

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины»

**ОБЩАЯ ФИЗИКА**  
**ОПТИКА**

Гомель  
2014

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

98  
Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины»

# ОБЩАЯ ФИЗИКА

## ОПТИКА

Рекомендовано учебно-методическим объединением  
по педагогическому образованию  
в качестве практикума для студентов учреждений  
высшего образования, обучающихся по специальности  
1—02 05 04 «Физика и техническое творчество»

2024

УК 906700012

Установа адукацыі  
"Гомельскі дзяржаўны ўніверсітэт  
імя Францыска Скарыны"  
БІБЛІЯТЭКА

Гомель  
ГГУ им. Ф. Скорины  
2014

УДК 535(076.5)

ББК 22.34я73

О-28

Авторы:

И. В. Семченко, Е. Б. Шершнёв, А. Н. Купо, В. В. Грищенко

Рецензенты:

кандидат физико-математических наук В. В. Кисель;

кандидат технических наук В. М. Зеленкевич;

кандидат педагогических наук Ч. М. Федорков

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
учреждения образования «Гомельский государственный  
университет имени Франциска Скорины»

**Общая физика : оптика : практикум** / И. В. Семченко  
О-28 [и др.] ; М-во образования РБ, Гом. гос. ун-т им. Ф. Скорины. –  
Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2014. – 108 с.  
ISBN 978-985-439-843-3

В практикуме приводятся методические рекомендации по выполнению 12 лабораторных работ, содержание которых соответствует основным темам раздела «Оптика». Каждая тема включает краткие теоретические понятия, инструкции по выполнению лабораторных работ.

В приложениях даются основные физические величины и значения коэффициентов.

Адресован студентам учреждений высшего образования, обучающихся по специальности 1 – 02 05 04 «Физика и техническое творчество».

УДК 535(076.5)

ББК 22.34я73

ISBN 978-985-439-843-3

© Семченко И. В., Шершнёв Е. Б.,  
Купо А. Н., Грищенко В. В., 2014

© УО «Гомельский государственный  
университет им. Ф. Скорины», 2014

## Содержание

Введение .....	4
<b>Тема 1. Фотометрия</b> .....	5
Лабораторная работа 1. Изучение основных законов фотометрии ...	11
<b>Тема 2. Основные явления и законы геометрической оптики.</b>	15
Лабораторная работа 2. Определение фокусных расстояний линз методом Бесселя .....	23
Лабораторная работа 3. Изучение основных характеристик микроскопа .....	26
<b>Тема 3. Интерференция света</b> .....	29
Лабораторная работа 4. Определение радиуса кривизны линзы и длины световой волны с помощью колец Ньютона .....	37
Лабораторная работа 5. Определение длины световой волны при помощи бипризмы Френеля .....	41
Лабораторная работа 6. Изучение чистоты обработки поверхности с помощью микроинтерферометра Линника .....	45
<b>Тема 4. Дифракция света</b> .....	50
Лабораторная работа 7. Изучение дифракции света .....	55
Лабораторная работа 8. Изучение дифракции света Фраунгофера и осуществление пространственной фильтрации изображения ...	59
<b>Тема 5. Поляризация света</b> .....	65
Лабораторная работа 9. Изучение поляризации света .....	72
Лабораторная работа 10. Изучение явления вращения плоскости поляризации света .....	76
<b>Тема 6. Дисперсия света</b> .....	80
Лабораторная работа 11. Определение средней дисперсии и показателя преломления вещества с помощью рефрактометра ИРФ-454 .....	83
<b>Тема 7. Поглощение света</b> .....	89
Лабораторная работа 12. Исследование поглощения света в растворе с помощью колориметра КФК-2 .....	92
Литература .....	97
Приложение А. Содержание отчета по лабораторной работе и требования к его оформлению .....	99
Приложение Б. Таблицы физических величин и их обозначение ..	101
Приложение В. Значения коэффициентов .....	104

## Введение

В соответствии с учебным планом специальности 1 – 02 05 04 «Физика и техническое творчество» в процессе изучения раздела «Оптика» курса «Общая физика» предусмотрено выполнение лабораторных работ в объёме 42 часа.

Описание и методика проведения лабораторных работ по оптике приведены в данном лабораторном практикуме. Каждая работа содержит краткое изложение основных закономерностей изучаемых явлений, сведения об экспериментальной методике, положенной в основу выполнения лабораторной работы, приводятся описания используемых приборов и последовательность проведения измерений.

Выполнение каждой лабораторной работы связано с необходимостью предварительного изучения соответствующей теоретической части курса «Общая физика» раздела «Оптика». Необходимо помимо данного пособия ознакомиться с соответствующим разделом учебника и конспектом лекций по указанной дисциплине, т. е. разобраться, какое явление изучается и какие величины измеряются.

Работа в лаборатории является одним из основных элементов процесса изучения физики, поскольку учит самостоятельно воспроизводить и анализировать физические явления, получать числовые значения измеряемых величин, сопоставлять теоретические расчёты с результатами эксперимента.

Данный лабораторный практикум разработан авторами на основании многолетнего опыта проведения лабораторных работ по курсу «Общая физика».

# Тема 1. Фотометрия

## Основные понятия по теме

*Фотометрией* называется раздел оптики, в котором рассматриваются вопросы, связанные с измерением энергии, переносимой электромагнитными волнами оптического диапазона. Для прикладной светотехники важна как объективная энергетическая характеристика света, так и мера воздействия света на глаз наблюдателя. Поэтому в фотометрии приходится вводить двойные физические величины: энергетические (оцениваемые по объективным энергетическим характеристикам) и фотометрические (оцениваемые по воздействию на глаз). Энергетические и фотометрические величины взаимосвязаны. Основной фотометрической единицей измерения является единица силы света – кандела. *Кандела* – единица силы света, равная силе света в данном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение частотой 540 ТГц, сила излучения которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср.

Выбранная частота соответствует зелёному цвету. Человеческий глаз обладает наибольшей чувствительностью в этой области спектра. Ранее кандела определялась как сила света, излучаемого чёрным телом перпендикулярно поверхности площадью 1/60 см<sup>2</sup> (или 1/6 · 10<sup>-5</sup> м<sup>2</sup>) при температуре плавления платины (2 042,5 К) и нормальном давлении (101 325 Па). В современном определении коэффициент 1/683 выбран таким образом, чтобы новое определение соответствовало старому.

Рассмотрим точечный источник, сила света которого равна  $I$ , и выделим телесный угол  $d\Omega$  с вершиной в точке нахождения источника (рисунок 1.1).

Величина

$$d\Phi = Id\Omega \quad (1.1)$$

называется *элементарным световым потоком*, излучаемым в пространство, ограниченное телесным углом  $d\Omega$ . Единицей светового потока является люмен (1 лм = 1 кд × 1 ср., где 1 ср (стерадиан) – единица телесного угла в СИ).

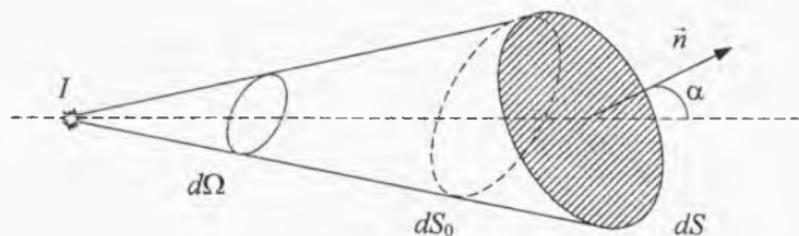


Рисунок 1.1 – Излучение точечного источника

Если сила света источника не зависит от направления наблюдения (такой источник называется изотропным), то полный световой поток, излучаемый источником по всем направлениям, равен

$$\Phi = 4\pi I. \quad (1.2)$$

На пути светового потока расположим элементарную площадку  $dS$ , нормаль  $\vec{n}$  к которой образует угол  $\alpha$  с направлением распространения света. Отношение светового потока к площади освещаемой поверхности

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (1.3)$$

называется освещенностью, которая измеряется в люксах ( $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм/м}^2$ ).

Выделим плоскость  $dS_0$ , являющуюся проекцией  $dS$  на плоскость, перпендикулярную к направлению наблюдения и находящуюся на том же расстоянии  $r$  от источника света, что и площадка  $dS$ . Учитывая, что

$$dS_0 = r^2 d\Omega = dS \cos \alpha \quad (1.4)$$

и используя соотношение (1.1), из формулы (1.3) получаем

$$E = \frac{I \cos \alpha}{r^2}. \quad (1.5)$$

Таким образом, освещенность поверхности обратно пропорциональна квадрату расстояния от точечного источника света (закон обратных квадратов) и прямо пропорциональна силе света и косинусу угла между направлением распространения света и нормалью к поверхности (закон косинусов).

Если источник света является протяжённым, то для его характеристики вводятся такие величины, как светимость и яркость.

Пусть некоторая площадка  $dS$  излучает свет, который можно охарактеризовать величиной светового потока  $d\Phi$ . Светимость – это физическая величина, численно равная отношению светового потока, излучаемого площадкой, к её площади:

$$R = \frac{d\Phi}{dS}. \quad (1.6)$$

Светимость, как и освещенность, измеряется в люксах (лк).

Ещё одной характеристикой излучения является яркость. Яркость – это физическая величина, определяемая силой света, испускаемого с единицы видимой поверхности в данном направлении:

$$B = \frac{dI}{dS \cos \alpha}. \quad (1.7)$$

Единица яркости в СИ  $\text{кд}/\text{м}^2$ .

Из формулы (1.7) следует, что яркость  $B$  источника может зависеть от угла наблюдения  $\alpha$ . Однако существуют источники света, для которых яркость не зависит от направления наблюдения, то есть  $B(\alpha) = \text{const}$ . Такие источники подчиняются закону Ламберта:

$$I = I_0 \cos \alpha, \quad (1.8)$$

где  $I_0$  – сила света в направлении нормали к поверхности;

$I$  – сила света в направлении, определяемом углом  $\alpha$  к нормали, и для них справедливо соотношение

$$R = \pi B. \quad (1.9)$$

Если свечение поверхности обусловлено освещением её внешним источником, то светимость связана с освещенностью соотношением:

$$R = \rho E,$$

(1.10)

где  $\rho$  – коэффициент рассеяния (отражения) света.

Исследование фотометрических характеристик различных источников света можно проводить с помощью фотоэлемента, электронного прибора, в котором в результате поглощения энергии падающего на него оптического излучения возникает разность потенциалов (фотоэдс) или электрический ток (фототок). Действие фотоэлемента основывается на явлении фотоэффекта.

*Фотоэффект* – явление испускания электронов веществом под действием падающего излучения. Различают внешний фотоэффект, когда электроны покидают пределы тела, и внутренний фотоэффект, когда электроны, потерявшие связь со своими атомами, остаются внутри тела, изменяя его электропроводность. Основные закономерности внешнего фотоэффекта впервые были исследованы русским физиком А. Г. Столетовым в 1888–1890 гг. Принципиальная схема опыта по исследованию явления внешнего фотоэффекта приведена на рисунке 1.2.

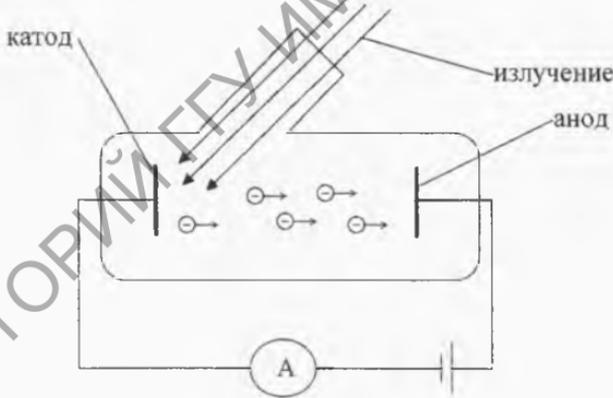


Рисунок 1.2 – Схема опыта по исследованию явления внешнего фотоэффекта

На основании обобщения опытных данных установлены следующие основные законы внешнего фотоэффекта:

1. При неизменном спектральном составе излучения сила фототока насыщения прямо пропорциональна падающему на поверхность (катод на рисунке 1.2) световому потоку.

2. Максимальная кинетическая энергия электронов, покинувших поверхность вещества под действием излучения, линейно растет с увеличением частоты излучения и не зависит от его интенсивности.

3. Фотоэффект не возникает, если частота излучения меньше некоторой, характерной для каждого вещества величины  $\nu_{\min}$ , называемой «красной» границей фотоэффекта.

Явление фотоэффекта может быть объяснено только исходя из квантовых представлений о природе электромагнитного излучения. Развивая квантовую теорию Планка, Эйнштейн выдвинул гипотезу, согласно которой не только испускание и поглощение, но и распространение излучения происходит порциями (квантами), энергия  $E$  которых пропорциональна частоте  $\nu$ :

$$E = h\nu. \quad (1.11)$$

Применяя закон сохранения энергии для объяснения явления фотоэффекта, Эйнштейн установил соотношение, которое получило название основного уравнения внешнего фотоэффекта:

$$h\nu = A + \frac{m\nu_{\max}^2}{2}, \quad (1.12)$$

где  $A$  – работа выхода электрона из вещества;

$\frac{m\nu_{\max}^2}{2}$  – максимальная кинетическая энергия вырванного электрона;

$h = (6,626\,196 \pm 0,000050)10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка.

Согласно теории Эйнштейна, каждый фотон взаимодействует только с одним электроном. Энергия фотона полностью передается электрону, при этом часть энергии электрона расходуется на совершение работы по выходу электрона из вещества, а оставшаяся часть идет на сообщение ему кинетической энергии. Из (1.12) для «красной» (низкочастотной) границы фотоэффекта имеем

$$\nu_{\min} = \frac{A}{h}. \quad (1.13)$$

Если изменить потенциалы катода и анода на противоположные (рисунок 1.2), то электроны, покинувшие освещенную поверхность, будут тормозиться на пути к противоположному электроду, то есть

приложенное напряжение будет оказывать задерживающее действие. При определенной величине задерживающего напряжения будет выполняться соотношение

$$eU_s = \frac{mv_{\max}^2}{2}, \quad (1.14)$$

то есть кинетическая энергия вырванных электронов полностью расходуется на преодоление потенциальной энергии задерживающего электрического поля. В этом случае даже самые «быстрые» электроны не достигают противоположного электрода. Фототок перестает существовать, и уравнение Эйнштейна (1.12) с учетом соотношения (1.14) может быть записано в виде

$$h\nu = A + eU_s. \quad (1.15)$$

Основными характеристиками фотоэлемента являются его вольт-амперная, световая, спектральная характеристики и интегральная чувствительность. Под *вольт-амперной характеристикой* понимают зависимость силы фототока от приложенного к фотоэлементу напряжения, то есть  $i = f(U)$ . *Световой характеристикой* называется зависимость силы фототока от падающего на фотоэлемент светового потока, то есть  $i = f(\Phi)$ . Световой поток в пределах малого телесного угла  $\Omega$  определяется соотношением (1.1):

$$\Phi = I\Omega, \quad (1.16)$$

где  $I$  – сила света источника;

$\Omega$  – телесный угол, в котором распространяется свет.

Поскольку  $\Omega = \frac{S}{r^2}$ , то для светового потока справедливо выражение:

$$\Phi = \frac{IS}{r^2}, \quad (1.17)$$

где  $S$  – площадь освещенной поверхности фотоэлемента, находящейся в пределах телесного угла  $\Omega$ ;

$r$  – расстояние от источника света до фотоэлемента.

Под *спектральной характеристикой* понимают зависимость силы фототока от длины волны (или частоты) падающего излучения,

то есть  $i = f(\lambda)$  (или  $i = f(\nu)$ ). Интегральной чувствительностью фотозлемента  $\gamma$  называется отношение силы фототока  $i$  к величине светового потока  $\Phi$ :

$$\gamma = \frac{i}{\Phi}. \quad (1.18)$$

## Вопросы для самоконтроля

1. В чем разница между энергетическими и фотометрическими величинами?
2. Назовите основные фотометрические величины и единицы их измерения.
3. Сформулируйте закон обратных квадратов и закон косинусов.
4. Какие источники света называются ламбертовыми?
5. Чем отличается внешний фотоэффект от внутреннего?
6. Сформулируйте основные законы внешнего фотоэффекта.
7. Объясните уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта с точки зрения закона сохранения энергии.
8. Что такое «красная» граница фотоэффекта?
9. Что такое задерживающее напряжение?
10. Назовите основные характеристики фотозлемента.

## Лабораторная работа 1

### Изучение основных законов фотометрии

**Цель работы:** изучить основные фотометрические понятия и величины; экспериментально проверить выполнение законов освещенности.

**Приборы и принадлежности:** фотометрический прибор на основе селенового фотозлемента, осветитель, набор диафрагм, матовое стекло, линза, комбинированный цифровой прибор типа 4323А, источник электрического питания типа ИЭПШ-2, соединительные провода.

**Описание установки.** Фотометрический прибор (рисунок 1.3) состоит из камеры 1 и съемного корпуса прямоугольной формы 2.

Внутри камеры вмонтирован селеновый фотоэлемент, соединительные элементы (зажимы) которого выведены на торцевую часть прибора. Фотоэлемент закреплен в специальной оправе, которая может поворачиваться вокруг горизонтальной оси в пределах угла от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Изменение угла осуществляется посредством поворота ручки 3, расположенной на лицевой стороне камеры. Отсчёт угла поворота производится по шкале 4. Селеновый фотоэлемент состоит из металлической подложки, на одной стороне которой нанесен слой селена толщиной около 0,1 мм. Сверху этот слой покрыт прозрачной плёнкой, выступающей в роли второго электрода. Согласно первому закону фотоэффекта, сила фототока насыщения пропорциональна падающему световому потоку:

$$i = \gamma \cdot \Phi, \quad (1.19)$$

где  $\gamma$  – интегральная чувствительность фотоэлемента.



Рисунок 1.3 – Установка для изучения законов фотометрии

Кривая спектральной чувствительности селенового фотоэлемента, характеризующая относительную степень восприятия света той или иной частоты, соответствует спектральной чувствительности человеческого глаза. Это позволяет использовать фотоэлемент для фотометрирования.

Внутри прямоугольного корпуса помещается лампочка, которую можно перемещать вдоль продольной оси прибора. Величина перемещения отсчитывается по линейке 5, закрепленной на лицевой стороне прибора. В комплект прибора также входят линза в оправе, матовое стекло, набор диафрагм, исследуемые электрические лампочки. Напряжение на лампочки подаётся с универсального источника

электрического питания ИЭПП-2 (6). Величина фототока измеряется с помощью комбинированного цифрового прибора типа 4323А (7).

### *Ход работы*

1. Цифровой прибор типа 4323А подключить к зажимам фотоэлемента, которые выведены на торцевую часть фотометрического прибора.
2. На передней панели цифрового прибора переключатель предела измерений поставить в положение « $\mu\text{A}$ » и установить предел измерений – 50 мкА, выбрать измеряемую величину – ток (положение «I»).
3. Установить фотоэлемент перпендикулярно оси прибора 2 (ручку 3 установить на нулевую отметку угловой шкалы 4).
4. Лампочку осветителя, которая находится внутри прямоугольного корпуса 2 фотометрического прибора, соединить с универсальным источником электрического питания ИЭПП-2 (6).

### **Упражнение 1. Исследование зависимости освещенности от расстояния до источника света**

1. Установить осветитель на отметке «10» шкалы 5 корпуса 2.
2. Для получения параллельного пучка света между источником и фотоэлементом установить линзу в оправе внутри корпуса 2.
3. С помощью ручки 8 на передней панели источника электрического питания 6 подать на лампочку такое напряжение, которое соответствует максимальному значению её мощности, указанному непосредственно на лампочке.
4. Снять показания цифрового прибора  $i_{10}$  при данном расстоянии.
5. Не меняя напряжения на лампочке, установить осветитель на отметках «20» и «30» шкалы корпуса 2 и снять показания  $i_{20}$  и  $i_{30}$ .
6. Используя полученные данные, проверить справедливость закона обратных квадратов:

$$\frac{i_{10}}{i_{20}} = \frac{r_{20}^2}{r_{10}^2};$$

$$\frac{i_{20}}{i_{30}} = \frac{r_{30}^2}{r_{20}^2};$$

$$\frac{i_{10}}{i_{30}} = \frac{r_{30}^2}{r_{10}^2}.$$

### **Упражнение 2. Исследование зависимости освещенности от угла падения света**

1. Установить осветитель на отметке «10» шкалы 5 корпуса 2.

2. Между источником и фотоэлементом установить линзу в оправе внутри корпуса 2.

3. Подать на лампочку напряжение, соответствующее максимальному значению её мощности, и снять отсчет  $i_0$  для положения ручки 3 «0°» по шкале 4.

4. Не меняя напряжение на лампочке и расстояние  $r$ , повернуть фотоэлемент на 30° и 45° с помощью ручки 3, ориентируясь по шкале 4, и снять отсчеты  $i_{30}$  и  $i_{45}$ .

5. Используя полученные данные, проверить справедливость закона косинусов:

$$\frac{i_0}{i_{30}} = \frac{\cos 0^\circ}{\cos 30^\circ}; \quad \frac{i_{30}}{i_{45}} = \frac{\cos 30^\circ}{\cos 45^\circ}; \quad \frac{i_0}{i_{45}} = \frac{\cos 0^\circ}{\cos 45^\circ}.$$

### Упражнение 3. Исследование зависимости светового потока от площади освещенной поверхности

1. Убрать линзу и повернуть фотоэлемент перпендикулярно падающему свету (установить ручку 3 на нулевую отметку угловой шкалы 4).

2. Поместить между фотоэлементом и световым источником матовое стекло в оправе (при этом площадь открытой поверхности фотоэлемента равна 9 см<sup>2</sup>).

3. Установить осветитель на отметке «10» шкалы 5 корпуса 2.

4. С помощью ручки 8 подать на лампочку напряжение, соответствующее максимальному значению её мощности. Снять значение величины фототока  $i_9$ .

5. Установить перед фотоэлементом последовательно диафрагмы с площадью 6 см<sup>2</sup> и 3 см<sup>2</sup> и снять соответственно показания цифрового прибора 7  $i_6$  и  $i_3$ .

6. Изобразить экспериментальные значения тока  $i$  в зависимости от площади освещаемой поверхности  $S$  на графике, убедиться в справедливости соотношения (1.17).

## Тема 2. Основные явления и законы геометрической оптики

### Основные понятия по теме

*Геометрическая оптика* – это раздел оптики, в котором используется предположение о том, что свет распространяется вдоль некоторых линий – световых лучей (лучевая оптика).

В этом приближении пренебрегают конечностью длин волн света, полагая, что  $\lambda \rightarrow 0$ . Законы геометрической оптики дают возможность во многих случаях достаточно хорошо рассчитать оптические системы. Но в ряде случаев реальный расчет оптических систем требует учета волновой природы света, тогда как расчет в рамках геометрической оптики дает приближенный результат, а иногда – неверный даже на качественном уровне.

*Закон прямолинейного распространения света* формулируется следующим образом: в прозрачной оптически однородной среде свет распространяется прямолинейно.

Если в среде показатель преломления изменяется от точки к точке, то свет не будет распространяться вдоль прямой. Такая среда называется оптически неоднородной.

При наличии резких неоднородностей, таких, как отверстия в непрозрачных экранах, границы этих экранов, наблюдается отклонение света от прямолинейного распространения.

Согласно *закону независимости световых лучей* направления лучей при их пересечении не изменяются. При больших интенсивностях этот закон не соблюдается, происходит рассеяние света на свете.

Законы отражения и преломления утверждают, что на границе раздела двух сред происходит отражение и преломление света. Лучи, изображающие отраженный и преломленный свет, лежат в одной плоскости, заданной лучом, соответствующим падающему свету, и перпендикуляром, восстановленным к границе раздела двух сред в точке пересечения луча с данной границей.

Угол отражения равен углу падения (рисунок 2.1):  $i' = i$

Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно отношению показателя преломления второй по ходу луча среды к показателю преломления первой:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}.$$

Величина  $n_i = \frac{c}{v_i}$ ,

где  $c$  – скорость света в вакууме;

$v_i$  – скорость света в  $i$ -й среде, называется *абсолютным показателем преломления*. Отношение показателей преломления оптических сред  $\frac{n_2}{n_1} = n_{21}$  называют *относительным показателем преломления*.

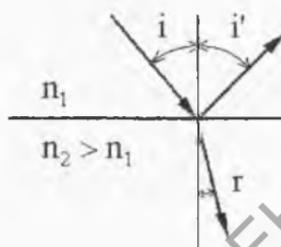


Рисунок 2.1 – Отражение и преломление света

Среда, обладающая большим показателем преломления, называется *более оптически плотной*. И в случае, когда свет падает из более оптически плотной среды в менее оптически плотную, может наблюдаться явление полного внутреннего отражения.

При увеличении угла падения  $i$  угол преломления тоже увеличивается, при этом интенсивность отраженного света растет, а преломленного – падает (их сумма равна интенсивности падающего света). При определенном значении  $i = i_{кр}$  угол  $r = \frac{\pi}{2}$ , интенсивность преломленного света становится равной нулю, то есть весь свет отражается. При дальнейшем увеличении угла  $i > i_{кр}$  преломленного света не будет, т. е. происходит полное внутреннее отражение света. Угол  $i = i_{кр}$  называется *углом полного внутреннего отражения*.

Значение угла падения  $i_{кр}$ , при котором наблюдается полное внутреннее отражение, можно определить из условия  $\sin r = 1$  (так как  $r = \frac{\pi}{2}$ ). Тогда:

$$\sin i_{кр} = \frac{n_2}{n_1}$$

*Линза* – система двух, чаще всего сферических, преломляющих поверхностей, ограничивающих прозрачное тело. Обычно линзы изготавливают из стекла. Линзы бывают собирающими и рассеивающими.

Собирающая линза в средней части толще, чем у краёв (рисунок 2.2). Световые лучи, параллельные главной оптической оси собирающей линзы, после прохождения данной линзы отклоняются к указанной оси в случае, когда показатель преломления материала линзы больше показателя преломления среды, в которой она находится.

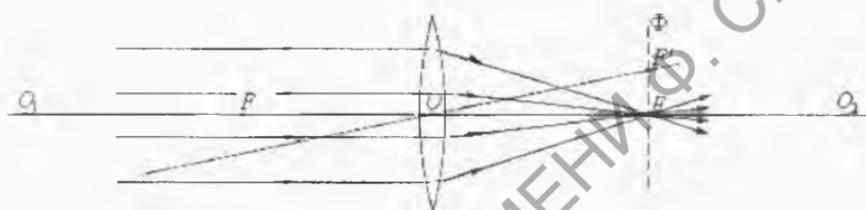


Рисунок 2.2 – Ход лучей в двояковыпуклой собирающей линзе

Рассеивающая линза в средней части тоньше, чем у краёв (рисунок 2.3). При таких же физических условиях, как и в случае собирающей линзы, световые лучи после прохождения рассеивающей линзы отклоняются от главной оптической оси.

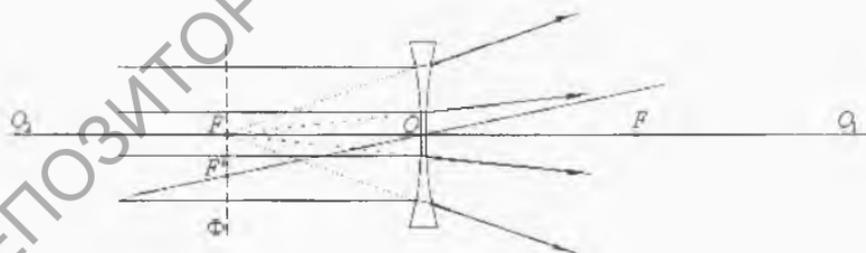


Рисунок 2.3 – Ход лучей в двояковогнутой рассеивающей линзе

Как было указано, собирающие и рассеивающие свойства линзы зависят не только от её формы, но и от соотношения показателей преломления линзы и среды.

Линза называется тонкой, если ее толщиной можно пренебречь, по сравнению с радиусами кривизны ограничивающих поверхностей. Схематически тонкие линзы изображаются, как показано на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Схематическое изображение собирающей (а) и рассеивающей (б) тонких линз

На рисунках 2.2–2.4 приняты следующие обозначения:

- 1) (O) – оптический центр линзы (проходящие через эту точку лучи не изменяют своего направления);
- 2) ( $O_1OO_2$ ) – главная оптическая ось (прямая, проходящая через центры кривизны, ограничивающих линзу поверхностей);
- 3) (F) – главные фокусы (точки на главной оптической оси, в которой пересекаются после преломления лучи (или их продолжения), падающие на линзу параллельно главной оптической оси); относительно хода лучей различают передний и задний фокусы;
- 4) ( $F'$ ) – побочный фокус (точка пересечения побочной оптической оси ( $F'O$ ) с фокальной плоскостью ( $\Phi$ )); пучок лучей (или их мнимых продолжений), параллельных побочной оптической оси, ( $F'O$ ) сходится в побочном фокусе.

Фокальная плоскость ( $\Phi$ ) проходит через главный фокус (F) перпендикулярно главной оптической оси ( $O_1OO_2$ ) и представляет собой геометрическое место множества побочных фокусов ( $F'$ ).

Основными характеристиками тонкой линзы являются:

1) фокусное расстояние ( $OF$ ) – расстояние от оптического центра (точка O) до фокуса; при этом: у собирающей линзы  $F > 0$ , а у рассеивающей  $-F < 0$ ;

2) оптическая сила линзы ( $D$ ) – величина, обратная фокусному расстоянию ( $D = \frac{1}{F}$ ); единица оптической силы – диоптрия (дптр =  $1 \text{ м}^{-1}$ );

аналогично фокусному расстоянию у собирающей линзы  $D > 0$ , а у рассеивающей –  $D < 0$ .

Для сферической тонкой линзы на основе закона преломления получается следующая формула для фокусного расстояния:

$$\frac{1}{F} = \left( \frac{n_l}{n_{cp}} - 1 \right) \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Здесь  $n_l$  и  $n_{cp}$  – показатели преломления линзы и среды, соответственно,  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны ограничивающих линзу поверхностей. Эта формула справедлива только для приосевых (параксиальных) лучей. Радиусы кривизны сферических поверхностей линзы  $R_1$ ,  $R_2$  могут быть положительными и отрицательными. Радиус кривизны выпуклой поверхности линзы считается положительным, вогнутой – отрицательным.

В современной оптике из отдельных линз собирают оптические системы. Системы, у которых оптические центры всех линз расположены на одной прямой, называются центрированными. *Простейшей оптической системой* называется система, состоящая из двух линз, сложенных вплотную. Для такой системы оптическая сила  $D$  равна:

$$D = D_1 + D_2,$$

где  $D_1$  и  $D_2$  – оптические силы линз, входящих в систему. Или

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2}.$$

Экспериментально фокусное расстояние собирающей линзы или собирающей системы линз может быть определено методом Бесселя. Указанный метод заключается в следующем: на оптической скамье помещают предмет  $S$  и экран, на котором получается изображение  $S'$ , даваемое собирающей линзой или собирающей системой линз, расположенной между предметом и экраном (рисунок 2.5). Если расстояние  $L$  от предмета до экрана достаточно велико и превышает учетверённое значение фокусного расстояния  $F$ , то, перемещая линзу или систему линз вдоль оптической оси, можно найти два таких положения I и II линзы или системы, при которых на экране наблюдаются чёткое увеличенное и уменьшенное изображения предмета.

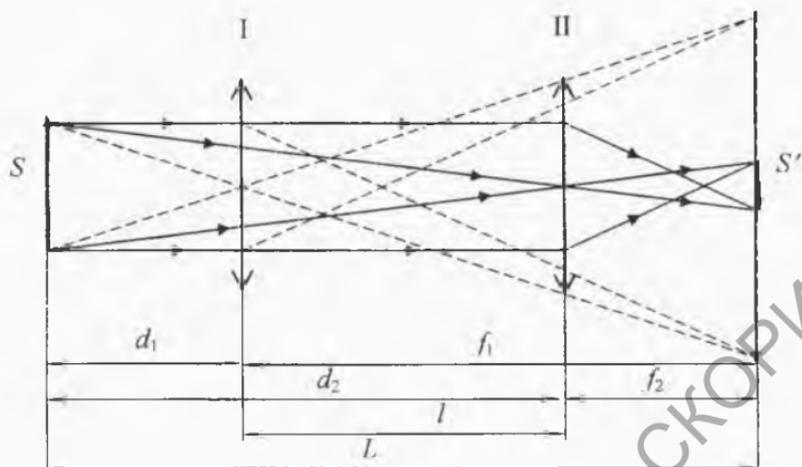


Рисунок 2.5 – Схема метода Бесселя

Обозначим через  $d_1$  и  $f_1$  расстояние от линзы до предмета и от линзы до изображения при увеличенном изображении предмета и через  $d_2$  и  $f_2$  те же величины при уменьшенном его изображении. Из рисунка 2.5 видно:

$$d_1 + f_1 = d_2 + f_2. \quad (2.1)$$

Запишем формулу тонкой линзы для увеличенного и уменьшенного изображений:

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1} = \frac{1}{F} \quad \text{и} \quad \frac{1}{d_2} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{F}, \quad (2.2)$$

Откуда  $\frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1} = \frac{1}{d_2} + \frac{1}{f_2}$  или  $\frac{f_1 + d_1}{f_1 d_1} = \frac{f_2 + d_2}{f_2 d_2}$ .

Так как  $f_1 + d_1 = L$  и  $f_2 + d_2 = L$ , то

$$\frac{L}{f_1 d_1} = \frac{L}{f_2 d_2}. \quad (2.3)$$

Из равенства (2.3) следует, что

$$f_1 d_1 = f_2 d_2. \quad (2.4)$$

Равенства (2.1) и (2.4) одновременно выполняются только при условии, что

$$d_1 = f_2 \quad \text{и} \quad d_2 = f_1. \quad (2.5)$$

Обозначим через  $l$  расстояние между двумя положениями линзы, при которых наблюдаются увеличенное и уменьшенное изображения предмета. На основании (2.5) и рисунка 2.5 получаем:

$$d_1 = \frac{L-l}{2}; \quad f_1 = \frac{L+l}{2}; \quad d_2 = \frac{L+l}{2}; \quad f_2 = \frac{L-l}{2}. \quad (2.6)$$

Подставляя (2.6) в (2.2) для каждого положения линзы I и линзы II, имеем

$$\frac{2}{L-l} + \frac{2}{L+l} = \frac{1}{F}. \quad (2.7)$$

Соответственно фокусное расстояние  $F$  может быть определено:

$$F = \frac{(L-l)(L+l)}{4L}. \quad (2.8)$$

В выражение (2.8) входят только величины  $L$  и  $l$ , легко измеряемые с достаточно большой степенью точности.

Реальные линзы и системы линз формируют изображения, обладающие недостатками, которые проявляются в том, что оптические изображения в ряде случаев не вполне отчётливы, не точно соответствуют объекту или оказываются окрашенными. Такие недостатки называются *абберациями* (лат. *aberratio* – уклонение).

Наиболее значительны следующие виды аббераций:

1) *сферическая абберация* – недостаток оптического изображения, заключающийся в том, что световые лучи, прошедшие вблизи главной оптической оси, и лучи, прошедшие через отдалённые от оси части оптической системы (например, линзы), не собираются в одну точку. Сферическая абберация может быть практически почти полностью устранена применением специально рассчитанных комбинаций линз;

2) *кома* – недостаток оптического изображения (изображение точки имеет вид продолговатого несимметричного пятнышка), возникающий при косом прохождении световых лучей через оптическую систему. В случае простой линзы размеры пятнышка пропорциональны квадрату радиуса линзы и углу наклона светового пучка по отношению к главной оптической оси;

3) *астигматизм* (от греч. *a* – отрицательная частица и *stigma* – точка), недостаток оптической системы, обусловленный неодинаковой кривизной оптической поверхности в разных плоскостях сечения падающего на неё светового пучка. Если при прохождении оптической системы сферическая световая волна деформируется и перестаёт быть сферической, то пучок лучей становится сложным: лучи пересекаются не в одной точке, а в точках, расположенных на двух взаимно перпендикулярных отрезках прямой линии, находящихся на некотором расстоянии друг от друга. Такой пучок называется *астигматическим*;

4) *дисторсия* – aberrация оптической системы, связанная с неодинаковостью линейного увеличения в пределах всего поля изображения, что приводит к нарушению геометрического подобия между объектом и его изображением;

5) *хроматическая aberrация* – связана с зависимостью показателя преломления от длины волны света, в результате чего при немонахроматическом свете изображения оказываются окрашенными.

Оптические системы могут обладать сразу несколькими видами aberrаций.

Исправление aberrаций в сложных оптических системах реализуется сочетанием линз и представляет трудную задачу. Устранение тех или иных видов aberrаций обычно производится в соответствии с назначением оптической системы. Несовершенства изображения в оптических системах связаны также с волновой природой света. Они возникают из-за дифракции света на диафрагмах, оправках линз и т. п. Влияние дифракции обычно невелико по сравнению с другими aberrациями.

## Вопросы для самоконтроля

1. В каких случаях справедливы выводы и результаты геометрической оптики?
2. Сформулируйте законы отражения и преломления света.
3. В чем заключается явление полного внутреннего отражения света?

4. Почему предмет, находящийся в оптически более плотной среде, кажется приближенным к наблюдателю?
5. Как использовать явление полного внутреннего отражения света для измерения показателя преломления?
6. От чего зависит фокусное расстояние линзы?
7. Дайте определение понятиям: оптический центр, главная оптическая ось, фокус и оптическая сила.
8. В чём сущность определения фокусного расстояния линз по методу Бесселя?
9. Как определить фокусное расстояние рассеивающей линзы?
10. Перечислите и охарактеризуйте аберрации оптических систем.

## Лабораторная работа 2

### Определение фокусных расстояний линз методом Бесселя

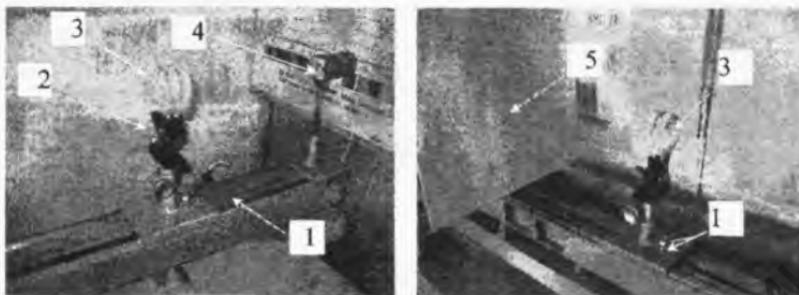
**Цель работы:** научиться определять фокусные расстояния линз и оптических систем методом Бесселя.

**Приборы и принадлежности:** оптический рельс с измерительной линейкой, набор линз, лампа подсветки (осветитель) с проецируемым предметом, экран.

**Описание установки.** Конструктивно лабораторная установка (рисунок 2.6) состоит из оптического рельса 1, на который устанавливается подвижный держатель (рейтор) 2 для линз 3 и осветитель с прозрачным предметом 4. Отсчет расстояния  $L$  от предмета 4 до экрана 5 и расстояние  $l$  между положениями линзы, при котором наблюдается увеличенное и уменьшенное изображения предмета на непрозрачном экране 5, производится по шкале, закрепленной непосредственно на оптическом рельсе 1.

#### Ход работы

На оптическом рельсе 1 разместить осветитель с предметом 4 (в виде прозрачной стрелки) и экран 5. Между ними поместить в специальном держателе (рейторе) 2 собирающую линзу 1. Включить осветитель 4 в сеть.



а)



б)

Рисунок 2.6 – Установка для определения фокусных расстояний методом Бесселя (а), набор линз (б)

### Упражнение 1. Определение фокусного расстояния собирающей линзы

1. Передвинуть линзу I вдоль оптического рельса 1 и найти два таких положения, при которых на экране 5 наблюдаются резкое увеличенное и уменьшенное изображения предмета.

2. Измерить на оптическом рельсе расстояние  $L$  от предмета до экрана и расстояние  $l$  между положениями линзы, когда на экране наблюдается увеличенное и уменьшенное изображения.

3. По формуле

$$F = \frac{(L-l)(L+l)}{4L} \quad (2.9)$$

вычислить фокусное расстояние линзы I.

4. Аналогичные измерения выполнить для собирающей линзы II и вычислить её фокусное расстояние.

## Упражнение 2. Определение фокусного расстояния оптической системы

1. Присоединив к собирающей линзе I вторую собирающую линзу II с помощью специальной оправы, повторить измерения аналогично проведенным в упражнении 1.

2. По формуле (2.9) вычислить фокусное расстояние оптической системы линз I и II.

3. Зная фокусное расстояние оптической системы, а также ранее определённое фокусное расстояние для линзы I, по формуле (2.10) вычислить фокусное расстояние линзы II:

$$\frac{1}{F_2} = \frac{1}{F} - \frac{1}{F_1}. \quad (2.10)$$

4. Проведя сопоставление вычисленного фокусного расстояния для линзы II по формуле (2.10) и ранее определённого по формуле (2.9), сделать вывод.

## Упражнение 3. Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы

1. Присоединив к собирающей линзе II, фокусное расстояние которой  $F_2$  определено, рассеивающую линзу с неизвестным фокусным расстоянием  $F_3$ , собрать систему из двух плотно сложенных линз. Для такой системы выполняется соотношение

$$\frac{1}{F_2} + \frac{1}{F_3} = \frac{1}{F}, \quad (2.11)$$

где  $F$  – фокусное расстояние системы линз с фокусными расстояниями  $F_2$  и  $F_3$ .

2. Фокусное расстояние системы линз II и III определить таким же образом, как и в предыдущем упражнении, путём измерения на опыте расстояний  $L$  и  $l$  и вычисления его по формуле (2.9).

3. Зная фокусное расстояние собирающей линзы  $F_2$  и фокусное расстояние  $F$  системы, из формулы (2.11) определить фокусное расстояние  $F_3$  рассеивающей линзы.

## Лабораторная работа 3

### Изучение основных характеристик микроскопа

**Цель работы:** изучить устройство микроскопа, принцип получения изображения в микроскопе, определить основные характеристики микроскопа.

**Приборы и принадлежности:** микроскоп, объектив-микрометр, миллиметровая шкала, штатив, диафрагма, штангенциркуль, лампа.

**Описание установки.** Установка для проведения исследований состоит из микроскопа, объективного микрометра, закрепленной вертикально миллиметровой шкалы, штангенциркуля и диафрагмы. На окуляре микроскопа имеется насадка с призмой, которая позволяет совместить шкалу окуляра с изображением миллиметровой шкалы.

Общий вид микроскопа показан на рисунке 2.7. Все детали микроскопа крепятся на массивном основании 1. Оптическая часть находится в тубусе 2, в верхней части которого крепится окуляр 3, а в нижней части – объектив 4.



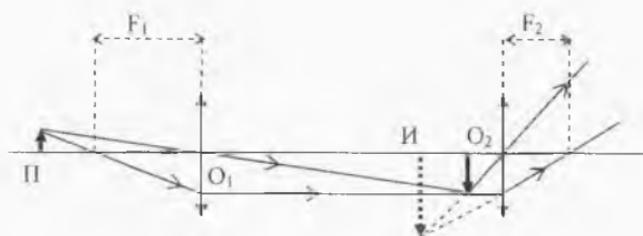
Рисунок 2.7 – Внешний вид микроскопа

Наблюдаемый объект располагают на предметном столике 5. Под предметным столиком находится зеркало 6, с помощью которого производится освещение объекта светом.

Наводка на резкость осуществляется вертикальным перемещением всего тубуса с помощью маховичков, один из которых 7 служит для

быстро, а второй 8 – для медленного перемещения тубуса 2 относительно предметного столика 5.

На рисунке 2.8 показан ход лучей в микроскопе и принцип формирования увеличенного изображения.



П – предмет, И – мнимое увеличенное изображение,  
 $F_1$  и  $F_2$  – фокусные расстояния объектива ( $O_1$ )  
 и окуляра ( $O_2$ ) соответственно

Рисунок 2.8 – Принцип формирования изображения в микроскопе

### Ход работы

#### Упражнение 1. Определение увеличения микроскопа

1. Установить на предметный столик микроскопа объективный микрометр и совместить его шкалу со шкалой окулярного микрометра.

Определить цену деления окулярного микрометра по формуле:

$$a = \frac{b_0}{b_1} \cdot 0,01 \text{ мм},$$

где  $b_0$  – число делений шкалы объективного микрометра по 0,01 мм каждое, которым соответствует  $b_1$  делений шкалы окулярного микрометра.

2. Разместить вертикально закреплённую на штативе миллиметровую шкалу, на расстоянии, приблизительно равном 25 см от оси микроскопа, и с помощью зеркальной насадки, надетой на окуляр, добиться совмещения миллиметровой шкалы со шкалой окулярного микрометра. Сосчитав количество  $n$  делений окулярной шкалы, по  $a$  мм каждое, соответствующих  $N$  делениям миллиметровой шкалы, найти увеличение микроскопа по формуле:

$$\Gamma = \frac{N}{na}$$

3. Повторив опыт несколько раз, найти среднее значение  $\langle \Gamma \rangle$ . Полученные значения увеличения микроскопа сравнить с увеличением, вычисленным по формуле  $\Gamma = \Gamma_{ок} \cdot \Gamma_{об}$ , где  $\Gamma_{ок}$  и  $\Gamma_{об}$  – линейные увеличения окуляра и объектива соответственно (значения промаркированы непосредственно на узлах 3 и 4 (рисунок 2.7)).

### Упражнение 2. Вычисление числовой апертуры объектива микроскопа

1. Вставить в отверстие предметного столика диафрагму и сфокусировать микроскоп на ее края.

2. Вынуть окуляр микроскопа и разместить под объективом (на ножках основания) штангенциркуль.

3. Измерить:  $m$  – часть линейки штангенциркуля, видимую сквозь тубус в отверстии окуляра, и  $L$  – расстояние от верхней поверхности предметного столика до штангенциркуля. Вычислить апертурный угол по формуле:

$$\theta = \arctg \left( \frac{m}{2L} \right)$$

4. По формуле  $A = n \cdot \sin \theta$  вычислить числовую апертуру микроскопа, где  $n$  – показатель преломления среды, в которой находится рассматриваемый объект.

### Упражнение 3. Определение разрешающей силы микроскопа

1. На верхнюю часть тубуса 2 микроскопа, из которого необходимо предварительно вынуть окуляр 3, положить желтый светофильтр с длиной волны пропускаемого света  $\lambda_{ж} = 600$  нм.

2. Разместить под объективом микроскопа штангенциркуль.

3. Провести измерения и вычислить числовую апертуру для желтого света по аналогии с упражнением 2.

4. По формуле  $\varepsilon = \frac{0,61 \cdot \lambda}{A}$  вычислить разрешающую силу микроскопа.

5. Аналогичные измерения выполнить для синего светофильтра с длиной волны пропускаемого света  $\lambda_{с} = 450$  нм и вычислить для него разрешающую силу микроскопа. Сделать выводы.

## Тема 3. Интерференция света

### Основные понятия по теме

Согласно электромагнитной теории Максвелла, свет представляет собой электромагнитные волны, распространяющиеся в вакууме со скоростью  $c = (2,9979 \pm 0,0005) \cdot 10^8$  м/с.

Уравнение плоской монохроматической электромагнитной волны записывается в виде:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_0), \quad (3.1)$$

где  $\vec{E}$  – мгновенное значение вектора напряженности электрического поля световой волны;

$\omega$  – циклическая частота волны;

$\vec{k}$  – волновой вектор;

$\vec{E}_0$  – максимальное значение вектора напряженности (векторная амплитуда);

$\varphi_0$  – начальная фаза колебания волны.

Чтобы полностью описать электромагнитную волну, необходимо записать уравнение для вектора напряженности  $\vec{H}$  магнитного поля, аналогичное уравнению (3.1). Ограничимся только выводами относительно электрической составляющей световой волны, поскольку законы изменения векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  взаимосвязаны, согласно современной теории электромагнетизма. Далее мы будем использовать уравнение только для модуля вектора  $\vec{E}$ :  $E = |\vec{E}|$ .

*Видимый свет* – это электромагнитные волны, длины волн которых лежат в диапазоне 0,4–0,7 мкм. Так, электромагнитные волны, длина которых  $\lambda = 0,4$  мкм, воспринимаются глазом как фиолетовый цвет,  $\lambda = 0,5$  мкм – как зеленый,  $\lambda = 0,65$  мкм – как красный и т. д.

Измерить длину световой волны можно различными методами. В основе некоторых методов лежит использование явления интерференции света.

*Интерференцией света* называется явление наложения световых волн, при котором происходит устойчивое взаимное усиление или ослабление амплитуд этих волн. Рассмотрим наложение двух синусоидальных волн, испускаемых двумя источниками  $S_1$  и  $S_2$  в однородной

среде, в которых колебания вектора  $\vec{E}$  происходят в одном направлении (рисунок 3.1).

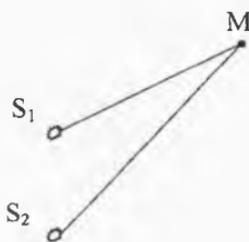


Рисунок 3.1 – Схема получения интерференции

Уравнение первой волны

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{01} \sin(\omega_1 t - \vec{k}_1 \vec{r}_1 + \varphi_{10}) = \vec{E}_{01} \sin \varphi_1, \quad (3.2)$$

второй

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_{02} \sin(\omega_2 t - \vec{k}_2 \vec{r}_2 + \varphi_{20}) = \vec{E}_{02} \sin \varphi_2, \quad (3.3)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – фазы колебаний для некоторого момента времени  $t$ ;

$\vec{k}_i$  – волновой вектор  $i$ -й волны, причём  $k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i}$  – волновое

число;

$\vec{r}_i$  – радиус-вектор точки М относительно источника  $S_i$ ;

$\varphi_{10}, \varphi_{20}$  – начальные фазы колебаний;

$\vec{E}_{01}, \vec{E}_{02}$  – векторные амплитуды складываемых колебаний.

Результирующее колебание в точке М будет описываться уравнением:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \vec{E}_0 \sin \varphi, \quad (3.4)$$

где  $\vec{E}_0$  – векторная амплитуда результирующего колебания;

$\varphi$  – фаза результирующего колебания.

Указанные параметры результирующего колебания можно определить методом векторного сложения амплитуд (рисунок 3.2).

Следует отметить, что на комплексной плоскости вектор  $\vec{E}_0$  результирующего колебания непрерывно вращается с частотой  $\omega$ .

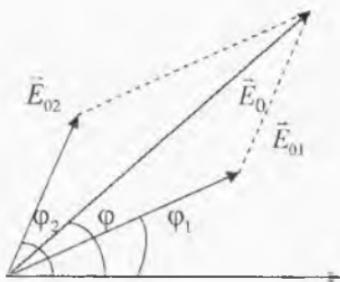


Рисунок 3.2 – Схема векторного сложения амплитуд

Из рисунка следует, что

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (3.5)$$

Возможны два случая сложения таких волн.

1) Разность фаз  $\varphi_2 - \varphi_1$  не меняется в течение длительного времени. Такие волны и возбуждающие их источники называются *когерентными*. Из (3.2) и (3.3) следует, что  $\varphi_2 - \varphi_1 = (\omega_2 - \omega_1)t - (\vec{k}_2 \vec{r}_2 - \vec{k}_1 \vec{r}_1) + (\varphi_{20} - \varphi_{10})$ .

Следовательно, при разности фаз, не зависящей от времени, частоты  $\omega_1, \omega_2$  и волновые числа  $k_1, k_2$  должны быть одинаковы. Тогда  $\varphi_2 - \varphi_1$  будет величиной, постоянной во времени, но зависящей от  $\Delta r = r_2 - r_1$  и называемой *геометрической разностью хода*.

Таким образом, когерентные волны имеют одинаковую частоту, постоянную разность фаз и совпадающие плоскости колебаний электрических векторов  $\vec{E}$ .

Так как энергия волны пропорциональна квадрату амплитуды, то в тех точках пространства, где квадрат модуля результирующей амплитуды ( $E_0^2$ ) имеет максимальное значение, будет максимальное усиление света, а в точках, где  $E_0^2$  имеет минимальное значение, будет минимальное ослабление света.

Из (3.5) следует, что значение  $E_0^2$  зависит от  $\varphi_2 - \varphi_1$ .

а) Если  $\varphi_2 - \varphi_1 = (2m + 1)\pi$ , (где  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ , – целое число), то  $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1$  и  $E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 - 2E_{01}E_{02}$ , т. е. энергия

результатирующей волны меньше суммы энергий складываемых волн на величину, пропорциональную  $2E_{01}E_{02}$ .

б) Если  $\varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi m$ , то  $E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02}$ , и энергия результирующей волны больше суммы энергии складываемых волн на величину, пропорциональную  $2E_{01}E_{02}$ .

Таким образом, сложение когерентных волн сопровождается перераспределением энергии световых волн в пространстве.

2) В случае сложения некогерентных волн, для которых разность фаз меняется со временем, квадрат модуля амплитуды результирующего колебания будет для всех точек иметь некоторое среднее значение  $\langle E_0^2 \rangle$ .

Пусть за некоторое время  $\tau$  разность фаз  $\varphi_2 - \varphi_1$  меняется на  $2\pi$ . Тогда среднее значение  $\langle \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \rangle$  за промежуток времени  $\tau$  равно 0, и следовательно,  $\langle E_0^2 \rangle = E_{01}^2 + E_{02}^2$ .

Перераспределение энергии не происходит, и явление интерференции наблюдаться не будет.

Световые волны от двух любых источников некогерентны, так как начальные фазы световых волн, излучаемых различными атомами, хаотически изменяются во времени. Поэтому для осуществления интерференции света необходимо пользоваться только одним источником, разделяя каким-либо способом излучаемый им свет на два пучка, а затем сводя эти пучки вместе.

Результат интерференции зависит от оптической разности хода ( $\Delta$ ) интерферирующих пучков света:

а) если  $\Delta = 2k \frac{\lambda}{2}$  (где  $k = 0, 1, 2, \dots$ ;  $\lambda$  – длина волны света в вакууме), то наблюдается максимальное взаимное усиление;

б) если  $\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ , то наблюдается максимальное взаимное ослабление.

Оптическая длина пути равна произведению геометрической длины пути света в данной среде на ее абсолютный показатель преломления  $n$ . Поэтому для световых волн, распространяющихся в вакууме ( $n = 1$ ) или воздухе ( $n \approx 1$ ), оптическая разность хода  $\Delta$  совпадает с геометрической разностью хода  $\Delta r$ .

Интерференция в тонких прозрачных пленках возникает в результате наложения волн, отраженных от верхней и нижней поверхностей пленки. Классическим примером такого рода интерференции являются кольца Ньютона. Этот случай наблюдается, когда выпуклая

поверхность линзы малой кривизны соприкасается в некоторой точке с плоской поверхностью хорошо отполированной пластины.

Роль тонкой пленки, от поверхностей которой отражаются когерентные волны, играет воздушный клинообразный зазор между пластиной и линзой (рисунок 3.3). При освещении (свет падает нормально к поверхности пластинки) этой системы монохроматическим светом волны, отраженные от верхней и нижней границ воздушного клина, интерферируют между собой, создавая следующую картину: в точке соприкосновения линзы и пластинки наблюдается черное пятно, которое окружено рядом concentрических светлых и темных колец убывающей ширины. Цвет колец соответствует длине волны монохроматического света, падающего на линзу. При освещении белым светом каждое кольцо становится радужным, то есть представляет собой систему колец различных цветов от красного до фиолетового. Если эти радужные кольца рассматривать через светофильтр, то получается картина, аналогичная той, которая имеет место при освещении монохроматическим светом, пропускаемым данным светофильтром.



Рисунок 3.3 – Схема образования колец Ньютона

Определим радиусы колец Ньютона. Освещение производится пучком лучей, падающих нормально к плоскости поверхности линзы.

На рисунке 3.3 показаны луч 1, отраженный от нижней поверхности линзы, и луч 2, отраженный от верхней поверхности пластины. Лучи 1 и 2 получаются от одного и того же источника, поэтому они когерентны. Найдем оптическую разность хода этих лучей.

При отражении от нижней пластины, представляющей собой оптически более плотную среду, чем воздух, волны меняют фазу колебания на противоположную, что эквивалентно изменению оптического пути на  $\frac{\lambda}{2}$ . Кроме того, радиус кривизны линзы  $K$  гораздо больше толщины зазора  $h$ , значит, падающий и отражённый лучи можно считать параллельными.

Поэтому оптическая разность хода лучей равна  $\Delta = 2h + \frac{\lambda}{2}$ ,

где  $h$  – толщина воздушного зазора между пластиной и примыкающей к ней поверхностью линзы вдоль линии падения луча.

Если разность хода лучей  $\Delta$  равна нечетному числу полуволн, то есть  $\Delta = 2h + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$ , то в точке наложения лучей, отраженных от верхней и нижней границ воздушного клина, будет наблюдаться минимум освещенности. Здесь  $k$  – целое неотрицательное число.

Преобразуя полученное выражение, имеем  $h = k\frac{\lambda}{2}$ , где  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$  и соответствует номеру тёмного кольца.

Вследствие симметрии относительно точки соприкосновения линзы и пластины, толщина воздушного слоя  $h_n$  одна и та же для кольца радиуса  $r_n$ . Следовательно, интерференционные кольца являются кривыми равной толщины. Величину  $h_n$  можно связать с соответствующим радиусом кольца.

Из треугольника с вершиной в точке  $O$  и основанием  $r$  для  $n$ -го кольца имеем:  $R^2 = r_n^2 + (R - h_n)^2$ , где  $R$  – радиус кривизны линзы. Производя алгебраические преобразования и учитывая, что  $h_n^2$  мало по сравнению с  $2Rh_n$ , получаем  $h_n = \frac{r_n^2}{2R}$ . Решая уравнения  $h = k\frac{\lambda}{2}$  и

$h_n = \frac{r_n^2}{2R}$  совместно относительно  $\lambda$ , имеем для  $n$ -го темного кольца (при  $k = n$ ):

$$\lambda = \frac{r_n^2}{nR} \quad \text{или} \quad \lambda = \frac{D_n^2}{4nR},$$

где  $D_n = 2r_n$  – диаметр  $n$ -го тёмного кольца.

Аналогичную формулу можно получить для кольца под номером  $m$ . В этом случае можно записать:

$$\lambda 4nR = D_n^2$$

$$\lambda 4mR = D_m^2$$

Из этих уравнений можно получить расчётную формулу, которую применяют на практике:

$$\lambda = \frac{D_n^2 - D_m^2}{4(n - m)R},$$

где  $n$  и  $m$  – номера темных колец;

$D_n$  и  $D_m$  – их диаметры;

$R$  – радиус кривизны линзы.

В проходящем свете максимумы и минимумы освещённости интерференционной картины колец Ньютона меняются местами.

Приборы, в которых явление интерференции света используется для точных измерений показателей преломления прозрачных сред, малых углов, малых удлинений, а также длин волн спектральных линий, называются *интерферометрами*.

В зависимости от принципа действия они подразделяются на двулучевые, в которых интерференционная картина образуется за счет интерференции двух когерентных волн, и многолучевые, в которых при образовании интерференционной картины участвуют лучи от многих источников. К двулучевым интерферометрам относятся интерферометры Жамена, Релея, Майкельсона, Линника. К многолучевым – интерферометр Фабри-Перо, пластинка Люмера-Герке.

Микроинтерферометр Линника, используемый в работе 6 данного лабораторного практикума, представляет собой малый интерферометр Майкельсона, совмещённый с микроскопом. Этот прибор позволяет наблюдать и измерять мельчайшие неровности поверхности и служит для исследования чистоты обработки поверхности.

Схема интерферометра Майкельсона приведена на рисунке 3.4. Пучок света от источника  $S$  падает на полупрозрачную пластинку  $П$ , достигает зеркала  $M_1$ , отражается от него, входит в пластинку  $П$  и выходит из неё по направлению к экрану  $P$ . Вторая часть светового пучка, проходит пластинку  $П$ , попадет на зеркало  $M_2$ , отражается от него, проходит пластинку  $П$  и идет по направлению к экрану  $P$ . Встречаясь, оба луча интерферируют между собой и формируют на экране  $P$  интерференционную картину.

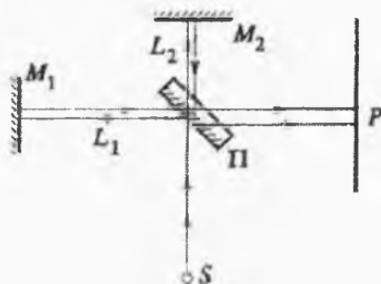


Рисунок 3.4 – Схема интерферометра Майкельсона

В микроинтерферометре Линника одно из зеркал заменено полированной поверхностью образца, чистоту обработки которого определяют.

Если на поверхности полированной детали имеется впадина, глубина которой равна  $h$ , то между лучами, отраженными от поверхности детали и от дна впадины, возникает дополнительная оптическая разность хода волн

$$\Delta = 2hn = 2h,$$

где  $n$  – показатель преломления среды, в которой находится деталь (для воздуха  $n = 1$ ).

Эта оптическая разность хода волн приведет к искривлению интерференционной картины и её смещению на  $m$  полос. При этом оптическая разность хода волн составит величину  $\Delta = m\lambda$ .

Если обозначить расстояние между интерференционными полосами через  $b$ , а глубину провала интерференционной полосы через  $a$  (рисунок 3.5), то  $m = \frac{a}{b}$ . Приравняв приведённые выше соотношения, для глубины впадины  $h$  получим выражение:

$$h = \frac{m\lambda}{2} = \frac{a}{b} \frac{\lambda}{2}.$$

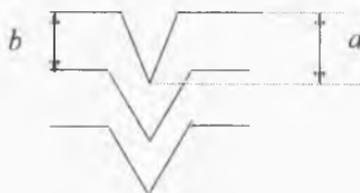


Рисунок 3.5 – Схема проведения измерений с помощью микроинтерферометра Линника

## Вопросы для самоконтроля

1. Какие источники называются когерентными?
2. Назовите способы осуществления когерентности.
3. В чём заключается явление интерференции?
4. Как связаны геометрическая и оптическая разности хода лучей?
5. Почему радиус кривизны линзы в опыте Ньютона должен быть достаточно большим?
6. Почему интерференционная картина в опыте Ньютона имеет вид колец?
7. Выведите формулу оптической разности хода лучей при интерференции в тонкой плёнке.
8. Изменяются ли радиусы колец Ньютона, если вместо воздуха в зазоре между линзой и пластинкой будет среда с другим показателем преломления?
9. Для чего используются интерферометры? Охарактеризуйте типы интерферометров.
10. Изобразите оптическую схему интерферометра Майкельсона и расскажите принцип формирования интерференционной картины с его помощью.

## Лабораторная работа 4

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

**Цель работы:** изучение явления интерференции в прозрачных изотропных средах.

**Приборы и принадлежности:** микроскоп, плоско-параллельная пластинка с линзой в оправе, светофильтры, сферометр ИЗС-7, программно-измерительный комплекс.

**Описание установки.** Измерение радиуса кривизны линзы осуществляется с помощью сферометра ИЗС-7, внешний вид которого представлен на рисунке 3.6. Сферометр состоит из массивного основания 1, рычага арретира 2, микроскопа 3, маховика 4. Исследуемый объект 5 прижимается к измерительному кольцу 6 нагрузкой 7.

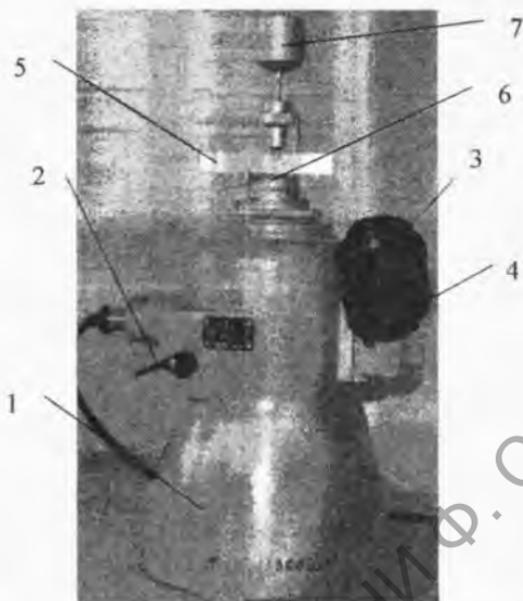


Рисунок 3.6 – Общий вид сферометра ИЗС-7

Определение радиуса кривизны линзы на сферометре ИЗС-7 сводится к измерению прогиба или выпуклости шарового сегмента и последующему вычислению.

Измерение производится следующим образом. С помощью рычага-арретира 2 измерительный стержень, находящийся внутри основания 1, отводят вниз и на измерительное кольцо 6 кладут плоскопараллельную стеклянную пластинку 5.

Рычаг 2 отпускают, и измерительный стержень, плавно поднимаясь, приходит в соприкосновение с пластинкой. Затем с помощью микроскопа 3 производят начальный отсчет по шкале.

В поле зрения микроскопа (рисунок 3.7) одновременно видны: 2-3 штриха миллиметровой шкалы, обозначенные крупными цифрами «11», «12», «13», неподвижная шкала десятых долей миллиметра с делениями от «0» до «10», круговая шкала для отсчёта сотых и тысячных долей миллиметра и двойные витки спирали. Чтобы произвести отсчет, необходимо предварительно маховиком 4 микроскопа 3 подвести двойной виток спирали так, чтобы миллиметровый штрих в зоне двойных витков оказался точно посередине между линиями витка. Индексом для отсчета миллиметров служит нулевой штрих десятых долей миллиметра.

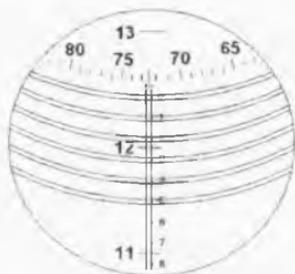


Рисунок 3.7 – Измерение радиуса кривизны с помощью сферометра

На рисунке 3.7 миллиметровый штрих «12» прошел нулевой штрих шкалы десятых долей миллиметра, а ближайший штрих «13» еще не дошел до нулевого штриха шкалы десятых долей миллиметра. Отсчет будет 12 мм плюс отрезок штриха «12» до нулевого штриха шкалы десятых долей. В нашем случае число десятых долей миллиметра обозначено цифрой «2» последнего пройденного штриха шкалы десятых долей. Сотые и тысячные доли миллиметра отсчитываются по круговой шкале, указателем для отсчета по ней служит стрелка; цена деления круговой шкалы – 0,001 мм. На рисунке 72-й штрих прошел указатель и часть интервала шкалы. Эту часть интервала определяют на глаз, она примерно равна 0,5 делений круговой шкалы. Окончательный отсчет будет 12,2725. Вычисление радиуса кривизны  $R$  для изделий с выпуклой поверхностью производится по следующей формуле:

$$R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2} - \rho, \quad (2.1)$$

где  $r$  – радиус измерительного кольца ( $r = 15,007$  мм);

$\rho$  – радиус шариков на измерительном кольце сферометра ( $\rho = 2,355$  мм);

$h$  – прогиб шарового сегмента измеряемой сферической поверхности.

### Ход работы

### Упражнение 1. Определение радиуса кривизны линзы с помощью сферометра ИЗС-7

1. Установить на измерительное кольцо 6 пластину 5, прижав её нагрузкой 7, как показано на рисунке 3.6.

2. Произвести отсчёт, как указано в описании установки. Опыт повторить 5 раз, найти среднее значение.

3. Установить на измерительное кольцо 6 стеклянную линзу выпуклостью вниз, прижав её нагрузкой 7.

4. Произвести отсчёт, как указано в описании установки. Опыт повторить 5 раз, найти среднее значение.

5. Найти разность  $h$  средних значений отсчётов, полученных при выполнении пунктов 2 и 4.

6. Вычислить радиус сферической поверхности линзы по формуле 2.1.

### Упражнение 2. Определение радиуса кривизны линзы с использованием компьютерной программы «кольца Ньютона»

1. Запустить локальную версию программы «ПИК 1.0» на компьютере в лаборатории.

2. В появившемся главном окне программы выбрать «Радиус кривизны линзы, кольца Ньютона». После чего на экране появится окно «Обработка изображений» (рисунок 3.8).

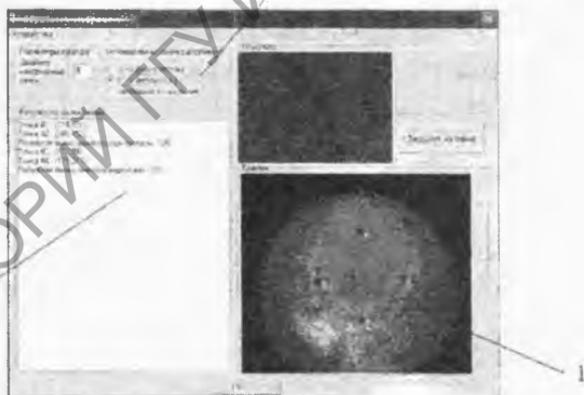


Рисунок 3.8 – Общий вид окна «Обработка изображений»

Поле 1 окна «Обработка изображений» (рисунок 3.8) содержит фотографию изображения колец Ньютона (в отражённом свете), полученного с помощью микроскопа и web-камеры.

3. С помощью мыши в областях, соответствующих темным кольцам, установить маркеры, по положениям которых автоматически производится расчёт расстояния (в данном случае диаметры колец),

результат расчёта приводится в поле 2. Поле 3 предназначено для выбора направления, вдоль которого производится определение расстояния (вертикально или горизонтально).

4. Открыть окно «Определение радиуса кривизны линзы и длины волны с помощью колец Ньютона», общий вид которого представлен на рисунке 3.9.

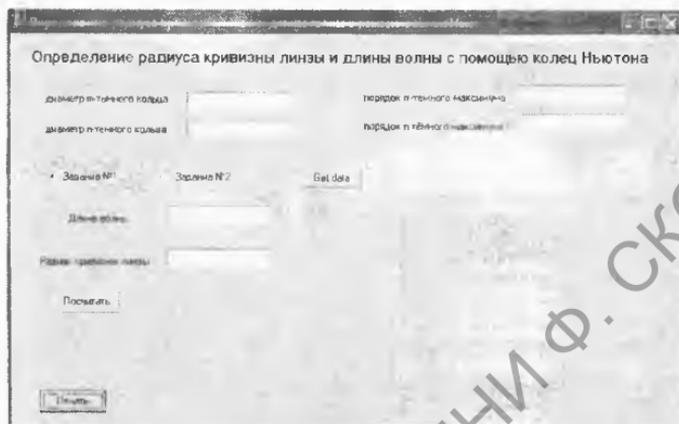


Рисунок 3.9 – Общий вид окна «Определение радиуса кривизны линзы и длины волны с помощью колец Ньютона»

5. Используя результаты работы с предыдущим окном (диаметры и номера колец), ввести в соответствующие поля их значения.

6. Нажать кнопку «Посчитать». Ниже отобразится радиус кривизны линзы.

7. Для вывода на экран окна предварительного просмотра отчёта нажать кнопку «Печать».

8. Сравнить найденное значение радиуса кривизны с полученным ранее в упражнении 1. Сделать выводы.

## Лабораторная работа 5

### Определение длины световой волны при помощи бипризмы Френеля

**Цель работы:** научиться определять длину световой волны, используя явление интерференции, наблюдаемое с помощью бипризмы Френеля.

**Приборы и принадлежности:** оптическая скамья, диафрагма со щелью, бипризма, собирающая линза, осветитель, набор светофильтров, тубус микроскопа.

**Описание установки.** Установка для определения длины световой волны состоит из оптического рельса 1, на котором расположены осветитель 2, светофильтр 3, регулируемая щель 4, бипризма 5, микроскоп 6. Для определения расстояния между мнимыми щелевыми источниками  $l$  на оптический рельс ставят линзу 7 и матовый экран 8.

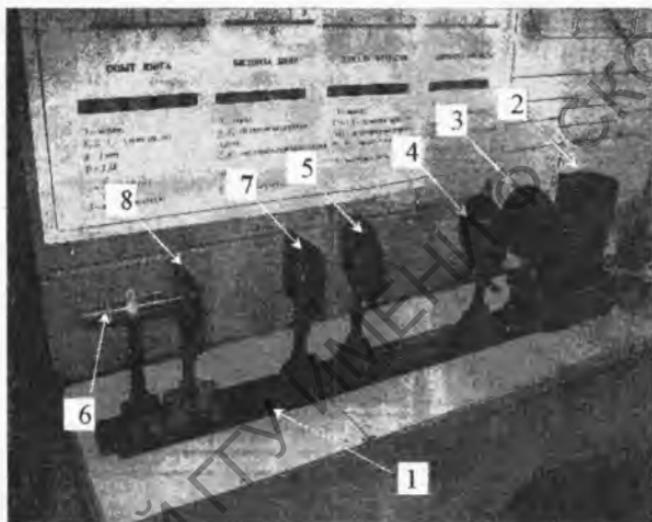


Рисунок 3.10 – Общий вид установки по определению длины световой волны при помощи бипризмы Френеля

Бипризма представляет собой две прямоугольные призмы с малыми углами преломления (порядка  $30'$ ), сложенные своими малыми катетами. В качестве источника света используется светящаяся щель 4. Если пучок световых лучей направлен параллельно ребру призмы, то они преломляются и разделяются на два перекрывающихся пучка лучей, продолжение которых пересекается в двух мнимых точках  $S_1$  и  $S_2$ . Эти мнимые изображения щелевого источника  $S$  света расположены по обе стороны от щели. В области перекрытия световых пучков, идущих от  $S_1$  и  $S_2$ , на экране наблюдается интерференционная картина, состоящая из чередующихся светлых и тёмных полос, причём в центре экрана возникает светлая полоса (рисунок 3.11).

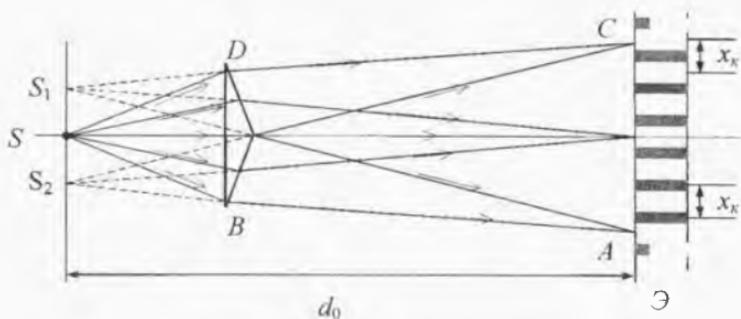


Рисунок 3.11 – Ход лучей в опыте с бипризмой Френеля

### Ход работы

#### Упражнение 1. Получение интерференционной картины с помощью бипризмы Френеля

1. На оптическую скамью 1 установить осветитель 2, светофильтр 3, щель 4, бипризму 5 и микроскоп 6 так, чтобы окно осветителя 2, середина щели 4, преломляющее ребро бипризмы 5 и микроскоп 6 находились на одной высоте и на прямой, проходящей через оптическую ось микроскопа.

2. Добиться отчётливой и достаточно яркой интерференционной картины при наблюдении её с помощью микроскопа, для этого:

- у окна осветителя (фонаря) 1 установить красный светофильтр 3;
- щель 4 поместить на расстоянии 10–20 см от осветителя 1;
- бипризму 5 поместить на расстоянии 45–55 см от щели 4 так, чтобы её преломляющее ребро было вертикально и строго параллельно щели;
- на расстоянии 35–40 см от бипризмы 5 поместить тубус микроскопа 6 (расстояние отсчитывается по шкале, имеющейся внизу оптического рельса).

#### Упражнение 2. Определение длины световой волны

1. По шкале микроскопа определить расстояние между 10 светлыми или тёмными полосами и разделить его на 10. Провести измерения несколько раз, определить среднее расстояние между двумя интерференционными полосами в делениях шкалы микроскопа.

2. Определить расстояние  $\langle \Delta x \rangle$  между двумя соседними интерференционными полосами (ширину интерференционной полосы) по формуле:

$$\langle \Delta x \rangle = c \cdot n,$$

где  $n$  – ширина интерференционной полосы в делениях микроскопа;  
 $c$  – цена деления шкалы микроскопа ( $c = 0,030$  мм).

3. Не сдвигая с места ранее установленных приборов, найти расстояние  $l$  между мнимыми щелевыми источниками света  $S_1$  и  $S_2$ . Для этого на оптический рельс 1 между бипризмой 5 и объективом микроскопа 6 установить двояковыпуклую линзу 7 и прозрачный (матовый) экран 8.

4. Передвигая линзу 7 и матовый экран 8, получить на последнем чёткое изображение мнимых щелевых источников света  $S_1$  и  $S_2$ . (рисунок 3.12). Это действительное изображение мнимых щелевых источников света рассматривают в микроскоп и определяют расстояние между серединами изображений щелей в делениях шкалы микроскопа  $n_1$ . Переводят данное значение  $n_1$  в мм по формуле:

$$S_1 S_2 = l_1 = c \cdot n_1,$$

где  $l_1$  – расстояние между изображениями щелей в мм;

$c$  – цена деления шкалы микроскопа;

$n_1$  – расстояние между  $S_1$  и  $S_2$ , выраженное в делениях шкалы микроскопа.

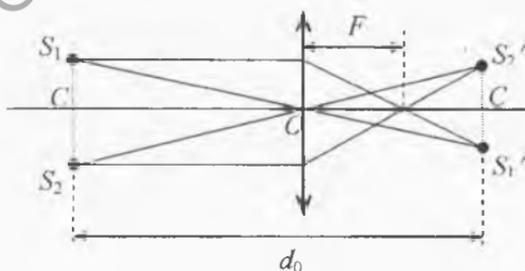


Рисунок 3.12 – Схема получения изображения мнимых щелевых источников

Из рисунка 3.12 следует, что  $\Delta S_1CO$  и  $\Delta S'_1OC_1$  подобные, так как три угла одного треугольника равны трём углам другого треугольника.

Из подобия треугольников следует, что

$$\frac{S_1C}{S'_1C_1} = \frac{CO}{C_1O}.$$

Обозначим  $CO = a$ ,  $C_1O = b$ ,  $S_1C = l_1/2$ ,  $S'_1C_1 = l/2$ , тогда  $\frac{l_1/2}{l/2} = \frac{a}{b}$  и, соответственно,

$$l = l_1 \frac{a}{b}.$$

5. Измерить расстояния от щели до линзы  $b$  и от линзы до экрана  $a$  при этом расстояние щели до экрана  $d_0 = a + b$ .

6. По формуле  $\lambda = \frac{\Delta x l}{d_0}$  вычислить длину световой волны. Сделать вывод.

## Лабораторная работа 6

### Изучение чистоты обработки поверхности с помощью микроинтерферометра Линника

**Цель работы:** изучить устройство и принцип работы микроинтерферометра Линника и определить чистоту (класс точности) обработки поверхности.

**Приборы и принадлежности:** микроинтерферометр Линника (прибор МИИ-4), исследуемые образцы.

**Описание установки.** Оптическая схема микроинтерферометра представлена на рисунке 3.13.

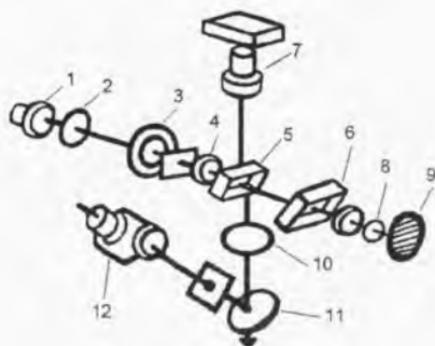


Рисунок 3.13 – Оптическая схема микроинтерферометра Линника

Свет от источника 1 через систему линз 2, 3, 4 параллельным пучком падает на разделительную пластинку 5. Пучок лучей, отраженный от пластинки 5, собирается в фокусе объектива 7 на исследуемой поверхности, после отражения от которой снова проходит через объектив 7, пластинку 5 и собирается в фокусе объектива 10, где наблюдается изображение исследуемой поверхности. Зеркало 11 направляет лучи в окуляр 12.

Второй пучок лучей, пройдя через разделительную пластинку 5, падает на компенсатор 6, затем собирается в фокусе объектива 7 на эталонном зеркале 9, отражаясь от которого снова проходит через объектив 8, компенсатор 6 и падает на разделительную пластинку 5. Отражаясь от пластинки 5, часть лучей интерферирует с лучами первой ветви интерферометра, образуя резкое изображение интерференционных полос, которое с помощью объектива 10 попадает в фокальную плоскость окуляра 12. Таким образом, изображения интерференционных полос и исследуемой поверхности получаются в фокальной плоскости окуляра и налагаются друг на друга.

Конструктивно микроинтерферометр Линника состоит (рисунок 3.14) из круглого основания 1, цилиндрической колонки 2, несущего предметного столика 3, на котором устанавливается исследуемая деталь. Предметный столик с помощью микрометрических винтов 4 может перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Цена деления барабана винта 0,005 мм. К колонке крепятся осветитель 5, наблюдательный тубус с окуляром 6 и винтовым окулярным микрометром 7.

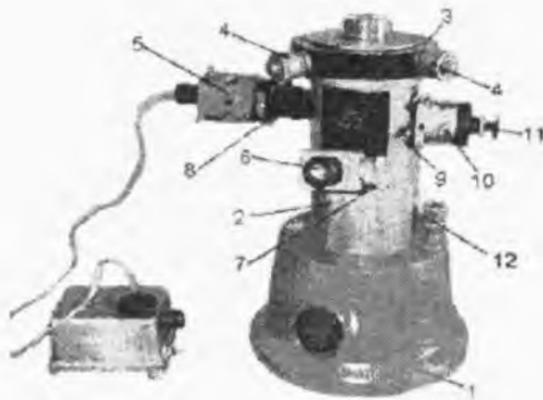


Рисунок 3.14 – Внешний вид интерферометра Линника (МИИ-4)

На верхней части головки расположена рукоятка 9, при помощи которой на пути лучей помещают шторку. При включенной шторке лучи не попадают на окуляр 6. Микроинтерферометр превращается в металлографический микроскоп. Ширина полос изменяется при помощи вращения вокруг своей оси винта 10. Изменение направления полос производится этим же винтом 10 путем вращения его вокруг оси всей интерференционной головки. Винт 11 служит для смещения интерференционных полос в поле зрения микроскопа. Фокусировка объектива на поверхность образца производится микрометрическим винтом 12.

### Ход работы

1. Установить образец на предметном столике 3 интерферометра исследуемой поверхностью вниз.

2. Повернуть рукоятку 9 таким образом, чтобы стрелка, нанесённая на рукоятку, расположилась вертикально, и вращением микрометрического винта 12 сфокусироваться на исследуемую поверхность.

3. Затем повернуть рукоятку 9 так, чтобы стрелка расположилась горизонтально. В окуляре 6 наблюдаются интерференционные полосы. Поворотом винта 12 добиться резкого изображения полос. На фоне интерференционной картины видна измерительная шкала объективного микрометра и две скрещенные под прямым углом нити.

4. Винтовой окулярный микрометр 7 развернуть так, чтобы одна из нитей перекрестия была направлена вдоль интерференционных полос, и закрепить его зажимным винтом.

## Упражнение 1. Вычисление величины изгиба полос

1. Совместить нить перекрестия подвижной сетки с серединой любой интерференционной полосы и снять отсчет  $N_1$ . Затем совместить эту же нить перекрестия с серединой следующей полосы и снять второй отсчет  $N_2$ . При этом необходимо отметить число интервалов между полосами  $n$ . Если полосы соседние, то  $n = 1$ . Разность  $N_2 - N_1 = b$ . Если между отсчетами  $N_1$  и  $N_2$  расположено  $n$  полос, то:

$$b = \frac{N_2 - N_1}{n}.$$

2. Совместить одну из нитей перекрестия с серединой интерференционной полосы и по шкале окулярного микрометра снять отсчет  $N_3$ . Затем нить перекрестия совместить с серединой той же полосы в месте изгиба и снять второй отсчет  $N_4$ . Как указано на рисунке 3.15.



Рисунок 3.15 – Схема отсчетов интерференционных полос

3. По формуле  $a = N_4 - N_3$  определить величину изгиба полосы.

## Упражнение 2. Определение высоты неровности поверхности

1. С помощью выдвигающейся горизонтальной пластинки 8 на пути светового пучка поместить зеленый светофильтр с  $\lambda = 561$  нм.

2. И, проведя аналогичные предыдущему упражнению измерения величин  $a$  и  $b$ , по формуле  $h = \frac{a \lambda}{b 2}$  вычислить высоту неровности поверхности для зелёного светофильтра.

3. В «белом» свете искривление в одну интерференционную полосу соответствует неровности на испытуемой поверхности, равной 0,27 мкм. Тогда  $h$  определяют по формуле

$$h = 0,27 \cdot \Delta N = 0,27 \frac{N_4 - N_3}{N_2 - N_1} n.$$

### Упражнение 3. Определение чистоты обработки поверхности

Микроинтерферометр Линника предназначен для измерения высоты неровностей на поверхностях от 10 до 14 класса по ГОСТ 2739-51.

1. Снять с испытуемого участка серию измерений величины  $h$  и определить среднее значение  $\langle h \rangle$ . Для снятия замеров столик перемещают микрометрическими винтами 4, имеющими диапазон перемещения, равный 10 мм.

2. По таблице 3.1 по среднему значению  $\langle h \rangle$  определить класс точности обработки поверхности детали.

Таблица 3.1 – Классы точности (чистота) обработки поверхности

Классы	10	11	12	13	14
$\langle h \rangle$ , мкм	от 0,50 до 0,80	от 0,25 до 0,50	от 0,12 до 0,25	от 0,06 до 0,12	до 0,06

## Тема 4. Дифракция света

### Основные понятия по теме

*Дифракцией света* называют совокупность оптических явлений, обусловленных волновой природой света и наблюдаемых при его распространении в среде с резко выраженными неоднородностями. В более узком смысле под дифракцией света понимают явление огибания светом малых препятствий, т. е. свет при определенных условиях может заходить в область геометрической тени. Если на пути параллельного светового пучка расположено круглое препятствие (круглый диск, шарик или круглое отверстие в непрозрачном экране), то на экране, находящемся на достаточно большом расстоянии от препятствия, появляется дифракционная картина – система чередующихся светлых и темных колец. Если препятствие имеет линейный характер (щель, нить, край экрана), то на экране возникает система параллельных дифракционных полос.

Различают дифракцию света Френеля и Фраунгофера. Если дифракционная картина образована источником света, лежащим на конечном расстоянии от препятствия, то от него во все стороны распространяется сферическая волна. Дифракцию света, наблюдаемую при распространении сферической волны, называют дифракцией Френеля. Дифракция света в параллельных лучах, когда источник света находится в бесконечности, называется *дифракцией Фраунгофера*.

Рассмотрим дифракцию света на пространственной структуре, которая может представлять собой систему неоднородностей, расположенных периодически. Такую структуру будем называть *дифракционной решёткой*.

В этом случае волна распространяется в среде, в которой имеются участки, где скорость света отличается от скорости в остальных участках среды.

Пусть решетка образована рядом одинаковых рассеивающих центров, расположенных вдоль прямой  $MM'$  на расстоянии  $d$  друг от друга (рисунок 4.1). В дальнейшем  $d$  – постоянная (период) дифракционной решётки. Такую решетку называют *одномерной*. Направим на рассматриваемую решетку под углом  $\Theta$  пучок параллельных когерентных лучей. Из лучей, рассеиваемых центрами, выберем такие, которые составляют с нормалью угол  $\varphi$ .

Оптическая разность хода  $\Delta$  соседних лучей равна:

$$\Delta = \Delta_1 - \Delta_2 = d \sin \Theta - d \sin \varphi,$$

где  $\Delta_1 = AB$ ,  $\Delta_2 = CD$ .

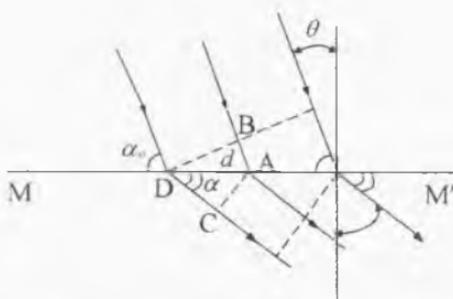


Рисунок 4.1. – Ход лучей при дифракции света

Главные максимумы возникают при условии, что  $\Delta = m \lambda$ . Тогда

$$d(\sin \Theta - \sin \varphi) = m \lambda, \quad (4.1)$$

где  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ .

Для упрощения дальнейшего рассмотрения вопроса введем вместо углов  $\theta$  и  $\varphi$  дополняющие к ним углы  $\alpha_0$  и  $\alpha$ . Тогда равенство (4.1) примет вид:

$$d(\cos \alpha_0 - \cos \alpha) = m \lambda. \quad (4.2)$$

Совокупность лучей, параллельных образующей конуса, ось которого совпадает с направлением  $MM'$ , соответствует постоянному значению угла  $\alpha$ . Выделим те лучи, которые параллельны одной из образующих конуса и лежат в плоскости чертежа (рисунок 4.2).

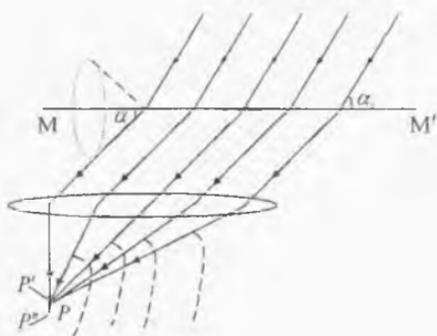


Рисунок 4.2 – Схема получения дифракционного максимума

При выполнении равенства (4.2) эти лучи усилят друг друга, вследствие чего в фокальной плоскости линзы появится светлое пятно Р. Лучи, для которых выполняется условие (4.2) и параллельные другим образующим, дадут свои светлые пятна, и на экране возникнет светлая полоса.

Если  $\alpha_0 = \frac{\pi}{2}$ , то значению  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  соответствует светлая полоса нулевого порядка, которая будет иметь вид прямой. Для нее  $m = 0$ . По обе стороны от нее расположатся изогнутые линии разных порядков (рисунок 4.3).

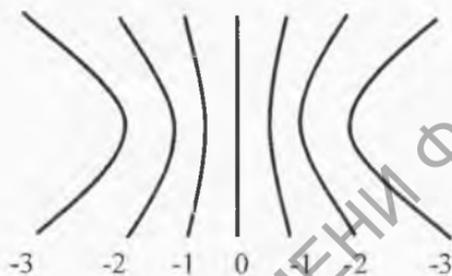


Рисунок 4.3 – Положение максимумов при дифракции

Для этих линий  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ . При большом количестве рассеивающих центров число интерферирующих пучков велико, а полосы получаются очень узкими.

Рассмотрим теперь двумерную решетку, в которой рассеивающие центры находятся в узлах квадратной решетки, представляющей собой две системы линейных решеток, наложенных друг на друга (рисунок 4.4). Для простоты будем полагать, что постоянные (периоды) решеток одинаковы и равны  $d$ .

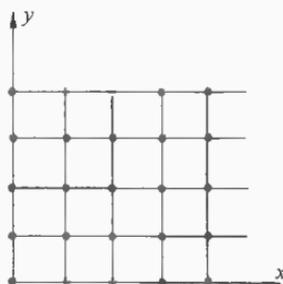


Рисунок 4.4 – Схема двумерной дифракционной решётки

Тогда максимумы образуются для тех направлений, для которых рассеянные от центров лучи под углами  $\alpha$  и  $\beta$  будут удовлетворять условиям

$$d(\cos \alpha_0 - \cos \alpha) = m_1 \lambda, \quad (4.3)$$

$$d(\cos \beta_0 - \cos \beta) = m_2 \lambda,$$

где  $m_1, m_2$  – целые числа.

Как следует из условия (4.3), в фокальной плоскости линзы для каждого направления образуется своя система изогнутых линий. Оба условия (4.3) будут выполняться для тех точек, в которых изогнутые линии пересекаются во взаимно перпендикулярных направлениях (рисунок 4.5).

Если на двумерную решетку падает монохроматический свет, дифракционная картина будет иметь вид чередующихся светлых пятен. Если же на решетку падает не монохроматический свет, то будет наблюдаться спектр каждого пятна.

В качестве модели двумерной дифракционной решетки может служить плоская сетка с очень мелкими ячейками. При падении на неё излучения лазера получается хорошая дифракционная картина. Если же такую решетку (сетку) осветить излучением лазера, то в фокальной плоскости линзы, расположенной за решеткой параллельно плоскости решетки, наблюдается дифракционная картина. В плоскости же наблюдения получается изображение сетки.

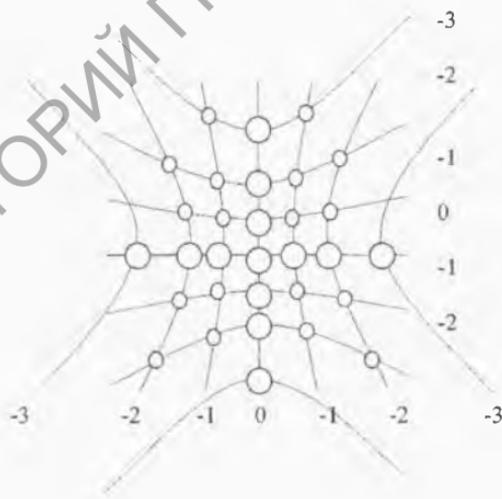


Рисунок 4.5 – Общий вид двумерной дифракционной картины

Вся информация, имеющаяся в изображении предмета (сетки), содержится также и в его дифракционной картине. Поэтому, если усилить или ослабить отдельные максимумы, то произойдут соответствующие изменения в изображении предмета (сетки). Внесение в дифракционную картину предмета изменений, вызывающих соответствующие изменения в изображении предмета, называется *пространственной фильтрацией изображения*.

Первым экспериментом, продемонстрировавшим возможность пространственной фильтрации изображения, был опыт Аббе-Портера (рисунок 4.6).

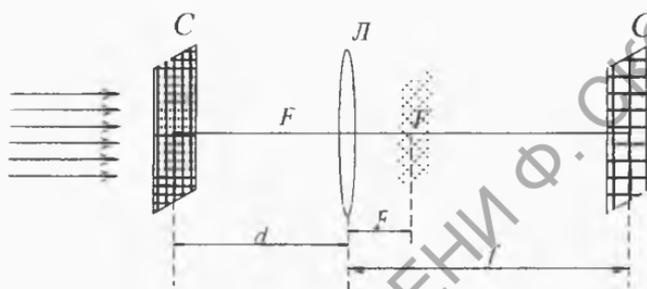


Рисунок 4.6 – Схема фильтрации изображения

В этом опыте металлическая сетка  $C$ , образованная проволоками, пересекающимися под прямым углом, освещалась параллельным пучком света. Сетка размещалась перед линзой  $L$ . В фокальной плоскости линзы образовывалась дифракционная картина сетки.

В плоскости наблюдения на расстоянии  $f$  от центра линзы формируется изображение сетки  $C_1$ . Если в фокальную плоскость  $F$  линзы ввести непрозрачный экран с горизонтально расположенной щелью, то в плоскости наблюдения в изображении сетки будут присутствовать только вертикальные линии.

Повернув непрозрачный экран в фокальной плоскости линзы на  $90^\circ$  так, чтобы щель расположилась вертикально, в изображении сетки наблюдаются только горизонтальные линии.

Таким образом, горизонтальные составляющие дифракционной картины предмета ответственны за образование вертикальных составляющих изображения предмета и, наоборот, вертикальные составляющие дифракционной картины в фокальной плоскости линзы ответственны за образование горизонтальных составляющих изображения предмета.

## Вопросы для самоконтроля

1. В чём заключается принцип работы оптического квантового генератора.
2. Что такое дифракция света?
3. Какой вид имеет дифракционная картина в зависимости от типа препятствия?
4. При каких условиях наблюдается дифракция Фраунгофера?
5. Чем дифракция Фраунгофера отличается от дифракции Френеля?
6. Что такое дифракционная решетка?
7. Каковы основные параметры дифракционной решетки?
8. Чем одномерная решетка отличается от двумерной?
9. При каких условиях наблюдается дифракция света?
10. В чем сущность пространственной фильтрации изображения?

## Лабораторная работа 7

### Изучение дифракции света

**Цель работы:** получить дифракционную картину, определить период дифракционной решетки и длину волны излучения газового лазера.

**Приборы и принадлежности:** оптический квантовый генератор (лазер); дифракционная решетка; экран; линейка, установленная на штативе.

**Описание установки.** Источником света в работе служит гелий-неоновый лазер. В качестве объектов исследования используют регулируемую щель, экраны с круглыми и прямоугольными отверстиями, нити, одномерные и двумерные решетки, закрепленные в рейтере на оптическом рельсе. Дифракционную картину наблюдают на экране. Для измерения фототока используют фотодиод ФД-3 с микроамперметром.

Основной частью газового лазера (рисунок 4.7) является газоразрядная трубка 1, в которой осуществляется тлеющий газовый разряд, реализованный между катодом (К) и анодом (А). Трубка заполнена смесью неона (Ne) и изотопа гелия (He).

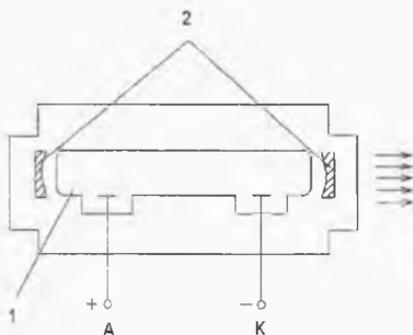


Рисунок 4.7 – Схема устройства гелий-неонового лазера

Используемый в работе лазер генерирует когерентное излучение с длиной волны  $\lambda = 632,8$  нм.

В результате взаимодействия атомов неона и гелия с электронами газоразрядной плазмы часть атомов Ne и He переходит в возбужденное состояние. Атомы гелия, находясь на нестабильных уровнях, могут передавать энергию возбуждения атомам Ne при их столкновениях. Вследствие этого возникает инверсная заселённость возбужденных уровней атомов Ne, что и приводит к процессам вынужденного излучения. Фотоны, распространяющиеся вдоль оси трубки, испытывают многократное отражение от зеркал 2, что обеспечивает большую длину пути в газовой среде, и, следовательно, большую интенсивность излучения. Часть этого излучения проходит через переднее зеркало, коэффициент пропускания которого около 2 %.

### Ход работы

#### Упражнение 1. Наблюдение дифракции Фраунгофера на щели

1. На выходе лазерного луча поместить штатив со щелью. Меняя ширину щели, пронаблюдать зависимость вида дифракционной картины на экране от ширины щели. Зарисовать картину и сделать выводы.
2. Установив произвольную ширину щели, определить положение трёх первых минимумов относительно центра дифракционной картины. Используя формулу

$$x_{\text{мин}} = \frac{L\lambda}{a} m, \quad (4.4)$$

где  $x_{\min}$  – расстояние от центра нулевого максимума, до центра  $m$ -го минимума;

$L$  – расстояние от щели до экрана, определить ширину щели  $a$ .

Результаты занести в таблицу 4.1.

Формула (4.4) применима для небольших углов дифракции  $\varphi$ .

Таблица 4.1 – Результаты наблюдения дифракции на щели

Порядок минимума $m$	$x$ , мм		$\langle x_{\min} \rangle = \frac{ x _{лев} +  x _{прав}}{2}$ , мм	$L$ , мм	$\lambda$ , нм	$a$ , мм	$\langle a \rangle$ , мм
	слева	справа					
1							
2							
3							

### Упражнение 2. Наблюдение дифракции на отверстиях различной формы

Поместить на выходе лазерного луча поочередно штативы с прямоугольными и круглыми отверстиями, щиты различной толщины. Зарисовать наблюдаемые дифракционные картины, сравнить их с видом препятствия и сделать выводы.

### Упражнение 3. Дифракция Фраунгофера на одномерной решетке

1. Поместить на пути лазерного излучения одномерную решетку и определить положения  $x_{\max}$  нескольких максимумов относительно центрального (нулевого) максимума (расстояния от центра нулевого дифракционного максимума до центров максимумов  $m$ -го порядка).

2. Определить длину волны излучения газового лазера по формуле

$$\lambda = \frac{x_{\max} d}{m L}, \quad (4.5)$$

где  $d$  – постоянная решетки;

$L$  – расстояние от решетки до экрана;

$m$  – порядок максимума.

Результаты опыта занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты наблюдения дифракции на одномерной решётке

Порядок максимума $m$	X, мм		$\langle x_{\max} \rangle = \frac{ x'_{\text{лев}}  +  x'_{\text{пр}} }{2}$ , мм	L, мм	d, мм	$\lambda$ , нм	$\langle \lambda \rangle$ , нм
	слева	справа					
1							
2							
3							

#### Упражнение 4. Дифракция Фраунгофера на двумерной решетке

1. Расположить на выходе лазерного луча держатель с набором двумерных дифракционных решеток. Получить дифракционную картину и определить координаты ( $x_{\max}$  и  $y_{\max}$ ) и порядки  $m$  главных дифракционных максимумов на экране аналогично упражнению 3. Главные максимумы обозначены крупными кружками на рисунке 4.5.

2. Рассчитать углы дифракции  $\varphi_x$  и  $\varphi_y$  по формулам:

$$\varphi_x = \frac{x_{\max}}{L}, \quad \varphi_y = \frac{y_{\max}}{L},$$

где  $L$  – расстояние от решетки до экрана. Из условия главных максимумов определить периоды двумерных решеток.

Результаты занести в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты наблюдения дифракции на двумерной решётке

Порядок максимума $m$	Направление x					Направление y				
	$x_{\max}$ , мм	L, мм	$\varphi_x$ , рад	$d_x$ , мм	$\langle d_x \rangle$ , мм	$y_{\max}$ , мм	L, мм	$\varphi_y$ , рад	$d_y$ , мм	$\langle d_y \rangle$ , мм
1										
2										
3										

## Лабораторная работа 8

### Изучение дифракции света Фраунгофера и осуществление пространственной фильтрации изображения

**Цель работы:** изучить дифракцию Фраунгофера, измерить периоды решеток, изучить последовательность формирования линзой оптического изображения и осуществить пространственную фильтрацию изображения.

**Приборы и принадлежности:** дифрактометр ИФ-124, микроскоп МБИ-1, дифракционная насадка, репродукционная насадка, одномерные и двумерные объекты, микрометр, щель в круглой оправе.

**Описание установки.** Дифрактометр ИФ-124 (рисунок 4.8) предназначен для исследования спектра пространственных частот электронно-микроскопических и других изображений, зарегистрированных на негативных фотоматериалах.

Он может использоваться для анализа светорассеивающих объектов, содержащих упорядоченные и неупорядоченные структуры. В данной работе дифрактометр используется для изучения дифракции Фраунгофера и осуществления пространственной фильтрации изображения.

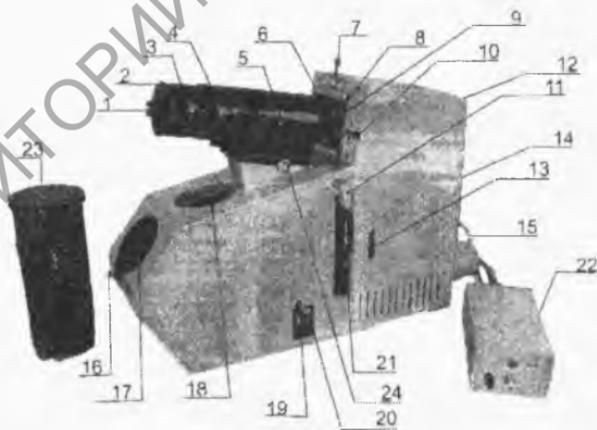


Рисунок 4.8 – Дифрактометр ИФ-124

Дифрактометр состоит из корпуса 14, дифракционного 2 и репродукционного 23 объективов, рамки с исследуемым объектом 21, столика масок 8 для помещения в него щели. Перемещения столика в горизонтальном и вертикальном направлениях осуществляются винтами 10 и 7. В качестве источника света используется газовый лазер типа ЛГН-208А, питаемый от блока 22. Диафрагма 13 ограничивает размер используемого участка предмета.

В режиме фильтрации дифракционный объектив 2 заменяется репродукционным объективом 23, который устанавливается на направляющие типа «ласточкин хвост» и крепится винтом 24. Изображение сетки наблюдается на матовом экране, закрепленном в отверстие 17 винтом 16 с помощью лупы в оправе. При этом крышка 18 должна быть удалена. В режиме дифракции дифракционная картина наблюдается с помощью окуляра 1, который фокусируется путем продольного перемещения. Увеличение дифракционного объектива при этом должно соответствовать положению винта 5 на  $1^\circ$ . Поворот щели в столике масок из горизонтального положения в вертикальное осуществляется вращением рычага 9. Изменение яркости изображения производится сменой поглощающего светофильтра 19, путем продольного перемещения рукоятки 20.

Принципиальная схема дифрактометра приведена на рисунке 4.9.

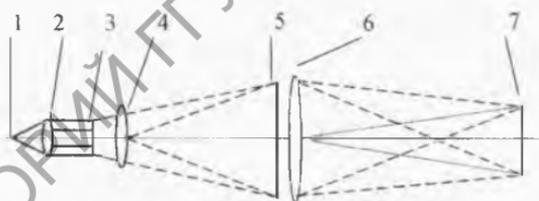


Рисунок 4.9 – Принципиальная схема дифрактометра

Световой поток из источника 1 проходит через коллиматор 2 и параллельным пучком освещает исследуемый снимок 3 (капроновую сетку).

В задней фокальной плоскости линзы 4 формируется дифракционное изображение сетки 5, представляющее собой Фурье-спектр. Световые лучи, прошедшие сетку, рассеиваются и фокусируются на некотором расстоянии от оси. За плоскостью 5 установлена фильтрующая линза 6. Эта линза совместно с линзой 4 создает изображение исследуемой сетки 3 на экране 7.

Если в дифракционную картину 5 внести соответствующие изменения (например, закрыть отдельные максимумы), то можно вызвать соответствующие изменения в изображении сетки 7, то есть провести фильтрацию изображения.

Оптическая схема дифрактометра показана на рисунке 4.10. Выходящий из лазера (квантового генератора) 1 пучок проходит через объектив 2 телескопической системы, светофильтр 3, фотозатвор 4, зеркала 5, 6, 7 и попадает на второй объектив 8. Лазерный луч, расширенный телескопической системой, попадает на исследуемую сетку, помещенную в столик 9. Рассеянные сеткой лучи проходят через систему линз 10 и 11, в фокальной плоскости 14 которой формируется дифракционная картина. Зеркала 12 и 13 служат для изменения направления хода луча. Объектив 15 при помощи зеркал 16 и 17 создает изображение сетки на матовом экране 18. При работе в режиме дифракции система линз 15 (репродукционный объектив) заменяется дифракционной насадкой, состоящей из объектива 19 с экраном 20 и лупой 21. Объектив 19 отображает дифракционную картину на матовый экран 20. Экспериментальное определение периода двумерных структур осуществляют с помощью микроскопа МБИ-1 (описание, принцип работы и способ градуировки приведены в лабораторной работе 3 данного лабораторного практикума).

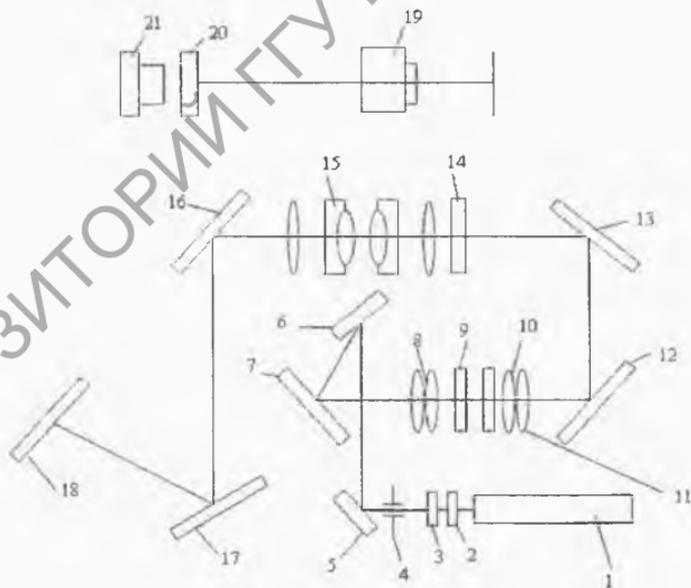


Рисунок 4.10 – Оптическая схема дифрактометра

## Ход работы

На диафрагме 13 (рисунок 4.8) установить раскрытие «54». В направляющие типа «ласточкин хвост» вставить дифракционный объектив 2 и зафиксировать его винтом 24. Винтом 25 установить увеличение объектива в степени  $1^x$ . Включить шнур блока питания 22 лазера в сеть. Поворотом тумблера на блоке питания включить лазер. Перемещением рукоятки 20 от себя до упора ввести поглощающий светофильтр. Передвигая лупу 1 в продольном направлении, сфокусировать ее на шкалу.

## Упражнение 1. Определение периода двумерных решеток

1. Поместить капроновую сетку в держатель рамки 21 и зафиксировать в выбранном положении рукояткой 11.

2. На экране 2 получить дифракционную картину в виде симметричных точек. Передвигая лупу 1 в продольном направлении, сфокусировать ее на дифракционную картину и четкое видение шкалы.

3. Измерить расстояние по оси  $X$  от центра максимума нулевого порядка до центра максимума первого порядка в левую сторону  $X'_{лев}$ , затем – в правую сторону  $X'_{пр}$  и определить среднее арифметическое значение по формуле:

$$\langle X' \rangle = \frac{X'_{лев} + X'_{пр}}{2}.$$

4. Из формулы  $d_x \sin \varphi = m\lambda$  определить период  $d_x$ , где  $m$  – порядок максимума;  $\varphi$  – угол дифракции. Фокусное расстояние дифракционного объектива ( $F = 400$  мм), тогда

$$\sin \varphi = \frac{\langle X' \rangle}{\sqrt{F^2 - \langle X' \rangle^2}}.$$

Так как расстояние до дифракционного максимума  $\langle X' \rangle$  гораздо меньше фокусного расстояния  $F$ , то:

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{\langle X' \rangle}{F} \quad \text{и} \quad d'_x = \frac{m \cdot \lambda \cdot F}{\langle X' \rangle}.$$

5. Измерить расстояние  $X''$  от центра максимума нулевого порядка до центра максимума второго порядка и  $X'''$  до центра максимума третьего порядка и вычислить  $d''_x$  и  $d'''_x$ . Определить среднее значение  $\langle d_x \rangle$ . При этом следует помнить, что для максимума второго порядка  $m = 2$ , третьего порядка  $m = 3$ . Цена одного деления шкалы 0,1 мм.

6. Аналогичные измерения провести вдоль оси  $Y$  и вычислить  $\langle d_y \rangle$ .

### Упражнение 2. Определение периода двумерных структур

1. Как и в первом упражнении, на экране 2 получить дифракционную картину в виде симметричных точек.

2. Измерить расстояние  $X'$  от центра максимума нулевого порядка до центра максимума первого порядка по оси  $X$ . Аналогично провести измерения для  $Y'$  по оси  $Y$ .

3. Используя график (рисунок 4.11), у которого ось абсцисс приведена в логарифмическом масштабе, для соответствующего увеличения  $1^x$  по оси  $d$  найти периоды двумерных структур, учитывая что  $R = X'$  и  $R = Y'$ .

### Упражнение 3. Экспериментальное определение периода двумерных структур

1. Определить цену деления микрометра. Для этого на предметный столик микроскопа положить микрометр. Совместить  $n$  делений окуляра с  $N$  делениями микрометра. Определить цену деления окуляра по формуле

$$C = \frac{N}{n} \cdot 0,01 \text{ мм.}$$

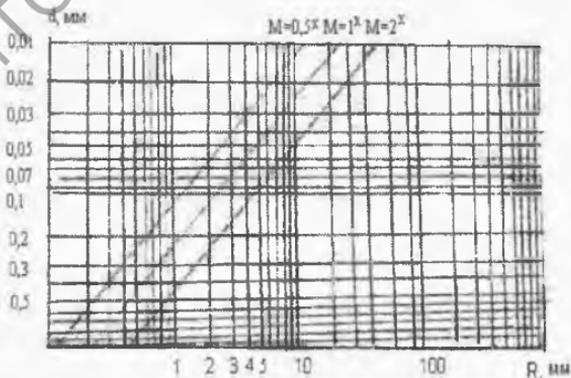


Рисунок 4.11 – График для определения периода двумерных структур

2. На предметный столик микроскопа поместить капроновую сетку, период которой нужно определить. Сфокусировать микроскоп на сетку и измерить вдоль оси  $X$  период решетки (сумму протяженностей прозрачного и непрозрачного участков) в делениях микроскопа. Учитывая цену  $K$  делений, найти  $d_x$ .

3. Повернуть шкалу делений окулярного микрометра на  $90^\circ$  и аналогично определить  $d_y$ .

4. Сопоставить периоды решетки  $d_x$  и  $d_y$  с периодами, определенными в упражнениях 1 и 2.

#### **Упражнение 4. Осуществление пространственной фильтрации изображения**

1. Заменить дифракционный объектив репродукционным. Для этого ослабить винт 24 (рисунок 4.8), снять с направляющих дифракционный объектив и на его место вставить репродукционный.

2. Достать из дифракционного объектива окуляр и вставить его в оправу лупы.

3. Открыть крышку 18 и на матовом экране 17 с помощью лупы в оправе найти изображение сетки. Путем продольного перемещения лупы сфокусировать ее на четкое виденье сетки и шкалы.

4. Столик масок 8 в круглой оправе поместить в щель, поворотом рычага 9 разместить щель горизонтально. Щель помещается в фокальной плоскости линзы, где образовывается дифракционная картина.

5. Перемещением винта 7 добиться попадания излучения лазера на середину щели.

6. На матовом экране 17 с помощью лупы в оправе получить изображение сетки в виде вертикальных полос. Если горизонтальные полосы отсутствуют, значит произошла фильтрация изображения.

7. Рычагом 9 повернуть щель и разместить ее вертикально. Перемещением винта 10 вывести излучение лазера на середину щели.

8. На матовом экране 17 с помощью лупы вновь получить изображение сетки в виде горизонтальных полос.

9. Сделать вывод об осуществлении пространственной фильтрации изображения.

## Тема 5. Поляризация света

### Основные понятия по теме

Согласно электромагнитной теории Максвелла, видимый свет представляет собой электромагнитные волны с длинами волн от 400 до 760 нм. Электромагнитные волны являются поперечными и характеризуются векторами напряженности электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей. Эти векторы перпендикулярны направлению распространения волны, совпадающему с осью  $x$  (рисунок 5.1).

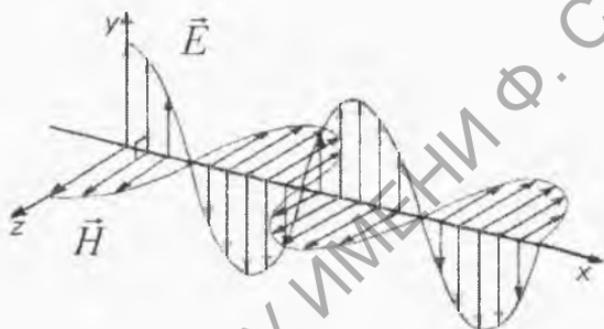


Рисунок 5.1 – Схема электромагнитной волны

Во всех действиях, производимых светом (химических, биологических и прочих), главную роль играет вектор напряженности электрического поля  $\vec{E}$ . Поэтому его называют *световым вектором*. В естественной световой волне вектор  $\vec{E}$  совершает колебания во всевозможных направлениях с большой скоростью. Причина такой ориентации вектора  $\vec{E}$  обусловлена тем, что источником излучения электромагнитных волн являются атомы веществ. Каждый атом за время  $10^{-8}$  с излучает  $10^7$  дугов волн (последовательность синусоид). Эти изменения происходят настолько быстро, что глаз не успевает следить за ними. На рисунке 5.2, а) схематически изображены положения вектора  $\vec{E}$  в неполяризованном (естественном) свете.

Свет, у которого колебания вектора  $\vec{E}$  упорядочены и совершаются в одной плоскости, называется *линейно* или *плоско поляризованным* (рисунок 5.2, б)). Плоскость, в которой совершает колебания вектор  $\vec{E}$ , называют *плоскостью световых колебаний*.

Плоскость, перпендикулярная плоскости световых колебаний, называется *плоскостью поляризации*.

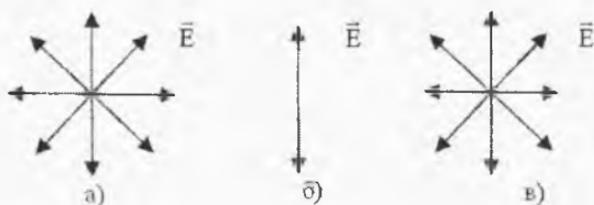


Рисунок 5.2 – Расположение вектора напряженности в случае различных поляризаций световой волны

Наблюдается и такой случай, когда вектор  $\vec{E}$  совершает колебания во всевозможных направлениях, но с различной амплитудой. Такой свет называется *частично поляризованным* (рисунок 5.2, в)). Схематически можно представить, что модуль вектора  $\vec{E}$  в этом случае изменяется от значения  $E_{\max}$  до  $E_{\min}$ . Так как интенсивность света  $I$  пропорциональна квадрату амплитуды волны  $E_0^2$ , то и интенсивность света изменяется от  $I_{\max}$  до  $I_{\min}$ .

*Степенью поляризации* называют величину  $P$ , равную

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (5.1)$$

Для характеристики частично поляризованного света используется величина  $\rho = \frac{I_{\min}}{I_{\max}}$ , называемая *поляризационным отношением*.

Тогда из соотношения (5.1) имеем

$$P = \frac{1 - \rho}{1 + \rho} \quad (5.2)$$

Существуют различные способы получения поляризованного света.

Если на пластинку кристалла турмалина, вырезанную вдоль определенного направления, называемого оптической осью кристалла, направить естественный свет, то из него выйдет линейно поляризованный свет (рисунок 5.3). Убедиться в линейности поляризации можно, если на пути луча поставить вторую такую же пластинку турмалина.

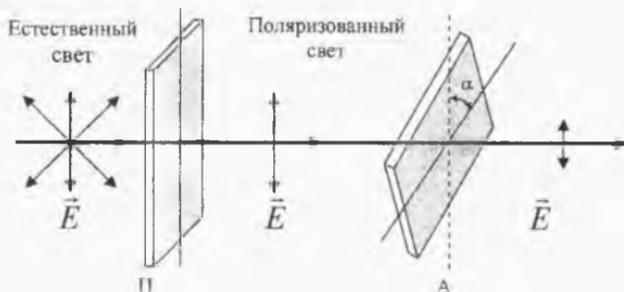


Рисунок 5.3 – Схема опыта демонстрирующего закон Малюса

Интенсивность прошедшего света будет максимальной, если плоскости световых колебаний параллельны друг другу. Первая пластинка турмалина, служащая для получения поляризованного света, называется *поляризатором* (П), вторая – *анализатором* (А). Если угол между плоскостями световых колебаний поляризатора и анализатора  $\alpha = 90^\circ$ , то интенсивность прошедшего света равна нулю.

При промежуточных значениях угла  $\alpha$  интенсивность  $I$  прошедшего через анализатор света определяется законом Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha, \quad (5.3)$$

где  $I_0$ ,  $I$  – интенсивности света, соответственно, до и после анализатора.

Если на границу раздела двух прозрачных диэлектриков направить естественный луч света, то часть светового потока отражается, а часть преломляется и распространяется во второй среде. Помещая на пути преломленного и отраженного лучей анализатор, например, пластинку турмалина, можно исследовать их поляризацию. Оказывается, что как отраженный, так и преломленный лучи частично поляризованы. А при угле падения  $i_B$  (рисунок 5.4), для которого выполняется соотношение

$$\operatorname{tg} i_B = \frac{n_2}{n_1} = n_{\text{отн}}, \quad (5.4)$$

где  $n_{\text{отн}}$  – относительный показатель преломления второй среды ( $n_2$ ) относительно первой ( $n_1$ ), отраженный луч полностью поляризован. Это соотношение получило название закона Брюстера. В этом случае угол между отраженным и преломленным лучами равен  $90^\circ$ .

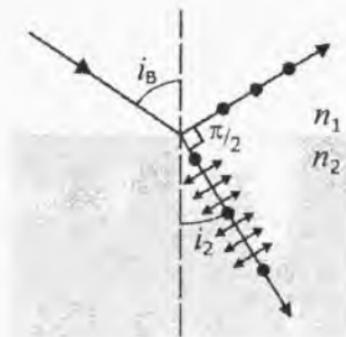


Рисунок 5.4 – Схема поляризации света, падающего на границу раздела под углом Брюстера

Линейно поляризованный свет можно получить, воспользовавшись явлением двойного лучепреломления.

Явление двойного лучепреломления заключается в том, что при прохождении света через прозрачные анизотропные среды, физические свойства которых по различным направлениям неодинаковы, поток света разделяется на два.

Показатель преломления одного из потоков не зависит от направления распространения. Луч, соответствующий такому потоку, называется *обыкновенным*. Для другого из потоков света показатель преломления зависит от направления распространения. В случае такого потока соответственно луч называется *необыкновенным*. Свет в обоих случаях является линейно поляризованным (рисунок 5.5).

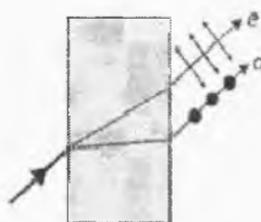


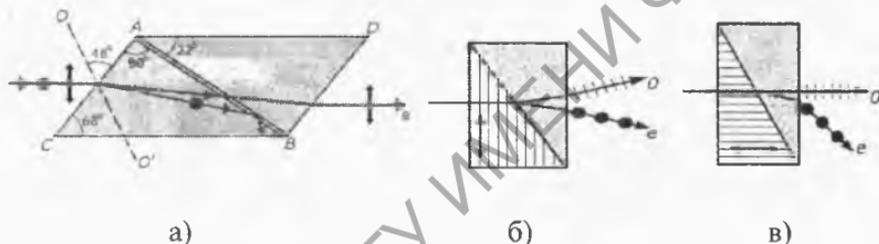
Рисунок 5.5 – Схема двойного лучепреломления

Необыкновенный луч соответствует излучению, поляризованному в плоскости падения, обыкновенный – в плоскости, перпендикулярной к плоскости падения.

Как правило, интенсивность обыкновенного и необыкновенного потоков света одинакова, однако существуют и такие кристаллы,

у которых один из них поглощается сильнее другого. Такое неодинаковое поглощение получило название *дихроизма*. Сильным дихроизмом обладают кристаллы турмалина. В кристалле турмалина толщиной в 1 мм полностью поглощается обыкновенное излучение, и из него выходит необыкновенный линейно поляризованный свет. Еще большим дихроизмом обладает кристалл герпатита (йодистого хинина). Пластика герпатита толщиной в 0,1 мм полностью поглощает обыкновенный свет. Кристаллы герпатита используются в поляроидных пленках для получения поляризованного света. Поляририд представляет собой прозрачную пленку, в которую вкрашены микроскопические кристаллы герпатита. Поляририды способны пропускать широкий спектр излучения, однако не обеспечивают полной поляризации света и неодинаково прозрачны для света различных длин волн.

Для получения поляризованного света широко используют различные поляризующие призмы (рисунок 5.6).



а) призма Николя; б) призма Волластона; в) призма Рошона

Рисунок 5.6 – Поляризующие призмы

Призма Николя (николь) состоит из двух прямоугольных призм с преломляющими углами  $68^\circ$  и  $22^\circ$ , изготовленных из кристалла исландского шпата и склеенных прозрачной смолой (канадским бальзамом). При падении на такую призму наблюдается явление двойного лучепреломления. Обыкновенный луч испытывает полное внутреннее отражение, и из призмы выходит необыкновенный линейно поляризованный луч света (рисунок 5.6, а)).

Призма Волластона (рисунок 5.6, б)) состоит из двух кварцевых прямоугольных призм, у которых оптические оси кристалла расположены во взаимно перпендикулярных направлениях: в первой призме оптическая ось параллельна вертикальному ребру призмы, во второй – перпендикулярна плоскости чертежа. Из нее выходят линейно поляризованные обыкновенный и необыкновенный лучи.

Призма Рошона (рисунок 5.6, в)) имеет такое же строение и изготовлена из такого же материала, что и призма Волластона, но оптическая ось кристалла в первой призме теперь направлена параллельно горизонтальной грани призм. Расхождение лучей в призме Рошона несколько меньше, чем в призме Волластона.

Явления, возникающие при взаимодействии света с веществом, чрезвычайно многообразны. Среди них важное место занимает вращение плоскости поляризации света. Вещества, способные вращать плоскость поляризации света в отсутствие внешнего воздействия, называются *оптически активными*. Существуют как кристаллические, так и аморфные вещества, обладающие оптической активностью (скипидар, камфора, никотин, раствор сахара и др.).

В рамках феноменологической электромагнитной теории света объяснение вращения плоскости поляризации света было дано Френелем, а затем развито М. Борном. Френель предположил, что в оптически активной среде распространяются две волны, поляризованные вправо и влево по кругу с различными скоростями. Пройдя один и тот же путь в веществе за разное время, две поляризованные волны будут характеризоваться электрическими векторами  $\vec{E}_{лев}$  и  $\vec{E}_{прав}$ , повернутыми на различные углы, что приведет к повороту вектора  $\vec{E}$  результирующей плоско поляризованной волны на некоторый угол  $\alpha$ . В случае кристаллов главной причиной различия скоростей следует считать отсутствие центра симметрии. По Борну для однородных аморфных тел необходимо учесть взаимодействие электромагнитного поля с каждой молекулой, которую можно представить в виде сложной ассиметричной пространственной структуры. Например, молекулы сахара и других органических соединений содержат несколько ассиметрично расположенных атомов углерода.

Существует способ расчёта концентрации вещества в растворе путём опытного определения угла поворота плоскости поляризации в данной оптически активной среде. Приборы, предназначенные для измерения угла вращения плоскости поляризации, называются *поляриметрами*. Поляриметры, предназначенные для определения концентрации сахара в растворе, называются *сахариметрами*.

Для растворов были установлены на опыте закономерности для явления поворота плоскости поляризации света. Сформулируем их.

1. Угол поворота плоскости поляризации  $\alpha$  прямо пропорционален толщине слоя  $l$  раствора и концентрации  $C$  активного вещества, то есть

$$\alpha = \alpha_0 \cdot l \cdot C, \quad (5.5)$$

где  $\alpha_0$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий природу вещества, называемый удельным вращением;

$l$  – длина трубки с раствором;

$C$  – объемная концентрация активного вещества.

2. Удельное вращение  $\alpha_0$  для данной оптически активной среды зависит от длины волны и температуры.

Зависимость удельного вращение от длины волны приближенно выражается соотношением

$$\alpha_0 \approx \frac{A}{\lambda^2}, \quad (5.6)$$

где  $A$  – некоторая постоянная величина, зависящая от оптических свойств материала.

От температуры удельное вращение зависит незначительно.

Из формулы (5.5) можно определить удельное вращение:

$$\alpha_0 = \frac{\alpha}{l \cdot C} \quad (5.7)$$

## Вопросы для самоконтроля

1. Какой свет называют поляризованным?
2. Какие существуют способы получения поляризованного света?
3. Как проверить закон Малюса и закон Брюстера?
4. Дайте определение понятию степень поляризации.
5. Чему равна степень поляризации излучения газового лазера и естественного света?
6. Какой свет называется плоско поляризованным?
7. Какой свет называется циркулярно поляризованным?
8. В чём заключается принцип работы поляризационных приборов?
9. Дайте определение понятию удельное вращение.
10. Какие вещества называются оптически активными?

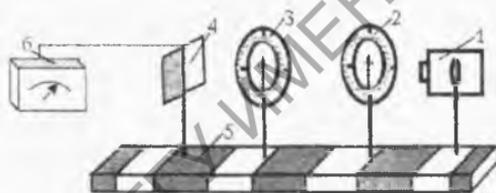
## Лабораторная работа 9

### Изучение поляризации света

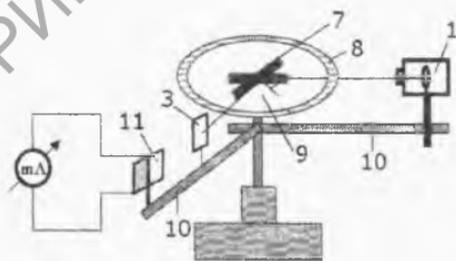
**Цель работы:** изучить способы получения поляризованного света, проверить выполнение законов Малюса и Брюстера.

**Приборы и принадлежности:** поляризатор, анализатор, диэлектрическое зеркало, поворотный столик, стопа Столетова, осветитель, источник питания, газовый лазер, фотоприемник, микроамперметр.

**Описание установки.** Установка для изучения поляризации света состоит из осветителя 1, поляризатора 2, анализатора 3, фотоэлемента 4, размещенных на оптическом рельсе 5 (рисунок 5.7, а). Фототок измеряется микроамперметром 6. Поляризатор и анализатор могут вращаться вокруг горизонтальной оси и снабжены устройством отсчета углов.



а)



б)

Рисунок 5.7 – Схема установки для изучения поляризации света (а) и проверки закона Брюстера (б)

Для проверки закона Брюстера используют (рисунок 5.7, б)) диэлектрическое зеркало 7, закрепленное на круглой горизонтальной

платформе 9, снабженной устройством отсчета углов 8. На вертикальной оси платформы закреплены кронштейны 10, вращающиеся в горизонтальной плоскости. На кронштейнах крепятся с одной стороны осветитель 1, а с другой анализатор 3 и фотоприемник 11. В работе также используется газовый лазер ЛГН-109.

### Ход работы

Вставить шнур осветителя в сеть и включить тумблер блока питания осветителя. Поворачивая рычаг реостата, добиться нормального накала лампочки.

### Упражнение 1. Проверка закона Малюса

1. На оптическом рельсе разместить осветитель, поляризатор, анализатор и фотозлемент.

2. Поворачивая анализатор 3 (рисунок 5.7, а), добиться максимального показания тока на микроамперметре. Так как величина фототока  $i$  пропорциональна интенсивности света  $I$ , падающего на фотозлемент ( $i = kI$ ), то этому положению будет соответствовать угол между плоскостями поляризации поляризатора и анализатора  $\alpha = 0^\circ$ .

3. Изменяя вращением анализатора 3 угол  $\alpha$  между плоскостями поляризатора и анализатора через каждые  $10^\circ$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , измерить величину фототока в каждом случае и вычислить отношения для каждого угла  $\alpha$ .

$$\gamma_\alpha = \frac{i_\alpha}{i_0} = \frac{I_\alpha}{I_0}.$$

4. Построить график зависимости  $\gamma_\alpha$  от угла  $\alpha$ .

5. Из закона Малюса следует, что

$$\frac{I_2}{I_0} = \cos^2 \alpha.$$

Поэтому в координатной плоскости, где уже построен график зависимости  $\gamma_\alpha$  от угла  $\alpha$  построить теоретическую кривую  $\cos^2 \alpha = f(\alpha)$ .

6. Сравнить указанные выше кривые, убедиться в выполнении закона Малюса.

## Упражнение 2. Измерение угла Брюстера, определение показателя преломления и диэлектрической проницаемости

1. На оптический рельс поместить круглую платформу 9 (рисунок 5.7, б)) с закрепленным диэлектрическим зеркалом 7. Показатель преломления и диэлектрическую проницаемость материала, из которого изготовлено зеркало 7, необходимо будет определить.

2. На кронштейнах платформы закрепить с одной стороны осветитель 1, с другой – анализатор 3 с фотоэлементом 11.

3. Излучение осветителя 1 попадает на зеркало 7 под определенным углом  $\varphi$  (рисунок 5.8).

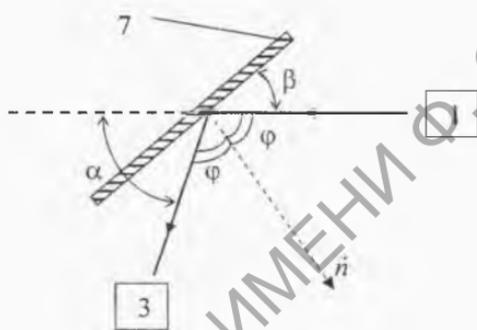


Рисунок 5.8 – Обозначение углов для выполнения упражнения 2

Отразившись от зеркала 7 под углом  $\varphi$ , излучение проходит через анализатор 3 и попадает на фотоэлемент. Если зеркало повернуто на угол  $\beta$  относительно линии распространения падающего света, то отраженный свет повернут на угол  $\alpha = 2\beta$  относительно этой же линии. Так как  $\varphi + \beta = 90^\circ$ , то по углу  $\alpha$  поворота отраженного луча можно определить угол его падения на зеркало

$$\varphi = 90^\circ - \frac{\alpha}{2}.$$

4. Установить кронштейн с анализатором под углом  $30^\circ$  к падающему лучу. Поворачивая зеркало, добиться максимального показания микроамперметра. При таком положении отраженный свет полностью попадает на фотоэлемент.

5. Вращая анализатор вокруг оси, добиться минимального показания микроамперметра. При дальнейших исследованиях положение анализатора не изменять.

6. Увеличивая угол  $\beta$  через каждые  $5^\circ$  в пределах от  $5^\circ$  до  $65^\circ$ , повернуть кронштейн с анализатором и фотоэлементом через  $10^\circ$  и записать показания микроамперметра.

7. По результатам измерений построить график зависимости фототока  $i$  от угла  $\alpha$ , то есть  $i = f(\alpha)$  и определить угол  $\alpha_{\min}$ , которому соответствует минимальный ток.

8. По формуле  $\varphi_B = 90^\circ - \frac{\alpha_{\min}}{2}$  определить угол Брюстера.

9. Используя закон Брюстера  $\operatorname{tg} \varphi_B = n = \sqrt{\epsilon}$ , вычислить показатель преломления и диэлектрическую проницаемость материала зеркала.

### Упражнение 3. Исследование зависимости степени поляризации отраженного света от угла поворота зеркала

1. Повернуть анализатор на  $90^\circ$ .
2. Как и в предыдущем упражнении, наряду с минимальной измерить максимальную силу тока, при каждом повороте зеркала на  $5^\circ$ .
3. Для каждого угла вычислить степень поляризации по формуле:

$$P = \frac{i_{\max} - i_{\min}}{i_{\max} + i_{\min}},$$

где  $i_{\max}$ ,  $i_{\min}$  – максимальное и минимальное значения фототоков, регистрируемых микроамперметром.

4. Построить график зависимости  $P = f(\beta)$ .

### Упражнение 4. Исследование зависимости степени поляризации света, прошедшего через стопу Столетова от угла наклона ее к падающему лучу

1. С оптического рельса убрать платформу с диэлектрическим зеркалом.
2. Разместить на рельсе 5 осветитель 1, анализатор 3 и фотоэлемент 4, как указано на рисунке 5.7, б).
3. Перед осветителем в специальном держателе с устройством отсчета углов вместо поляризатора 2 закрепить стопу Столетова.
4. Поворачивая стопу вокруг вертикальной оси через  $5^\circ$ , измерить, как и в предыдущем упражнении,  $i_{\max}$  и  $i_{\min}$  и для каждого угла определить степень поляризации  $P$ .
5. Построить график зависимости  $P = f(\beta)$ .

### Упражнение 5. Определение степени поляризации излучения газового лазера

1. На оптический рельс 5 вместо осветителя 1 поместить газовый лазер, а также анализатор 3 вместе с фотоэлементом 4 (рисунок 5.7, а).
2. Вращая анализатор вокруг своей оси, измерить  $i_{\max}$  и  $i_{\min}$ .
3. По формуле 
$$P = \frac{i_{\max} - i_{\min}}{i_{\max} + i_{\min}}$$
 вычислить степень поляризации и убедиться в том, что излучение газового лазера линейно поляризовано.

### Упражнение 6. Определение степени поляризации естественного света

1. С оптического рельса 5 (рисунок 5.7, а)) убирают газовый лазер, оставляя только анализатор 3 вместе с фотоэлементом 4.
2. Направить на анализатор естественный свет (из окна аудитории). Подобрать освещённость таким образом, чтобы показания миллиамперметра находились вблизи максимального значения измерительной шкалы.
3. Вращая анализатор, измерить  $i_{\max}$  и  $i_{\min}$ .
4. По формуле 
$$P = \frac{i_{\max} - i_{\min}}{i_{\max} + i_{\min}}$$
 вычислить степень поляризации и убедиться в том, что она близка к значению «0».

## Лабораторная работа 10

### Изучение явления вращения плоскости поляризации света

**Цель работы:** изучить метод поляриметрических измерений; определить зависимости удельного вращения от длины волны концентрации сахара в растворах.

**Приборы и принадлежности:** круговой поляриметр (сахариметр) СМ-3, набор светофильтров, растворы сахара различных концентраций.

**Описание установки.** Для наблюдения вращения плоскости поляризации используется круговой поляриметр СМ-3, принцип работы

которого следующий: излучение осветителя, пройдя светофильтр, попадает на поляризатор, представляющий собой призму Николя. Затем, пройдя трубку с исследуемым оптически активным веществом (раствором сахара), попадает на анализатор. При повороте анализатора в окуляре можно наблюдать изменение освещенности поля зрения, которая характеризует интенсивность прошедшего излучения.

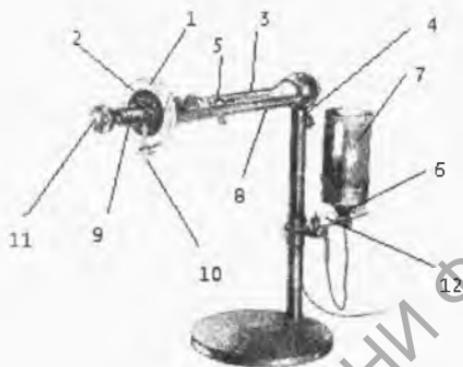


Рисунок 5.9 – Общий вид поляриметра СМ-3

Осветитель 7 (рисунок 5.9), держателем 6 прикреплен к штанге 4. Включив осветитель 7 в сеть переменного тока тумблером 12, через окуляр 11 прибора наблюдают фотометрическое поле. Вращением муфты 9 устанавливают окуляр так, чтобы видеть резкое изображение разделяющих линий тройного поля. После этого вращением фрикциона 10 поворачивают анализатор и добиваются равномерно затемнения поля зрения (рисунок 5.10). Незначительное вращение фрикциона вызывает резкое изменение освещенности наблюдаемых частей поля.

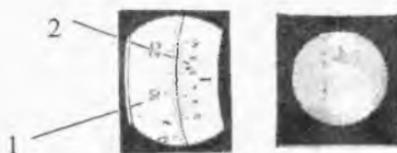


Рисунок 5.10 – Изображение в окуляре поляриметра

Установив равномерную затемнённую тройного поля зрения в отсутствии трубки с раствором сахара в пенале 3, делают отсчет лимба 1 по нониусу 2 ( $\varphi_0$ ) следующим образом: определяют, на сколько полных градусов повернут нуль нониуса 2 по отношению к лимбу 1. Затем по штриху нониуса, совпадающему с градусным штрихом лимба, отсчитывают доли градуса.

Оцифровка нониуса 2 следующая: обозначение «2» соответствует  $0,2^\circ$ ; «4» соответствует  $0,4^\circ$  и т. д. Цена деления нониуса  $0,05^\circ$ . К числу градусов, взятых по лимбу, прибавляют отсчет по нониусу и определяют угол  $\varphi_0$ . Установку на равномерную затемнённую тройного поля повторяют пять раз и вычисляют среднее значение  $\langle \varphi_0 \rangle$ .

В пенал 3 прибора помещают трубку с исследуемым раствором сахара 5 и закрывают шторкой 8. Освещенность поля зрения будет другой. Добиваются вновь равномерной затемненности тройного поля зрения вращением фрикцииона 10. Отсчитывают угол  $\varphi$ , повторяют опыт и определяют среднее значение угла  $\langle \varphi \rangle$ .

По средним значениям углов  $\langle \varphi \rangle$  и  $\langle \varphi_0 \rangle$ , определяют угол поворота плоскости поляризации  $\alpha$ :

$$\alpha = \langle \varphi \rangle - \langle \varphi_0 \rangle. \quad (5.8)$$

### Ход работы

1. Установив в поляриметре трубку с исследуемым раствором сахара (например  $C = 5\%$ ), меняя светофильтры на пути излучения осветителя 1, определить угол поворота плоскости поляризации  $\alpha$  для различных длин волн (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Таблица маркировки светофильтров

Маркировка	СС – 2	СЗС – 3	ОС – 11	ОС – 13	КС – 10
Длина волны $\lambda$ , нм	400	485	535	565	640

2. По формуле  $\alpha_0 = \frac{\alpha}{l \cdot C}$  определить удельное вращение  $\alpha_0$  выбранного раствора сахара. Для расчета  $\alpha_0$  в град/см концентрацию раствора выразить в процентах; в эксперименте используются трубки длиной  $l = 19$  см. Результаты занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Зависимость удельного вращения  $\alpha_0$  (град/см) для раствора сахара ( $C = 5\%$ ) от длины волны  $\lambda$  (нм)

№ п/п	$\lambda_1 = \dots$		$\lambda_2 = \dots$		$\lambda_3 = \dots$		$\lambda_4 = \dots$	
	$\alpha_0$	$\langle \alpha_0 \rangle$						
1								
2								
3								
4								
5								

3. По данным таблицы 5.2 построить графики зависимости:

$$\langle \alpha_0 \rangle = f(\lambda) \quad \text{и} \quad \langle \alpha_0 \rangle = f\left(\frac{1}{\lambda^2}\right).$$

4. Определить углы вращения плоскости поляризации для четырёх различных растворов сахара с концентрациями  $C_1, C_2, C_3, C_4$  для длины волны  $\lambda = 535$  нм (светофильтр ОС – 11) и одного-двух растворов с неизвестной концентрацией  $C_x$ . Результаты занести в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 – Зависимость угла вращения плоскости поляризации  $\alpha$  (град/см) от концентрации раствора сахара  $C$

№ п/п	Концентрация									
	$C_1 = 5\%$		$C_2 = 10\%$		$C_3 = 15\%$		$C_4 = 20\%$		$C_x$	
	$\alpha$	$\langle \alpha \rangle$	$\alpha$	$\langle \alpha \rangle$						
1										
2										
3										
4										
5										

Построить график зависимости  $\langle \alpha \rangle = f(C)$  и с помощью графика определить неизвестную концентрацию  $C_x$  раствора сахара.

## Тема 6. Дисперсия света

### Основные понятия по теме

*Дисперсия света* (разложение света) – это явление зависимости абсолютного показателя преломления вещества от длины волны (или частоты) света (частотная дисперсия), или, что то же самое, зависимость фазовой скорости света в веществе от длины волны (или частоты). Дисперсия экспериментально открыта Ньютоном в 1672 году, однако теоретически достаточно хорошо объяснена значительно позднее.

Один из самых наглядных примеров дисперсии – разложение белого света при прохождении его через призму (опыт Ньютона). Физической причиной дисперсии является неодинаковая скорость распространения лучей света с различной длиной волны в прозрачном веществе – оптической среде (тогда как в вакууме скорость света всегда одинакова, независимо от длины волны и, следовательно, цвета). Обычно чем больше частота волны, тем больше показатель преломления среды и тем меньше скорость распространения волны в среде.

Однако в некоторых веществах (например в парах йода) наблюдается эффект аномальной дисперсии, при котором угол преломления лучей синей области видимого спектра меньше, чем красной. Аномальная дисперсия наблюдается практически у всех газов на частотах вблизи линий поглощения. У паров йода эта частота лежит в области видимого спектра, поэтому она более удобна для наблюдения.

Дисперсия света позволила впервые вполне убедительно показать сложную природу «белого» света.

«Белый» свет разлагается в спектр и в результате прохождения через дифракционную решётку или отражения от нее (это не связано с явлением дисперсии, а объясняется природой дифракции). Дифракционный и призматический спектры отличаются: призматический спектр сжат в красной части и растянут в фиолетовой и располагается в порядке убывания длины волны: от красного к фиолетовому; дифракционный спектр – равномерный во всех областях и располагается в порядке возрастания длин волн: от фиолетового к красному.

По аналогии с дисперсией света, также дисперсией называются и сходные явления зависимости скорости распространения волн любой другой природы от длины волны (или частоты).

Дисперсия является причиной хроматических aberrаций – одних из aberrаций оптических систем, в том числе фотографических и видео-объективов.

Коши предложил эмпирическую формулу, выражающую зависимость показателя преломления от длины волны:

$$n = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} + \dots,$$

где  $\lambda$  – длина волны света в вакууме;

$a, b, c$  – некие эмпирические константы.

Рассмотрим луч света, распространяющийся симметрично через стеклянную призму, т. е. преломленный на первой границе раздела луч распространяется параллельно основанию в равнобедренной призме и выходит из призмы под углом  $\delta$  к первоначальному направлению (рисунок 6.1).

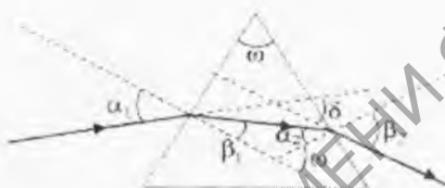


Рисунок 6.1 – Ход луча в призме

Если  $\omega$  – преломляющий угол призмы, то из геометрических соображений  $\omega = \beta_1 + \alpha_2$  и  $\delta = \alpha_1 - \beta_1 + \beta_2 - \alpha_2 = \alpha_1 + \beta_2 - \omega$ . Тогда для симметричного хода луча получим:

$$\beta_1 = \frac{\omega}{2};$$

$$\alpha_1 - \beta_1 = \beta_2 - \alpha_2 = \frac{\delta}{2};$$

$$\alpha_1 = \beta_1 + \frac{\delta}{2} = \frac{\omega}{2} + \frac{\delta}{2}.$$

Используя полученные соотношения совместно с законом преломления  $n = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = \frac{\sin \beta_2}{\sin \alpha_2}$ , можно получить выражение для определения показателя преломления:

$$n = \frac{\sin(\omega/2 + \delta/2)}{\sin(\omega/2)}. \quad (6.1)$$

Для малых углов падения ( $\sin \alpha \approx \alpha$ ) из формулы (6.1) можно получить соотношение:

$$\delta = (n - 1) \omega.$$

На практике коэффициент преломления материала призмы и зависит от длины волны света  $\lambda$ , так что угол  $\delta$ , под которым призма преломляет свет, будет также зависеть от длины волны. Величина, которая характеризует преломляющие свойства оптической системы, называется *угловой дисперсией*  $D$  и определяется как

$$D = \frac{d\delta}{d\lambda} = \frac{d\delta}{dn} \cdot \frac{dn}{d\lambda}. \quad (6.2)$$

Взяв производную по  $\delta$  от выражения (6.1), можем найти первый сомножитель в правой части уравнения (6.2):

$$\frac{dn}{d\delta} = \frac{\cos(\omega/2 + \delta/2)}{2 \sin(\omega/2)}. \quad (6.3)$$

Соответственно выражение для угловой дисперсии  $D$  может быть представлено в виде:

$$D = \frac{2 \sin(\omega/2)}{\cos(\omega/2 + \delta/2)} \cdot \frac{dn}{d\lambda} = \frac{2 \sin(\omega/2)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(\omega/2)}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}. \quad (6.4)$$

### Вопросы для самоконтроля

1. Что такое дисперсия света?
2. Чем отличаются нормальная и аномальная дисперсии?
3. В чём суть опыта Ньютона?
4. Каким образом можно наблюдать дисперсию?
5. Изобразите схему симметричного хода лучей в призме.
6. Получите формулу для угла отклонения луча призмой.

7. В чём различие дифракционного и призматического спектров?
8. Какие величины связывает формула Коши для дисперсии?
9. Что такое линейная и угловая дисперсии?
10. Запишите выражение для угловой дисперсии призмы.

## Лабораторная работа 11

### Определение средней дисперсии и показателя преломления вещества с помощью рефрактометра ИРФ-454

**Цель работы:** определить показатели преломления жидких и твердых веществ и среднюю дисперсию вещества.

**Приборы и принадлежности:** рефрактометр ИРФ-454, объективный микроскоп, набор образцов.

**Описание установки.** Рефрактометр ИРФ-454 (рисунок 6.2) состоит из корпуса 1, осветительной призмы 2, измерительной призмы 3, окуляра 4, компенсатора, вращающегося с помощью маховичка 5.

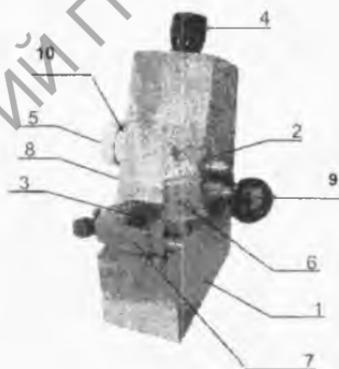


Рисунок 6.2 – Внешний вид рефрактометра ИРФ-454

Подсветка призм осуществляется зеркалами 6 и 7. Нахождение границы раздела света и тени и совмещение ее с перекрестием сетки осуществляется разворотом зеркала и шкалы вращением маховичка 8, Подсветку производят зеркалом 9.

Компенсатор состоит из двух призм прямого зрения (призм Амичи). Маховичком 5 призмы Амичи поворачиваются одновременно в разные стороны. При этом изменяется угловая дисперсия компенсатора и устраняется окрашенность границы раздела света и тени. Вместе с маховичком 5 вращается и шкала 10, с которой снимается отсчет для определения дисперсии призмы. Поворот маховичка 5 на одно деление шкалы определяют по нониусу. Одно деление нониуса соответствует повороту призм Амичи на  $0,3^\circ$ .

Рефрактометр ИРФ-454 служит для быстрого определения показателя преломления жидких и твердых тел. Оптическая схема рефрактометра представлена на рисунке 6.3.

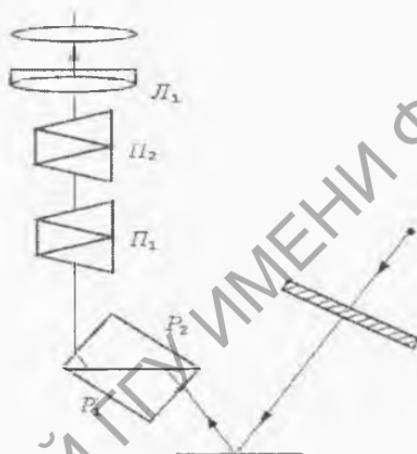


Рисунок 6.3 – Оптическая схема рефрактометра

Основной его частью являются две стеклянные прямоугольные призмы  $P_1$  и  $P_2$ , изготовленные из стекла с большим показателем преломления. В разрезе призмы имеют вид прямоугольных треугольников, обращенных друг к другу гипотенузами; зазор между призмами имеет ширину около 0,1 мм и служит для помещения исследуемой жидкости.

Окрашенность границы раздела света и тени устраняется вращением призм Амичи  $П_1$  и  $П_2$ . Наблюдение производят через окуляр  $L_1$ .

Ход лучей при работе по методу скользящего луча изображен на рисунке 6.4.

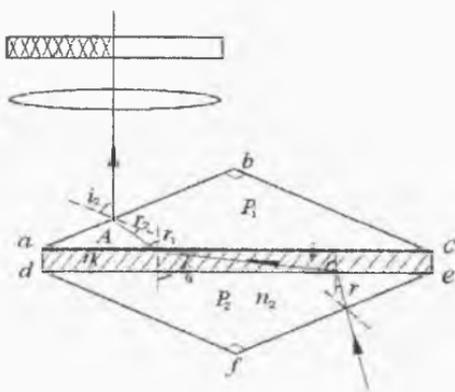


Рисунок 6.4 – Ход лучей в призмах при работе по методу скользящего луча

Свет проходит через призму  $P_2$  и через матовую грань  $ed$  попадает в жидкость. Рассеянный матовой поверхностью свет проходит в слой жидкости и под всевозможными углами ( $0^\circ \leq i \leq 90^\circ$ ) падает на поверхность  $ac$  призмы  $P_1$ . Обозначим угол падения на границе раздела  $ed$  стекла и жидкости через  $r$ , а угол преломления через  $i$  (рисунок 6.4). Так как луч падает из более плотной среды в менее плотную, то угол преломления  $i > r$ . При увеличении угла  $r$  будет возрастать, и угол преломления  $i$  и, наконец, при некотором строго определенном для данных сред угле падения  $r = r_{кр}$ , станет равным  $i = 90^\circ$ . Наступит полное внутреннее отражение. Все лучи, падающие под углами  $r < r_{кр}$ , пройдут через слой жидкости, призму  $P_1$  и сформируют освещенную часть поля зрения. При падении лучей под углом  $r > r_{кр}$  свет отразится в первую среду и не попадет в призму  $P_1$ . Эта часть поля зрения в окуляре будет затемнена. Применим для этого случая закон преломления света

$$\frac{\sin r_{кр}}{\sin 90^\circ} = \frac{n_{ж}}{n_c}, \quad (6.5)$$

где  $n_c$  – показатель преломления стекла;

$n_{ж}$  – показатель преломления жидкости;

$r_{кр}$  – угол полного внутреннего отражения.

Из соотношения (6.5) находим показатель преломления жидкости. Так как  $\sin 90^\circ = 1$ , то

$$n_{xc} = n_c \sin r_{xp}. \quad (6.6)$$

Показатель преломления стекла  $n_c$  – величина постоянная. Поэтому для разных жидкостей будет разный предельный угол полного внутреннего отражения. Граница раздела света и тени соответствует этому случаю. И если мы совмещаем границу раздела света и тени с перекрестием, наблюдаемым в окуляре рефрактометра, то мы автоматически выполняем условие (6.6). На этом принципе и основано определение показателей преломления жидкостей.

Рефрактометр ИРФ-454 можно использовать и для определения показателей преломления твердых тел. Используемый образец должен иметь плоскую полированную поверхность. Этой поверхностью он прижимается к гипотенузе  $de$  призмы  $P_2$  (призма  $P_1$  при этом случае отклоняется в сторону). Для обеспечения оптического контакта в зазор между соприкасающимися поверхностями вводится тонкий слой иммерсионной жидкости, показатель преломления которой удовлетворяет условию:  $n_1 \leq n \leq n_2$ . При выполнении этого условия наличие слоя жидкости не искажает результатов измерений.

Изложенный принцип работы прибора, строго говоря, справедлив лишь в случае, когда свет является монохроматическим. Дисперсия исследуемого вещества и стекла призмы приводит к тому, что величины предельных углов  $r'$  и  $i'_2$  зависят от длины волны  $\lambda$ . При работе с белым светом наблюдаемая в поле зрения граница света и тени часто оказывается размытой и окрашенной. Для того, чтобы получить резкое изображение, перед объективом трубы помещают компенсатор с переменной дисперсией. Компенсатор содержит две одинаковые дисперсионные призмы Амичи, каждая из которых состоит из трех склеенных призм, обладающих различными показателями преломления и различной дисперсией. Призмы рассчитываются так, чтобы монохроматический луч с длиной волны  $\lambda = 589,3$  нм (среднее значение длины волны желтого дублета натрия) не испытывал отклонений. Лучи с другими длинами волн отклоняются призмой в ту или иную сторону. В зависимости от взаимной ориентации призмы дисперсия компенсатора изменяется в пределах от 0 до удвоенного значения дисперсии одной призмы.

Мерой дисперсии помещенного на призму образца служит поворот одной призмы компенсатора относительно другой до полного устранения окрашенности границы раздела света и тени. Снимают отсчет  $Z$  целых градусов по барабану маховичка 5 и десятых долей градуса по нониусу.

Используя таблицы В1 и В2 из приложения В пособия, для данного показателя преломления образца определяют коэффициенты А и В. Для измеренного Z и поправок А и В находят  $\sigma$ .

По найденным величинам А, В и  $\sigma$  вычисляют разность показателей преломления  $\Delta n$

$$\Delta n = n_f - n_c = A + \sigma B. \quad (6.7)$$

Среднее значение дисперсии образца определяют по формуле:

$$\frac{\Delta n}{\Delta \lambda} = \frac{A + \sigma B}{\lambda_f - \lambda_c}, \quad (6.8)$$

где  $\lambda_f = 486,1$  нм;  
 $\lambda_c = 656,3$  нм.

## Ход работы

### Упражнение 1. Измерение показателя преломления жидкостей

1. С помощью пипетки поместить между призмами рефрактометра несколько капель исследуемой жидкости (воды).

2. Поворотом зеркал 6 и 9 (рисунок 6.2) добиться хорошей освещенности поля зрения окуляра и шкалы.

3. Вращением маховичка 8 совместить границу раздела света и тени с перекрестием окуляра.

4. Вращением маховичка 5 устранить окрашенность границы света и тени.

5. Через окуляр по шкале определить показатель преломления воды.

6. Тщательно протереть призмы ветошью, так чтобы их поверхность была сухой.

7. Аналогичные измерения провести для раствора сахара, глицерина, трансформаторного масла и определить их показатели преломления. После каждого измерения тщательно протирать призмы ветошью или ватой, смоченной спиртом.

### Упражнение 2. Определение показателей преломления твердых тел

1. Между призмами поместить несколько капель иммерсионной жидкости, на нее положить пластинку из стекла и прижать призмой.

В качестве иммерсионной жидкости используют трансформаторное масло, у которого показатель  $n_{ж}$  преломления больше показателя преломления стеклянной пластинки  $n_c$ , но меньше показателя преломления призмы  $n_{пр}$ ,  $n_c < n_{ж} < n_{пр}$ .

2. Зеркало 6 (рисунок 6.2) закрыть, а зеркалом 7 подсветить нижнюю грань призмы.

3. Вращением маховичков 5 и 8 устранить окрашенность границы раздела света и тени и совместить её с перекрестием окуляра.

4. По шкале окуляра определить значение показателя преломления пластинки.

5. Аналогичные измерения провести и для других образцов.

### Упражнение 3. Определение средней дисперсии образца

1. Между призмами поместить несколько капель иммерсионной жидкости и положить на нее пластинку из стекла. Определить показатель преломления стекла по методике, описанной в упражнении 2.

2. Совместить перекрестие, наблюдаемое в окуляре, с границей раздела света и тени.

3. Вращая маховичок 5 (рисунок 6.2) по часовой стрелке, добиться исчезновения окрашенности границы раздела света и тени. По шкале барабана маховичка 5 снимают отсчет  $Z$  целых градусов, а по нониусу – десятых долей градуса, взяв за начало отсчета начало шкалы нониуса.

4. Вращением маховичка 5 по часовой стрелке, вновь добиться исчезновения окрашенности границы раздела света и тени. Снять отсчет  $Z$ , взяв за начало отсчета конец шкалы нониуса, то есть отсчет с обратной стороны. Провести по пять таких измерений с каждой стороны нониуса и вычислить среднее значение  $Z$ .

5. Используя таблицу В1, найти коэффициенты А и В.

6. Для измеренного значения  $Z$ , используя таблицу В1, с учетом поправок по таблице В2 находят  $\sigma$ .

7. По формуле (6.7) вычислить разность показателей преломления  $\Delta n$ .

8. Среднее значение дисперсии определить по формуле (6.8). По окончании работы очистить грани призм дистиллированной водой и протереть ватой, смоченной в спирте.

## Тема 7. Поглощение света

### Основные понятия по теме

При прохождении света через вещество он частично поглощается. Среднюю энергию, переносимую через единицу площади за одну секунду, называют *интенсивностью световой волны*  $I$ . Пусть на некоторую среду падает свет интенсивности  $I_0$ . Интенсивность света  $I$ , прошедшего через среду, согласно закону Бугера-Ламберта-Берра (далее, закон Бугера), определяется по формуле

$$I = I_0 e^{-\alpha d}, \quad (7.1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поглощения света;  
 $d$  – толщина слоя вещества.

Таким образом, интенсивность света, прошедшего через вещество, зависит как от толщины слоя, так и от природы и свойств поглощающего вещества.

Поглощение света обусловлено взаимодействием световой волны с атомами и молекулами вещества, через которое проходит свет. Под воздействием электрического поля световой волны  $\vec{E}$  электроны в атомах смещаются относительно ядер, совершая гармонические колебания. Возникают вторичные волны. Падающая волна интерферирует со вторичными волнами, испускаемыми электронами атомов, и порождает волну с амплитудой, не равной амплитуде действующего электрического поля. С энергетической точки зрения наблюдаемое явление поглощения означает, что часть энергии электромагнитной волны идет на увеличение внутренней энергии вещества, через которое проходит свет. Электромагнитная волна переносит энергию, пропорциональную квадрату амплитуды напряженности электрического поля.

Коэффициент поглощения света  $\alpha$  пропорционален молекулярной концентрации  $C$ , т. е.

$$\alpha = \alpha_0 \cdot C, \quad (7.2)$$

где  $\alpha_0$  – коэффициент, характерный для молекулы растворенного вещества, не зависящий от концентрации. Подставляя (7.2) в соотношение (7.1), получим

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha_0 c d}. \quad (7.3)$$

Формула (7.3) является справедливой для растворов и газов малой концентрации (при этом предполагается, что растворитель практически не поглощает свет).

При прохождении монохроматической световой волны через вещество происходит затухание амплитуды волны в поглощающей среде. Затухание амплитуды характеризуется показателем затухания  $\chi$ , который связан с коэффициентом поглощения  $\alpha$  соотношением:

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda_0} n\chi, \quad (7.4)$$

где  $\lambda_0$  – длина волны в вакууме;

$n$  – показатель преломления среды.

Учитывая, что  $\lambda_0 = n\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны в среде, формулу можно переписать в виде:

$$\alpha = \frac{4\pi\chi}{\lambda}. \quad (7.4 \text{ а})$$

Соотношения (7.4) и (7.4 а) показывают, что коэффициент поглощения  $\alpha$  зависит от длины волны. Эта зависимость обуславливает окрашенность растворов.

Поглощение света прозрачными растворами исследуется при помощи колориметров (название прибора происходит от англ. *colour* – цвет) различной конструкции. Измеряя интенсивности падающего и прошедшего света, можно определить концентрацию поглощающего вещества.

Поглощение света в средах характеризуется:

1) коэффициентом светопропускания  $\tau$

$$\tau = \frac{I}{I_0}, \quad (7.5)$$

где  $I_0$  – интенсивность падающего светового потока;

$I$  – интенсивность светового потока, прошедшего через раствор;

2) оптической плотностью вещества  $D$

$$D = \lg \frac{I_0}{I}. \quad (7.6)$$

Связь между коэффициентом светопропускания и оптической плотностью выражается равенством

$$D = \lg \frac{1}{\tau}. \quad (7.7)$$

Коэффициент светопропускания раствора  $\tau$  можно выразить из закона Бугера:

$$\tau = e^{-\alpha d}. \quad (7.8)$$

Соответственно коэффициент поглощения  $\alpha$  равен

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \tau. \quad (7.9)$$

С учетом (7.5), (7.6) и (7.9) зависимость между коэффициентом поглощения  $\alpha$  и оптической плотностью раствора  $D$  определяется следующим образом:

$$\alpha = 2,3 \frac{D}{d}. \quad (7.10)$$

Поглощение света носит резонансный характер. Резонансный вид кривой поглощения определяется структурой атомов и диапазоном частот электромагнитной волны, проходящей через вещество.

На рисунке 7.1 показана кривая поглощения  $\alpha = f(\omega)$  для вещества, в котором молекулы имеют одну собственную частоту колебания (AB – ширина полосы поглощения, определяемая на уровне половины максимального поглощения).

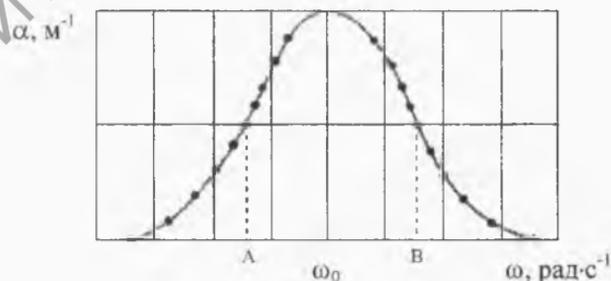


Рисунок 7.1 – Зависимость коэффициента поглощения от частоты колебаний молекулы вещества

## Вопросы для самопроверки

1. Чем обусловлено поглощение растворов?
2. Как формулируется закон Бугера?
3. Как интенсивность света связана с амплитудой световой волны?
4. От чего зависит коэффициент поглощения  $\alpha$ ?
5. Дайте определение понятию оптическая плотность вещества?
6. Как связан коэффициент поглощения с коэффициентом светопропускания?
7. Как коэффициент поглощения  $\alpha$  зависит от длины волны  $\lambda$ ?
8. Как связан коэффициент поглощения  $\alpha$  с оптической плотностью вещества  $D$ ?
9. Почему поглощение света носит резонансный характер?
10. Как определяется ширина полосы поглощения?

## Лабораторная работа 12

### Исследование поглощения света в растворе с помощью колориметра КФК-2

**Цель работы:** определение концентрации вещества окрашенных растворов и проверка закона Бугера-Ламберта-Берра (закона Бугера).

**Приборы и принадлежности:** колориметр фотоэлектрический концентрационный КФК-2, набор кювет, набор прозрачных окрашенных растворов (раствор медного купороса, раствор двуххромовокислого калия).

**Описание установки.** Колориметр фотоэлектрический концентрационный КФК-2 (рисунок 7.2) предназначен для измерения в отдельных участках диапазона длин волн 315–980 нм, выделяемых светофильтрами, коэффициентов пропускания и оптической плотности жидких растворов и твердых тел, а также определения концентрации веществ в растворах методом построения градуировочных графиков.

Колориметр позволяет также производить измерения коэффициентов пропускания рассеивающих взвесей, эмульсий и коллоидных растворов в проходящем свете.

Принцип измерения коэффициента пропускания состоит в том, что на фотоприемник направляются поочередно световые потоки: полный  $F_{0\lambda}$  и прошедший через исследуемую среду  $F_{\lambda}$ , и определяется

отношение этих потоков. Отношение потоков определяет коэффициент пропускания  $\tau$  исследуемого раствора

$$\tau = \frac{F_{\lambda}}{F_{0\lambda}}. \quad (7.11)$$

Это отношение определяется следующим образом: помещают кювету с растворителем или контрольным раствором так, чтобы сквозь них проходил световой пучок. Изменением чувствительности колориметра устанавливают отсчет по шкале коэффициентов пропускания колориметра  $n_1$ , равный 100 делениям. Таким образом, полный световой поток  $F_{0\lambda}$  условно принимается за 100 %. Затем в колориметр помещают кювету с исследуемым раствором. Полученный отсчет  $n_2$  по шкале коэффициентов пропускания колориметра будет соответствовать  $F_{\lambda}$ . Следовательно, коэффициент пропускания исследуемого раствора  $T$ , выраженный в процентах, будет равен  $n_2$ , соответственно

$$\tau = \frac{T}{100} = \frac{n_2}{100}.$$

Оптическая плотность:

$$D = -\lg \frac{F_{\lambda}}{F_{0\lambda}} = -\lg \frac{T}{100} = 2 - \lg T. \quad (7.12)$$

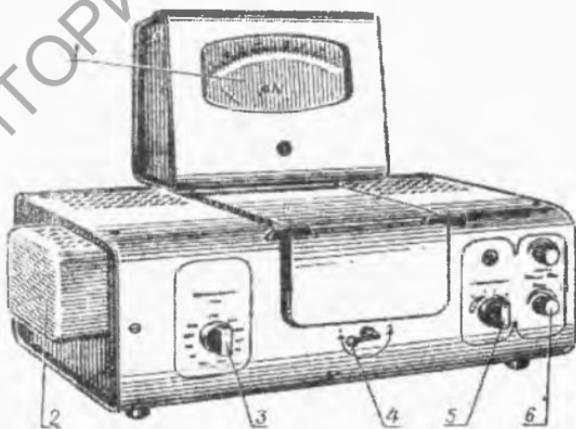


Рисунок 7.2 – Общий вид колориметра КФК-2

Конструктивно колориметр состоит из совокупности следующих узлов. Дадим некоторую их характеристику.

1. *Регистрирующий прибор.* В качестве регистрирующего прибора применен микроамперметр 1 (рисунок 7.2) типа М907 со шкалой, оцифрованной в коэффициентах пропускания  $T$  и оптической плотности  $D$ . На задней стенке крышки микроамперметра имеются гнезда для подключения цифрового вольтметра с пределом измерения 0,1 В.

2. *Осветитель.* Кожух осветителя обозначен на рисунке 2. Конструкция механизма осветителя обеспечивает перемещение лампы в трех взаимно перпендикулярных направлениях для ее правильной установки.

3. *Оправа с оптикой.* В оправу встроены конденсор, диафрагма и объектив.

4. *Светофильтры.* Цветные светофильтры вмонтированы в диск. Светофильтр в световой пучок вводится ручкой 3. Рабочее положение каждого светофильтра фиксируется.

5. *Кюветодержатель.* В кюветодержатель устанавливают кюветы с растворителем или контрольным раствором и помещают его в кюветное отделение. Кюветодержатель устанавливают в кюветное отделение на столик так, чтобы две маленькие пружины находились с передней стороны. Переключение кювет в световом пучке производится поворотом ручки 4 до упора. При открытой крышке кюветного отделения шторка закрывает окно перед фотоприемниками.

6. *Фотометрическое устройство.* В фотометрическое устройство входят: фотоэлемент Ф-26, фотодиод ФД-24К, светоделительная пластинка, усилитель. Включение фотоприемников осуществляется с помощью ручки 5. Ручка 6 служит для калибровки прибора.

### Ход работы

Колориметр включить в сеть за 15 минут до начала измерения. Во время прогрева кюветное отделение должно быть открыто (при этом шторка перед фотоприемниками перекрывает световой пучок).

Установить минимальную чувствительность колориметра. Для этого ручку «чувствительность» установить в положение «1», ручку «установка 100 грубо» – в крайнее левое положение.

Перед измерениями и при переключении фотоприемников проверить установку стрелки на «0» по шкале 1 коэффициентов пропускания  $T$  при открытом кюветном отделении. При смещении стрелки от нулевого положения ее подводят к нулю с помощью потенциометра «нуль» (ручка 6).

## Упражнение 1. Измерение коэффициента пропускания

1. В кюветодержатель поместить кювету с растворителем и исследуемым раствором медного купороса. Закрыть крышку кюветного отделения.

2. Поворотом ручки 3 (рисунок 7.2) установить длину волны светофильтра 315 нм.

3. Ручками «чувствительность» и «установка 100 грубо» и «точно» установите отсчет 100 по шкале колориметра.

4. Затем поворотом ручки 4 кювету с растворителем или контрольным раствором заменить кюветой с исследуемым раствором.

5. Снять отсчет по шкале 1 колориметра, соответствующий коэффициенту пропускания исследуемого раствора в процентах. Для регистрирующего прибора типа М907 отсчет снять по шкале 1 коэффициентов пропускания  $T$  в процентах.

6. Измерение провести 3–5 раз и окончательное значение измеренной величины определить как среднее арифметическое из полученных значений.

7. Установить ручкой 3 длины волн 315, 364, 400, 440, 490, 540, 590, 670, 750 нм и определить для них коэффициент пропускания  $T$ . Построить график зависимости коэффициента пропускания от длины волны, то есть  $T = f(\lambda)$ .

8. При длине волны 540 нм определить коэффициенты пропускания других растворов.

## Упражнение 2. Измерение оптической плотности вещества

1. В кюветодержатель установить кюветы с растворителем и раствором и поместить их в кюветное отделение, закрыв крышку прибора.

2. Установить длину волны 315 нм по методике, описанной в предыдущем упражнении.

3. Затем поворотом ручки 4 (рисунок 7.2) кювету с растворителем или контрольным раствором заменить кюветой с исследуемым раствором.

4. Снять отсчет по шкале 1 колориметра, соответствующий оптической плотности раствора. Для регистрирующего прибора типа М907 отсчет снять по шкале  $D$ .

5. Измерение провести 3–5 раз и окончательное значение измеренной величины определить как среднее арифметическое из полученных значений.

6. Аналогичные измерения провести для длины волны 315, 364, 400, 440, 490, 540, 590, 670, 750 нм.

7. Построить графики зависимости оптической плотности вещества от длины волны, то есть  $D = f(\lambda)$  для измеренных растворов.

### Упражнение 3. Определение неизвестной концентрации вещества

1. По спектральной зависимости  $D = f(\lambda)$ , полученной ранее, определить длину волны, для которой оптическая плотность мало зависит от  $\lambda$ , то есть ход кривой вблизи значения которой примерно параллелен горизонтальной оси. С помощью ручки 3 установить светофильтр с данной длиной волны на колориметре.

2. Залить раствор в кюветы различной длины и определить для них оптическую плотность вещества по методике, описанной в упражнении 2. Для дальнейшей работы используйте кювету, для которой оптическая плотность вещества находится в пределах от 0,3 до 0,6.

3. Наполнить выбранную кювету растворами медного купороса с известной концентрацией и определить для них оптическую плотность  $D$ .

4. По полученным данным построить график зависимости оптической плотности  $D$  от концентрации медного купороса  $C$ , то есть  $D = f(C)$ .

5. Убедиться в линейной зависимости оптической плотности  $D$  веществ от концентрации  $C$ .

## Литература

1. Матвеев, А. Н. Оптика: учеб. / А. Н. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1983. – 363 с.
2. Ландсберг, Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – М.: Наука, 1976. – 926 с.
3. Савельев, И. В. Курс общей физики: учеб. пособие: в 3 т. Т. 3. Оптика / И. В. Савельев. – М.: Наука, 1973. – 528 с.
4. Пёрышкин, А. В. Курс физики: учеб.: в 3 ч. Ч. 3. Оптика / А. В. Пёрышкин. – М.: Просвещение, 1968. – 382 с.
5. Калашников, С. Г. Оптика: учеб. / С. Г. Калашников. – М.: Высшая школа, 1977. – 576 с.
6. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: в 5 т. Т. 4. Оптика / Д. В. Сивухин. – М.: ФИЗМАТЛИТ/МФТИ, 2005. – 792 с.
7. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 4 т. Т. 3. Оптика. Атомная физика. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И. В. Савельев. – М.: ФИЗМАТЛИТ/МФТИ, 1998. – 528 с.
8. Емельянов, В. А. Методы обработки результатов измерений в лаборатории физпрактикума: учеб. пособие / В. А. Емельянов, Д. Г. Лин, В. Ф. Шолох. – Мн.: Бестпринт, 1997. – 90 с.
9. Кравченко, Н. С. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в лабораторном практикуме: учеб. пособие / Н. С. Кравченко, О. Г. Ревинская; Томский политех. ун-т. – Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2011. – 86 с.
10. Самарченко, Д. А. Оптика. Лабораторный практикум (для выполнения на модульных установках): в 3 ч. / Д. А. Самарченко. – М.: МИФИ, 2009. – Ч. 1. – 96 с. Ч. 2. – 272 с. Ч. 3. – 120 с.
11. Семченко, И. В. Лабораторный практикум по оптике : учебно-методическое пособие / И. В. Семченко, С. А. Хахомов; Гом. гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2007. – 223 с.
12. Бойко, А. А. Физика : практикум по одноименному курсу для студ. всех спец. заочной формы обучения : в 3 ч. Ч. 3. : Оптика. Атомная и ядерная физика / А. А. Бойко, Е. С. Петрова, П. С. Шаповалов ; Гом. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, 2011.
13. Маскевич, А. А. Физический практикум по оптике : учеб. пособие / А. А. Маскевич ; Гродн. гос. ун-т им. Я. Купалы – 2001.
14. Бежанова, А. И. Методические указания к лабораторным работам по оптике : в 3 ч. Ч. 1. Геометрическая оптика / А. И. Бежанова, В. Б. Вовк, Г. В. Кулак ; Мозырский гос. пед. ун-т им. И. П. Шамякина, 2006.

15. Квасов, Н. Т. Оптика : учебно-методическое пособие / Н. Т. Квасов, Ю. И. Савилова, Т. А. Зарембовская ; Бел. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники, 2009.

16. Шемяков, Н. Ф. Курс лекций по физике: Волновая и квантовая оптика. Строение атома и ядра [Электронный ресурс] – Красноярск, 2011. – Режим доступа: [http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/Lyahovskiy/u\\_lectures3.pdf](http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/Lyahovskiy/u_lectures3.pdf).

17. Архипкин, В. Г. Лекции по оптике [Электронный ресурс] / В. Г. Архипкин, Г. С. Патрин. – Красноярск, 2006. – Режим доступа: <http://flyonmap.com>.

18. Чумак, В. В. Лекции по курсу «Оптика» [Электронный ресурс] / В. В. Чумак. – Иркутск, 2012. – Режим доступа : <http://medphysics-irk.narod.ru/lect-kef/chumak-lect.html>.

# Приложение А

(обязательное)

## Содержание отчета по лабораторной работе и требования к его оформлению

### Содержание отчета

Отчет должен включать следующие разделы:

1. Титульный лист.
2. Название и цель работы.
3. Перечень приборов и принадлежностей с указанием технических характеристик.
4. Необходимые расчетные формулы для искомых величин и погрешностей с пояснением обозначений.
5. План эксперимента.
6. Ход выполнения работы с расчленением на отдельные упражнения (таблицы с результатами наблюдений, графики и необходимые расчеты).
7. Окончательные результаты измерений и соответствующие выводы.

### Требования к оформлению отчета о лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе выполняется каждым студентом самостоятельно на белой бумаге формата А4 (210x297мм) с одной стороны листа рукописным или машинописным способом. Страницы отчета следует нумеровать арабскими цифрами, соблюдая сквозную нумерацию по всему тексту отчета. При оформлении отчета следует применять стандартизированные единицы физических величин, их наименования и обозначения. Применение в отчете разных систем обозначения физических величин недопустимо.

Формулы, на которые имеются ссылки в тексте, должны нумероваться в пределах раздела арабскими цифрами. Номер формулы должен состоять из номера раздела и порядкового номера формулы, разделенных точкой (например, 2.1).

Результаты измерений для их большей наглядности, рекомендуется оформлять в виде таблиц. Каждая таблица должна иметь заголовок, который помещают над соответствующей таблицей после слова «Таблица». Таблицы должны нумероваться в пределах отчета

арабскими цифрами с указанием порядкового номера таблицы. (Например, таблица 3.1).

Графики и диаграммы должны быть четкими и наглядно иллюстрирующими полученные результаты. Значения величин, связанных изображаемой функциональной зависимостью, следует откладывать на осях координат в виде шкал. Оси координат на графиках и диаграммах следует заканчивать стрелками, указывающими направления возрастания значений величин с указанием их обозначения и размерности. Масштаб выбирается таким, чтобы экспериментальная кривая (прямая) занимала практически всю площадь рисунка, при этом точки не должны сливаться друг с другом. Размер точек должен быть в 3–4 раза больше толщины линии, которая по ним проводится.

В заключении формулируются *выводы* по работе, содержание которых зависит от цели работы. В тех случаях, когда целью работы является изучение каких-либо законов или явлений, в выводах следует написать о том, подтверждаются ли экспериментом рассматриваемые законы (явления). В случае, когда в ходе выполнения лабораторной работы определяются известные константы, в выводах необходимо провести сравнение полученных расчетов с табличными данными. При расхождении теоретических и практических результатов нужно указать возможные причины расхождения.

В выводах следует привести окончательные значения измеренных величин с указанием абсолютных и относительных погрешностей, не забывая при этом указывать размерность этих величин.

Методы обработки результатов измерений описаны в литературе.

## Приложение Б (справочное)

### Таблицы физических величин и их обозначение

Таблица Б1 – Значения фундаментальных констант

Величина	Значение
Скорость света в вакууме	$c = 2,997\,924\,58 \cdot 10^8$ м/с
Постоянная Планка	$h = 6,626\,176 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Дж/м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> ·с
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,854\,187\,82 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 12,566\,370\,614 \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Масса покоя электрона	$m_e = 9,109\,534 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя протона	$m_p = 1,672\,648\,5 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,674\,954\,3 \cdot 10^{-27}$ кг
Отношение массы протона к массе электрона	$m_p/m_e = 1\,836,151\,52$
Элементарный заряд	$e = 1,602\,189\,2 \cdot 10^{-19}$ Кл
Отношение заряда электрона к его массе	$e^-/m_e = 1,758\,804\,7 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Атомная единица массы	1 а.е.м. = $1,660\,565\,5 \cdot 10^{-27}$ кг
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,022\,045 \cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>

### Греческий алфавит

Α α – альфа	Η η – эта	Ν ν – ню	Τ τ – тау
Β β – бета	Θ θ – тэта	Ξ ξ – кси	Υ υ – ипсилон
Γ γ – гамма	Ι ι – йота	Ο ο – омикрон	Φ φ – фи
Δ δ – дельта	Κ κ – каппа	Π π – пи	Χ χ – хи
ε ε – эпсилон	Λ λ – ламбда	Ρ ρ – ро	Ψ ψ – пси
Ζ ζ – дзета	Μ μ – мю	Σ σ – сигма	Ω ω – омега

Таблица Б2 – Международная система единиц (СИ)

Величина		Единица			Определение
		Наименование	Обозначение		
Наименование	Размерность			русское	международное
Длина	l	метр	м	m	<b>Метр</b> – единица длины, равная расстоянию проходимому в вакууме плоской электромагнитной волной за 1/299 792 458 доли секунды.
Масса	m	килограмм	кг	kg	<b>Килограмм</b> – единица массы, равная массе международного прототипа килограмма.
Время	t	секунда	с	s	<b>Секунда</b> – единица времени, равная 9 192 631 770 периодам излучения атома цезия -133.
Сила электр. тока	I	ампер	A	A	<b>Ампер</b> – единица силы электрического тока. А – сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызывал бы между этими проводниками силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.
Количество вещества	v	моль	моль	mol	<b>Моль</b> – единица количества вещества, в которой содержится столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде $C^{12}$ , массой 0,012 кг.
Сила света	J	кандела	кд	cd	<b>Кандела</b> – единица силы света, равная силе света в данном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение частотой 540 ТГц, сила излучения которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср.

Таблица Б3 – Производные единицы СИ, имеющие собственные наименования

Величина	Единица		Выражение производной единицы	
	Наименование	Обозначение	Через другие единицы СИ	Через основные единицы СИ
Частота	герц	Гц		$\text{с}^{-1}$
Сила	ньютон	Н		$\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Давление	паскаль	Па	$\text{Н}/\text{м}^2$	$\text{м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Энергия, работа, кол-во теплоты	джоуль	Дж	$\text{Н} \cdot \text{м}$	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Мощность, поток энергии	ватт	Вт	Дж/с	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$
Световой поток	люмен	лм		$\text{кд} \cdot \text{ср}$
Освещенность	люкс	лк		$\text{м}^{-2} \cdot \text{кд} \cdot \text{ср}$

Таблица Б4 – Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Множитель	Приставка	Обозначение
$1\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{12}$	тера	Т
$1\ 000\ 000\ 000 = 10^9$	гига	Г
$1\ 000\ 000 = 10^6$	мега	М
$1\ 000 = 10^3$	кило	к
$100 = 10^2$	гекто	г
$10 = 10^1$	дека	да
$0,1 = 10^{-1}$	деци	д
$0,01 = 10^{-2}$	санتي	с
$0,001 = 10^{-3}$	милли	м
$0,000\ 001 = 10^{-6}$	микро	мк
$0,000\ 000\ 001 = 10^{-9}$	нано	н
$0,000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-12}$	пико	п
$0,000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-15}$	фемто	ф
$0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-18}$	атто	а

## Приложение В

(справочное)

### Значения коэффициентов

Таблица В1 (а) – Значения коэффициентов А и В для определения средней дисперсии при измерении показателя преломления в пределах  $n = 1,2 - 1,7$  с помощью рефрактометра ИРФ-454

n	A	$\Delta$	B	$\Delta$	n	A	$\Delta$	B	$\Delta$
1,200	0,024 44	-6	0,056 03	-1	1,450	0,023 30	-2	0,048 12	-67
1,210	0,024 38	-6	0,056 02	-3	1,460	0,023 28	-2	0,047 45	-69
1,220	0,024 32	-6	0,055 99	-6	1,470	0,023 26	-2	0,046 76	-74
1,230	0,024 26	-6	0,055 93	-9	1,480	0,023 24	-1	0,046 02	-75
1,240	0,024 20	-6	0,055 84	-11	1,490	0,023 23	-2	0,045 27	-80
1,250	0,024 14	-6	0,055 73	-14	1,500	0,023 21	-1	0,044 47	-83
1,260	0,024 08	-5	0,055 59	-16	1,510	0,023 20	0	0,043 64	-86
1,270	0,024 03	-6	0,055 43	-18	1,520	0,023 20	-1	0,042 78	-91
1,280	0,023 97	-5	0,055 25	-22	1,530	0,023 19	0	0,041 87	-94
1,290	0,023 92	-5	0,055 03	-24	1,540	0,023 19	+1	0,040 93	-98
1,300	0,023 87	-5	0,054 79	-26	1,550	0,023 20	0	0,039 95	-103
1,310	0,023 82	-5	0,054 53	-29	1,560	0,023 20	+1	0,038 92	-107
1,320	0,023 77	-4	0,054 24	-31	1,570	0,023 21	+2	0,378 5	-113
1,330	0,023 73	-5	0,053 93	-34	1,580	0,023 23	+2	0,036 72	-117
1,340	0,023 68	-4	0,053 59	-36	1,590	0,023 25	+3	0,035 55	-122
1,350	0,023 64	-4	0,053 23	-39	1,600	0,023 28	+3	0,034 32	-129
1,360	0,023 60	-4	0,052 84	-42	1,610	0,023 31	+4	0,033 03	-135
1,370	0,023 56	-4	0,052 42	-44	1,620	0,023 35	+4	0,031 68	-143
1,380	0,023 52	-4	0,051 98	-47	1,630	0,023 39	+6	0,030 25	-150
1,390	0,023 48	-3	0,051 51	-50	1,640	0,023 45	+6	0,028 75	-160
1,400	0,023 45	-3	0,051 01	-52	1,650	0,023 51	+8	0,027 15	-169
1,410	0,023 42	-4	0,050 49	-55	1,660	0,023 59	+9	0,025 46	-181
1,420	0,023 38	-2	0,049 94	-58	1,670	0,023 68	+11	0,023 65	-185
1,430	0,023 36	-3	0,049 36	-61	1,680	0,023 79	+13	0,021 70	-211
1,440	0,023 33	-3	0,048 75	-63	1,690	0,023 92	+16	0,019 59	-233
1,450	0,023 30		0,048 12		1,700	0,024 08		0,017 26	

Таблица В1 (6) — Значения коэффициентов А и В для определения средней дисперсии при измерении показателя преломления в пределах  $n = 1,6 - 2,0$  с помощью рефрактометра ИРФ-454

n	A	$\Delta$	B	$\Delta$	n	A	$\Delta$	B	$\Delta$
1,600	0,062 92	-12	0,051 43	+9	1,800	0,061 23	-5	0,048 15	-44
1,610	0,062 80	-10	0,051 52	+6	1,810	0,061 18	-5	0,047 71	-46
1,620	0,062 70	-11	0,051 58	+3	1,820	0,061 13	-4	0,047 25	-49
1,630	0,062 59	-10	0,051 61	0	1,830	0,061 09	-4	0,046 76	-51
1,640	0,062 49	-10	0,051 61	-2	1,840	0,061 05	-4	0,046 25	-54
1,650	0,062 39	-10	0,051 59	-5	1,850	0,061 01	-3	0,045 71	-57
1,660	0,062 29	-9	0,051 54	-8	1,860	0,060 98	-2	0,045 14	-60
1,670	0,062 20	-9	0,051 46	-10	1,870	0,060 96	-3	0,044 54	-63
1,680	0,062 11	-9	0,051 36	-13	1,880	0,060 93	-1	0,043 91	-66
1,690	0,062 02	-9	0,051 23	-15	1,890	0,060 92	-2	0,043 25	-68
1,700	0,061 93	-8	0,051 08	-18	1,900	0,060 90	0	0,042 57	-72
1,710	0,061 85	-8	0,050 90	-20	1,910	0,060 90	-1	0,041 85	-75
1,720	0,061 77	-8	0,050 70	-23	1,920	0,060 89	+1	0,041 10	-79
1,730	0,061 69	-8	0,050 47	-26	1,930	0,060 90	+1	0,040 31	-82
1,740	0,061 61	-7	0,050 21	-28	1,940	0,060 91	+2	0,039 49	-85
1,750	0,061 54	-7	0,049 93	-30	1,950	0,060 93	+2	0,038 64	-89
1,760	0,061 47	-6	0,049 63	-33	1,960	0,060 95	+3	0,037 75	-93
1,770	0,061 41	-6	0,049 30	-36	1,970	0,060 98	+4	0,036 82	-96
1,780	0,061 35	-6	0,048 94	-38	1,980	0,061 02	+5	0,035 86	-101
1,790	0,061 29	-6	0,048 56	-41	1,990	0,061 07	+6	0,034 85	-105
1,800	0,061 23		0,048 15		2,000	0,061 13		0,033 80	

Таблица В2 – Значения коэффициента  $\sigma$  в зависимости от показаний Z шкалы маховичка 5

Z	$\sigma$	$\Delta$	Z	Z	$\sigma$	$\Delta$	Z
0	1,000	-1	60	16	0,669	-40	44
1	0,999		59	17	0,629		43
		-4				-41	
2	0,995		58	18	0,588		42
		-7				-43	
3	0,988		57	19	0,545		41
		-10				-45	
4	0,978		56	20	0,500		40
		-12				-46	
5	0,966		55	21	0,454		39
		-15				-47	
6	0,951		54	22	0,407		38
		-17				-49	
7	0,934		53	23	0,358		37
		-20				-49	
8	0,914		52	24	0,309		36
		-23				-50	
9	0,891		51	25	0,259		35
		-25				-51	
10	0,866		50	26	0,208		34
		-27				-52	
11	0,839		49	27	0,156		33
		-30				-52	
12	0,809		48	28	0,104		32
		-32				-52	
13	0,777		47	29	0,052		31
		-34				-52	
14	0,743		46	30	0,000		30
		-36					
15	0,707		45				
		-38					

Установа адукацыі  
"Гомельскі абласны ўніверсітэт  
імя Францыска Скарыны"  
БІБЛІЯТЭКА

Учебное издание

**Семченко Игорь Валентинович,  
Шершнёв Евгений Борисович,  
Купо Александр Николаевич,  
Грищенко Виталий Владимирович**

## **ОБЩАЯ ФИЗИКА**

### **Оптика**

Практикум

для студентов учреждений высшего образования,  
обучающихся по специальности  
1 – 02 05 04 «Физика и техническое творчество»

Редактор *В. И. Шкредова*  
Корректор *В. В. Калугина*

Подписано в печать 24.01.2014. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 6,3.  
Уч.-изд. л. 6,7. Тираж 25 экз. Заказ 35.

**10539-00**

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/87 от 18.11.2013.  
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.  
Ул. Советская, 104, 246019, Гомель.