменёва*

Подписано в печать 02.03.2022. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 3,02. Уч.-изд. л. 2,71. Тираж 17 экз. Заказ в/п.

Издатель и полиграфическое исполнение – учреждение образования  
«Витебский государственный университет имени П.М. Машерова».

Свидетельство о государственной регистрации в качестве издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/255 от 31.03.2014.

Отпечатано на ризографе учреждения образования  
«Витебский государственный университет имени П.М. Машерова».

210038, г. Витебск, Московский проспект, 33.