

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ЛГПУ»)

Н. В. Корчикова, Ю. В. Тхтелев, А. Г. Сильчева

**ФИЗИКА:
ОБЩАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА
(ОПТИКА)**

Лабораторный практикум

для студентов бакалавриата очной и заочной форм
обучения по направлениям подготовки

44.03.05 Педагогическое образование (с двумя профилями подготовки).

Физика. Математика,

44.03.05 Педагогическое образование (с двумя профилями подготовки).

Физика. Информатика

Луганск
Издательство ЛГПУ
2025

УДК 535 (076.5)
ББК 22.34я73
К70

Р е ц е н з е н т ы :

- Чаленко А. В.** – доцент кафедры физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Луганский государственный университет имени В. Даля», кандидат технических наук, доцент;
- Калайдо А. В.** – доцент кафедры технологий производства и профессионального образования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Луганский государственный педагогический университет», кандидат технических наук, доцент;
- Давыскиба О. В.** – доцент кафедры фундаментальной математики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Луганский государственный педагогический университет», кандидат педагогических наук, доцент.

Корчикова, Н. В., Тхетелев, Ю. В., Сильчева, А. Г.
К70 Физика: общая и экспериментальная физика (оптика) : лабораторный практикум / сост. Н. В. Корчикова, Ю. В. Тхетелев, А. Г. Сильчева ; ФГБОУ ВО «ЛГПУ». – Луганск : Издательство ЛГПУ, 2025 – 120 с.

Пособие содержит краткие теоретические сведения, описание экспериментальных установок и методику проведения измерений, порядок выполнения работ и контрольные вопросы, которые помогут студентам при подготовке, выполнении и сдаче лабораторных работ. Данное издание написано в целях оказания помощи студентам физических специальностей в проведении и осмыслении эксперимента по разделу общей физики «Оптика».

Лабораторный практикум предназначен для студентов очной и заочной форм обучения по направлениям подготовки 44.03.05 Педагогическое образование (с двумя профилями подготовки). Физика. Математика и 44.03.05 Педагогическое образование (с двумя профилями подготовки). Физика. Информатика.

УДК 535 (076.5)
ББК 22.34я73

*Рекомендовано Учебно-методическим советом ФГБОУ ВО «ЛГПУ»
в качестве лабораторного практикума для студентов очной и заочной форм обучения по
направлениям подготовки 44.03.05 Педагогическое образование (с двумя профилями
подготовки). Физика. Математика, 44.03.05 Педагогическое образование
(с двумя профилями подготовки). Физика. Информатика
(протокол № 2 от 21.10.2025 г.).*

© Корчикова Н. В., 2025
© ФГБОУ ВО «ЛГПУ», 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Организация лабораторных занятий по оптике	6
Часть I. Геометрическая оптика	9
Изучение оптических систем.....	9
Лабораторная работа № 1 Юстировка оптических систем.....	29
Лабораторная работа № 2 Определение фокусных расстояний тонких положительных линз	34
Лабораторная работа № 3 Определение фокусного расстояния тонкой отрицательной линзы.....	39
Лабораторная работа № 4 Определение параметров толстой собирающей линзы	43
Лабораторная работа № 5 Изучение параметров двухкомпонентной оптической системы	47
Лабораторная работа № 6 Моделирование оптических инструментов	54
Лабораторная работа № 7 Изучение гониометра. Гониометрический метод измерения углов	60
Лабораторная работа № 8 Изучение монохроматора	68
Часть II. Волновая оптика.....	78
Лабораторная работа № 9 Изучение интерференции света на тонких пленках.....	78
Лабораторная работа № 10 Определение радиуса кривизны линзы и длины световой волны с помощью колец Ньютона	85
Лабораторная работа № 11 Дифракция плоских световых волн на щели (дифракция Фраунгофера)	95
Лабораторная работа № 12 Изучение дифракционной решетки..	102
Лабораторная работа № 13 Проверка закона Малюса	110
Заключение.....	116
Рекомендуемая литература	117

ВВЕДЕНИЕ

Современное педагогическое образование требует от будущих учителей глубокого понимания фундаментальных физических явлений, а также уверенных практических навыков проведения экспериментов и использования лабораторного оборудования. Раздел оптики занимает особое место в курсе общей и экспериментальной физики: он не только формирует целостное представление о природе света и его взаимодействии с веществом, но и служит базой для изучения широкого спектра дисциплин – от астрономии до современных технологий лазерной обработки материалов и оптических приборов.

Предлагаемый лабораторный практикум предназначен для студентов направления подготовки 44.03.05 Педагогическое образование (с двумя профилями подготовки), обучающихся по профилям «Физика. Математика» и «Физика. Информатика». Оно может быть полезно как при аудиторных занятиях, так и для самостоятельной подготовки, выполнения лабораторных работ и проектных заданий.

В пособии представлено тринадцать лабораторных работ, охватывающих ключевые разделы курса «Общая и экспериментальная физика (оптика)». Каждая работа включает теоретическое обоснование, описание оборудования, пошаговую инструкцию выполнения эксперимента, таблицы для фиксации результатов, а также контрольные вопросы для самопроверки.

Основные задачи пособия:

- систематизация теоретических знаний по геометрической и физической оптике;
- формирование практических навыков юстировки и настройки оптических систем, проведения измерений и обработки экспериментальных данных;

– развитие исследовательских компетенций студентов, умения планировать и проводить эксперименты;

– подготовка к дальнейшей профессиональной деятельности учителя физики и информатики, включающей проведение лабораторных работ в школе.

Пособие ориентировано на поэтапное освоение материала: от базовых понятий и экспериментов по юстировке оптических систем до моделирования сложных приборов (микроскопов, зрительных труб) и освоения современных методов измерения оптических параметров.

ОРГАНИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ ПО ОПТИКЕ

Перед работой в лаборатории оптики студент обязан пройти общий инструктаж по технике безопасности и инструктаж на рабочем месте.

Подготовка студента к выполнению лабораторного эксперимента

Подготовка студента к выполнению лабораторного эксперимента осуществляется в два этапа.

1 этап – внеаудиторная подготовка. На этом этапе студент должен изучить теоретические основы лабораторного эксперимента по методическим указаниям и рекомендованной литературе.

2 этап – подготовка в лаборатории. На этом этапе студент должен ознакомиться с устройством прибора (установки) и правилами обращения с ними, разработать целесообразную таблицу для записи результатов.

Выполнение лабораторного эксперимента

С целью сохранения оборудования и успешного выполнения лабораторного эксперимента студент проходит краткое собеседование. Для допуска к проведению эксперимента необходимо знать:

- 1) цель работы;
- 2) сущность физических явлений и свойств объектов, изучаемых в ходе эксперимента; вывод расчетных формул;
- 3) устройство, принцип действия приборов и правила работы с ними; схему экспериментальной установки; ответы на контрольные вопросы.

Получив советы и разрешение преподавателя, студент самостоятельно приводит экспериментальную установку в рабочее состояние и убеждается в нормальном ее

функционировании, проводит все необходимые измерения в количестве, достаточном для оценки погрешности эксперимента, выполняет расчеты, оформляет отчет и представляет его преподавателю.

В тех случаях, когда студент не закончил оформление отчета, он предъявляет результаты прикидочных расчетов преподавателю (который их визирует) и с его разрешения завершает оформление отчета вне аудитории.

Отчет о лабораторном эксперименте

Отчет о лабораторном эксперименте должен содержать: название и цель эксперимента, расчетные формулы, оптическую схему установки (прибора), таблицу с результатами, графики (на миллиметровой бумаге), конечный результат и краткие выводы.

В ходе собеседования по результатам эксперимента студент должен показать понимание сущности физических явлений и законов, используемых в лабораторной работе, умение выводить расчетные формулы, знание оптической схемы прибора (установки) и функционального назначения его элементов, умение представлять результаты измерений в соответствии с требованиями ГОСТа, умение анализировать результаты и делать обоснованные выводы.

Примечания:

1. При обработке результатов эксперимента, сначала решить, с какими погрешностями (случайными, систематическими или промахами) придется иметь дело и использовать соответствующую методику расчета погрешностей.

2. При обработке следить за тем, чтобы точность результатов измерений соответствовала точности измерительных приборов.

3. Использовать стандартную форму записи чисел.

4. Пользоваться целесообразными функциональными шкалами при построении графиков.

5. Цену деления выражать (по возможности) целыми числами.

6. Согласовывать точность измерений и отсчетов по графику.

7. Для рационального использования поля графика оцифровку по осям координат начинать со значений, немного меньших тех, которые получены во время эксперимента.

ЧАСТЬ I. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Геометрическая оптика

Геометрические методы построения изображений в оптических системах составляют содержание геометрической (лучевой) оптики. Являясь предельным случаем волновой оптики, геометрическая оптика оперирует понятиями отдельных световых лучей, подчиняющихся законам отражения и преломления и независимых друг от друга. Луч – геометрическая линия, направление которой определяет направление переноса световой энергии.

В геометрической оптике каждая светящаяся точка источника рассматривается как вершина расходящегося пучка лучей, называемого гомоцентрическим (имеющим общий центр). Если после прохождения оптической системы пучок остается гомоцентрическим, то его центр является изображением светящейся точки. При сохранении гомоцентричности каждая точка источника дает одну точку изображения. Системы, в которых сохраняется гомоцентричность пучков, называются идеальными. Реальная система может рассматриваться как идеальная лишь для лучей, называемых параксиальными, которые падают, отражаются и преломляются под столь малыми углами к оси симметрии, что для них справедливы приближенные соотношения

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi \approx \varphi .$$

Поэтому при построении изображений в геометрической оптике рассматривается ход лишь параксиальных лучей.

Световые лучи, используемые для построения изображений, подчиняются принципу взаимности (обратимости), в силу которого изображение можно рассматривать как источник, а источник – как изображение.

Для гомоцентрических пучков точечный источник и его изображение называют сопряженными точками. Сопряженными называют также лучи, идущие от источника до прохождения оптической системы, и соответствующие лучи, образующие изображение. Принцип взаимности справедлив для всех задач, связанных с построением изображений и решаемых методом геометрической оптики.

Преломление лучей на сферической границе раздела двух сред. Одним из основных элементов любой оптической системы является сферическая поверхность раздела двух сред с показателями преломления n_1 и n_2 (рис. 1), а основными процессами – отражение и преломление световых лучей на этой границе. На рис. 1 показан ход одного из лучей гомоцентрического параксиального пучка, падающего от точечного источника S_1 , на сферическую поверхность раздела двух сред. При выводах всех расчетных соотношений отрезки, которые отсчитываются от точки P (полюса поверхности) – положительные в направлении луча и отрицательные против хода лучей. Аналогично, вертикальные отрезки считаются положительными, если они расположены над осью симметрии, и отрицательными в противном случае.

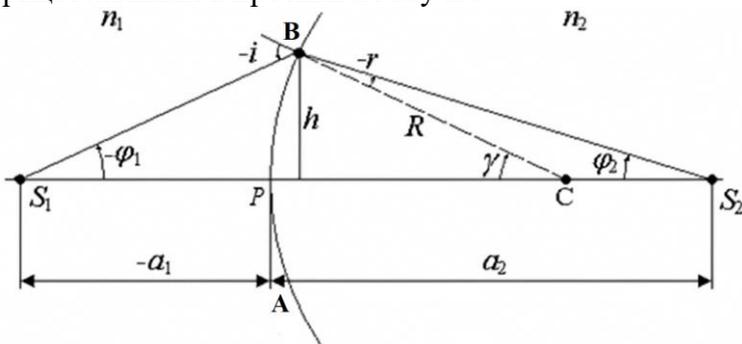


Рисунок 1 – Падение луча на сферическую поверхность

Такой подход позволяет получать выражения, одинаково пригодные как для выпуклых сферических

поверхностей (поверхность положительной кривизны), так и для вогнутых (поверхность отрицательной кривизны).

Из треугольников S_1BC и CBS_2 следует

$$\frac{S_1C}{\sin i} = \frac{R}{\sin \varphi_1} \quad (1)$$

и

$$\frac{R}{\sin \varphi_2} = \frac{S_2C}{\sin r}. \quad (2)$$

Разделив (2) на (1) и учитывая, что $S_1C = R - a_2$, $S_2C = a_2 - R$, а также закон преломления, получаем:

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{a_2 - R}{R - a_1}.$$

Т.к. для параксиальных лучей $\varphi_1 \approx \frac{h}{S_1B} \approx \frac{h}{S_1P} = -\frac{h}{a_1}$, а

$$\varphi_2 \approx \frac{h}{S_2B} \approx \frac{h}{S_2P} = -\frac{h}{a_2}, \text{ то } \frac{n_2}{n_1} = \frac{R - a_1}{-a_1} \cdot \frac{a_2}{a_2 - R}, \text{ или}$$

$$n_1 \left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{R} \right) = n_2 \left(\frac{1}{a_2} - \frac{1}{R} \right) = Q. \quad (3)$$

Как видно из (3), величина Q сохраняет свое значение при переходе луча из одной среды в другую и называется нулевым инвариантом Аббе. Поскольку Q не зависит от h (следовательно, и от φ), все параксиальные лучи гомоцентрического пучка после преломления пересекутся в точке S_2 .

Выражение (3) можно записать в виде

$$-\frac{n_1}{a_1} + \frac{n_2}{a_2} = \frac{n_2 - n_1}{R}. \quad (4)$$

Величина $\Phi = \frac{n_2 - n_1}{R}$ носит название оптической силы преломляющей поверхности.

$$\text{При } a_2 \rightarrow \infty \quad a_1 = \frac{n_1 \cdot R}{n_2 - n_1} = f ,$$

$$\text{при } a_2 \rightarrow -\infty \quad a_2 = n_2 R / (R_2 - n_1) = f' .$$

Величины f и f' характеризуют преломляющую поверхность и называются передним и задним фокусными расстояниями соответственно: точки F , и F' – передний и задний фокусы (см. рис. 2).

Формула тонкой линзы. Линза (прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями) считается идеальной, если она точечный источник изображает в виде точки. Прямая, на которой находятся центры сферических поверхностей, называется главной оптической осью линзы.

Прохождение световых лучей через идеальную линзу можно рассматривать как последовательное преломление на двух сферических поверхностях. Пусть S_1 – точечный источник света, расположенный на главной оптической оси в среде с показателем преломления n_1 ; n_2 – показатель преломления среды за линзой, n_3 – показатель преломления материала линзы (рис. 3).

Тогда S_3 – изображение источника S_1 – получаемое в результате преломления лучей на первой сферической поверхности, разделяющей среды с n_1 и n_3 . Изображение S_3 является объектом для второй преломляющей поверхности, разделяющей среды с показателями преломления n_3 и n_2 . Изображение этого объекта находится в точке S_2 , которая и является изображением точки S_1 в результате последовательного преломления лучей на двух оптических поверхностях.

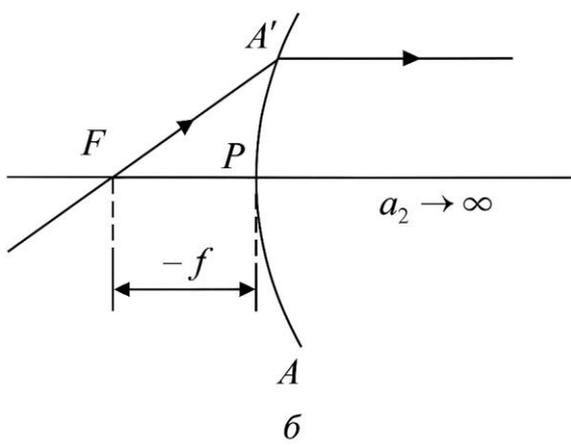
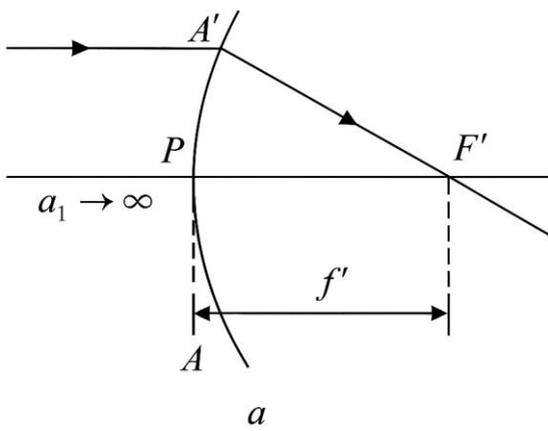


Рисунок 2 – Передние и задние фокусы

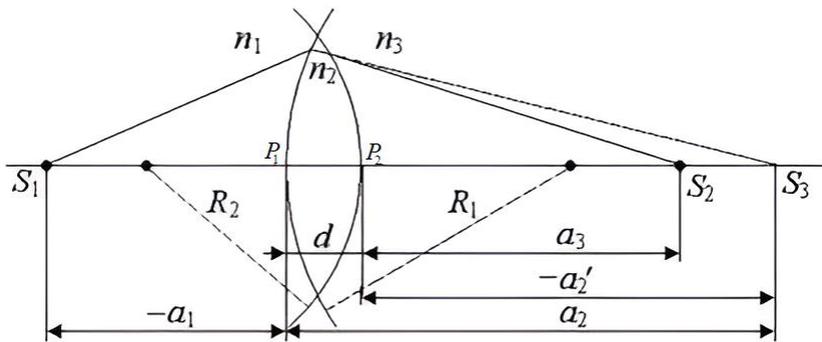


Рисунок 3 – Ход лучей через идеальную линзу

Применяя нулевой инвариант Аббе для первой и второй сферических поверхностей, получаем

$$-\frac{n_1}{a_1} + \frac{n_3}{a_3} = \frac{n_3 - n_1}{R_1}, \quad (5)$$

$$-\frac{n_3}{a'_3} + \frac{n_2}{a_2} = \frac{n_2 - n_3}{R'_2}, \quad (6)$$

причем $a'_3 = a_3 - d$, где d – толщина линзы. Для тонких линз $a'_3 = a_3 - d$, поэтому $a'_3 \approx a_3$. Складывая (5) и (6), получаем

$$-\frac{n_1}{a_1} + \frac{n_2}{a_2} = \frac{n_3 - n_1}{R_1} + \frac{n_2 - n_3}{R_2} = \Phi, \quad (7)$$

где Φ – оптическая сила линзы.

Если $\Phi > 0$, то линза собирающая (положительная); если $\Phi < 0$ – линза рассеивающая (отрицательная). Из определения переднего и заднего фокусов следует

$$f = -\frac{n_1}{\Phi}; \quad f' = -\frac{n_2}{\Phi}. \quad (8)$$

Учитывая (8), выражение (7) можно записать в виде

$$\frac{f}{a_1} + \frac{f}{a_2} = 1 \quad \text{или} \quad -\frac{n_1}{a_1} + \frac{n_2}{a_2} = \Phi. \quad (9)$$

Если среда по обе стороны линзы одинакова $n_1 = n_2$, то $|f| = f'$ и формула тонкой линзы принимает вид

$$-\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f'}. \quad (10)$$

Идеальные оптические системы. Гаусс (1841 г.) дал общую теорию идеальных оптических систем, в которой всякой точке (линии, поверхности) пространства объектов соответствует точка (линия, поверхность) в пространстве изображений. Теория Гаусса устанавливает ряд кардинальных точек и плоскостей, задание которых полностью определяет все свойства оптической системы, не рассматривая реального хода лучей в системе. При этом считается, что в такой системе гомоцентрический парааксиальный пучок остается гомоцентрическим при произвольном числе преломлений и отражений. Последнее выполняется для центрированных систем, в которых центры всех сферических поверхностей лежат на одной прямой, являющейся осью симметрии и называемой главной оптической осью системы.

В сложной оптической системе (рис. 4) имеются две плоскости MM' и NN' , называемые главными, сопряженным точкам которых соответствует линейное поперечное увеличение $V = \frac{R_2' H_2'}{R_1 H_1} = +1$. Свойства главных плоскостей

следующие:

1) параллельный пучок, входящий в систему, собирается в фокусе F_2' , отстоящем от задней NN' главной плоскости на расстояние f_2' ;

2) параллельный пучок, входящий в систему с противоположной стороны, собирается в переднем фокусе F_1 , отстоящем от передней главной плоскости MM' на расстояние f_1 .

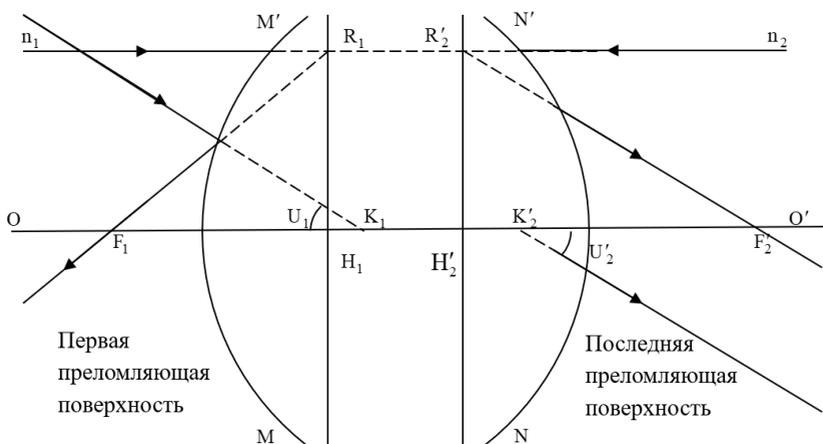


Рисунок 4 – Ход лучей в сложной оптической системе

Точки пересечения главных плоскостей с главной оптической осью H_1 и H_2' называются передней и задней главными точками соответственно. Положения главных плоскостей центрированной системы определяются радиусами кривизны поверхностей, расстояниями между ними и показателями преломления всех сред, разграничиваемых этими поверхностями. Поэтому они могут находиться как внутри, так и вне системы (как по разные стороны от ограничивающих систему поверхностей, так и по одну сторону от одной из них). Так, для тонкой линзы главные плоскости сливаются в одну, для толстой – находятся внутри неё. Если $n_1 = n_2$, то $|f_1| = |f_2'| = f'$. Система положительна, если фокус F_1 находится слева от передней главной плоскости, а F_2' – справа от задней главной плоскости. Если F_1 – справа от MM' , а F_2' – слева от NN' , то система отрицательна.

Кроме линейного увеличения V оптическая система характеризуется угловым увеличением

$$W = \frac{tgU'_2}{tgU_1}. \quad (11)$$

Сопряженные точки K_1 и K'_2 , через которые проходят сопряженные лучи с угловым увеличением $W = I$, называются узловыми точками, а плоскости, проходящие через K_1 и K'_2 , перпендикулярно главной оптической оси, — узловыми плоскостями. Передняя узловая точка K_1 отстоит от переднего фокуса, F_1 на расстояние f_1 , а задняя отстоит от F_2 на расстояние f'_2 . Если $n_1 = n_2$, то положение узловых точек совпадает с положением главных точек системы.

Таким образом, если известно взаимное расположение четырех кардинальных точек (четырёх кардинальных плоскостей), то изображение объекта может быть найдено путем простых геометрических построений, как это показано на рис. 5.

Задавая положения сопряженных точек относительно главных точек их расстояниями a_1 и a_2 (с учетом знаков), можно получить ряд соотношений, связывающих положения этих точек. Так, из треугольников $A_1B_1F_1$ и $F_1H_1M_1$ следует

$$-\frac{y_2}{y_1} = \frac{a_1 - x_1}{x_1} = \frac{f_1}{x_1}. \quad (12)$$

А из треугольников $H'_2N'_2F'_2$ и $F'_2A'_2B'_2$

$$-\frac{y_2}{y_1} = \frac{x'_2}{a_2 - x'_2} = \frac{x'_2}{f'_2}. \quad (13)$$

Сравнивая (12) и (13), получаем

$$x_1 \cdot x'_2 = f_1 \cdot f'_2 \quad \text{и} \quad \frac{f_1}{a_1} + \frac{f'_2}{a_2} = 1. \quad (14)$$

Уравнения (14) следует дополнить соотношениями

$$\frac{f_1}{f'_2} = -\frac{n_1}{n_2}; \quad V = -\frac{y_2}{y_1} = \frac{x'_2}{f'_2} = \frac{f_1}{x_1}. \quad (15)$$

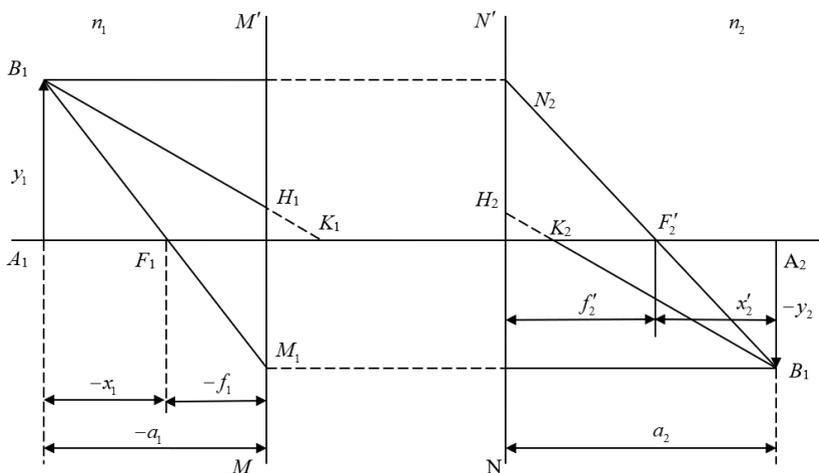


Рисунок 5 – Получение изображения с помощью кардинальных точек

В формулах (12)-(15) x_1 и x'_2 – расстояния от соответствующих фокусов до сопряженных точек.

Наконец, для практически важного случая $n_1 = n_2$, получаем уравнения, определяющие положения сопряженных точек, в виде:

$$-\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f'}; \quad x_1 \cdot x'_2 = -f'^2; \quad V = -\frac{x'_2}{f} = \frac{-f'}{x_1}. \quad (16)$$

Оптические инструменты

Для различных близких, но малых (или больших, но далеких) предметов служат различные визуальные оптические инструменты, основной функцией которых является увеличение угла зрения, под которым рассматривается предмет невооруженным глазом. К таким инструментам относятся лупа, зрительная труба (телескоп), бинокль, микроскоп. Основными частями любого оптического инструмента, за

исключением лупы, являются объектив и окуляр. Объектив всегда создает действительное изображение, которое рассматривается глазом через окуляр. Объектив обращен к рассматриваемому предмету, а окуляр – к наблюдателю.

Важнейшими характеристиками оптических инструментов являются видимое увеличение и их разрешающая способность.

Под видимым (угловым) увеличением понимают отношение

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\operatorname{tg} \varphi}, \quad (17)$$

где φ' и φ – соответственно углы зрения, под которыми виден предмет через инструмент и без него. Чтобы величина γ была объективной характеристикой оптического инструмента, расчет увеличения по формуле (17) выполняется в предположении об аккомодации глаза наблюдателя на бесконечность. Как будет показано ниже, разница между объективным увеличением и субъективным, связанным с изменением аккомодации глаза, незначительна.

Дифракция световых волн, обусловленная ограничением конуса лучей, вырезаемого краями линз и диафрагм объектива системы, приводит к нарушению стигматичности изображения – точка изображается дифракционным кружком. Последнее приводит к пределу различимости деталей изображения. По Рэлею за предел разрешимости двух точек принимают такое их положение, при котором центральный дифракционный максимум изображения одной точки совпадает с первым темным дифракционным кольцом изображения второй точки. При этом максимальное угловое расстояние ψ между двумя разрешимыми точками равной интенсивности определяется соотношением

$$\psi = 0.61 \frac{\lambda}{R}, \quad (18)$$

где R – радиус объектива.

Величина, обратная предельному углу ψ , называется разрешающей способностью (силой)

$$A = \frac{1}{\psi} = \frac{R}{0.61 \cdot \lambda}. \quad (18')$$

При расчетах обычно полагают $\lambda = 555$ нм.

Лупа

Она представляет собой короткофокусную (10...100 мм) собирающую линзу или систему линз. Предмет помещается на расстоянии, несколько меньшем фокусного, так, чтобы его увеличенное мнимое изображение находилось на расстоянии наилучшего видения $l_{\text{НВ}} = 250$ мм от глаза наблюдателя. Возможен второй способ использования лупы, при котором предмет помещается в фокусе лупы, а минимальное увеличенное изображение рассматривается глазом без усилия аккомодации. На рис. 6 показан ход лучей в лупе для этих двух способов ее использования, а также ход лучей от предмета к невооруженному глазу, определяющий угол зрения φ .

Используя понятие объективного увеличения, с помощью рис. 6 б) и в) можно получить величину γ :

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{h}{f}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{h}{l_{\text{НВ}}}, \quad \text{и } \gamma = \frac{l_{\text{НВ}}}{f}. \quad (19)$$

Т.к. $\frac{h}{a} \square \frac{h}{f}$ (сравните рис. 6, *a* и *б*), то при обоих

способах применения лупы ее увеличение практически одинаково и определяется выражением (19). Обычно применяемые лупы дают увеличение от 2.5 до 25 раз.

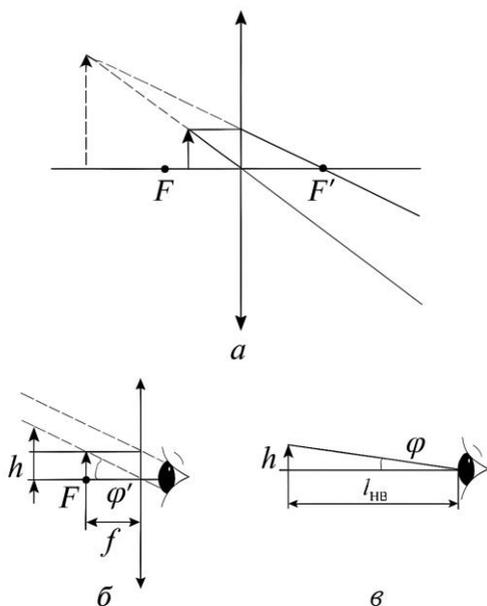


Рисунок 6 – Ход лучей в лупе

Зрительная труба Кеплера (астрономическая труба)

Объективом и окуляром трубы Кеплера служат собирающие линзы, расположенные так, что задний фокус длиннофокусного объектива и передний фокус короткофокусного окуляра практически совпадают. Ход лучей в зрительной трубе Кеплера показан на рис. 7. Так как зрительные трубы используются для наблюдения удаленных предметов, находящихся от объектива на расстояниях, значительно превышающих его фокусное расстояние, то действительное изображение предмета, даваемое объективом, практически находится в его фокальной плоскости. Это изображение рассматривается через окуляр как через лупу. Мнимое изображение, даваемое окуляром, расположено на расстоянии от него. Настраивая инструмент на резкость

(перемещая окуляр), наблюдатель автоматически устанавливает расстояние, удобное для аккомодации глаза. При наблюдении далеких предметов с помощью трубы глазом, аккомодированным на бесконечность, задний фокус объектива совпадает с передним фокусом окуляра. Труба Кеплера дает перевернутое изображение предмета.

Для определения увеличения трубы Кеплера рассмотрим телескопический ход лучей (рис. 7), при котором параллельный пучок лучей, входящих в объектив, остается параллельным по выходе из окуляра. Последнее реализуется, если задний фокус объектива совпадает с передним фокусом окуляра.

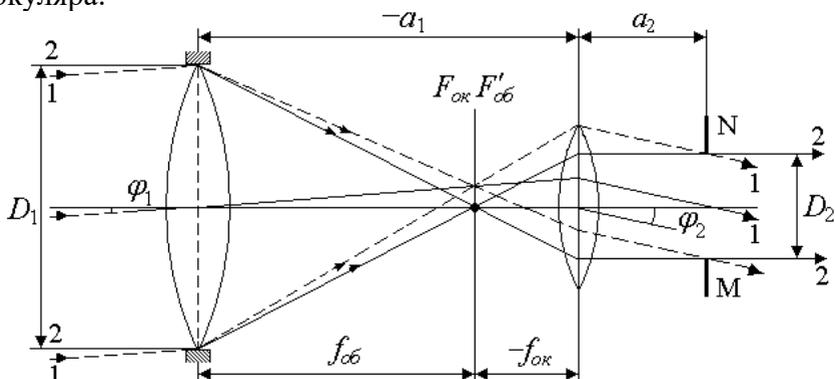


Рисунок 7 – Ход лучей в трубе Кеплера

Ширина параллельного пучка лучей, входящих в объектив, определяется диаметром его оправы D_1 , а ширина пучка, выходящего из окуляра, определяется диаметром D_2 изображения оправы объектива, даваемого окуляром. Из рис. 7 видно, что

$$\frac{f_{об}}{f_{ок}} = \frac{D_1}{D_2}.$$

Тогда увеличение, даваемое зрительной трубой Кеплера, может быть определено выражением

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1} = \frac{D_1}{D_2} = \frac{f_{об}}{f_{ок}}. \quad (20)$$

Зрительная труба Галилея

В трубе Галилея в качестве окуляра используется рассеивающая линза. Передний фокус окуляра по-прежнему практически совпадает с задним фокусом объектива, но т.к. переднее фокусное расстояние рассеивающей линзы положительно длина трубы Галилея меньше, чем у трубы Кеплера. Изображение, даваемое трубой Галилея, прямое. Перемещением окуляра меняется расстояние d при изменении аккомодации глаза так же, как и в трубе Кеплера.

При телескопическом ходе лучей (рис. 8) в галилеевой трубе изображение оправы объектива, даваемое окуляром, мнимое и располагается между объективом и окуляром. Формула (20) для увеличения трубы Кеплера справедлива и для трубы Галилея.

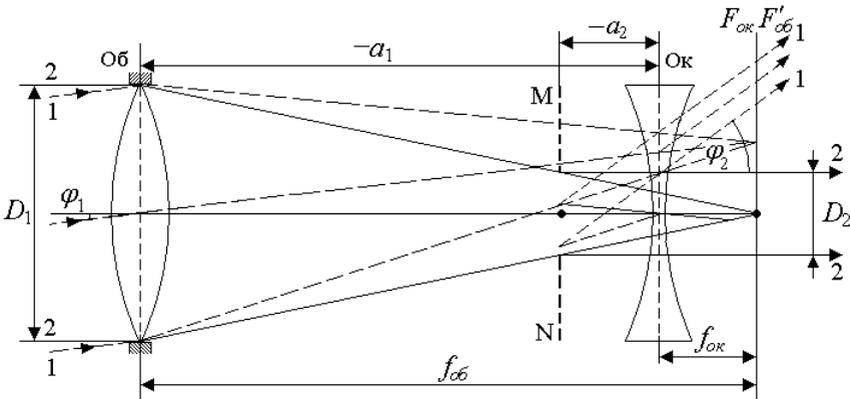


Рисунок 8 – Ход лучей в галилеевой трубе

Бинокль

Приборы, составленные из двух параллельных зрительных труб, позволяющие наблюдать удаленные

предметы двумя глазами, называются биноклями. В биноклях с целью уменьшения длины тубуса и увеличения расстояния между объективами (из-за чего улучшается стереоскопичность зрения) применяют призмы полного отражения.

На рис. 9 показана схема одной из труб призмного бинокля. В театральных биноклях для получения прямого изображения и уменьшения размеров применяются трубы Галилея.

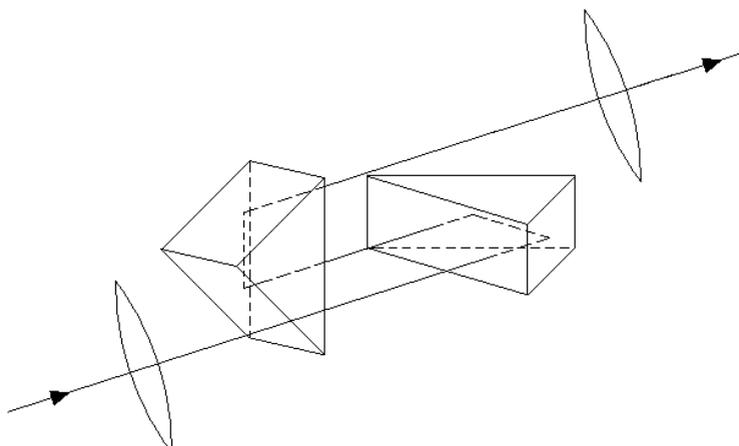


Рисунок 9 – Оптическая схема призмного бинокля

Микроскоп

Он представляет собой оптический прибор для получения увеличенных изображений малых объектов.

Человеческий глаз при нормальной остроте зрения на расстоянии наилучшего видения D может различать мелкие детали объекта, отстоящие на расстояние не менее 0.08 мм, что приблизительно соответствует углу зрения I' . Увеличивая угол зрения, микроскоп позволяет различать детали на расстоянии 0.25 мкм.

Для получения больших увеличений в микроскопах используется комбинация из двух оптических систем – объектива и окуляра, разделенных значительным расстоянием.

Упрощенная схема оптической системы микроскопа представлена на рис. 10. Малый объект помещается вблизи переднего главного фокуса объектива, дающего действительное увеличенное изображение A , которое рассматривается через окуляр так, чтобы увеличенное мнимое изображение B , получалось на расстоянии наилучшего видения. При этом, изображение B , даваемое окуляром, располагается на конкретном расстоянии d от него, автоматически устанавливаемом наведением инструмента на резкость. Для ненапряженного глаза, аккомодированного на бесконечность, мнимое изображение располагается в бесконечности и, следовательно, промежуточное изображение A должно совпадать с фокальной плоскостью окуляра.

Объективное увеличение γ микроскопа определим с использованием рис. 10.

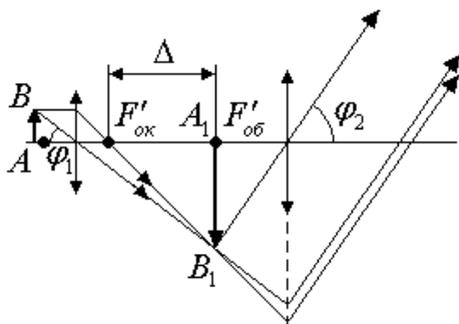


Рисунок 10 – Ход лучей в микроскопе

Пусть l – линейный размер предмета, а l' – линейный размер его промежуточного изображения. Тогда тангенс угла φ_2 , под которым наблюдается изображение в окуляре, определяется соотношением $tg \varphi_2 = \frac{l'}{f_{об}}$. Из рис. 10 видно, что

$$\frac{l'}{l} = \frac{\Delta}{f_{об}}. \text{ Поэтому}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{l \cdot \Delta}{f_{об} \cdot f_{ор}}. \quad (21)$$

При наблюдении невооруженным глазом (см. рис. 6, в) $\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{l}{D}$. Следовательно, увеличение микроскопа равно

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1} = \frac{D \cdot \Delta}{f_{об} \cdot f_{ор}}, \quad (22)$$

где $f_{об}$ и $f_{ор}$ – фокусные расстояния объектива и окуляра соответственно.

Величина Δ обычно лежит в пределах 150–200 мм; фокусное расстояние объектива при его максимальном увеличении 100–120, не меньше 1.5 мм, а окуляра – не меньше 8 мм. Полезное увеличение микроскопов ограничено дифракционными явлениями и не превышает 1000–1500. Оптимальными для нормального глаза являются микроскопы с увеличением 200–300.

Разрешающая способность микроскопа, как правило, определяется не величиной угла, а минимальным расстоянием между двумя точками, различимыми с помощью микроскопа. Минимальное разрешаемое микроскопом расстояние между двумя самосветящимися точками

$$d = 0.61 \frac{\lambda}{n \cdot \sin u}, \quad (23)$$

где u – апертурный угол объектива, n – показатель преломления среды, в которой находится предмет.

Для несамосветящихся объектов

$$d = 0.5 \frac{\lambda}{n \cdot \sin u}. \quad (24)$$

Разрешающая способность микроскопа определяется выражением

$$r = \frac{1}{d}. \quad (25)$$

Компоновка оптических и механических узлов в большинстве микроскопов всех типов, за исключением металлографических, в общих чертах одинакова. На штативе укреплен предметный столик, под которым находится конденсор с зеркалом. Тубусодержатель несет тубус с окуляром и револьвер с объективами. Фокусировка осуществляется передвижением тубусодержателя с помощью грубого и микрометрического механизмов, а зеркало, расположенное под конденсатором, направляет в него свет.

От предмета к объективу свет должен поступать широкими пучками, что важно для получения больших световых потоков и улучшения разрешающей способности микроскопа. Так как обычно наблюдаются несамосветящиеся объекты, то важным элементом оптической системы микроскопа является специальное осветительное устройство – конденсор. Конденсор представляет собой двух- или трехлинзовую систему с ирисовой диафрагмой. В зависимости от метода наблюдения применяются конденсоры различных типов: светлопольный, темнопольный, конденсор для наблюдения по методу фазового контраста и конденсор со смещающейся апертурной диафрагмой, дающей косое освещение для достижения максимальной разрешающей способности.

Все микрообъективы можно разделить на сухие и иммерсионные системы. В сухих системах свет от препарата достигает объектива, проходя через покровное стекло. Из-за явления полного внутреннего отражения до объектива доходят лишь те лучи, которые составляют внутри стекла конус с апертурой около 42° . Этот угол может быть увеличен при использовании иммерсионных объективов, в которых просвет между покровным стеклом и объектом заполнен жидкостью – водой или маслом.

По степени исправления аберрации микрообъективы делятся на ахроматические, апохроматические, планахроматические и планапохроматические. В ахроматических объективах (наиболее простых по устройству) хроматическая аберрация исправляется для двух длин волн; в апохроматических – для трех длин волн. В планахроматических и планапохроматических объективах наряду с хроматической аберрацией исправлена и сферическая аберрация – поле изображения плоское, а увеличение для различных частей наблюдаемого объекта одинаково.

Окуляры микроскопов обычно состоят из двух линз – глазной линзы, обращенной к глазу, и собирающей линзы. Собирающая линза увеличивает угол, под которым изображение рассматривается глазной линзой, и действует как простая лупа. Выбор окуляра определяется типом объектива. Несмотря на то, что окуляр работает с узкими пучками, эти пучки наклонные. Поэтому в окулярах стремятся к исправлению астигматизма, кривизны поля и хроматической аберрации. С ахроматическими объективами малых и средних увеличений применяют окуляры Гюйгенса или артоскопические окуляры; с ахроматическими объективами и ахроматическими объективами больших увеличений – компенсационные окуляры. Последние рассчитываются так, что их хроматизм увеличения противоположен ахроматам, что улучшает качество изображения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ЮСТИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Цель работы: овладеть практическими навыками работы при конструировании оптических систем.

Оборудование: оптическая скамья, осветитель с матовым стеклом, пластинка с горизонтальными щелями, набор положительных и отрицательных линз, вспомогательная зрительная труба с окулярным микрометром, рейтеры, держатели линз.

1.1 Методика юстировки

В общем случае под юстировкой прибора понимают совокупность операций по его приведению в рабочее состояние. Юстировка заключается в установлении правильного взаимодействия, взаимного расположения и относительного перемещения деталей, узлов и систем юстируемых объектов.

При юстировке оптических приборов важно правильно отцентрировать входящие в систему линзы или наборы линз. Проходя через плохо отцентрированную систему линз, луч света отклоняется в сторону и может вообще не дойти до глаза наблюдателя. В случае работы с оптической скамьей достаточная степень юстировки в поперечном направлении обеспечивается самой скамьей, а существенными являются лишь юстировка линз по высоте и юстировка их главных оптических осей вдоль скамьи.

Юстировка собирающих линз по высоте и ориентации может быть выполнена следующим образом:

– рейтер с экраном придвигается вплотную к осветителю, в котором установлено матовое стекло со шкалой – объект-шкала;

– вращением и сближением осветителя и экрана добиваются плотного прилегания оправы осветителя к экрану, что свидетельствует о параллельности плоскостей экрана и объекта-шкалы;

– регулировкой высоты экрана добиваются совмещения центра объекта-шкалы с центром шкалы экрана. Так как в ходе данной операции центры объекта-шкалы с центром шкалы экрана не видны, об их совмещении судят по равенству отсчётов на шкале экрана по всем четырём направлениям от центра экрана до внешнего края оправы осветителя (считается, что объект-шкала предварительно отъюстирована в оправе);

– затем осветитель и экран отодвигают к противоположным концам скамьи и между ними помещают на рейтере положительную линзу. Передвигая рейтер с линзой, добиваются четкого изображения шкалы на экране. Линза устанавливается по высоте так, чтобы изображение объекта-шкалы совпадало с горизонтальной шкалой экрана. Далее, поворотом линзы вокруг вертикальной оси и (при необходимости) малыми изменениями расстояния до экрана, добиваются совпадения центра изображения объекта-шкалы с центром шкалы экрана, а также одинаковой резкости изображения краёв объекта-шкалы.

Эти операции следует повторить несколько раз для различных положений линзы и экрана. При правильной юстировке центры изображения и шкалы экрана остаются совмещёнными при любых расстояниях между элементами оптической системы.

При юстировке отрицательных линз на оптическую скамью помещают рейтер с уже отъюстированной положительной линзой и рейтер с отрицательной линзой (рис. 1.1), подлежащей юстировке. Перемещая линзы вдоль скамьи, получают на экране изображение объекта-шкалы и аналогичным образом проводят юстировку отрицательной линзы.

В процессе юстировки отрицательной линзы высоту и угол поворота остальных элементов оптической системы изменять нельзя.

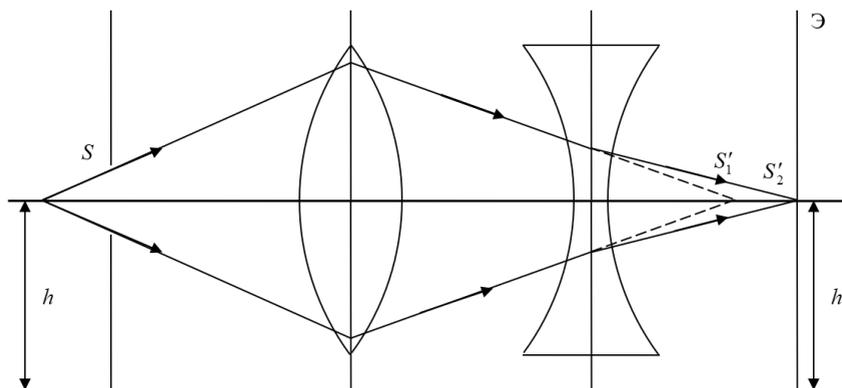


Рисунок 1.1 – Схема установки для юстировки отрицательных линз

Для получения параллельных пучков в оптических системах используются устройства, называемые коллиматорами. Так, если предмет установить в фокусе положительной линзы, то лучи, выходящие из одной точки предмета, пройдя через линзу, образуют параллельный пучок. Юстировку предварительно отцентрированной коллиматорной линзы можно выполнить с помощью вспомогательной зрительной трубы. Трубу сначала устанавливают на бесконечность. Для этого, вращая винт с окуляром, добиваются резкого изображения предмета, удалённого на достаточно большое расстояние (100...200 метров). После чего трубу помещают на оптической скамье за коллиматорной линзой. Передвигая линзу коллиматора вдоль скамьи, добиваются резкого изображения шкалы осветителя в окуляре трубы. При этом одновременно необходимо отъюстировать по высоте и вспомогательную зрительную трубу – установить ее так, чтобы центр изображения был совмещён с перекрестьем в окуляре. Если юстировка

произведена правильно, то на любом расстоянии от коллиматорной линзы зрительная труба будет давать резкое изображение шкалы осветителя.

При конструировании оптических систем важно правильное взаимное расположение линз. Последнее можно выполнить, если известны оценочные значения фокусных расстояний линз, входящих в состав системы. Поэтому необходимо владеть приемами экспресс-методов оценочного определения фокусных расстояний положительных и отрицательных линз. Наиболее просто это выполнить с помощью параллельных пучков световых лучей, создаваемых коллиматорной линзой. Так, если в параллельных лучах установить на оптической скамье положительную линзу, то расстояние между ней и изображением на экране является фокусным расстоянием исследуемой линзы.

1.2 Порядок выполнения работы

1. Отъюстировать положительную линзу, используя увеличенное и уменьшенное изображения. Сделать выводы.

2. Используя отъюстированную положительную линзу, выполнить юстировку отрицательной линзы.

3. Выполнить юстировку оптической системы, состоящей из двух положительных линз.

4. С помощью вспомогательной зрительной трубы выполнить юстировку коллиматорной линзы.

5. Произвести измерения a_1 и a_2 как показано на рис. 5. Полученные измерения занести в табл. 1.1. Произвести расчет фокусных расстояний набора положительных линз по формуле (10). Занести результаты расчета в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Экспериментальные и расчетные данные по определению
фокусных расстояний f'

a_1 , мм	a_2 , мм	f' , м

6. Предложите экспресс-метод оценки фокусного расстояния отрицательных линз. Выполните оценку.

1.3 Контрольные вопросы и задания

1. Какое изображение – увеличенное или уменьшенное – предпочтительно использовать при юстировке положительных линз?

2. Предложите способ юстировки вспомогательной зрительной трубы, не имеющей окулярной шкалы.

3. Почему при юстировке по высоте используются горизонтальные щели осветителя?

4. Предложите другие методы оценки фокусных расстояний

5. Продумайте экспресс-методы оценки фокусных расстояний отрицательных линз.

6. Почему экспресс-методы определения фокусных расстояний являются оценочными?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНЫХ РАССТОЯНИЙ ТОНКИХ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ЛИНЗ

Цель работы: овладеть способами определения фокусного расстояния тонкой положительной линзы.

Оборудование: оптическая скамья, осветитель с объекшкой, тонкая собирающая линза, экран, рейтер, держатель линзы.

2.1 Экспериментальная установка и способы определения фокусных расстояний тонких положительных линз

Фокусное расстояние тонких положительных линз может быть определено различными способами. В настоящей работе предлагаются три способа определения фокусных расстояний таких линз. Измерения выполняются на оптической скамье, вдоль которой могут перемещаться рейтеры с линзой и экраном; расстояния от предмета до линзы, от линзы до экрана, или от осветителя до экрана отсчитываются по линейке, совмещенной с основанием скамьи.

I способ. Получает изображение предмета (объект-шкалы) на экране (рис. 2.1), измеряют расстояния a_1 , и a_2 . В соответствии с формулой $-\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f'}$ определяют фокусное расстояние линзы f' .

II способ. Используя определение линейного увеличения $V = \frac{y_2}{y_1}$, определяют V . Затем, измеряют a_1 или a_2

с учетом $V = -\frac{a_2}{a_1}$. В соответствии с формулой из предыдущего способа определяют фокусное расстояние линзы f' .

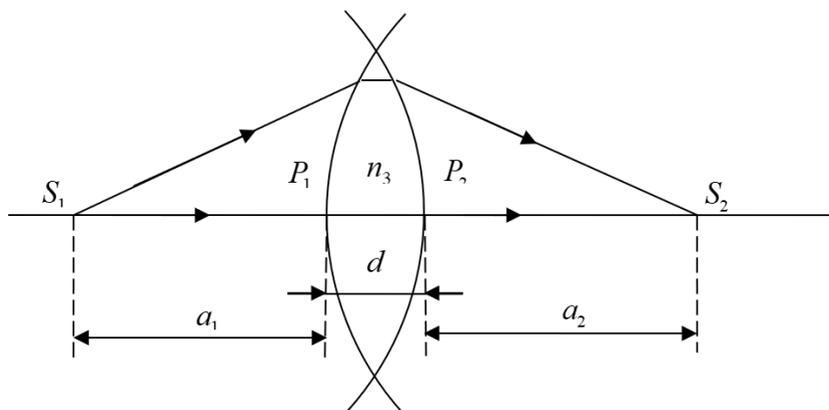


Рисунок 2.1 – Ход лучей в установке для I способа

III способ. Если расстояние L между предметом и его изображением больше $4f'$, то можно получить два изображения – увеличенное и уменьшенное – при неизменном положении предмета и экрана (рис. 2.2). В этом случае фокусное расстояние линзы можно определить по формуле

$$f = \frac{L^2 - l^2}{4L}, \quad (2.1)$$

где l – расстояние между двумя положениями линзы.

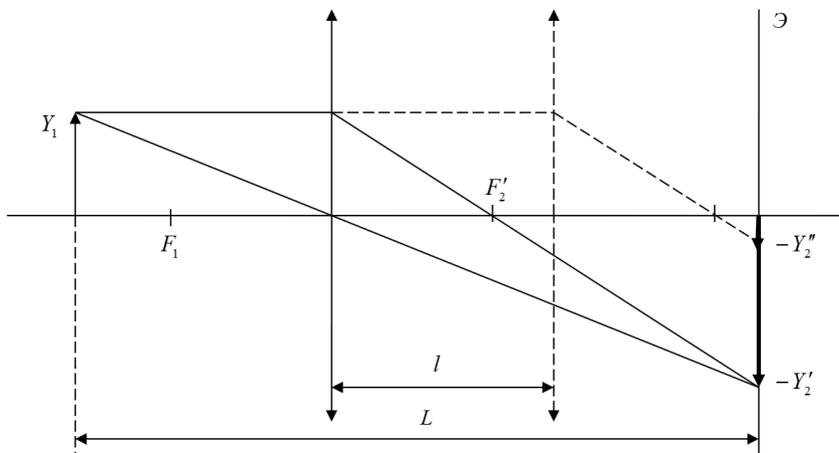


Рисунок 2.2 – Ход лучей в установке для III способа

2.2 Порядок выполнения работы

1. Выполнить юстировку экспериментальной установки.
2. Определить фокусное расстояние исследуемой положительной линзы тремя способами. Измерения каждым способом повторить не менее 5 раз, изменяя расстояние между предметом и изображением. Результаты измерений и расчеты занести в соответствующие табл. 2.1-2.3.

Таблица 2.1

Экспериментальные и расчетные данные по определению фокусных расстояний f' I способом

a_1 , мм	a_2 , мм	f' , м

Таблица 2.2

Экспериментальные и расчетные данные по определению фокусных расстояний f' II способом

y_1 , мм	y_2 , мм	V	a_1 , мм	a_2 , мм	f' , м

Таблица 2.3

Экспериментальные и расчетные данные по определению фокусных расстояний f' III способом

L , мм	l , мм	f , м

3. Сравнить точности измерения фокусного расстояния, выполненного тремя способами. Сделать выводы.

4. Повторить измерения одним из способов (например, первым), используя светофильтр. Результаты измерений и расчеты занести в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Экспериментальные и расчетные данные по определению фокусных расстояний f' I способом с использованием светофильтра

a_1 , мм	a_2 , мм	f' , м

5. Сравнить точности измерения фокусного расстояния при работе со светофильтром и без него.

2.3 Контрольные вопросы и задания

1. Вывести формулу тонкой линзы.
2. Получить расчетную формулу (2.1).

$$f = \frac{L^2 - l^2}{4L}, \quad (2.1)$$

3. Построить изображение предмета в тонкой линзе при $a_1 > 2f$, $a_1 = 2f$, $2f > a_1 > f$, $a_1 < f$.

4. Что произойдет с изображением, если закрыть половину линзы?

5. Построить изображение предмета, расположенного под углом к оптической оси.

6. Как меняется фокусное расстояние положительной линзы в зависимости от длины волны падающего света?

7. В чём проявляется хроматическая aberrация при освещении линзы белым светом?

8. Почему в исследуемых линзах хроматическая aberrация не приводит к заметным проявлениям?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ ТОНКОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ЛИНЗЫ

Цель работы: овладеть способами определения фокусного расстояния тонкой отрицательной линзы.

Оборудование: оптическая скамья, осветитель с объективом, тонкая положительная линза, тонкая отрицательная линза, экран, вспомогательная зрительная труба, рейтеры, держатели линз.

3.1 Экспериментальная установка и теория способов

В настоящей работе предлагаются два способа определения фокусного расстояния тонкой отрицательной линзы с помощью экспериментальной установки, описанной в работе № 2.

1 способ. Между предметом AB и экраном размещают собирающую линзу и получают его изображение A_1B_1 (рис. 3.1). Затем на пути сходящихся лучей, выходящих из положительной линзы (между линзой и изображением), размещают отрицательную линзу, как показано на рис. 3.1. Измеряют расстояние a_1 – от отрицательной линзы до экрана, которое соответствует расстоянию до мнимого источника A_1B_1 . Перемещая экран, добиваются четкого изображения предмета и измеряют новое расстояние от отрицательной линзы до экрана a_2 , соответствующее расстоянию до изображения A_2B_2 мнимого источника A_1B_1 . Зная расстояния a_1 и a_2 , с учетом их знаков вычисляют фокусное расстояние

$$f' \text{ по формуле тонкой линзы } -\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f'}$$

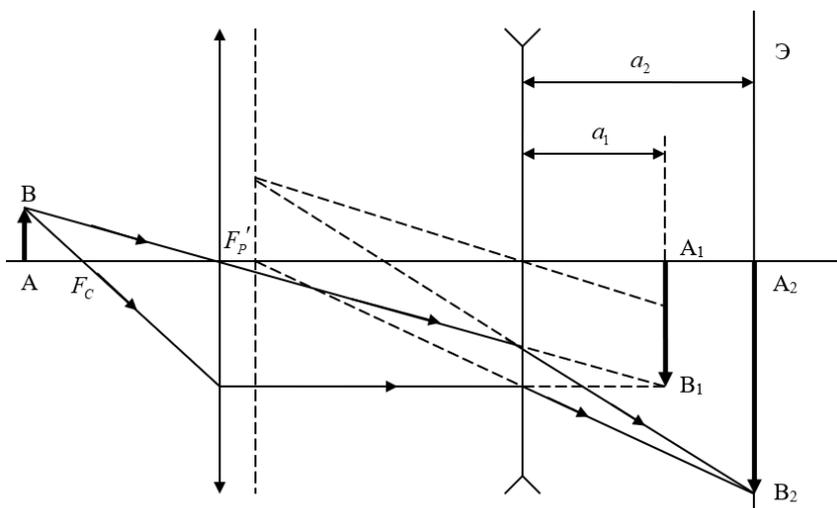


Рисунок 3.1 – Ход лучей в установке для I способа

II способ. Если мнимый источник S_1 (рис. 3.2) совпадает с передним фокусом отрицательной линзы, то изображение S_2 перемещается в бесконечность, т.е. лучи из отрицательной линзы выходят параллельным пучком. Параллельность пучка устанавливается с помощью вспомогательной зрительной трубы, предварительно настроенной на бесконечность. Зная положение мнимого источника S_1 (изображение источника S , даваемое положительной линзой) и положение отрицательной линзы, определяет фокусное расстояние.

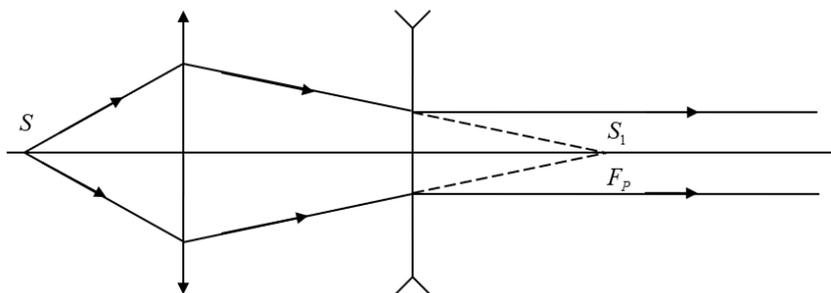


Рисунок 3.2 – Ход лучей в установке для II способа

3.2 Порядок выполнения работы

1. Выполнить юстировку линз, используемых в работе.
2. Определить фокусное расстояние тонкой отрицательной линзы первым способом. Измерения повторить не менее 5 раз, изменяя положения отрицательной линзы и экрана. Полученные измерения и расчеты занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Экспериментальные и расчетные данные по определению фокусного расстояния f' I способом

Положение отрицательной линзы, мм	Положение экрана 1, мм	Положение экрана 2, мм	a_1 , мм	a_2 , мм	f' , м

3. Результаты измерений представить графически в координатах $\left(\frac{1}{a_1}, \frac{1}{a_2}\right)$. Убедиться в совместности результатов.

4. Определить фокусное расстояние тонкой отрицательной линзы вторым способом. Для этого на край оптической скамьи поместить вспомогательную зрительную трубу, настроенную на бесконечность. Получить изображение объекта на экране с помощью положительной линзы. Записать положение экрана и убрать его со скамьи. Установить между

положительной линзой и зрительной трубой отрицательную линзу и перемещая её добиться резкого изображения объекта, наблюдаемого в зрительную трубу.

5. Измерения повторить несколько раз для различных расстояний между предметом и собирающей линзой. Полученные измерения и расчеты занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Экспериментальные и расчетные данные по определению фокусного расстояния f' II способом

Положение экрана, мм	Положение отрицательной линзы, мм	Положение положительной линзы, мм	f , м

6. Сравнить точности измерений фокусного расстояния первым и вторым способами.

3.3 Контрольные вопросы и задания

1. Почему при определении фокусного расстояния отрицательной линзы используется вспомогательная положительная линза?

2. Построить изображение в рассеивающей линзе предмета AB , расположенного на расстояниях $a_1 > 2f$, $a_1 = f$, $f < a_1 < 2f$, $a_1 < f$.

3. Построить изображение предмета, расположенного под углом к оптической оси в рассеивающей линзе.

4. Как меняется фокусное расстояние рассеивающей линзы в зависимости от длины волны падающего света?

5. Каким способом может быть уменьшена хроматическая аберрация оптических систем?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОЛСТОЙ СОБИРАЮЩЕЙ ЛИНЗЫ

Цель работы: усвоить представления о главных плоскостях и фокусных расстояниях толстых линз и приобрести навыки их экспериментального определения.

Оборудование: оптическая скамья, осветитель с объект-сеткой, вспомогательная зрительная труба, толстая собирающая линза с держателем, экран, рейтеры.

4.1 Экспериментальная установка и теория метода

Определение параметров толстой собирающей линзы выполняется с помощью оптической скамьи, на одном конце которой установлен осветитель, снабженный объект-сеткой, а на другом – вспомогательная зрительная труба, настроенная на бесконечность. Вдоль скамьи могут перемещаться рейтер с исследуемой линзой и экраном. Положения линзы и экрана отсчитываются по линейке, совмещенной с основанием скамьи.

Толстая линза – простейшая оптическая система, толщина которой не мала по сравнению с ее фокусным расстоянием. В основе определения фокусного расстояния и положений главных плоскостей толстой линзы лежит метод Аббе.

Пусть предмет, линейный размер которого y , находится на расстоянии $-x_1$ от главного фокуса F (рис. 4.1). Размер изображения $-y_1$. Тогда линейное увеличение

$$V_1 = \frac{-y_1}{y} = \frac{-f}{-x_1}. \quad (4.1)$$

Для определения главных плоскостей кроме фокусного расстояния необходимо также знать положения главных фокусов. Для этого используется вспомогательная зрительная труба, настроенная на бесконечность – линза устанавливается относительно осветителя так, чтобы изображение объект-сетки в окуляре трубы было четким, тогда, отложив от главных фокусов (его положение совпадает с положением объект-сетки) отрезки, равные фокусному расстоянию, находят положения главных плоскостей относительно указателя на рейтаре толстой линзы.

4.2 Порядок выполнения работы

1. Отъюстировать оптическую систему.

2. Перемещая линзу и экран вдоль скамьи выполнить измерения линейного размера изображения (не менее трех измерений заметно отличающихся изображений). Результаты измерений занести в табл. 4.1. По формуле (4.3) рассчитать фокусное расстояние толстой собирающей линзы. Результаты вычислений занести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Экспериментальные и расчетные данные по определению фокусного расстояния f толстой собирающей линзы

y , мм	y_1 , мм	y_2 , мм	x_2 , мм	x_1 , мм	a , мм	f , м

3. Сняв экран с рейтера, и перемещая линзу вдоль скамьи добиться четкого изображения предмета в окуляре зрительной трубы, предварительно построенной на бесконечность. Определить положения главных фокусов линзы.

4. Изобразить в масштабе наружные поверхности линзы, положения главных плоскостей и главных фокусов.

4.3 Контрольные вопросы и задания

1. Вывести основные уравнения для идеальных оптических систем.
2. Вывести расчетную формулу (4.3).
3. Как расположены главные плоскости в положительных и отрицательных системах?
4. При каких условиях узловые точки совпадают с главными?
5. Сформулировать правила построения изображений в идеальных системах.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИЗУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Цель работы: ознакомиться с методами расчетов параметров двухкомпонентных оптических систем и выполнить экспериментальную проверку расчетных соотношений.

Оборудование: оптическая скамья, осветитель с объект-сеткой, экран, длиннофокусная собирающая линза, короткофокусная собирающая линза, рейтеры, держатели линз, фиксатор расстояния между линзами.

5.1 Экспериментальная установка и теория метода

Изучение свойств двухкомпонентных систем проводится с помощью оптической скамьи, на одном конце которой установлен осветитель с объект-сеткой. Вдоль скамьи могут перемещаться рейтеры с тонкими линзами (компонентами системы) и экран. Для перемещения системы линз как единого целого и установки расстояния между линзами используется фиксатор. Порядок установки длиннофокусной 1 и короткофокусной 2 линз на скамье указан на оптической схеме установки, представленной на рис. 5.1.

Двухкомпонентные системы, состоящие из двух тонких линз, играют большую роль в практике конструирования оптических приборов. Параметры таких систем – их фокусные расстояния, положения главных плоскостей, характер (положительные или отрицательные) определяются как фокусными расстояниями линз-компонентов, так и расстояниями между ними.

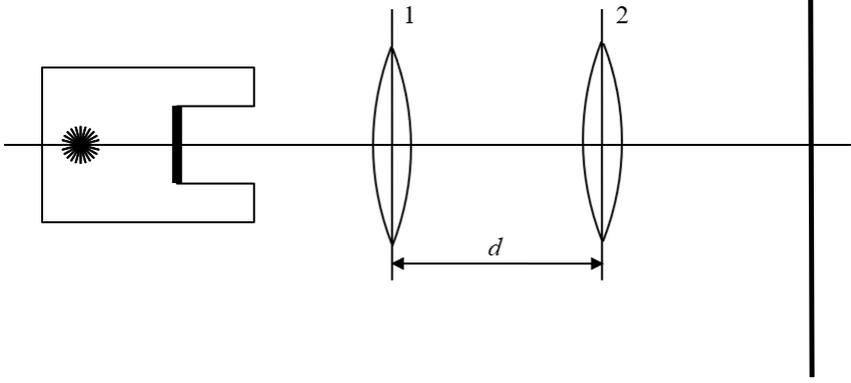


Рисунок 5.1 – Экспериментальная установка

Для установления этой связи рассмотрим ход лучей, параллельных главной оптической оси, в системе двух положительных линз, как показано на рис. 5.2.

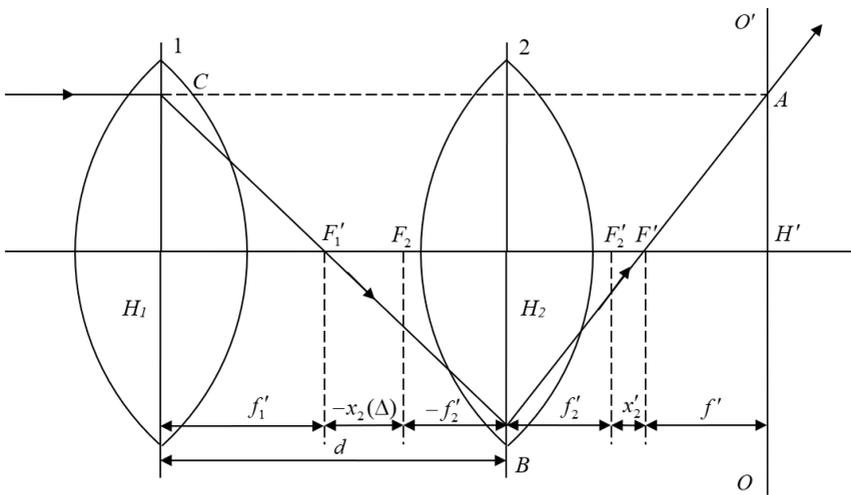


Рисунок 5.2 – Ход лучей в двухкомпонентной системе линз

При этом, будем рассматривать практически важный случай, когда линзы находятся в однородной среде – воздухе. Заметим, что в соответствии с построением и определением главных плоскостей представленная на рис. 5.2 система отрицательна, OO' – ее задняя главная плоскость, а F' – задний главный фокус.

Из треугольников $F'H'A$ и $F'H_2B$ следует, что

$$\frac{f'}{AH'} = \frac{H_2F'}{H_2B}, \quad (5.1)$$

а из треугольников CH_1F' и $F_1'H_2B$

$$\frac{f_1'}{CH_1} = \frac{\Delta - f_2}{H_2B}, \quad (5.2)$$

где $\Delta = d - f_1' + f_2$.

Сравнивая (5.1) и (5.2), получаем $\frac{f'}{f_1'} = \frac{H_2F'}{\Delta - f_2}$.

Значение H_2F' можно получить, используя формулу Ньютона $x_2x_2' = f_2f_2'$ или $-\Delta(H_2F' - f_2') = f_1f_2'$. Выражая отсюда H_2F' и подставляя это значение в (5.2). После несложных преобразований получаем

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f_1'} + \frac{1}{f_2'} - \frac{d}{f_1' \cdot f_2'}, \quad (5.3)$$

или для оптической силы системы

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - d\Phi_1\Phi_2. \quad (5.4)$$

В данной работе предполагается экспериментальное исследование положительной двухкомпонентной системы, образованной длиннофокусной собирающей линзой 1 и короткофокусной собирающей линзой 2. Фокусное расстояние такой системы может быть рассчитано по формуле (5.3), если известны фокусные расстояния компонентов f_1' и f_2' , а также расстояние между компонентами. Для определения

положений главных плоскостей и главных фокусов системы рассмотрим ход луча, параллельного главной оптической оси, падающего на линзу 1 (рис. 5.3). Отрезка x'_1 и x'_2 , определяющие положения задней главной плоскости OO' и заднего главного фокуса F' системы, отсчитываются от главной плоскости линзы 2 с учетом их знаков.

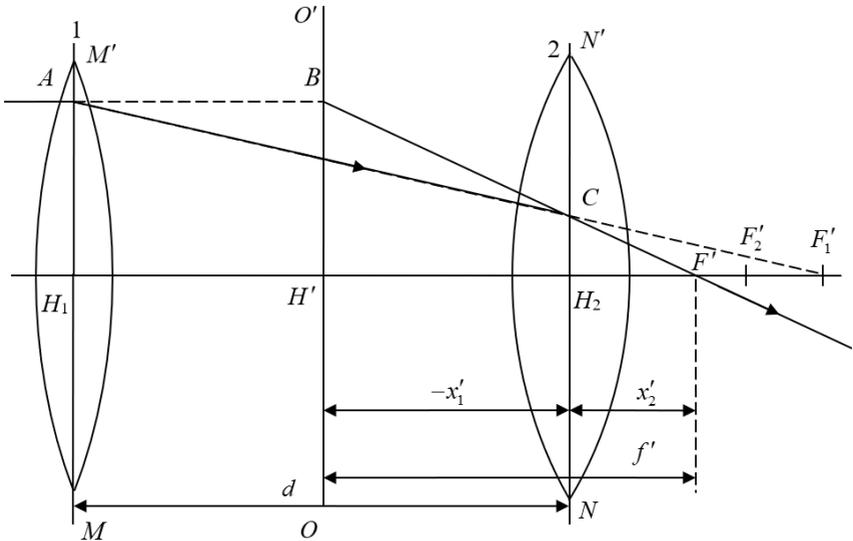


Рисунок 5.3 – Определение главных плоскостей и фокусов двухкомпонентной системы линз

Из сравнений треугольника $H_1AF'_1$ с $H_2CF'_2$ и треугольника HBF'_1 и $H_2CF'_2$ следует:

$$\frac{H_1A}{H_2A} = \frac{f_1}{f'_1 - d}, \quad \frac{H'B}{H_2C} = \frac{f'}{x'_2}.$$

Сравнивая эти соотношения, получаем

$$x'_2 = f' \left(1 - \frac{d}{f'_1} \right) = f' (1 - d\Phi_1). \quad (5.5)$$

Из рис. 5.3 видно, что $x'_2 - x'_1 = f'$ и $x'_1 = x'_2 - f'$. Тогда

$$x_1' = -f'\Phi_1 d. \quad (5.6)$$

Рассматривая ход луча, параллельного главной оптической оси и проходящего в обратном направлении, получаем аналогичные соотношения для x_1 и x_2 , определяющих расстояния от первой линзы до положения передней главной плоскости и переднего главного фокуса системы F (отрезки отсчитываются относительно главной плоскости линзы l с учетом их знаков).

$$x_2' = f(1 - d\Phi_2), \quad (5.7)$$

$$x_1' = -f'\Phi_1 d = x_2 - f. \quad (5.8)$$

Таким образом, если известны f_1' , и f_2' , то по формулам (5.3), (5.4), (5.5), (5.7), (5.8) можно рассчитать параметры двухкомпонентной системы. Экспериментально фокусное расстояние двухкомпонентной системы можно определять методом Аббе (см. работу № 3).

5.2 Порядок выполнения работы

1. Собрать оптическую схему в соответствии с рис. 5.1. Выполнить юстировку экспериментальной установки.

2. Перемещая систему линз как целое (без изменения расстояния d между компонентами) и экран, добиться нескольких (не менее трех) четких изображений объекта на экране, заметно отличающихся линейными размерами. Результаты измерений занести в табл. 5.1 (обозначения взяты из работы № 4). По формуле (4.3) из работы № 4 определить фокусное f расстояние системы. Результаты вычислений занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Экспериментальные и расчетные данные по определению фокусного расстояния f системы линз

a , мм	d , мм	y , мм	y_1 , мм	y_2 , мм	V_1	V_2	f , м

3. Изменяя расстояние d (не менее пяти раз) между линзами повторить действия в п. 2. Построить графики зависимостей $f(d)$.

4. Экспериментально одним из способов, описанных в работе № 2, определить фокусные расстояния f_1' и f_2' компонентов системы. Результаты измерений занести в табл. 5.2. Выполнить расчет фокусного расстояния системы f' по формуле (5.3) для соответствующих значений d . Результаты вычислений занести в табл. 5.2. Сравнить результаты. Линзы 1 и 2 имеют одинаковые характеристики. Расчет фокусного расстояния ведется I способом из работы № 2.

Таблица 5.2

Экспериментальные и расчетные данные по определению фокусного расстояния f компонентов системы

a_1 , мм	a_2 , мм	$f_{1,2}'$, м

5. Для одного из значений расстояния между компонентами d определить положения главных фокусов и главных плоскостей системы. Результаты представить графически с соблюдением масштаба.

5.3 Контрольные вопросы и задания

1. Вывести расчетные формулы (5.3)–(5.8).
2. Соблюдая масштаб, построением определить положения главных фокусов и главных плоскостей системы, используя найденные значения f_1' и f_2' .

3. Какими неучтенными в работе факторами обусловлены ошибки в определениях фокусного расстояния и положения главных плоскостей?

4. Построением определить положение главных фокусов и главных плоскостей двухкомпонентной системы,

состоящей из положительной и отрицательной линз ($f_1 \approx f_2$, $f_1 \gg f_2$, $f_1 \ll f_2$). Какой будет система в каждом из случаев – положительной или отрицательной?

5. Сформулируйте правила построения изображений в сложных оптических системах.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Цель работы: изучение оптических систем зрительных труб Кеплера и Галилея, микроскопа.

Оборудование: оптическая скамья, осветитель с матовым стеклом и объект-сеткой, экран со шкалой, набор линз, рейтеров, держателей, вспомогательная зрительная труба, линейка.

6.1 Экспериментальная установка и методы моделирования

Моделирование зрительных труб выполняется с помощью установки, схема которой представлена на рис. 6.1.

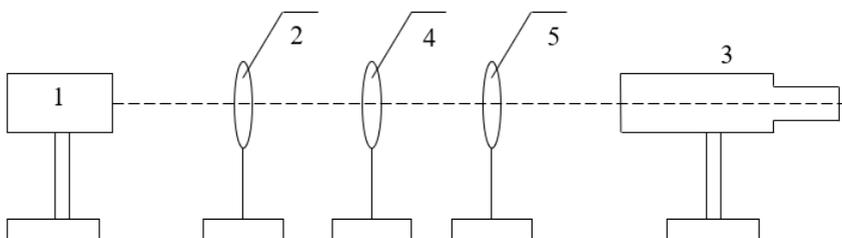


Рисунок 6.1 – Модель зрительной трубы

На одном конце оптической скамьи закреплён осветитель 1 с матовым стеклом и объект-сеткой, а на другом – вспомогательная зрительная труба 3. Модель удалённого предмета реализуется с помощью коллиматорной линзы 2, в фокусе которой находится объект-сетка осветителя. Длиннофокусная собирающая линза 4 объектива моделируемой зрительной трубы располагается за коллиматорной линзой почти вплотную к ней. Между объективом 4 и вспомогательной зрительной трубой 3 помещают короткофокусную собирающую линзу 5 окуляра

при моделировании трубы Кеплера или рассеивающую линзу $5'$ при моделировании трубы Галилея. Окуляр 5 (или $5'$) располагается так, чтобы ход лучей в моделируемой трубе был телескопическим. Последнее регистрируется с помощью вспомогательной зрительной трубы 3 , предварительно настроенной на бесконечность: модель является афокальной системой, если в окуляре вспомогательной зрительной трубы видно отчетливое изображение объект-сетки осветителя. При этом расстояние между объективом и окуляром модели должно быть равным сумме их фокусных расстояний.

Увеличение зрительной трубы можно определить различными способами.

I способ. Для нахождения увеличения трубы Кеплера можно использовать выражение (20), измерив размер оправы объектива и изображения этой оправы в окуляре. Для этого позади окуляра модели устанавливается рейтер с экраном – при определённом положении экрана на нём отчетливо видно резкое изображение оправы. Если диаметр линзы коллиматора меньше диаметра объектива, то для получения изображения оправы объектива на него целесообразно надеть круглую диафрагму, которая бы целиком заполнялась светом, идущим из коллиматора. Данный метод прямого измерения увеличения неприменим для трубы Галилея, т.к. изображение оправы объектива в окуляре мнимое.

II способ. Этот способ основан на измерении угла зрения, под которым виден предмет невооружённым глазом и с помощью инструмента. Наблюдая изображение объект-сетки в окуляре вспомогательной зрительной трубы, установленной на бесконечность, по окулярной шкале измеряется расстояние l_2 между делениями наблюдаемой шкалы объект-сетки. Очевидно, что $l_2 = k \cdot tg \varphi_2$, где k – коэффициент, характеризующий увеличение вспомогательной трубы, а φ_2 – угловое расстояние между наблюдаемыми делениями на выходе модели. Если теперь убрать линзы модели, то в поле

зрения вспомогательной зрительной трубы вновь будет наблюдаться изображение делений объект-сетки. Расстояние l_1 между соответствующими делениями будет равным $l_1 = k \cdot \text{tg} \varphi_1$, где φ_1 – угловое расстояние между изображениями делений на выходе коллиматора. Измеряя l_1 и l_2 по окулярной шкале вспомогательной зрительной трубы, можно найти увеличение:

$$\gamma = \frac{\text{tg} \varphi_2}{\text{tg} \varphi_1} = \frac{l_2}{l_1}. \quad (6.2)$$

Данный способ применим для определения увеличения как трубы Кеплера, так и трубы Галилея.

Моделирование микроскопа выполняется с помощью оптической схемы, представленной на рис. 6.2. Осветитель 1 с матовым стеклом и объект-сеткой установлен на одном конце оптической скамьи.

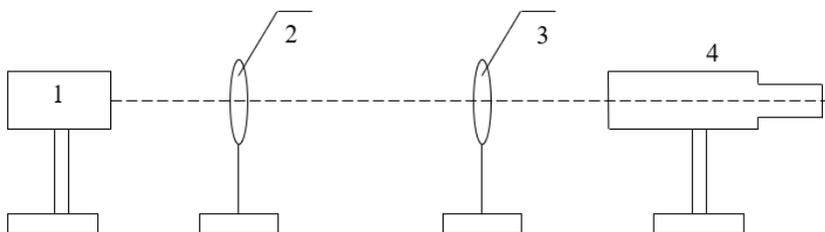


Рисунок 6.2 – Модель микроскопа

Объектив модели (линза 2) располагается на скамье так, чтобы расстояние между ним и осветителем несколько превышало фокусное расстояние линзы-объектива. Для заданного увеличения γ микроскопа по известным оценочным значениям фокусных расстояний линз объектива и окуляра в соответствии с выражением (6) оценивается длина тубуса модели L . На расстоянии L от линзы-объектива устанавливается линза-окуляр 3, после чего модель

фокусируется на деления шкалы объект-сетки осветителя. Фокусировка осуществляется следующим образом: за окуляром модели размещается вспомогательная зрительная труба, предварительно установленная на бесконечность. Перемещая осветитель, добиваются получения отчётливого изображения сетки в окуляре вспомогательной зрительной трубы, после труба снимается, а изображение наблюдается в окуляр модели.

Экспериментальная проверка увеличения модели микроскопа может быть выполнена следующим образом. Рядом с оптической скамьёй на рейтере устанавливается вертикальная линейка на расстоянии наилучшего видения $D = 25$ см от окуляра модели. Рассматривая одним глазом изображение делений объект-сетки осветителя в окуляре, а другим – вертикально расположенную линейку, определить, сколько делений линейки укладывается между изображениями соответствующих делений объект-сетки. Если это число делений обозначить через N , а n – число делений этой же линейки, соответствующих расстоянию между наблюдаемыми делениями объект-сетки, то увеличение микроскопа:

$$\gamma = \frac{N}{n}. \quad (6.3)$$

6.2 Порядок выполнения работы

1. Оценить фокусные расстояния линз, используемых при моделировании оптических инструментов.

2. Используя одну из собирающих линз, построить модель коллиматора.

3. В соответствии с рис. 6.1 собрать и отъюстировать оптическую систему, моделирующую зрительную трубу Кеплера.

4. Экспериментально определить увеличение модели трубы Кеплера первым и вторым способами. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 6.1 и 6.2.

Таблица 6.1

Экспериментальные и расчетные данные по определению увеличения γ трубы Кеплера I способом

D_1 , мм	D_2 , мм	γ

Таблица 6.2

Экспериментальные и расчетные данные по определению увеличения γ трубы Кеплера II способом

l_1 , мм	l_2 , мм	γ

5. Заменяя положительную линзу-окуляр на отрицательную, выполнить юстировку и фокусировку модели трубы Галилея.

6. Экспериментально определить увеличение модели трубы Галилея. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Экспериментальные и расчетные данные по определению увеличения γ трубы Галилея II способом

l_1 , мм	l_2 , мм	γ

7. Для заданной преподавателем величины увеличения микроскопа выбрать линзы для объектива и окуляра, оценить длину тубуса модели, собрать, в соответствии с рис. 6.2, отъюстировать и сфокусировать модель микроскопа.

8. Экспериментально определить увеличение модели микроскопа и сравнить его с расчётным.

6.3 Контрольные вопросы и задания

1. Построить ход лучей в зрительной трубе Кеплера, в зрительной трубе Галилея, в микроскопе.

2. Вывести формулы для увеличения зрительной трубы и микроскопа.

3. Дать определение видимого увеличения оптических инструментов.

4. В чём отличие объективного увеличения от субъективного?

5. Почему для наблюдения изображения, отнесённого на бесконечность, используется вспомогательная зрительная труба, настроенная на бесконечность?

6. Какой из предложенных способов определения углового увеличения модели зрительной трубы Кеплера является более точным? Почему?

7. Почему первый из предложенных способов определения углового увеличения зрительной трубы неприменим к трубе Галилея?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИЗУЧЕНИЕ ГОНИОМЕТРА. ГОНИОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ

Цель работы: изучить устройство и принцип работы гониометра, овладеть методам гониометрических измерений.

Оборудование: гониометр Г-5М, трехгранная стеклянная призма.

7.1 Экспериментальная установка и метод измерений

Гониометр – прибор точной механики и оптики, который предназначен для измерения двухгранных углов между полированными плоскими поверхностями многогранников.

Принцип работы оптических узлов гониометра основан на законах геометрической оптики.

Гониометрический метод измерения для отражательных оптических гониометров заключается в поочередном наблюдении параллельных световых лучей, отраженных от разных граней многогранников. Значения величин двугранных углов определяются с помощью отсчетных устройств, входящих в состав гониометра.

Существуют различные модификации гониометров, отличавшихся конструктивным оформлением и системами отсчетных устройств.

В работе используется гониометр Г-5М, общий вид которого представлен на рис. 7.1.

Трехгранная призма жестко закреплена на диске 7 столика гониометра 15. Столик состоит из нижней и верхней частей. Эти части могут вращаться совместно или отдельно относительно общей вертикальной оси.

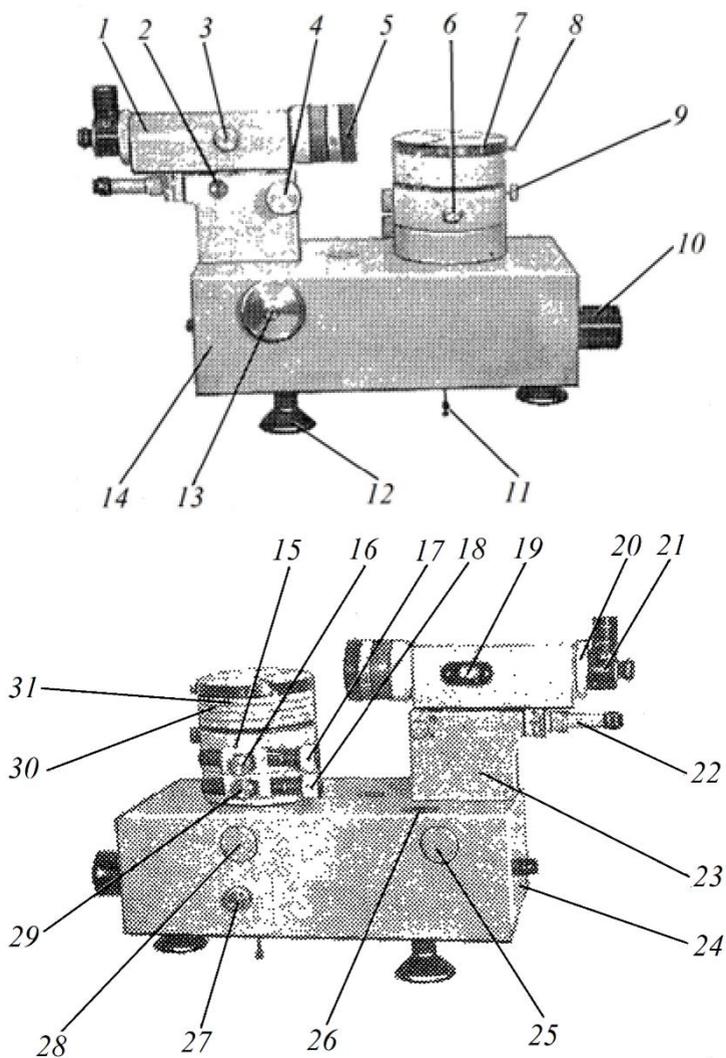


Рисунок 7.1 – Гониометр Г-5М: 1 – автоколлиматор. 2 – розетка; 3 – маховичок фокусировки автоколлиматора; 4 – направляющий винт автоколлиматора; 5 – крышка объектива; 6, 9 – винты наклона столика; 7 – диск; 8 – зажимной винт диска; 10 – колпачок подсветки лимба; 11 – шпилька; 12 – подъемный винт; 13 –

маховичок оптического микрометра; 14 – корпус; 15 – столик; 16, 29 – зажимные винты; 17 – микрометричный винт верхнего столика; 18 – микрометричный винт нижнего столика; 19 – шкала; 20 – кольцо; 21 – автоколлимационный окуляр; 22 – микроскоп; 23 – стойка; 24 – панель; 25, 28 – крышки; 26 – уровень установочный; 27 – маховичок перемещения лимба; 30 – кольцо; 31 – винт.

Отраженный от одной из граней призмы свет наблюдается через автоколлиматор 1 с автоколлимационным окуляром 21. Автоколлиматор установлен на стойке 23, которая закреплена неподвижно на корпусе прибора. Автоколлиматор – оптико-механический прибор для точных угловых измерений отраженных световых лучей.

На рис. 7.2 приведена принципиальная оптическая схема, используемая для получения автоколлимационного изображения.

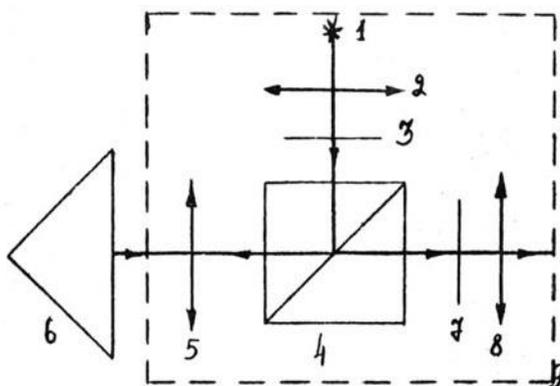


Рисунок 7.2 – Принципиальная оптическая схема гониометра

Пучок света от источника света 1 через конденсор 2 освещает крестообразный вырез в экране 3 (в дальнейшем называемый маркой). Светоделительная призма-куб 4 отражает свет от марки в объектив 5 на одну из граней исследуемого многогранника 6. Отраженные от грани

многогранника лучи образуют в фокальной плоскости объектива автоколлимационное изображение марки на стеклянной пластине 7, на которой нанесены штрихи, называемые сеткой. Полученное таким образом автоколлимационное изображение марки наблюдается через окуляр 8. Элементы 1, 2, 3, 4, 5, 7, и 8 закреплены в кожухе 9 и представляют собой единую систему – автоколлиматор.

Если поворотом многогранника или поворотом автоколлиматора совместить изображение марки с сеткой, то это соответствует падению параллельных лучей света из автоколлиматора на грань многогранника под углом, равным 0° .

Отсчет углов производится через отсчетный микроскоп 22 считыванием показаний оптического микрометра.

Каждое деление шкалы оптического микрометра соответствует $1/600$ угла $10'$. т.е. равному $1''.4$. Поле зрения отсчетного микроскопа приведено на рис. 7.3. В левом окне наблюдаются изображения диаметрально противоположных участков лимба и вертикальный индекс для отсчета градусов и десятков минут, а в правом окне – деления шкалы оптического микрометра и горизонтальный индекс для отсчета единиц минут и секунд.

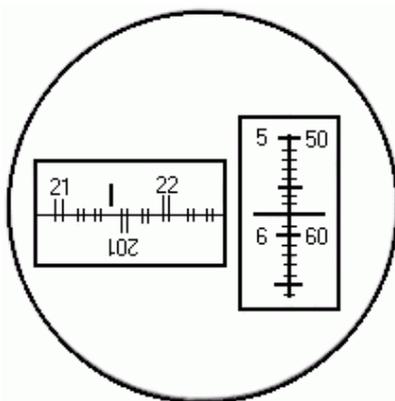


Рисунок 7.3 – Поле зрения отсчетного микроскопа

Чтобы снять отсчет по лимбу, необходимо повернуть маховичок *13* оптического микрометра (рис. 7.1) настолько, чтобы верхние и нижние изображения штрихов лимба в левом окне точно совместились.

Число градусов будет равно видимой ближайшей левой от вертикального индекса цифре *21* (рис. 7.3). Число десятков минут равно числу интервалов, заключенных между верхним штрихом, который соответствует отсчитанному числу градусов, и нижним оцифрованным штрихом, отличающимся от верхнего на 180° .

Число единиц минут отсчитывается по шкале микрометра в правом окне по левому ряду чисел.

Число десятков секунд – в том же окне по правому ряду чисел. Число единиц секунд равно числу делений между штрихами, соответствующих отсчету десятков секунд, и неподвижным горизонтальным индексом. Положение, показанное на рис. 7.3 соответствует отсчету $21^\circ 35' 58''$.

7.2 Порядок выполнения работы

Внимание. Гониометр с призмой подготовлен к измерениям. Поэтому требуется строго выполнять, рекомендуемый порядок работы, чтобы не нарушить юстировку прибора. Винты наведения нужно поворачивать медленно, плавно и без усилий. Неосторожное обращение с ними может привести к порче лабораторной установки.

1. Установить общий выключатель в положение «Сеть», при этом должны загораться сигнальная лампа, лампа подсветки лимба и лампа автоколлимационного окуляра.

2. Зажать винт *16* и отпустить винт *29*. При этом нижняя и верхняя части столика *15* должны совместно вращаться от руки.

3. Повернуть столик *15* так, чтобы одна из граней призмы располагалась приблизительно перпендикулярно к визирной оси автоколлиматора.

4. Зажать винт 29 и с помощью маховичка 3 фокусировки автоколлиматора, наводящего винта 4 автоколлиматора (юстировка по вертикали) и микрометрического винта 18 нижней части столика 15 добиться четкого автоколлимационного изображения марки.

Вид марки и сетки гониометра Г-5М изображены на рис. 7.4 и 7.5 соответственно.



Рисунок 7.4 – Автоколлимационная марка окуляра-куба

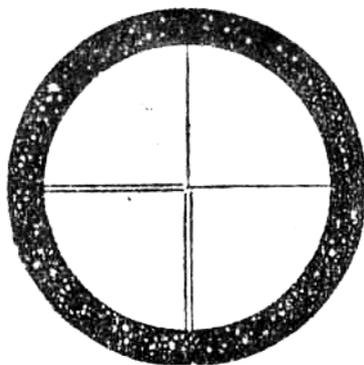


Рисунок 7.5 – Сетка окуляра-куба

5. Отпустить винт 29 и, вращая столик 15 рукой по часовой стрелке, поочередно наблюдать автоколлимационное изображение метки от каждой грани призмы. Действуя винтами 6 и 9 наклона столика, добиться, чтобы смещение автоколлимационного изображения горизонтального штриха метки относительно горизонтальной сетки окуляра при

наблюдении разных граней было минимальным.

6. Вращением столика 15 сначала от руки, а затем (застопорив столик винтом 29) микрометрическим винтом 18 автоколлимационное изображение вертикального штриха марки, с вертикальным штрихом сетки окуляра. Эта операция называется автоколлимационным наведением.

7. Вращением маховичка 13 свести изображения диаметрально противоположных штрихов лимба и считать отсчет A_1 по шкале оптического микрометра, шкалу оптического микрометра наблюдать через микроскоп 22.

8. Произвести повторное автоколлимационное наведение, для чего развести и снова совместить изображения штрихов с помощью микрометрического винта 18, и снять отсчет A_2 , сводя штрихи лимба маховичком 13 оптического микрометра. За отсчет направления A_{cp} принять среднее арифметическое значение A_1 и A_2 .

9. Отпустить винт 29 сначала от руки, а затем, при зажатом винте 29, микрометрическим винтом 18 произвести автоколлимационное наведение на следующую грань призмы. Снять отсчеты B_1, B_2 и вычислить среднее B_{cp} .

10. Значение угла α между перпендикулярами к отражающим граням определить по формуле

$$\alpha = A_{cp} - B_{cp}.$$

11. Преломляющий угол θ (двугранный угол между гранями призмы) рассчитать по формуле

$$\theta = 180 - \alpha.$$

12. Выполнить измерения всех преломляющих углов призмы.

13. После завершения измерений выключить гониометр, установив общий выключатель в положение «Выкл.».

7.3 Контрольные вопросы и задания

1. Каково назначение гониометра Г-5М?
2. В чем заключается гониометрический метод измерений?
3. Нарисуйте принципиальную оптическую схему автоколлиматора и поясните механизм получения автоколлимационного изображения.
4. Назовите составные части гониометра и поясните их назначение.
5. Изложите порядок снятий отсчетов по лимбу гониометра Г-5М.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ИЗУЧЕНИЕ МОНОХРОМАТОРА

Цель работы: изучение спектральных приборов и овладение приемами работы с монохроматором при измерении пропускания.

Оборудование: монохроматор МУМ, блок питания, приемник излучения, источник излучения, вольтметр В7-22, светофильтр.

8.1 Краткие теоретические сведения

Спектральные устройства, как правило, имеют общими большинство своих узлов: входную щель, объективы входного и выходного коллиматоров и диспергирующую систему в виде призмы, системы призм, дифракционной решетки, либо комбинации решетки с другими решетками или призмами.

По способу наблюдения и регистрации спектров спектральные устройства могут быть разделены на три основных типа: спектроскопы, где наблюдение спектров ведется визуально с помощью окуляра; спектрографы, где регистрация ведется с помощью фотопластинки или фотопленки, и спектрометры, где с помощью кинематического механизма получают развертку спектра во времени, который после преобразования в приемно-усилительном устройстве регистрируется на ПК.

Оптическая часть спектрометров представляет собой самостоятельный спектральный прибор, который очень часто используется для целей монохроматизации света и поэтому носит название монохроматора. В фокальной плоскости выходного объектива монохроматора устанавливается выходная щель, с помощью которой из спектра выделяется узкий его участок или отдельная спектральная линия.

Элементарная теория спектральных приборов связана с теорией призмы и дифракционной решетки как диспергирующих систем, от которых зависят основные параметры спектральных устройств – их линейная дисперсия и разрешающая способность. Для призмы последние легко определяются, когда она установлена в параллельных пучках вблизи угла наименьшего отклонения.

Установка призм, как и дифракционных решеток в параллельных пучках, связана прежде всего с тем, что в этих условиях удастся получить спектры наиболее высокого качества. Аберрации комы и астигматизма при этом имеют минимальные значения.

Углом отклонения φ призмы называют угол, образованный пересечением продолжения луча, падающего на призму, с лучом, вышедшим из призмы (рис. 8.1).

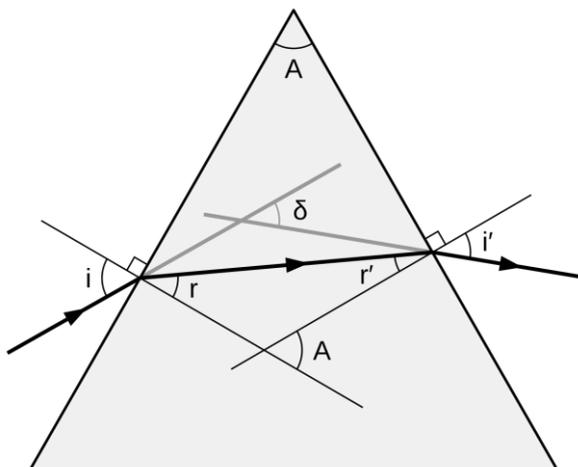


Рисунок 8.1 – Ход лучей в призме

Угол наименьшего отклонения равен

$$\varphi_{\min} = 2 \arcsin \left(n \sin \frac{A}{2} \right) - A, \quad (8.1)$$

где n – показатель преломления материала призмы.

Угловую дисперсию D_φ призмы определяют как физическую величину, численно равную угловому расстоянию между спектральными линиями, длина волн которых отличается на единицу.

$$D_\varphi = \frac{2 \sin \frac{A}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}. \quad (8.2)$$

Поэтому для установки призмы при минимальном отклонении

$$D_\varphi = \frac{2 \sin \frac{A}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}. \quad (8.3)$$

Если призма выполнена из стекла или кварца, то дисперсию призмы можно определить, воспользовавшись эмпирической формулой Коши

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2}, \quad (8.4)$$

где A и B – константы.

$$D_\varphi = -4B \frac{\sin \frac{A}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}} \cdot \frac{1}{\lambda^3}. \quad (8.5)$$

Линейная дисперсия $D_\varphi = \frac{dl}{d\lambda}$ спектрального прибора с одной призмой, установленной на угол минимального отклонения, может быть определена, если известны угловая дисперсия призмы и фокусное расстояние выходного объектива f :

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{d\varphi}{d\lambda} \cdot f. \quad (8.6)$$

Согласно данной формуле, можно разделить, сколько единиц длины спектра, выраженной обычно в миллиметрах, приходится на единицу длины волны, выраженной в ангстремах. Однако чаще всего определяют обратную величину линейной дисперсии, выраженную в ангстремах на миллиметр.

Если в спектральном приборе в качестве диспергирующего элемента используется дифракционная решетка, то значение угловой дисперсии $D_\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda}$ можно получить из условия, которое определяет положение главных максимумов:

$$\sin \varphi = \pm k \frac{\lambda}{d}, \quad (8.7)$$

где d – постоянная решетки, k – порядок спектра. Дифференцируя его по λ , имеем:

$$D_\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{d \cos \varphi}. \quad (8.8)$$

Из (8.8) следует, что угловая дисперсия прибора прямо пропорциональна, порядку спектра. Однако порядок спектра ограничен тем, что $\sin \varphi_{\max} = 1$, поэтому $|k_{\max}| = \frac{d}{\lambda}$, и интенсивность спектральных линий очень быстро убывает с увеличением порядка спектра.

Поэтому, чтобы иметь прибор с хорошей дисперсией в спектрах низшего порядка, стремятся изготовить решетку с малым значением ее постоянной d и в то же время с достаточно большим общим числом штрихов. Хорошие решетки для видимой области спектра имеют не менее 500–600 штрихов на 1 мм. Современная техника изготовления решеток позволяет получать решетки с 1200

штрихов на 1 мм и заштрихованной поверхностью 25×35 см и более.

Из (8.8) видно, что при малых φ $D_\varphi = \frac{k}{d}$ не зависит от длины волны. В этом отношении призматический спектр, где дисперсия (8.5) меняется обратно пропорционально λ^3 , менее удобен.

Разрешающую способность спектрального прибора условно определяют величиной

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda}, \quad (8.9)$$

где $d\lambda$ – расстояние между двумя разрешающими линиями (точнее их максимумами).

Согласно критерию Рэлея считают, что два близких главных дифракционных максимума приблизительно одинаковой интенсивности, соответствующих длинам волн λ_1 и λ_2 , еще достаточно хорошо могут быть замечены как отдельные, если максимум одной линии совпадает с минимумом другой.

Из критерия Рэлея следует, что разрешающая способность дифракционной решетки равна

$$R = kN, \quad (8.10)$$

где N – число щелей на всей решетке.

Разрешающая способность призмы определяется выражением

$$R = l \frac{dn}{d\lambda}, \quad (8.11)$$

где l – длина основания призмы.

Световые измерения в физической оптике носят весьма разнообразный характер. Взаимодействие света с веществом проявляется прежде всего в процессе поглощения (абсорбции) света, испускания света (люминесценции), рефракции

(преломления), оптической активности, поляризации и рассеяния света.

В основе абсорбционных измерений лежит закон поглощения, согласно которому считается, что каждый слой равной толщины поглощает равную долю проходящего через него излучения.

Отсюда $dI = kI dx$ и после интегрирования получаем закон Футера-Ламберта-Бэра

$$I = I_0 e^{-kd}, \quad (8.12)$$

где d – толщина поглощающего слоя.

Очень часто пользуются понятием прозрачности поглощающего слоя T , определяя ее из соотношения $T = \frac{I}{I_0}$.

Аналогично этому вводится понятие пропускания ослабляющего слоя, если исключить потери на отражение и рассеяние проходящих пучков света не удастся или если в этом нет необходимости $\left(t = \frac{I}{I_0} \right)$.

8.2 Описание экспериментальной установки

Для выделения монохроматического излучения в области спектра 200...900 нм используется универсальный малогабаритный монохроматор МУМ. Оптическая схема монохроматора приведена на рис. 8.2.

Излучение от лампы 1 через конденсор 2 попадает на входную щель 3 посредством зеркала 4 заполняет вогнутую дифракционную решетку, которая выполняет роль фокусирующего и диспергирующего элемента. В изделии применена решетка с переменным шагом нарезки с криволинейными штрихами, что дает возможность значительно компенсировать расфокусировку и другие aberrации.

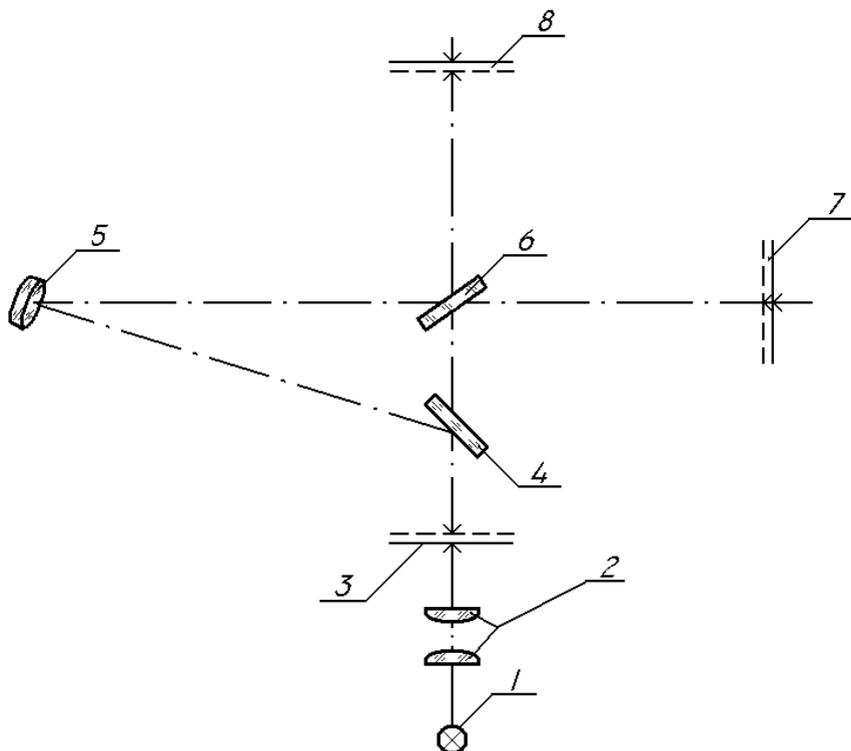


Рисунок 8.2 – Принципиальная оптическая схема монохроматора

Дифрагированное решеткой излучение направляется на выходную щель 7 (при выведенном плоском зеркале б) или в выходную щель 8 (при введенном зеркале б).

Щели сменные постоянной ширины (0.05; 0.25; 1.0; 3.0 мм).

Для получения большей спектральной чистоты выделяемого излучения при работе в области спектра 290...710 нм входная и выходные щели устанавливаются в положение I, а при работе в области спектра 200...290 нм и 710...800 нм щели устанавливаются в положение II.

Номинальные размеры сменных щелей и обозначение положения щелей нанесены на поверхностях щели. Для установки щелей в корпусе монохроматора предусмотрены гнезда.

Переключение зеркала δ осуществляется перемещением от себя (к себе) рукоятки, расположенной на боковой стенке корпуса со стороны выходной щели.

Сканирование спектра осуществляется поворотом решетки δ вокруг оси на угол ψ в пределах $\psi_0 = 6^\circ 51'$ до $\psi_k = 28^\circ 44'$. Закон движения решетки обеспечивается синусным механизмом, в котором для перемещения опорной поверхности служит винт. Системой зубчатых передач синусный механизм связан с решеткой рукояткой, расположенной на торцевой стенке монохроматора, и цифровым механическим счетчиком, смонтированным в корпус монохроматора, с помощью которого осуществляется непосредственный отсчет длин волн с точностью ± 0.2 нм (величина обратной линейной дисперсии $\pm 3.2 \frac{\text{нм}}{\text{мм}}$).

В комплект принадлежностей входят, кроме монохроматора, блок питания, приемник излучения, источник излучения (в качестве источника излучения применена галогенная лампа накаливания типа КГМ 12-100), вольтметр цифровой В7-22.

На лицевой панели корпуса блока питания имеется тумблер СЕТЬ и сигнальная лампа, тумблер НАКАЛ-НЕДОКАЛ, обеспечивающий работу источника излучения в двух режимах, и гнезда для подключения вольтметра.

На боковой стенке приемника излучения имеются переключатель, с помощью которого регулируется чувствительность усилителя постоянного тока (УПТ), две рукоятки установки нуля.

8.3 Порядок выполнения работы

1. Включить блок питания тумблером «СЕТЬ».
2. Включить источник света.
3. Тумблер чувствительности «УПТ» поставить в положение II.
4. Поставить диафрагму в положение, когда она пропускает минимальное количество света.
5. Включить в сеть вольтметр.
6. Включить фотоприемник.
7. Проверить, чтобы вольтметр на всем диапазоне длин волн без светофильтра показывал менее 25 В.
8. Установить нулевой отсчет на вольтметре, перекрыв свет, идущий в монохроматор от источника.
9. Выждав минут 5-10, убедиться в том, что нулевой отсчет не изменяется.
10. Выставить длину волны 300 нм.
11. Произвести два измерения интенсивности света: одно – поставив светофильтр перед входной щелью (I), другое – убрав светофильтр (I_0).
12. Выполнить измерения во всем диапазоне спектра в плоть до 800 нм с шагом 5 нм. Результаты измерений занести в табл. 8.1. Записать название выбранного светофильтра.

Таблица 8.1

Экспериментальные данные по определению спектра пропускания t светофильтра

λ , нм	I_0 , В	I , В	λ , нм	I_0 , В	I , В

13. Вычислить пропускание $t = \frac{I}{I_0} \cdot 100\%$,

построить зависимость $t = f(\lambda)$, сравнить с паспортными данными для используемого светофильтра.

Замечание. При измерениях особое внимание обратить на условия освещения входной щели и на выбор ширины входной и выходной щелей.

Ширину выходной щели с точки зрения физических соображений следует брать равной геометрическому изображению входной, что соответствует максимуму светового потока, проходящего через прибор для данного участка спектра. Для используемого монохроматора (рис. 8.2) ширина входной и выходной щелей одинаковы.

Спектральная ширина щелей должна быть выбрана так, чтобы при измерении полосы поглощения на ее контуре можно было бы нанести достаточное количество точек, с тем чтобы интервалы $\Delta\lambda$ длин волн, пропускаемых щелью, не перекрывались друг с другом.

8.4 Контрольные вопросы и задания

1. Что понимают под угловой и линейной дисперсией?
2. Каковы пути увеличения угловой дисперсии спектрального прибора:
 - а) с призмой;
 - б) с дифракционной решеткой?
3. Какие физические явления препятствуют увеличению угловой дисперсии призмы?
4. Что понимают под разрешающей способностью спектрального прибора?
5. Сформулируйте критерий Рэлея для разрешающей способности спектрального прибора.
6. Расскажите об устройстве и принципе действия монохроматора.
7. Перечислите отличительные особенности спектров излучения, полученных при помощи призмы и при помощи дифракционной решетки.
8. Что понимают под пропускаемостью вещества?

ЧАСТЬ II. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА НА ТОНКИХ ПЛЕНКАХ

Цель работы: изучить явление интерференции на тонких пленках; с помощью полос равного наклона определить показатель преломления плоскопараллельной стеклянной пластинки.

Оборудование: газовый лазер ЛГ-72, с источником питания, экран с линзой, плоскопараллельная стеклянная пластинка, оптическая скамья.

9.1 Краткие теоретические сведения

Интерференцию света на тонких пленках можно наблюдать как в естественных, так и лабораторных условиях. Примером могут служить цветовая окраска тонких пленок (мыльные пузыри, пленки нефти или масла на поверхности воды, прозрачных пленок оксидов на поверхности закаленных металлических деталей – цвета побежалости и т.д.). Когерентные волны, которые интерферируют при наложении, образуются в этих случаях вследствие отражения света, падающего на пленку от ее верхней и нижней поверхности. Расположение светлых и темных интерференционных полос зависит от разности фаз, которую приобретают когерентные световые волны в пленках.

Разность фаз связана с оптической разностью хода следующим образом

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta, \quad (9.1)$$

где λ_0 – длина волны света в вакууме.

При падении монохроматического света длиной волны λ_0 на плоско-параллельную пластинку толщиной d и показателем преломления n под углом φ_k (рис. 9.1) оптическая разность хода когерентных лучей равна

$$\Delta'_k = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi_k}. \quad (9.2)$$

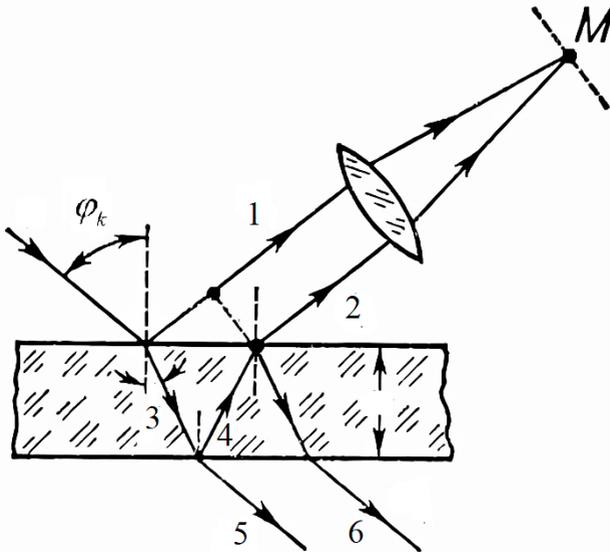


Рисунок 9.1 – Ход лучей в плоскопараллельной пластинке

Учитывая, что при отражении света от оптически более плотной среды, фаза вектора электрической напряженности меняется на противоположную, полная оптическая разность хода когерентных лучей в отраженном свете имеет вид

$$\Delta_k = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi_k} - \frac{\lambda_0}{2}. \quad (9.3)$$

Когерентные лучи накладываются друг на друга интерферируют на бесконечности или в фокальной плоскости собирающей линзы. Если линза расположена параллельно

поверхности пластины, на которую свет падает под различными углами (расходящийся пучок), интерференционная картина имеет вид концентрических светлых и темных полос с центром в главном фокусе линзы.

Положение светлых интерференционных полос в отраженном свете определяется уравнением

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi_k} - \frac{\lambda_0}{2} = k\lambda_0, \quad (9.4)$$

где k – номер полосы, принимает значения $0, 1, 2, \dots$

Уравнение

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi'_k} = k\lambda_0, \quad (9.5)$$

позволяет найти углы φ'_k , определяющие положения темных интерференционных полос. Наблюдаемые в этом случае полосы называются полосами равного наклона. Интерференцию можно наблюдать и в проходящем свете. В этом случае когерентными будут лучи 5 и 6 (рис. 9.1). Так как оптическая разность хода для проходящих лучей отличается от оптической разности для отраженного света на (лучи 5 и 6 фазу не меняют), то под углами φ_k , соответствующими максимумам в отраженном свете, будут наблюдаться темные полосы в проходящем свете и наоборот. Интерференционная картина будет наиболее четкой при значениях интенсивностей когерентных лучей мало отличаются друг от друга. Очевидно, что интенсивности лучей 1 и 2 меньше отличаются друг от друга, чем лучей 5 и 6, поэтому полосы равного наклона лучше наблюдать в отраженном свете.

В реальных случаях придется иметь дело с некогерентным излучением. Пусть длины волн падающего света заключены в некотором интервале λ_0 и $\lambda_0 + \Delta\lambda$. Критерием неразличимости интерференционной картины является совмещение максимума $(k+1)$ -го порядка

длины волны λ_0 с k -м максимумом длины волны $\lambda_0 + \Delta\lambda$. Из этого критерия вытекает, что

$$(\Delta\lambda)_{пред} = \frac{\lambda_0}{k}. \quad (9.7)$$

Следовательно, для возможности наблюдения интерференционной картины необходимо, чтобы ширина интервала длин волн не превышала $(\Delta\lambda)_{пред}$, т.е.

$$(\Delta\lambda) < (\Delta\lambda)_{пред} = \frac{\lambda_0}{k}. \quad (9.8)$$

Из формулы (9.8) следует, что с увеличением порядка интерференции k уменьшается ширина спектрального интервала, при котором еще возможно наблюдение интерференции. И обратное: более низкий порядок позволяет наблюдать интерференционную картину в менее монохроматическом свете.

Ширина спектрального интервала связана с длиной когерентности $l_{ког}$ следующим соотношением

$$l_{ког} = \frac{\lambda_a^2}{\Delta\lambda}. \quad (9.9)$$

Длина когерентности для нелазерных источников порядка десятка сантиметров и меньше. В случае лазерных источников $l_{ког}$ достигает значений сотен метров.

Для получения различимой интерференционной картины необходимо, чтобы разность хода Δ была мала по сравнению с длиной когерентности ($\Delta < l_{ког}$). Значительная когерентность будет при

$$\Delta \ll l_{ког} \quad (9.10)$$

9.2 Описание экспериментальной установки и метода

Экспериментальная установка (рис. 9.2) состоит из газового лазера ЛГ-72 ($\lambda_0 = 632,8 \text{ нм}$), экрана Э, в котором закреплена линза для создания расходящегося пучка света и плоско-параллельной исследуемой пластинки П толщиной h . Из соотношения (9.10) следует, что при использовании лазерного источника, степень монохроматичности которого, а следовательно, и длина когерентности, большая, можно использовать для исследования пластинки толщиной порядка сантиметров.

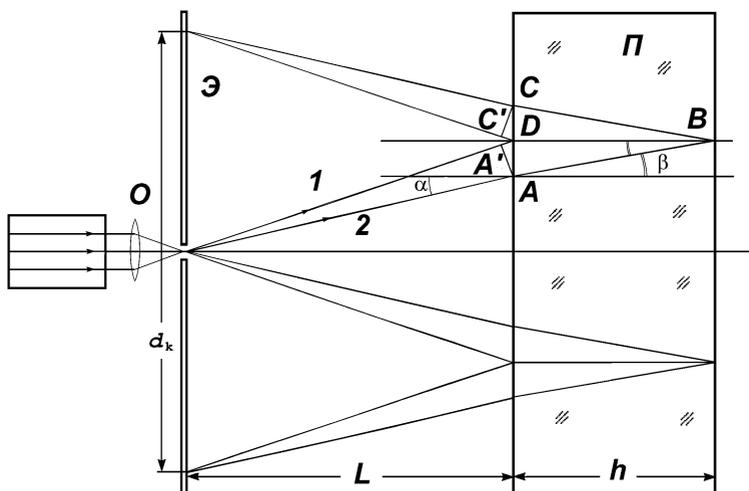


Рисунок 9.2 – Экспериментальная установка

Интерференционные полосы равного наклона в отраженном свете наблюдаются на экране Э без помощи дополнительной линзы, так как расстояние L между пластиной и экраном достаточно большое.

Применим уравнение (9.6) для k -го и i -го темных колец

$$2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi_k} = k\lambda_0, \quad (9.11)$$

$$2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi_i} = i\lambda_0. \quad (9.12)$$

Вычтем из (9.11) уравнение (9.12) и учитывая, что $\sin \varphi = \frac{r}{2L}$, где r – радиус кольца, получим

$$2h \left[\left(n^2 - \frac{r_k^2}{4L^2} \right)^{\frac{1}{2}} - \left(n^2 - \frac{r_i^2}{4L^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] = (k-i)\lambda_0$$

или

$$2hn \left[\left(1 - \frac{r_k^2}{4L^2 n^2} \right)^{\frac{1}{2}} - \left(1 - \frac{r_i^2}{4L^2 n^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] = (k-i)\lambda_0. \quad (9.13)$$

Имея ввиду, что $(1+x)^\alpha = 1 + \alpha x + \frac{\alpha(\alpha-1)}{1 \cdot 2} x^2 + \dots$ и ограничившись вторым слагаемым, преобразуем выражение (9.13) к виду

$$2hn \left[1 - \frac{1}{2} \frac{r_k^2}{4L^2 n^2} - 1 + \frac{1}{2} \frac{r_i^2}{4L^2 n^2} \right] = (k-i)\lambda_0. \quad (9.14)$$

Решая уравнение (9.14) относительно n , получим расчетную формулу для выбранных i -го и k -го колец

$$n = \frac{h(r_k^2 - r_i^2)}{4L^2 (k-i)\lambda_0}. \quad (9.15)$$

9.3 Порядок выполнения работы

1. Включить источник питания лазера. Через 30 минут включить сам лазер нажатием кнопки «Пуск».

2. Отцентрировать установку таким образом, чтобы центр интерференционных колец, наблюдаемых на экране, совпадал с центром экрана.

3. Пользуясь шкалой на экране, измерить радиусы нескольких (до 10) темных колец.

4. Измерить толщину пластинки d и расстояние L от экрана до передней поверхности стеклянной пластинки.

5. По формуле (9.15) определить показатель преломления. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Экспериментальные данные по определению показателя преломления n стеклянной пластинки

Номер темного кольца, n	Радиус слева, r_1 , мм	Радиус справа, r_2 , мм	Радиус кольца, $r = \frac{r_1 + r_2}{2}$

9.4 Контрольные вопросы и задания

1. Нарисовать ход лучей и объяснить явление интерференции в тонких пластинках.

2. Что понимают под оптической разностью хода?

3. Вывести формулу оптической разности хода при интерференции на плоскопараллельной пластине.

4. Что понимают под длиной когерентности?

5. При каких условиях возникают полосы равного наклона?

6. Почему для освещения исследуемой пластинки используется лазерное излучение?

7. Можно ли в данной работе наблюдать интерференцию в белом свете?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ И ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

Цель работы: изучить явление интерференции света на тонких пленках, научиться определять радиус кривизны линзы и длину волны монохроматического излучения с помощью полос равной толщины.

Оборудование: микроскоп МБС-10 со столиком, плоско-выпуклая линза, плоскопараллельная пластинка, осветитель с блоком питания, светофильтры.

10.1 Краткие теоретические сведения

Частным случаем интерференции на тонких пленках являются кольца Ньютона.

Направим пучок монохроматического света параллельно главной оптической оси плосковыпуклой тонкой линзы, лежащей на стеклянной пластинке. Если радиус кривизны линзы большой, то луч 1 (рис. 10.1), отраженный от прослойки, находящейся между линзой и пластинкой, и луч 2, отраженный от поверхности пластинки, являются когерентными, а, следовательно, будут интерферировать.

При нахождении оптической разности хода когерентных лучей, можно пренебречь небольшими наклонами лучей, проходящих в прослойке. Геометрическая разность хода между когерентными лучами, очевидно, равна $2 \cdot h_m$, где h_m – толщина зазора в данном месте.

Для вычисления полной оптической разности хода лучей необходимо учесть оптические свойства прослойки (показатель преломления), а также изменение фазы световой волны. При отражении световой волны от оптически более плотной среда фаза электрического вектора изменяется на π .

Таким образом, если $n_{np} < n_{cm}$, то луч 2 меняет фазу, а для случая $n_{np} > n_{cm}$ меняет фазу луч 1.

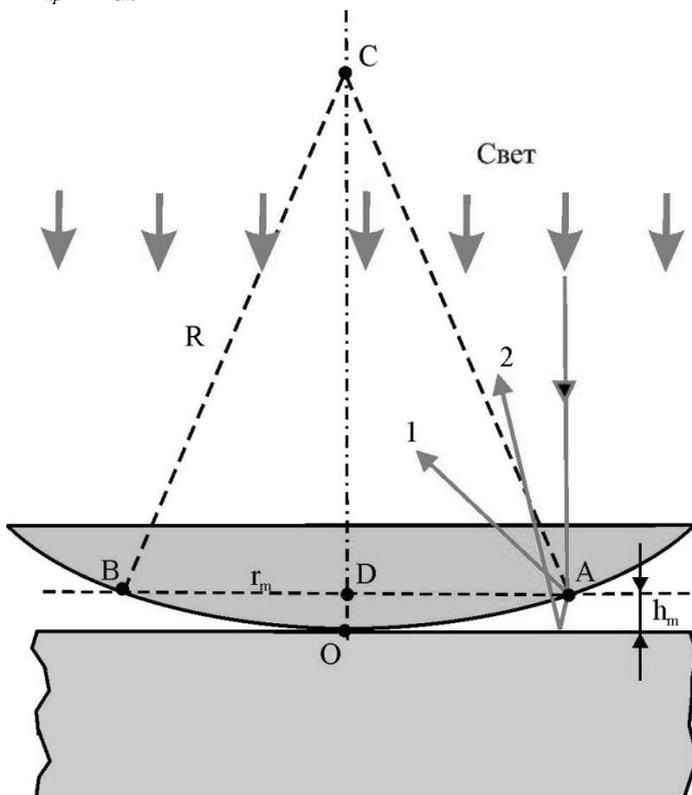


Рисунок 10.1 – Ход лучей в исследуемой линзе

Но в обоих случаях происходит сдвиг фазы на π , следовательно

$$\Delta = 2h_m n_{np} + \frac{\lambda_0}{2}, \quad (10.1)$$

$$r_m^2 = R^2 - (R - h_m)^2 = 2Rh_m - h_m^2. \quad (10.2)$$

Принимая во внимание, что $R \gg h_m$, получим

$$h_m = \frac{r_m^2}{2R}. \quad (10.3)$$

С учетом (10.3) выражение (10.1) примет вид

$$\Delta = \frac{r_m^2}{R} n_{np} + \frac{\lambda_0}{2}. \quad (10.4)$$

Из выражения (10.1) видно, что оптическая разность хода при заданной длине волны определяется полностью толщиной прослойки. Значит, наблюдаемые интерференционные полосы являются полосами равной толщины, а в соответствии с (10.4) они представляют собой кольца радиуса r_m с центром в точке соприкосновения линзы с пластинкой (точка О на рис. 10.1).

Радиусы темных колец найдем из условия минимума

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2}. \quad (10.5)$$

Приравняв правые части равенств (10.4) и (10.5), получим

$$r_m = \sqrt{m \frac{\lambda R}{n_{np}}}. \quad (10.6)$$

Для радиусов светлых колец аналогично получим

$$r_m' = \sqrt{(2m - 1) \frac{\lambda R}{n_{np}}}. \quad (10.7)$$

Если линза и пластинка имеют одинаковый показатель преломления, то центр колец в отраженном свете темный. Так как прослойка представляет собой клин с изменяющимся преломляющим углом, то кольца сгущаются по мере увеличения угла.

10.2 Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из микроскопа МБС-10, в комплект которого входят осветительная лампа с

конденсором и блоком питания, а также плоскопараллельная пластинка с выпуклой линзой, закрепленные вместе в пластмассовом кольце. Степень прижатия линзы к пластинке регулируется резьбой кольца.

На стеклянную пластинку, используемую в работе, нанесен плоскопараллельный слой прозрачного вещества, показатель преломления которого n_c больше показателя преломления пластинки $n_c > n_{пл}$.

При толщине слоя $d = \frac{\lambda}{4n_c}$ интенсивность лучей,

отраженных от пластинки, значительно усиливается, что обеспечивает контрастную интерференционную картину. В центре интерференционной, картины наблюдается светлое пятно, что объясняется различием показателей преломления линзы и слоя, нанесенного на пластину.

Общий вид микроскопа показан на рис. 10.2. Все указанные детали можно объединить в 3 основных блока:

- оптическая головка;
- стол микроскопа;
- блок питания.

Оптическая головка включает в себя корпус с барабаном 1, объектив 16 $f' = 90$ мм, бинокулярную насадку 5, осветитель с конденсором.

Фокусировка микроскопа производится перемещением оптической головки относительно стола микроскопа по направляющей типа «ласточкин хвост» вращением рукояток 22.

Внимание. Вращение рукояток фокусировки во взаимно противоположных направлениях запрещается.

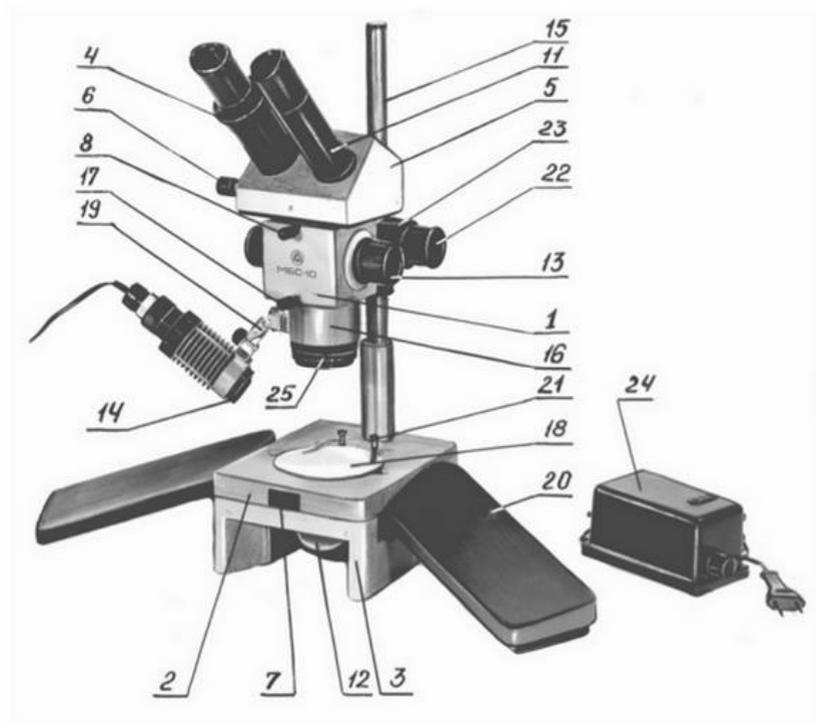


Рисунок 10.2 – Микроскоп МБС-10: 1 – корпус с барабаном; 2 – столик для работы в отраженном свете; 3 – столик для работы в проходящем свете; 4 – кольцо диоптрийной наводки; 5 – бинокулярная насадка; 6 – рукоятка механизма изменения межзрачкового расстояния; 7 – фиксатор столика; 8, 17 – винты, фиксирующие бинокулярную насадку в объектив $f' = 90$ мм; 9 – втулка осветителя; 10 – гайка осветителя; 11 – окулярная трубка; 12 – зеркало и матовая пластина в оправе; 13 – рукоятка переключения увеличений; 14 – светофильтр; 15 – стойка; 16 – объектив $f' = 90$ мм; 18 – предметное стекло; 19 – кронштейн; 20 – подлокотники; 21 – прижим; 22 – рукоятка фокусировки; 23 – рукоятка регулировки хода; 24 – блок питания; 25 – кольцо.

Оптическая система микроскопа состоит из объективной части микроскопа и сменных окуляров. В

объективную часть входят объектив $f' = 90$ мм, две системы Галилея, два объектива $f' = 180$ мм и две призмы Шмидта.

Объективная часть позволяет получить 5 различных увеличений: 0.57; 1.01; 2; 4; 7.05. Округленные значения увеличений нанесены на рукоятках барабана 16 (0.6; 1; 2; 4; 7), вращением которого устанавливается нужное увеличение. Поворачивать рукоятку необходимо до совмещения цифры на рукоятках с индексом на кольце.

Системы Галилея размещены в корпусе 1, а призмы Шмидта и объективы $f' = 180$ мм входят в бинокулярную насадку. Смещенные окуляры устанавливаются в окулярные трубки.

В работе рекомендуется использовать окуляр 8^x , в фокальной плоскости которого установлена плоскопараллельная пластинка со шкалой с пеной деления 0,1 мм.

В переводной табл. 10.1 указано, какой величине объекта соответствует одно деление шкалы при всех увеличениях микроскопа.

Таблица 10.1

Соответствие увеличения и размеров объекта в окуляре

Значения увеличений, нанесенные на рукоятках барабана	0.6	1	2	4	7
Одно деление шкалы 0.1 мм соответствует величине на объекте, мм	0.17	0.1	0.05	0.025	0.014

Для создания параллельного пучка лучей, падающих нормально на систему, линза-пластинка, осветитель, устанавливается в одну из окулярных трубок бинокулярной насадки.

Измерив радиусы светлых и темных колец, можно рассчитать длину волны λ , если известен радиус кривизны линзы R . И наоборот, по известному значению λ можно определить радиус кривизны линзы R . Поскольку практически никогда ее удается получить соприкосновение линзы с пластинкой без зазоров, то для получения более точного результата в определении λ или R следует воспользоваться графическим методом обработки экспериментальных данных, который изложен ниже.

Записав выражения (10.7) для m -го и k -го темных колец и вычтя их друг из друга, получим при интерференции на воздушной прослойке ($\pi = 1$)

$$r_m^2 - r_k^2 = (m - k)R\lambda. \quad (10.8)$$

Аналогично для светлых колец

$$\left(r'_m\right)^2 - \left(r'_k\right)^2 = (m' - k')R\lambda. \quad (10.9)$$

Значения радиусов r_m , r_k , r'_m , r'_k необходимо брать из графика зависимости $r_m^2 = f(m)$, построенного по результатам измерений. Как следует из (10.6) и (10.8), графики зависимости квадрата радиуса кольца от его номера должны иметь линейный характер. Практически при измерении всегда допускаются ошибки, кроме того, деформация линзы и стеклянной пластинки в местах их соприкосновения может приводить к отступлению от формул (10.6) и (10.8). Поэтому к результатам, полученным при малых номерах колец, следует относиться с осторожностью. Так как меньше искажены влиянием деформации кольца Ньютона с большими номерами, то после нанесения экспериментальных точек необходимо проводить прямую $r_m^2(m)$ преимущественно по точкам для больших номеров колец.

10.3 Порядок выполнения работы

1. Включить источник питания в сеть и регулятором яркости установить необходимую для работы яркость поля зрения.

2. Проверить наличие в установке светофильтра с известной длиной волны (поле зрения должно быть одного цвета). Записать его название и рабочую длину волны.

3. Вращением барабана выбрать такое увеличение, чтобы кольца занимали все поле зрения.

4. Наблюдая в окуляр микроскопа кольца Ньютона, добиться резкой видимости колец.

5. Установить центральное светлое пятно на середину поля зрения и шкалы, соответственно, перемещая обойму с линзой и пластинкой по предметному столику.

6. По шкале окуляра зафиксировать положение 10 светлых и 10 темных колец справа и слева от центра, занеся показания в табл. 10.2.

Примечание: во время измерений положение обоймы с пластинкой и линзой на столике не изменять!

Таблица 10.2

Экспериментальные данные по определению радиуса кривизны R линзы

№ кольца	Светлое или темное кольцо	Положение левого края кольца, l_1	Положение правого края кольца, l_2	Радиус кольца, r	Квадрат радиуса, r^2

7. Пользуясь табл. 10.1, определить цену деления шкалы окуляра в соответствии с выбранным увеличением.

8. Рассчитать радиусы колец Ньютона, а затем квадрат радиусов, с учетом выбранного увеличения.

9. Построить графики зависимости квадратов радиусов светлых и темных колец от их номеров.

10. Для выбранных m и k по графикам определить r_m^2 , r_k^2 , $(r'_m)^2$, $(r'_k)^2$ и по формулам (10.8) и (10.9) определить радиус R кривизны линзы.

11. Заменить светофильтр с известной длиной волны светофильтром неизвестной длины волны и повторить пп. 6-9. Результаты измерений занести в табл. 10.3.

Внимание. Осветитель нагревается во время работы. Не брать за него голыми руками!

Таблица 10.3

Экспериментальные данные по определению длины волны λ исследуемого светофильтра

№ кольца	Светлое или темное кольцо	Положение левого края кольца, l_1	Положение правого края кольца, l_2	Радиус кольца, r	Квадрат радиуса, r^2

12. Используя результаты графической обработки экспериментальных данных, по формулам (10.8) и (10.9) рассчитать длину волны λ исследуемого светофильтра. Значение радиуса кривизны линзы взять из результатов, полученных в п. 10.

13. Снять обойму с пластинкой и линзой с предметного столика.

14. На стеклянную поверхность предметного столика положить выпуклую линзу и, проведя наблюдения полученных при этом колец Ньютона, сравнить их с исследованной ранее интерференционной картиной.

10.4 Контрольные вопросы

1. Как объяснить возникновение интерференционных колец?

2. В каком случае и почему в центре колец Ньютона в отраженном свете наблюдается темное пятно?

3. Как изменяется интерференционная картина при наблюдении в проходящем свете?

4. Почему воздушная прослойка между линзой и пластинкой должна быть тонкой?

5. Где плотнее расположены кольца Ньютона в центре или на периферии? Почему?

6. Отчего при применении белого света число интерференционных колец меньше, и они цветные и расплывчатые?

7. Как и почему изменится интерференционная картина, если слой между линзой и пластинкой будет заполнен жидкостью?

8. Как понимать то, что кольца Ньютона локализованы вблизи поверхности раздела сред линза-воздух?

9. Почему в исследуемой интерференционной картина центр колец Ньютона светлый?

Таблица 10.4

Рабочие длины волн используемых светофильтров

Светофильтр	Длина волны максимума пропускания светофильтра λ , нм
Фиолетовый	393
Синий	429
Голубой	490
Зеленый	542
Желтый	582
Оранжевый	654
Красный	693

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

ДИФРАКЦИЯ ПЛОСКИХ СВЕТОВЫХ ВОЛН НА ЩЕЛИ (ДИФРАКЦИЯ ФРАУНГОФЕРА)

Цель работы: лабораторное исследование распределения интенсивности света в дифракционной картине.

Оборудование: гелий-неоновый лазер, фоторезистор на подвижке, микроамперметр, щель регулируемой ширины.

11.1 Краткие теоретические сведения

Пусть на пути распространения плоской монохроматической световой волны с длиной волны λ расположена непрозрачная преграда с щелью шириной $b \ll \lambda$ (рис. 11.1).

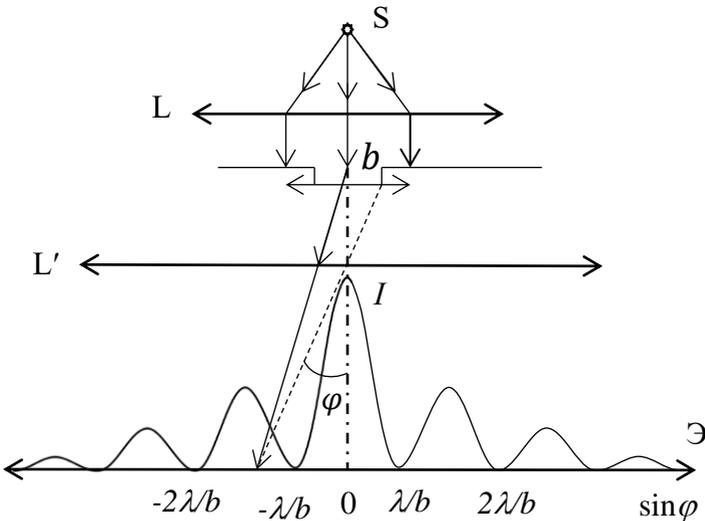


Рисунок 11.1 – Ход лучей в установке

За щелью расположена собирающая линза L , в фокальной плоскости которой находится экран \mathcal{E} . На экране наблюдается дифракционная картина – чередующиеся светлые и темные полосы, параллельные щели. Результирующая освещенность любой точки экрана, направление на которую составляет с нормальной к поверхности щели угла φ , определяется интерференцией всех вторичных волн. В зависимости от соотношения фаз складываемых колебаний в точке A могут наблюдаться как максимумы, так и минимумы интенсивности колебаний результирующего поля.

Задача дифракции заключается в нахождении распределения интенсивности света в зависимости от угла дифракции $I_\varphi = f(\varphi)$.

Аналитический метода расчета амплитуды колебания дает следующее выражение

$$A_\varphi = A_0 \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi} \right]. \quad (11.1)$$

Положение главного максимума определяется из условия $\varphi = 0$, т.к. при этом $I = I_0$.

Положение следующих максимумов определяется из условия экстремума для A :

$$\frac{dA}{d\varphi} = 0, \quad (11.2)$$

что приводит к уравнению:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi\right) = \frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi. \quad (11.3)$$

Это трансцендентное уравнение имеет решение:

$$\frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi \cdot m\lambda, \text{ где } m = \pm 1.43; \pm 2.46; \pm 3.47; \pm 4.48; \dots \quad (11.4)$$

или

$$b \cdot \sin \varphi = m\lambda, \quad (11.5)$$

что и является условием максимумов.

Графический метод сложения амплитуд определяет положение максимумов следующим условием:

$$b \cdot \sin \varphi = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad \text{где } k = 1, 2, 3, \dots \quad (11.6)$$

Очевидно, что условия (11.5) и (11.6) практически совпадают для больших k .

Условия минимума получаются при $A_\varphi = U$, т.е. при

$$\sin \left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi \right) = U, \quad \text{если } \sin \varphi \neq 0.$$

Откуда:

$$\frac{\pi b}{\lambda} \cdot \sin \varphi = k\pi, \quad \text{где } k = 1, 2, 3, \dots \quad (11.7)$$

и

$$b \cdot \sin \varphi = k\lambda.$$

Интенсивность I_φ пропорциональна квадрату амплитуды A_φ

$$I_\varphi = I_0 \left[\frac{\sin \left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi \right)}{\frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi} \right]^2. \quad (11.8)$$

Подставляя выражение (11.4) и (11.8), получим:

$$I_1 = I_0 \left[\frac{\sin(1.43\pi)}{1.43\pi} \right]^2 = 0.047I_0.$$

$$I_2 = I_0 \left[\frac{\sin(2.46\pi)}{2.46\pi} \right]^2 = 0.017I_0. \quad (11.9)$$

$$I_3 = I_0 \left[\frac{\sin(3.47\pi)}{3.47\pi} \right]^2 = 0.008I_0.$$

$$I_4 = I_0 \left[\frac{\sin(4.48\pi)}{4.48\pi} \right]^2 = 0.005I_0.$$

Распределение интенсивности при дифракции на щели представлено на рис. 11.1.

11.2 Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 11.2) состоит из оптической скамьи, на которой установлены источники света (гелий-неоновый лазер) 1; щель регулируемой ширины 2; регистрирующее устройство, состоящее из фоторезистора 3 и микроамперметра 4 и съемный экран.

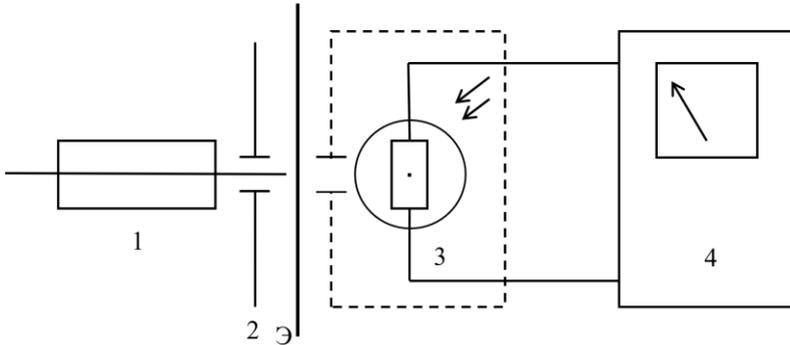


Рисунок 11.2 – Экспериментальная установка

Использование излучения гелий-неонового лазера значительно упрощает эксперимент. Лазерный луч обладает малой расходимостью, так что фронт волны падающего на щель света является практически плоским, и высокой степенью монохроматичности, что обеспечивает четкость дифракционной картины. Поэтому экспериментальная

установка позволяет получить оптимальную по размерам и удобную для непосредственных измерений дифракционную картину.

11.3 Порядок выполнения работы

1. Включить гелий-неоновый лазер, а затем и микроамперметр. Проверить, чтобы на нем был включен максимальный предел измерений.

2. Осветить щель излучением лазера так, чтобы при отражении от лезвий щели луч возвращался в выходное отверстие корпуса лазера. Это соответствует нормальному падению света на щель.

3. Регулируя ширину щели, получить дифракционную картину на экране.

4. Убрать экран.

5. При фиксированном положении всех элементов установки перемещать фоторезистор вдоль дифракционной картины с шагом равным одному делению барабана механизма перемещения, регистрирующего устройство и при этом фиксировать показания микроамперметра.

Внимание. При работе с микроамперметром следует выбирать такой предел измерений, чтобы максимально использовать всю шкалу прибора. Переключать пределы можно только тогда, когда стрелка микроамперметра показывает меньше 10 (следует уменьшить предел), либо собирается переваливать за 100 (следует увеличить предел). Если же прибор, по неосторожности, все же зашкалил, немедленно выключите его, нажав кнопку питания, и сообщите об этом заведующему лабораторией, либо преподавателю.

6. Рассчитать интенсивность излучения как произведение показаний микроамперметра на предел. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 11.1.

7. Построить график зависимости $I(x)$ интенсивности света в дифракционной картину от ее линейных размеров.

Таблица 11.1

Экспериментальные и расчетные данные по определению интенсивности I в различных положениях фоторезистора

Положение фоторезистора x , мм	Показания амперметра	Предел измерения	Интенсивность I , А

8. Экспериментально подобрать ширину щели так, чтобы при самой большой чувствительности микроамперметра ($\times 1$) его показания были в пределах шкалы при перемещении фоторезистора вдоль 1-го, 2-го и 3-го максимумов дифракционной картины.

9. Произвести измерения интенсивности света в дифракционной картине для максимумов 1-го, 2-го и 3-го порядков. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 11.2.

Таблица 11.2

Экспериментальные и расчетные данные по определению интенсивности I в максимумах

Положение фоторезистора x , мм	Номер макс. n	Показания амперметра	Предел	Интенсивность I , А

10. Вычислить отношения $\frac{I_2}{I_1}$, $\frac{I_1}{I_3}$, $\frac{I_2}{I_3}$ и сравнить с аналогичными отношениями из формулы (11.9).

11. Передвинуть щель к лазеру на расстояние около 10 см от первоначального положения.

12. Повторить пункты 8-10. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 11.3.

13. Передвинуть щель к регистрирующему устройству на расстояние около 20 см от первоначального положения.

14. Повторить пункты 8-10. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 11.4.

Таблица 11.3

Экспериментальные и расчетные данные по определению интенсивности I в максимумах после смещения на 10 см

Положение фоторезистора x , мм	Номер максимума n	Показания микроамперметра	Предел	Интенсивность I , А

Таблица 11.4

Экспериментальные и расчетные данные по определению интенсивности I в максимумах после смещения на 20 см

Положение фоторезистора x , мм	Номер максимума n	Показания микроамперметра	Предел	Интенсивность I , А

11.4 Контрольные вопросы и задания

1. Чем отличается дифракция Фраунгофера от дифракции Френеля?

2. Объясните назначение линз L и L' в схеме для наблюдения дифракции Фраунгофера?

3. Почему не используются линзы L и L' в данной лабораторной установке?

4. Как получить графически соотношения (11.6) и (11.7), определяющие направление на максимумы и минимумы?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Цель работы: изучить дифракцию Фраунгофера. Научиться экспериментально определять спектральный состав источника света при помощи дифракционной решетки, а также определять важнейшие характеристики решетки.

Оборудование: гониометр Г-5М с осветителем, плоские прозрачные дифракционные решетки

12.1 Краткие теоретические сведения

Дифракционной решеткой называется устройство, представляющее собой периодическую структуру из большого числа регулярно расположенных элементов, на которых происходит дифракция света. Периодически меняющимся параметром может быть, например, прозрачность (амплитуда решетки), геометрическая толщина или показатель преломления (фазовая решетка).

Простейшая амплитудная дифракционная решетка представляет собой ряд щелей одинаковой ширины b , расположенных друг от друга на расстояниях a (рис. 12.1). Изготовление большинства современных дифракционных решеток осуществляется при помощи делительной машины путем нанесения параллельных штрихов ступенчатого профиля на поверхность стеклянной пластины. Если такие штрихи нанесены на отполированную металлическую поверхность, то с такой поверхности можно снять отпечатки на пластмассах, которые называются репликами и используются как второсортные дешевые решетки.

Характеристиками амплитудной решетки являются: общее число штрихов N , число штрихов на одном миллиметре

n , период решетки $d = a + b$ (рис. 12.1), причем $d = \frac{1}{n}$ и $a = b$

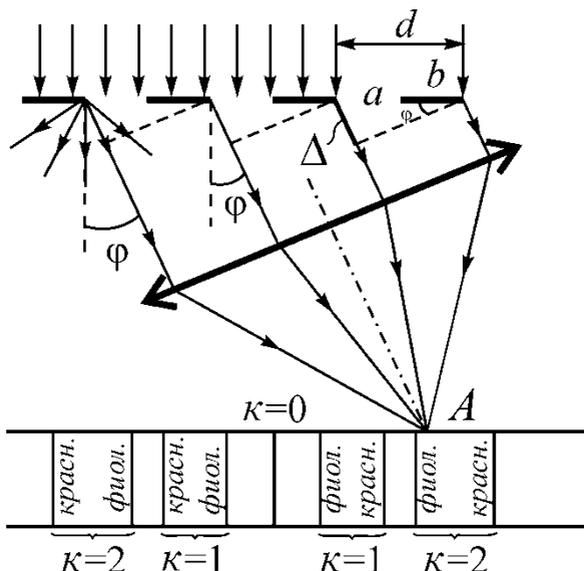


Рисунок 12.1 – Ход лучей в дифракционной решетке

Пусть плоская монохроматическая волна длиной λ падает нормально на дифракционную решетку (рис. 12.1) за дифракционной решеткой расположим собирающую линзу, в фокальной плоскости которой поместим экран. Световые пуски, посылаемые отдельными щелями в направлении угла φ , будут интерферировать между собой и разность хода между двумя параллельными лучами, идущими от симметричных точек соседних щелей S_1 и S_2 , определяется соотношением

$$\Delta = d \sin \varphi. \quad (12.1)$$

При значении $\Delta = k\lambda$ ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) эти лучи, встретились после прохождения через линзу в точке A ее фокальной плоскости, дадут на экране интерференционный максимум. (Линза не вносит никакой дополнительной

разности). Число k носит название порядка дифракционного максимума. В точке $k = 0$ расположен центральный максимум, а по обе стороны от него симметрично располагаются дифракционные максимумы более высоких порядков. Следовательно, направления, удовлетворяющие условию

$$d \sin \varphi = k \lambda. \quad (12.2)$$

Представляют собой направления на главные максимумы. S_1 Распределение интенсивности света описывается уравнением

$$I = N^2 I_0 \left(\frac{\sin \theta}{\theta} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sin N \beta}{N \beta} \right)^2, \quad (12.3)$$

где $\theta = \left(\frac{\pi b}{\lambda} \right) \cdot \sin \varphi$, $\beta = \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right) \cdot \sin \varphi$, I_0 – интенсивность света,

падающего на одну щель. Множители $\left(\frac{\sin \theta}{\theta} \right)^2$ и $\left(\frac{\sin N \beta}{N \beta} \right)^2$ выражают распределение интенсивности при дифракции на каждой щели и интерференции пучков, исходящих от всех щелей

Из (12.3) видно, что между двумя соседними главными максимумами располагаются $(N - 1)$ минимумов, получающихся при обращении в нуль числителя, т.е. при $N \beta = \pi, 2\pi, \dots, (N - 1)\pi$. Между минимумами располагаются побочные максимумы, интенсивность которых гораздо меньше главных. У хороших решеток они практически незаметны.

Положения главных максимумов зависят от длины волны. Поэтому решетка разлагает падающий свет сложного состава в спектры различных порядков.

При падении плоской монохроматической волны на решетку под некоторым углом ψ условие максимумов принимают вид

$$d(\sin \varphi + \sin \psi) = k\lambda. \quad (12.4)$$

Основными оптическими характеристиками любого спектрального прибора, и дифракционной решетки в том числе, являются его дисперсия и разрешающая способность.

Угловой дисперсией прибора называется величина, численно равная угловому расстоянию между максимумами двух спектральных линий, отличающихся по длине волны на единицу

$$D = \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda}. \quad (12.5)$$

Для дифракционной решетки

$$D = \frac{k}{d \cos \varphi}. \quad (12.6)$$

Разрешающей способностью дифракционной решетки является величина

$$R = \frac{\lambda}{\partial \lambda} = kN, \quad (12.7)$$

где $\partial \lambda$ – интервал двумя видимыми нераздельно спектральными линиями с длинами волн в окрестностях λ .

12.2 Экспериментальная установка

Лабораторная установка состоит из гониометра Г-5М, на верхнем столике которого жестко укреплена плоская прозрачная дифракционная решетка (рис. 12.2) шириной заштрихованной поверхности $l = 5$ см и $a = 200$ мм⁻¹. На нижнем столике гониометра установлен осветитель с лампы, дающей линейчатый спектр испускания.

Верхний и нижний столик гониометра жестко закреплены друг относительно друга так, что обеспечивает нормальное падение света на дифракционную решетку.

Для наблюдения дифракции и измерения углов φ верхний и нижний столики совместно поворачивают вокруг вертикальной оси гониометра.

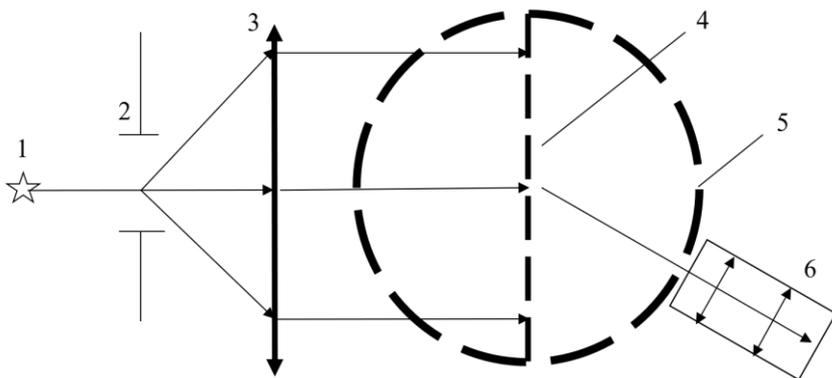


Рисунок 12.2 – Лабораторная установка

Параллельность светового пучка, падающего на решетку, обеспечивает оптической системой осветителя, работающего от специального блока питания.

Свет от лампы 1 попадает на щель 2, которая находится в фокусе линзы 3 параллельным пучком нормально падает на дифракционную решетку 4. Дифракционную картину различных порядков наблюдают через автоколлиматор гониометра 6 поворачивая совместно столики гониометра 5.

12.3 Порядок выполнения работы

1. Включить блок питания лампы и прогреть ее 5 минут.
2. Поворачивая совместно стол гониометра наблюдать через автоколлиматор гониометра дифракционную картину различных порядков по обе стороны относительно центрального максимума.
3. Устанавливая в спектре первого порядка слева поочередно каждую яркую линию на перекрестия сетки

окуляра автоколлиматора, зафиксировать показания на лимбе (при считывании показаний пользоваться правилами отсчета по лимбу и нониусу описанными в лабораторной работе № 7). Результаты измерений занести в табл. 12.1.

Таблица 12.1

Экспериментальные данные измерения углов спектральных линий в первом порядке слева

Порядок	Цвет	Угол

4. Аналогичные изменения выполнить для тех же линий в первом порядке справа. Результаты измерений занести в табл. 12.2.

Таблица 12.2

Экспериментальные данные измерения углов спектральных линий в первом порядке справа

Порядок	Цвет	Угол

5. Вычислить угол дифракции φ для каждой линии в первом порядке как полуразность показаний линий слева и справа.

6. Выполнить пп. 3-5 для тех же линий во втором порядке. Результаты измерений занести в табл. 12.3 и 12.4.

Таблица 12.3

Экспериментальные данные измерения углов спектральных линий во втором порядке слева

Порядок	Цвет	Угол

Таблица 12.4

Экспериментальные данные измерения углов спектральных линий во втором порядке справа

Порядок	Цвет	Угол

7. По формуле (12.2) вычислить длины волн исследуемых спектральных линий. Найти среднее значение длины волны каждой линии.

8. По результатам пункта 7 и данным табл. 12.5 определить элемент, пары которого находятся в лампе лабораторной установки.

9. По формулам (12.5) и (16.7) рассчитать угловую дисперсию и разрешающую способность дифракционной решетки для некоторых дублетов 1-м и 2-м порядке.

12.4 Контрольные вопросы

1. Что собой представляет дифракционная решетка?
2. Объясните явление дифракции света на решетке.
3. Чем отличается дифракционный спектр от спектра, полученного при помощи призмы?
4. Какие лучи (красные или фиолетовые) дифрагируют на больший угол в одном и том же порядке? Почему?
5. Что понимают под разрешающей способностью дифракционной решетки?
6. Что называют дисперсией дифракционной решетки?
7. Как изменится дифракционная картина, если закрыть половину решетки?
8. Как изменится дифракционная картина, если лучи на решетку направить под углом отличным от нулевого?

Таблица 12.5

Длины волн спектральных линий некоторых элементов
в видимой области

Элемент	Символ	λ , нм	Элемент	Символ	λ , нм
Кальций	Ca	393.3666	Таллий	Tl	535.0460
Кальций	Ca	396.8468	Ртуть	Hg	546.0740
Ртуть	Hg	404.6561	Ртуть	Hg	576.9596
Водород	H	410.1735	Ртуть	Hg	579.0654
Кальций	Ca	422.6728	Гелий	He	587.5618
Железо	Fe	430.7905	Натрий	Na	588.9953
Водород	H	434.0465	Натрий	Na	589.5923
Ртуть	Hg	435.8343	Литий	Li	610.3642
Железо	Fe	438.3547	Цинк	Zn	636.2347
Кадмий	Cd	441.4630	Кадмий	Cd	643.8470
Гелий	He	447.1477	Водород	H	656.2725
Стронций	Cr	460.7331	Гелий	He	667.8149
Железо	Fe	468.0298	Литий	Li	670.7844
Кадмий	Cd	479.9914	Кислород	O	686.7200
Водород	H	486.1327	Гелий	He	706.5188
Гелий	He	492.1929	Кислород	O	760.8200
Кадмий	Cd	508.5824	Калий	K	766.4907
Железо	Fe	527.0360	Калий	K	769.8979

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА

Цель работы: изучить явление поляризации света, ознакомиться с устройством и принципом действия поляризационных приборов, экспериментально проверить закон Малюса.

Оборудование: оптическая скамья с рейтерами, источник естественного света, поляризатор и анализатор в оправках с круговой шкалой, фотоприемник с показывающим электрическим прибором.

13.1 Краткие теоретические сведения

Световые волны поперечны. Электрический вектор \vec{E} и магнитный вектор \vec{B} ($\vec{B} \perp \vec{E}$) располагаются в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны (лучу S). Во всякой точке пространства ориентация пары векторов \vec{E} и \vec{B} в плоскости, перпендикулярной к лучу S , может изменяться со временем. В зависимости от характера такого изменения различают естественный и поляризованный свет.

Обычный источник света является совокупностью огромного числа быстро высвечивающихся ($10^{-7} \div 10^{-5}$ с) элементарных источников (атомов или молекул), испускающих свет независимо друг от друга с разными фазами и с разными ориентациями векторов \vec{E} и \vec{B} .

Ориентация векторов \vec{E} и \vec{B} в результирующей волне хаотически изменяется во времени, так, что в плоскости, перпендикулярной к лучу S , все направления оказываются равноправными. Такой свет называется естественным или неполяризованным.

При помощи специальных приспособлений (поляризаторов), естественный свет может быть превращен в линейно поляризованный. В линейно поляризованной волне пара векторов \vec{E} и \vec{B} не изменяют с течением времени своей ориентации. Плоскость \vec{E} называется в этом случае плоскостью колебаний. В некоторых случаях может быть получен эллиптически поляризованный свет. В эллиптически поляризованной световой волне конец вектора \vec{E} (в данной точке пространства) описывает некоторый эллипс. Линейно-поляризованный свет можно рассматривать как частый случай эллиптически поляризованного света, когда эллипс поляризации вырождается в отрезок прямой линии; другим частным случаем является круговая поляризация. Отличать естественный свет от поляризованного и определять направления световых колебаний в нем можно при помощи анализаторов; те же приборы служат и для получения поляризованного света.

Принцип действия различных поляризирующих приборов одинаков. Направления колебаний электрического и магнитного векторов естественного света всегда «сортируются» этими приборами так, что в один пучок отбирается преимущественно (или сполна) излучение с одним направлением электрических колебаний, а другой – излучение с перпендикулярным направлением электрических колебаний. Смещение обоих пучков снова дает естественный свет. Иногда явление несколько сглаживается тем обстоятельством, что один из этих пучков претерпевает более или менее полное поглощение (турмалин, непрозрачный диэлектрик). Два взаимно перпендикулярных направления колебаний в двух пучках, образующихся при поляризации, определяются физическими особенностями примененного поляризатора (в случае турмалина и др. кристаллов они определены строением кристалла, в случае зеркала – направлением плоскости падения и т.д.).

Эти избранные направления можно назвать главными плоскостями P_1 и P_2 ($P_1 \perp P_2$). Если естественный свет проходит через два поляризующих прибора, соответствующие плоскости которых образуют между собой угол γ , то интенсивность света, пропущенного такой системой, будет пропорциональна $\cos^2 \gamma$. Закон этот был сформулирован Малюсом в 1810 году: подтвержден тщательными фотометрическими измерениями Араго, который построил на этом принципе фотометр. Небезынтересно заметить, что Малюс вывел закон, основываясь на корпускулярных представлениях о свете. С волновой точки зрения закон Малюса представляет собой следствие теоремы разложения вектора амплитуды и утверждение, что интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды световой волны. Действительно, если угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора равен γ , то проекция вектора \vec{E}_0 линейно поляризованного света, вышедшего из поляризатора, на главную плоскость анализатора, равна

$$E_n = E_0 \cos \gamma. \quad (13.1)$$

Учитывая, что интенсивность света I пропорциональна квадрату амплитуды световой волны (в данном случае E_n), получим

$$I_n = I_0 \cos^2 \gamma. \quad (13.2)$$

Это и есть закон Малюса. Он лежит в основе расчета интенсивности света, прошедшего через поляризатор и анализатор, все всевозможных поляризационных приборах.

13.2 Экспериментальная установка и теория метода

Принципиальная схема установки представлена на рис. 13.1.

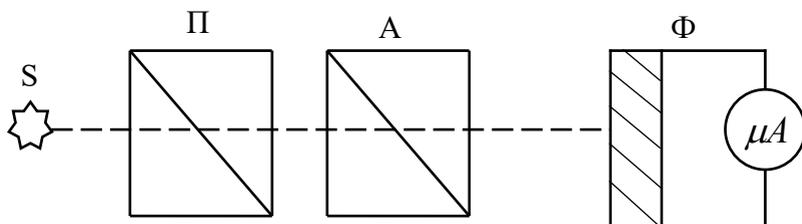


Рисунок 13.1 – Экспериментальная установка

Свет от источника проходит через поляризатор, закрепленный на вращающемся диске с угловыми делениями. Угол поворота измеряется по шкале диска и нониуса. После поляризатора свет попадает на анализатор (в качестве анализатора *А* и поляризатора *П* использованы призмы Николя). Пройдя анализатор, свет попадает на фотоэлемент, в цепи которого возникает фототок, измеряемый гальванометром. Величина фототока пропорциональна интенсивности света, пропущенного системой поляризатора и анализатора (николей).

Таким образом, экспериментальная установка представляет возможность измерять интенсивность света, прошедшего через анализатор и поляризатор, при разных известных углах между их главными плоскостями.

13.3 Порядок выполнения работы

ЗАДАНИЕ 1. Наблюдать ослабление интенсивности естественного света после прохождения через поляризующий прибор.

1. Оставить на оптической скамье только источник света и фотоприемник света с регистрирующим прибором. Включить источник света и добиться показаний прибора, равных 100 делениям шкалы (можно кратных 100 делениям).

2. Установить на оптическую скамью рейтер с поляризатором во вращающейся обойме так, чтобы оптическая система была центрирована.

3. Зафиксировать показания прибора.

4. Медленно поворачивая поляризатор ($0^\circ - 360^\circ$) относительно оптической оси системы, следить за показаниями прибора.

5. Сделать вывод о влиянии поляризирующего прибора на интенсивность прошедшего света.

ЗАДАНИЕ 2. Наблюдать ослабление поляризованного света после прохождения через второй поляризационный прибор.

1. Убрать с оптической скамьи поляризатор и на его место установить второй поляризационный прибор, который будет в дальнейшем использоваться в качестве анализатора.

2. Зафиксировать показания прибора.

3. Выполнить аналогично 3 и 4 задания 1.

ЗАДАНИЕ 3. Исследовать зависимость интенсивности света I , прошедшего через оптическую систему «поляризатор-анализатор» от угла γ между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора.

1. Установить на оптическую скамью поляризатор и анализатор. Поставить индексы отсчета против угла 0° (для поляризатора и анализатора). В этом положении плоскости пропускания поляризатора и анализатора параллельны. Зафиксировать показания прибора.

2. Поворачивая анализатор на 360° с шагом 10° и фиксируя показания прибора, получить экспериментальные данные о зависимости интенсивности света от угла γ . Результаты измерений занести в табл. 13.1.

3. Построить график зависимости $\frac{I}{I_0} = f(\gamma)$, где I_0 – максимальная интенсивность света, прошедшим через систему «поляризатор-анализатор».

4. Сделать вывод о характере этой зависимости.

Таблица 13.1

Экспериментальные и расчетные по определению интенсивности I света в системе поляризатор-анализатор при различных углах поворота

γ , град.	I	γ , град.	I

ЗАДАНИЕ 4. Проверить выполнение закона Малюса.

1. Проанализировать характер зависимости, полученной при выполнении задания 3 и представленной в координатах $\frac{I}{I_0}(\gamma)$.

2. Выбрать функциональные шкалы, в которых эта зависимость может быть линейной.

3. Используя метод наименьших квадратов, провести наилучшую прямую через экспериментальные точки, записать ее уравнение.

4. Сделать выводы о выполнении закона Малюса.

13.4 Контрольные вопросы и задания

1. Чем отличается поляризованный свет от естественного?

2. Какой свет называется плоско поляризованным?

3. Что называют плоскостью колебаний?

4. Какими способами можно получить плоско поляризованный свет?

5. Назовите наиболее употребительные поляризационные призмы, расскажите об их конструкции и физических явлениях, используемых в них.

6. Что утверждает закон Малюса?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведённый курс лабораторных работ по дисциплине «Общая и экспериментальная физика (оптика)» направлен на формирование у студентов целостного представления о природе света, законах его распространения и взаимодействия с веществом, а также практических навыков экспериментальной работы. Освоение методик юстировки оптических систем, измерения фокусных расстояний линз, моделирования оптических приборов и анализа погрешностей эксперимента закладывает основу профессиональной подготовки будущего учителя физики. Особое внимание уделено развитию исследовательских компетенций: умению самостоятельно планировать эксперимент, выбирать оптимальные методы измерений и корректно интерпретировать полученные результаты.

Содержание лабораторного практикума полностью соответствует содержанию дисциплины «Общая и экспериментальная физика (оптика)» учебных планов бакалавриата по направлениям подготовки 44.03.05 Педагогическое образование (с двумя профилями подготовки): профили Физика. Математика и Физика. Информатика.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ландсберг, Г. С. Оптика : учебное пособие / Г. С. Ландсберг. – 7-е изд., стереот. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2021. – 852 с. – ISBN 978-5-9221-1742-5. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL : <https://e.lanbook.com/book/185678> (дата обращения: 28.08.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

2. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 3 томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика : учебник для вузов / И. В. Савельев. – 18-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 500 с. – ISBN 978-5-507-51528-8. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL : <https://e.lanbook.com/book/422636> (дата обращения: 28.08.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

3. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 3 томах. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц : учебник для вузов / И. В. Савельев. – 16-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2025. – 320 с. – ISBN 978-5-507-50503-6. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL : <https://e.lanbook.com/book/440198> (дата обращения: 28.08.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

4. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : учебное пособие / Д. В. Сивухин. – 3-е изд., стер. – М. : ФИЗМАТЛИТ, [б. г.]. – Том 4 : Оптика – 2002. – 792 с. – ISBN 5-9221-0228-1. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL : <https://e.lanbook.com/book/2314> (дата обращения: 28.08.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

5. Годжаев, Н. М. Оптика : учеб. пособ. для вузов / Н. М. Годжаев. – М. : Высш. школа, 1977. – 432 с.

6. Корсунский, М. И. Оптика, строение атома, атомное ядро [Учеб. пособие для вузов] / М. И. Корсунский. – 3-е изд., стер. – Москва : Наука, 1967. – 527 с.

7. Яворский, Б. М. Курс физики [Для вузов]. Волновые процессы. Оптика. Атомная и ядерная физика / Б. М. Яворский. – 1967. – 553 с.

8. Физический практикум. Электричество и оптика : учебное пособие для университетов : допущено Министерством высшего и среднего специального образования РСФСР / под ред. В. И. Иверонова ; авт.-сост. А. Г. Белянкин [и др.]. – 2-е изд., перераб. – Москва : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1968. – 815 с. – Текст : непосредственный.

9. Практикум по общей физике: [Для физ.-мат. фак. пед. ин-тов] / З. И. Авдусь, М. М. Архангельский, Н. И. Кошкин и др. ; Под ред. проф. В. Ф. Ноздрева. – Москва : Просвещение, 1971. – 311 с.

10. Майсова, Н. Н. Практикум по курсу общей физике / Н. Н. Майсова. – М. : Высш. шк., 1970. – 448 с.

11. Евграфова, Н. Н. Руководство к лабораторным работам по физике : учебное пособие / Н. Н. Евграфова, В. Л. Каган. – Москва : Высш. школа, 1970. – 382 с.

12. Попко, Ю. М. Руководство к практикуму по физике : для физ.-матем. фак. пед. ин-тов / Ю. М. Попко, Л. А. Князева ; под ред. проф. З. В. Волковой. – Москва : Учпедгиз, 1959. – 443 с.

13. Лабораторные занятия по физике : [Учеб. пособие для физ. спец. вузов / Л. Л. Гольдин, Ф. Ф. Игошин, С. М. Козели др.] ; под ред. Л. Л. Гольдина. – Москва : Наука, 1983. – 704 с.

14. Гершензон, Е. М. Курс общей физики. Оптика и атомная физика : [Для физ.-мат. фак.] / Е. М. Гершензон, Н. Н. Малов, А. Н. Мансуров. – 2-е изд., перераб. – Москва : Просвещение, 1992. – 320 с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

КОРЧИКОВА Наталия Всеволодовна
ТЕХТЕЛЕВ Юрий Владимирович
СИЛЬЧЕВА Анна Геннадьевна

**ФИЗИКА:
ОБЩАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА
(ОПТИКА)**

Лабораторный практикум

В авторской редакции

Подписано в печать 13.11.2025. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Печать ризографическая. Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 6,98.
Тираж 100 экз. Зак. № 80.

ФГБОУ ВО «ЛГПУ»
Издательство ЛГПУ
ул. Оборонная, 2, г. Луганск, ЛНР, 291011. Т/ф:+7-857-258-03-20.
e-mail: knitaizd@mail.ru