ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И.С. ТУРГЕНЕВА»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ Н.Н. ПОЛИКАРПОВА

Кафедра машиностроения

Л.Ю. Фроленкова, С.Н. Ромашин, М.В. Хорошилова

ОПТИКА, КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ
Часть 3

Практикум

Дисциплина – «Физика»
Специальность – 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов»
Направления: 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»
15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
23.03.01 «Технология транспортных процессов»
23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы»
23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»
23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства»
29.03.01 «Технология изделий легкой промышленности»
29.03.05 «Конструирование изделий легкой промышленности»

Орёл
ОГУ имени И.С. Тургенева
2019

Авторы: д-р техн. наук, доц., зав. каф. машиностроения
Л.Ю. Фроленкова
канд. физ.-мат. наук, доц. каф. технической физики
С.Н. Ромашин
канд физ.-мат. наук , доц. каф. технической физики
М.В. Хорошилова

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. каф. технической физики
В.С. Шоркин

Практикум по выполнению лабораторных работ содержит требования по подготовке, выполнению, оформлению и отчету лабораторных работ, краткие теоретические сведения, необходимые для выполнения экспериментальной части работ, алгоритм выполнения экспериментов, а также контрольные вопросы для самопроверки и списки литературных источников.

Предназначен для студентов, обучающихся по специальности 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов» и направлениям: 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», 15.03.06 «Мехатроника и робототехника», 23.03.01 «Технология транспортных процессов», 23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», 29.03.01 «Технология изделий легкой промышленности», 29.03.05 «Конструирование изделий легкой промышленности», изучающих дисциплину «Физика».

Редактор Т.Н. Шаблинская
Технический редактор О.Н. Федоров

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»

Подписано к печати 18.01.2019 г. Формат 60×90 1/16.
Усл. печ. л. 3,4. Тираж 10 экз.
Заказ №_____

Отпечатано с готового оригинал-макета
на полиграфической базе ОГУ имени И.С. Тургенева
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95.

© Фроленкова Л.Ю., Ромашин С.Н.,
Хорошилова М.В., 2019
© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2019

Содержание

ВВЕДЕНИЕ 5
1 УКАЗАНИЯ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ 6
2 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СВЕТА МЕТОДОМ КОЛЕЦ НЬЮТОНА 8
2.1 Цель работы 8
2.2 Оборудование 8
2.3 Метод измерений 8
2.4 Подготовка к работе 8
2.5 Теоретическая часть 8
2.6 Устройство и принцип работы 11
2.7 Методика проведения эксперимента 12
2.8 Контрольные вопросы 13
2.9 Рекомендуемая литература 13
3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА: ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА ОТ ОТВЕРСТИЯ И ПРЕГРАДЫ 15
3.1 Цель работы 15
3.2 Оборудование 15
3.3 Метод измерений 15
3.4 Подготовка к работе 15
3.5 Теоретическая часть 15
3.6 Устройство и принцип работы 18
3.7 Методика проведения эксперимента 19
3.8 Контрольные вопросы 22
3.9 Рекомендуемая литература 23
4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ 24
4.1 Цель работы 24
4.2 Оборудование 24
4.3 Метод измерений 24
4.4 Подготовка к работе 24
4.5 Теоретическая часть 24
4.6 Устройство и принцип работы 27
4.7 Методика проведения эксперимента 28
4.8 Контрольные вопросы 30
4.9 Рекомендуемая литература 30
5 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА: ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКЕ С ПОМОЩЬЮ КОМПАКТ-ДИСКА 31
5.1 Цель работы 31
5.2 Оборудование 31
5.3 Метод измерений 31
5.4 Подготовка к работе 31
5.5 Теоретическая часть 31

5.6. Устройство и принцип работы 34
5.7 Методика проведения эксперимента..... 35
5.8 Контрольные вопросы..... 37
5.9 Рекомендуемая литература 37
6 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА: ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ АТОМОВ ВОДОРОДА И РТУТИ 38
6.1 Цель работы 38
6.2 Оборудование 38
6.3 Метод измерений 38
6.4 Подготовка к работе..... 38
6.5 Теоретическая часть..... 38
6.6 Устройство и принцип работы 41
6.7 Методика проведения эксперимента..... 43
6.8 Контрольные вопросы..... 45
6.9 Рекомендуемая литература 45
7 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ СТЕФАНА – БОЛЬЦМАНА С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОГО ПИРОМЕТРА 46
7.1 Цель работы 46
7.2 Оборудование 46
7.3 Метод измерений 46
7.4 Подготовка к работе..... 46
7.5 Теоретическая часть..... 46
7.6 Устройство и принцип работы 49
7.7 Методика проведения эксперимента..... 52
7.8 Контрольные вопросы..... 53
7.9 Рекомендуемая литература 53
ПРИЛОЖЕНИЕ А ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ 55

ВВЕДЕНИЕ

Практикум по физике – наука экспериментальная, поэтому физический эксперимент является корневой структурой физического образования. Лабораторные работы проводятся с целью повторения, углубления, расширения и обобщения полученных знаний из разных тем курса физики; развития и совершенствования у студентов экспериментальных умений; формирования у них самостоятельности при решении задач, связанных с экспериментом. Составной частью современного научного познания является эксперимент, отличающийся от наблюдения активным оперированием реальными объектами, позволяющий изолировать изучаемый объект или процесс от побочных явлений или предметов. Получая в ходе проведения эксперимента числовой результат, обучающийся должен понимать, какие допущения и пренебрежения были сделаны при постановке опыта и проведении расчетов. С этой позиции он должен оценивать и сопоставлять с табличными данными полученный результат, формулировать вывод.

Методические указания по выполнению лабораторных работ разработаны согласно рабочим программам по учебной дисциплине «Практикум по физике» и требованиям к умениям и знаниям Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по специальностям 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 15.03.06 Мехатроника и робототехника, 23.03.02 Наземные транспортно-технологические комплексы, 23.05.01.65 Наземные транспортно-технологические средства.

Цель методических указаний – помочь обучающимся выполнить лабораторные работы, предусмотренные программой по практикуму по физике, научить правильно, определять погрешности и производить необходимую числовую обработку результатов лабораторного эксперимента.

Весь процесс выполнения лабораторных работ включает в себя теоретическую подготовку, ознакомление с приборами и сборку схем, проведение опыта и измерений, числовую обработку результатов лабораторного эксперимента и защита лабораторной работы.

1 УКАЗАНИЯ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

На каждое лабораторное занятие отводится 4 часа аудиторного времени и 4 часа на самостоятельную подготовку.

Целью проведения лабораторных занятий является:

- привитие навыков практического использования теоретических положений, с которыми студенты знакомятся на лекциях и в ходе самостоятельной работы;
- привитие навыков работы с современными исследовательскими приборами и оборудованием;
- обучение математическим методам обработки результатов экспериментов.

Готовясь к лабораторным занятиям, студенты должны помнить следующее:

- теоретическая подготовка к лабораторной работе, а также подготовка отчета по ней должны проводиться заранее (дома), так как время занятий ограничено и предназначено в основном для монтажа установки, проведения измерений и обработки их результатов;
- при подготовке к занятиям нужно в первую очередь внимательно прочитать описание соответствующей лабораторной работы и понять: ее цель; основные теоретические положения, которые являются основой проводимых измерений; устройство экспериментальной установки; план проведения эксперимента. При необходимости следует повторить по конспекту или учебнику материал тех лекций, которые так или иначе связаны с темой лабораторной работы.

Форма отчета должна готовиться на двойных листах из ученической тетради или на листах бумаги формата А4 в соответствии со стандартными требованиями. Первый и последний листы отчета являются обложкой. Лицевая страница обложки должна содержать номер и название лабораторной работы, номер группы и фамилию студента, выполняющего эту работу, фамилию преподавателя, проверившего ее (см. Приложение А).

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- оборудование;
- метод измерения;
- описание экспериментальной установки (нужно схематически нарисовать установку) с перечислением используемых в эксперименте приборов и указанием их класса точности (если он имеется);

- таблицы для записи результатов измерений;

- формулы, необходимые для вычислений, и сами вычисления искомых величин, расчеты их погрешностей;

- ответы на контрольные вопросы со списком использованных литературных или других источников;

- выводы.

Цель работы, оборудование, метод измерения, описание экспериментальной установки и ее схема, таблицы для записи результатов измерений, формулы, необходимые для вычислений переписываются из методических указаний по выполнению лабораторных работ. В случае отсутствия метода измерений он формулируется самостоятельно.

Контрольные вопросы содержатся в методических указаниях по выполнению соответствующей лабораторной работы. Плановое аудиторное выполнение лабораторной работы начинается с проверки теоретических знаний в виде опроса ответов на контрольные вопросы. По итогам опроса преподаватель проставляет отметку о допуске к выполнению лабораторной работы.

Работа над контрольными вопросами в лаборатории непосредственно в аудиторное время, отведенное на выполнение работы, не допускается. Студенты, не прошедшие опрос, к дальнейшему выполнению экспериментальной части работы не допускаются.

Теоретические сведения, необходимые для ответов на контрольные вопросы, содержатся в методических указаниях по выполнению лабораторных работ, а также в литературных источниках, перечисленных в методических указаниях.

В выводах указывается оценка полученного результата и погрешность его определения, перечисляются установленные закономерности и даются их объяснения, а также должна содержаться фраза об их соответствии цели лабораторной работы.

2 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СВЕТА МЕТОДОМ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

2.1 Цель работы

Изучение интерференции света в тонких пленках, определение длины световой волны.

2.2 Оборудование

Микроскоп с окулярным микрометром, линза и плоскопараллельная пластинка, заключенные в оправе.

2.3 Метод измерений

По прямым измерениям радиусов колец Ньютона определяют длину световой волны.

2.4 Подготовка к работе

В ходе домашней подготовки к выполнению лабораторной работы студенты знакомятся с теоретической частью (п. 2.5) настоящего методического указания. Кроме того, ими подготавливается бланк отчета по лабораторной работе, содержащей титульный лист (см. Приложение А); цель работы (п. 2.1); краткое описание экспериментального оборудования (п. 2.2); письменные ответы на контрольные вопросы (п. 2.8) при использовании теоретической части (п. 2.5) и рекомендуемой литературы (п. 2.9).

2.5 Теоретическая часть

Явление наложения световых пучков, ведущее к образованию светлых и темных полос, получило название интерференции света, при которой световые пучки, накладываясь, могут не только усиливать, но и ослаблять друг друга. Такое явление можно наблюдать, например, в опытах с кольцами Ньютона. Световые пучки, дающие устойчивую картину интерференции, называются когерентными. Когерентные источники света излучают волны одинаковой частоты с постоянной во времени разностью фаз. Опыт показывает, что получить устойчивую картину интерференции от двух независимых источников света невозможно, так как такие источники света не являются когерентными.

Установка для получения колец Ньютона изображена на рисунке 2.1 а. Она состоит из плоскопараллельной пластинки и плосковыпуклой линзы. Эту систему освещают параллельным пучком лучей монохроматического света, падающего нормально к плоской поверхности линзы.

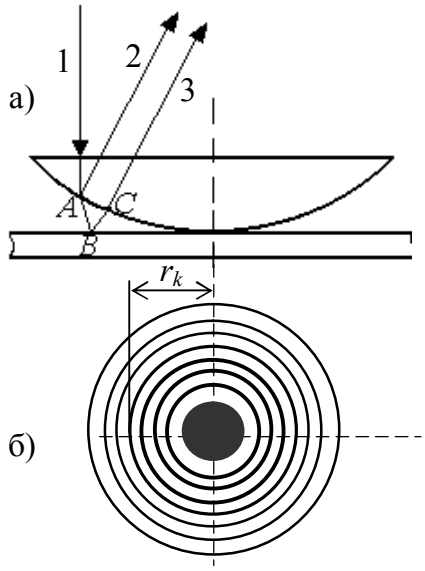


Рисунок 2.1 – Схема образования колец Ньютона

Рассмотрим ход волны, распространявшейся вдоль луча 1. В точке *A* возникает волна, отраженная от выпуклой поверхности линзы (рисунок 2.1 а, луч 2). В точке *B* возникает волна, отраженная от плоской поверхности пластины (рисунок 2.1 а, луч 3). Волны 2 и 3 являются частями одной и той же первичной волны 1. Они когерентны и при наложении интерферируют (рисунок 2.1 б).

Результат интерференции зависит от разности хода волн Δ. Из рисунка 2.1 видно, что разность хода волн 2 и 3

$$\Delta = (AB + BC) + \frac{\lambda}{2} = 2AB + \frac{\lambda}{2} = 2d + \frac{\lambda}{2}, \qquad (2.1)$$

где d – толщина воздушного зазора.

При отражении в точке *B* от оптически более плотной среды фаза волны изменяется на π, что эквивалентно изменению хода волны на $\frac{\lambda}{2}$ в соотношении (2.1).

Если разность хода волн Δ равна целому числу длин волн

$$\Delta = k\lambda, \qquad (2.2)$$

где k=1, 2, 3, …, то волны друг друга усиливают. Если же разность

хода волн равна нечетному числу полуволн

$$\Delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2}, \qquad (2.3)$$

то волны друг друга ослабляют.

Из соотношений (2.1), (2.2), (2.3) видно, что результат интерференции зависит от толщины воздушного зазора d. Во всех тех точках, которым соответствует одна и та же толщина воздушного клина, результат интерференции будет одинаков. Вследствие этого в рассматриваемом случае интерференционная картина имеет вид светлых и темных колец с темным пятном в центре (при идеальном соприкосновении линзы и пластинки).

Найдем радиус r_k темного кольца Ньютона с номером k. Из соотношений (2.1) и (2.3) следует:

$$2d_k + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}, \qquad (2.4)$$

где d_k – толщина воздушного зазора, соответствующая темному кольцу с номером k. Из соотношения (2.4) получаем:

$$2d_k = k\lambda. \qquad (2.5)$$

Найдем зависимость между разностью хода волн 2 и 3, радиусом r_k – k-ого темного кольца и радиусом кривизны линзы R. Обратимся к рисунку 2.2.

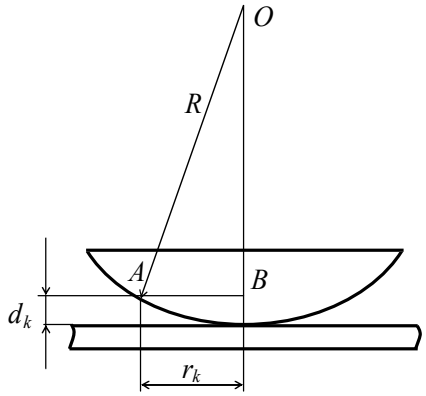


Рисунок 2.2 – Схема для определения радиуса r_k кольца Ньютона с номером k

Из треугольника OAB находим:

$$r_k^2 = R^2 - (R - d_k)^2 = 2Rd_k - d_k^2.$$

Так как d_k мало по сравнению с радиусом кривизны линзы (d_k имеет порядок длины волны), то членом d_k^2 пренебрегаем, поэтому

$$r_k^2 = 2Rd_k\,. \qquad (2.6)$$

Из соотношений (2.5) и (2.6) получаем:

$$r_k = \sqrt{Rk\lambda}\,. \qquad (2.7)$$

Аналогичный расчет показывает, что радиус кривизны k-ого светлого кольца подсчитывается по формуле

$$r_k = \sqrt{R(2k-1)\frac{\lambda}{2}}\,. \qquad (2.8)$$

Из формулы (2.7) видно, что, измерив радиус k-ого темного кольца r_k и радиус кривизны линзы R, можно найти длину световой волны λ.

Чтобы избежать ошибки, возникающей вследствие неидеального соприкосновения сферической поверхности линзы и плоскопараллельной пластинки, необходимо вычислить длину волны по разности радиусов двух колец r_m-r_n, где m и n номера темных колец.

Из соотношения (2.7) следует:

$$r_m = \sqrt{Rm\lambda}\,, \qquad (2.9)$$

$$r_n = \sqrt{Rn\lambda}\,, \qquad (2.10)$$

Из соотношений (2.9) и (2.10) получаем:

$$\lambda = \frac{r_m^2 - r_n^2}{R(m-n)}\,. \qquad (2.11)$$

2.6 Устройство и принцип работы

Установка для наблюдения колец Ньютона, изображенная на рисунке 2.3, состоит из микроскопа МБС-1, трансформатора 1, питающего лампочку осветителя 3, и прибора 2, содержащего стеклянную пластинку с линзой. На тубусе микроскопа укреплен осветитель 3 с красным светофильтром и окулярный микрометр 4. С помощью микровинта 5 производится перемещение тубуса по вертикали и настройка микроскопа на резкое видение колец. Поворотом рукоятки 6 производится смена объективов, позволяющих изменять увеличение микроскопа.

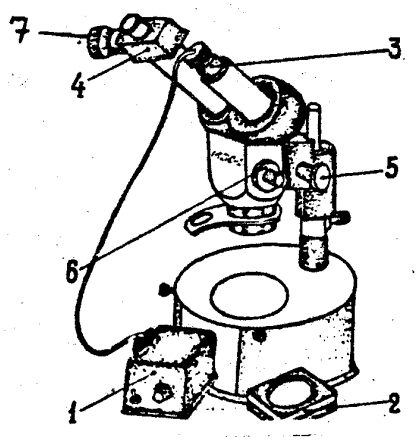


Рисунок 2.3 – Схема установки для наблюдения колец Ньютона

2.7 Методика проведения эксперимента

2.7.1 Поместить на столик микроскопа установку 2 (рисунок 2.3), содержащую стеклянную пластинку и линзу. Включить лампу накаливания.

2.7.2 Рукоятку 6 микроскопа поставить в положение, соответствующее объективу с двукратным увеличением. При этом на правой рукоятке против белой точки должна стоять цифра 2.

2.7.3 Вращая микровинт 5 и перемещаz установку 2 с линзой и пластиной по столику микроскопа, получить резкое изображение колец Ньютона.

2.7.4 С помощью регулятора накала лампы, имеющегося на трансформаторе, установить освещенность поля зрения, удобную для наблюдения колец.

2.7.5 Расположить установку с линзой и плоскопараллельной пластинкой так, чтобы перекрестие окулярного микрометра при вращении барабанчика 7 перемещалось вдоль диаметра колец. С помощью окулярного микрометра измерить радиусы 6-8 темных колец. Для этого перекрестие окулярного микрометра наводят сначала на левый край кольца и снимают показание B_1. Целое число показания находят по шкале, видимой в поле зрения. Сотые доли деления находят по шкале барабанчика окулярного микрометра (например, $B_1 = 2{,}61$). Затем аналогичным образом наводят перекрестие окулярного микрометра на правый край кольца и снимают показание B_2 (например, $B_2 = 6{,}37$). Диаметр кольца будет равен $(B_2–B_1)b$, где b – цена одного деления шкалы окулярного микрометра. При использовании объектива с двукратным увеличением цена деления неподвижной шкалы окулярного микрометра равна **0,37** ***мм***.

Все данные измерений занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

Номер кольца	B_1, *дел.*	B_2, *дел.*	$(B_2–B_1)$, *дел.*	Диаметр кольца $(B_2–B_1)b$, *мм*	Радиус кольца, *мм*

2.7.7 По формуле (2.11) рассчитать три-четыре значения λ, взяв попарно, например, следующие кольца: первое и пятое, второе и шестое, третье и седьмое, четвертое и восьмое. **Радиус кривизны линзы *R*=24 *см***. По полученным значениям λ найти среднее арифметическое значение $\lambda_{ср.}$

2.7.8 Из формулы (2.7) следует, что длина волны света

$$\lambda = \frac{r_k^2}{Rk}.$$

Абсолютную погрешность измерения длины волны определить по формуле:

$$\Delta\lambda = \left(\frac{2\Delta r_k}{r_k} + \frac{\Delta R}{R}\right)\lambda_{ср.}, \qquad (2.12)$$

где Δr_k=0,003 *мм*, ΔR=0,005 *мм*.

Записать окончательный результат в виде: $\lambda = \lambda_{ср.} \pm \Delta\lambda$.

2.8 Контрольные вопросы

А) Объяснить образование колец Ньютона.

Б) Почему при идеальном соприкосновении линзы и пластинки в центре колец Ньютона образуется темное пятно?

В) Получите формулу (2.7).

Г) Получите формулу (2.8).

2.9 Рекомендуемая литература

1. Трофимова, Т. И. Курс физики: учебное пособие для вузов / Т. И. Трофимова. - Москва: Академия (Academia), 2008. – 557 с.

2. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 4. Волны. Оптика: учебное пособие для втузов / И. В. Савельев. – Москва: АСТ: Астрель, 2008. – 256 с.

3. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного яд-

ра и элементарных частиц / И. В. Савельев. - Москва: АСТ: Астрель, 2008. – 368 с.

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

3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА: ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА ОТ ОТВЕРСТИЯ И ПРЕГРАДЫ

3.1 Цель работы

Исследуя картину дифракции от отверстия и преграды, определить длину световой волны и размеры преграды.

3.2 Оборудование

Гелий-неоновый лазер ЛГ-209, прямоугольная щель, нить, пластина с круглым отверстием, пластина с мелкими круглыми частицами, метровая линейка, экран с полоской миллиметровой бумаги.

3.3 Метод измерений

По прямым измерениям расстояния между минимумами k-ого порядка и диаметра светлого пятна определяют длину световой волны и размеры преграды.

3.4 Подготовка к работе

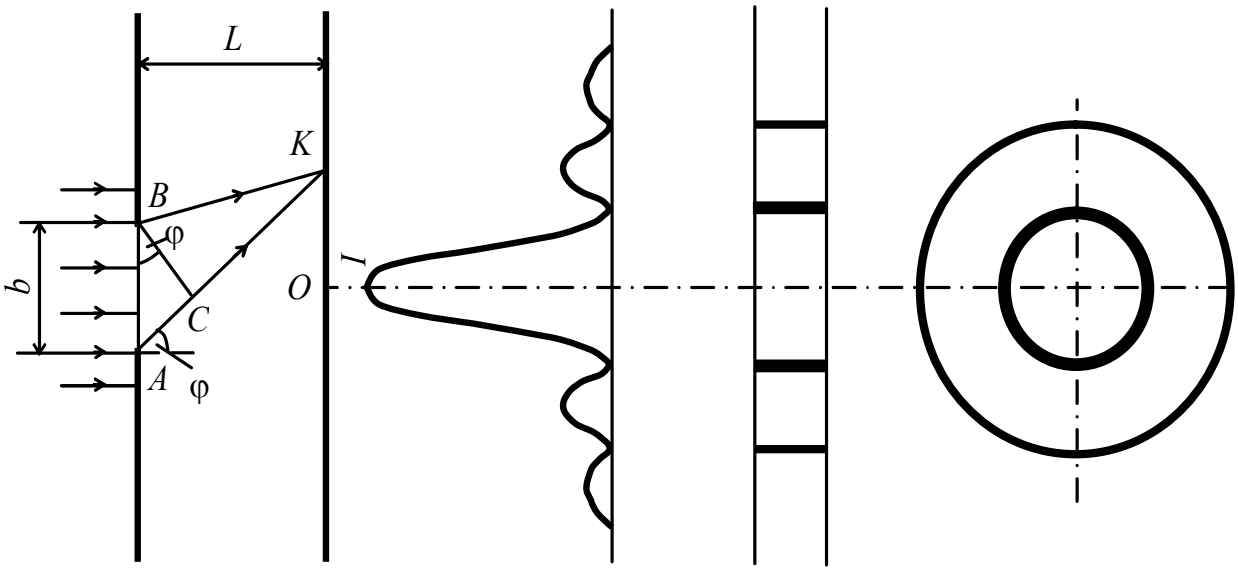
В ходе домашней подготовки к выполнению лабораторной работы студенты знакомятся с теоретической частью (п. 3.5) настоящего методического указания. Кроме того, ими подготавливается бланк отчета по лабораторной работе, содержащей титульный лист (см. Приложение А); цель работы (п. 3.1); краткое описание экспериментального оборудования (п. 3.2); письменные ответы на контрольные вопросы (п. 3.8) при использовании теоретической части (п. 3.5) и рекомендуемой литературы (п. 3.9).

3.5 Теоретическая часть

Дифракция света представляет собой отклонение света от прямолинейного распространения. Это явление возникает при наличии какого-либо препятствия на пути света (узкая щель, малое отверстие и т. д.). Дифракция в параллельных лучах впервые была рассмотрена И. Фраунгофером (1821 – 1822 гг.).

Пусть плоская монохроматическая волна длиной λ падает на непрозрачную преграду с узкой целью AB, имеющей постоянную ширину $b=|AB|$ и длину $l>>b$ (рисунок 3.1 а). По **принципу Гюйгенса** каждая точка, до которой дошла волна, является источником вторичных сферических волн. Поэтому из каждой точки отверстия по всем

направлениям будут распространяться волны. Рассмотрим волны, падающие в точку K экрана. Если расстояние от щели до экрана L значительно больше ширины щели, то можно считать, что все они дифрагируют под одним и тем же углом φ. В точке K накладывающиеся волны интерферируют. Результат интерференции зависит от разности хода волн $\Delta=|AC|$, попадающих в точку K от краев щели.



а) б) в)

Рисунок 3.1 – Дифракция света от отверстия

Для нахождения разности хода волн Δ из точки B опустим перпендикуляр BC на прямую AK. Из треугольника ABC (рисунок 3.1) следует:

$$\Delta=b\sin\varphi, \tag{3.1}$$

где b – ширина щели; φ - угол дифракции.

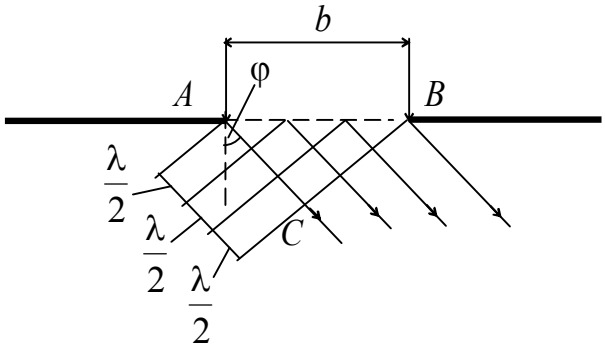


Рисунок 3.2 – Схема разбиения линии AC на z отрезков

Мысленно разобьем линию AC на ряд отрезков длиной $\frac{\lambda}{2}$ (рисунок 3.2). На $AC=b\sin\varphi$ уложится $z=\frac{b\sin\varphi}{\lambda/2}$ таких отрезков. Проведя из концов этих отрезков линии, параллельные BC, до встречи их с AB, мы разобьем фронт волны в щели на ряд полосок одинаковой ширины. Эти полоски и являются в дан-

ном случае зонами Френеля. Волны, идущие от каждых двух соседних зон Френеля, приходят в точку K в противоположной фазе и гасят друг друга. Если при таком построении число зон окажется четным, $z=2k$ (где k – целое число, не равное нулю, k=1, 2, 3, …), то каждая пара соседних зон взаимно погасит друг друга и при данном угле φ на экране будет минимум освещенности. Условие образования **минимума** имеет вид:

$$b\sin\varphi = 2k\frac{\lambda}{2}. \qquad (3.2)$$

В промежутках между минимумами будут наблюдаться **максимумы** освещенности:

$$b\sin\varphi = (2k+1)\frac{\lambda}{2}. \qquad (3.3)$$

В этом случае фронт AB разбивается на нечетное число зон Френеля $z=2k+1$ и одна из зон остается непогашенной.

Пусть угол дифракции φ=0, тогда все волны приходят в точку O экрана без разности хода (в одной фазе). Они усиливают друг друга, образуя **центральный максимум** нулевого порядка.

Таким образом, дифракционная картина при освещении щели параллельным пучком лучей монохроматического света имеет вид чередующихся светлых и темных полос с широкой светлой полосой в центре – центральным максимум (рисунок 3.1 б). Интенсивность максимумов по мере удаления от центрального максимума убывает.

В случае дифракции Фраунгофера на круглом отверстии диаметра D дифракционное изображение состоит из центрального светлого пятна (диск Эйри), на которое приходится приблизительно 85 % энергии света, и окружающих его светлых и темных колец (рисунок 3.1 в). Кольцевые максимумы убывают по интенсивности еще быстрее, чем в случае отверстия прямоугольной формы.

Положение максимумов и минимумов удовлетворяет условию:

$$\left.\begin{aligned} D\sin\varphi &= m_{\max}k\lambda \\ D\sin\varphi &= m_{\min}k\lambda \end{aligned}\right\}, \qquad (3.4)$$

где D – диаметр отверстия; φ - угол дифракции; λ - длина волны света; k – целые числа; значения $m_{\max}$ и $m_{\min}$ для k=1, 2, 3 и 4 приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

k	$m_{\max}$	$m_{\min}$
1	0	1,22
2	0,82	1,12
3	0,88	1,08
4	0,92	1,06

Следовательно, первому минимуму соответствует выражение:

$$D \sin \varphi = 1{,}22\lambda . \qquad (3.5)$$

Измерения толщины тонкой нити или диаметра мелких частиц размерами в несколько микрон являются сложной задачей. Эта проблема может быть решена дифракционным методом с весьма высокой точностью.

Рассмотрим дифракцию от нити и мелкой круглой частицы. Воспользуемся для этой цели теоремой Бабине. Согласно этой теореме дифракционные картины от преграды (нить, мелкая круглая частица и т. п.) и от равного ей по размеру отверстия (щель, круглое отверстие и т. п.) должны быть совершенно одинаковы вне области свободного (прямого) пучка. Убедимся, что это действительно так. Рассмотрим некоторую точку экрана. Пусть в этой точке амплитуда волны, дифрагирующей от преграды (нить, мелкая круглая частица и т. п.) в данном направлении, равна $\overline{A}$, а для соответствующего дополнительного экрана (щель, круглое отверстие и т. п.) в том же направлении амплитуда дифракционной волны равна $\overline{B}$. В отсутствии обоих экранов (преграды и отверстия) амплитуды волн для всех направлений, кроме направления первоначального пучка, равны 0. Следовательно, $\overline{A} + \overline{B} = 0$. Отсюда $\left|\overline{A}\right| = \left|\overline{B}\right|$, а значит равны интенсивности света.

Таким образом, дифракционные картины от нити толщиной b или мелкой круглой частицы диаметра D (вне области прямого пучка) будут такими же, как и от щели, ширина которой равна толщине нити или круглого отверстия диаметр которого равен диаметру мелкой круглой частицы (в случае круглой частицы центральное светлое пятно называется пятном Пуассона). Раз так, то для расчета дифракции от нити/мелкой круглой частицы можно воспользоваться теми же формулами (3.2 – 3.5), что и для щели/круглого отверстия.

3.6 Устройство и принцип работы

Схема установки дана на рисунке 3.3. Параллельный монохро-

матический пучок света от лазера 1 падает на ширму 2 с отверстием или преградой. Дифракционная картина отображается на сплошной экран 3. С помощью линейки 4 измеряется расстояние между ширмой с прямоугольной щелью/отверстием и экраном. Лазер располагают на расстоянии 0,5 – 2 *м* от экрана.

3.7 Методика проведения эксперимента

3.7.1 Расположить приборы по схеме, изображенной на рисунке 3.3.

3.7.2 Определение длины световой волны

3.7.2.1 Установить ширму 2 с прямоугольной щелью известной ширины b перпендикулярно лучу на расстоянии 1 – 0,5 *м* от экрана. Включить лазер в сеть. Путем небольших поворотов вокруг оси, совпадающей с лучом, добиться четкой дифракционной картины в виде светлых и темных пятен (максимумов и минимумов), располагающихся на экране по горизонтальной линии (рисунок 3.1 б)).

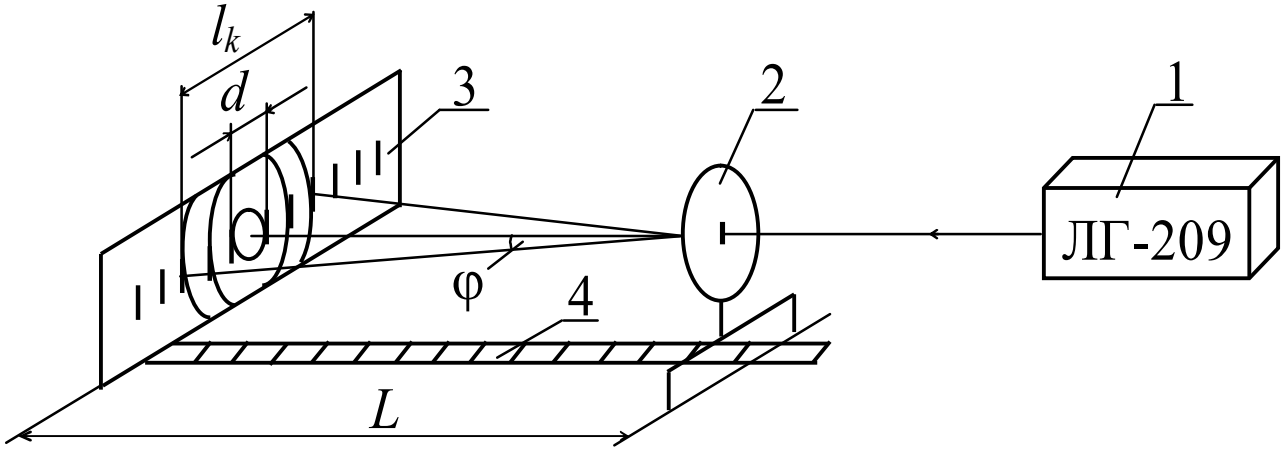


Рисунок 3.3 – Схема установки для изучения дифракции света от отверстия или преграды

3.7.2.2 Линейкой 4 измерить расстояние L между экраном и щелью.

3.7.2.3 На миллиметровой бумаге, укрепленной на экране 3, острием карандаша отметить середины еще хорошо заметных минимумов одного и того же порядка слева и справа от середины дифракционной картины. Порядок (номер) минимума отсчитывается от центрального максимума. **После этого лазер следует немедленно выключить.**

3.7.2.4 Измерить расстояние l_k между минимумами k-ого порядка (рисунок 3.4). Подсчитать синус угла дифракции φ для отмеченно-

го минимума.

Ввиду малости угла дифракции φ из рисунка 3.3 следует, что

$$\sin\varphi \approx \mathrm{tg}\varphi \approx \frac{l_k/2}{L} = \frac{l_k}{2L}. \qquad (3.6)$$

3.7.2.5 Ширину щели b узнать у преподавателя. По формуле (3.2) подсчитать длину световой волны.

3.7.2.6 Значения величин b, L, l_k, k, sinφ, λ занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

№	b, *м*	L, *м*	l_k, *м*	k	sinφ	λ, *м*	$\lambda_{ср}$, *м*
1							
2							
3							

Опыт повторить три раза для различных значений L.

3.7.2.7 Рассчитать абсолютную погрешность измерения длины волны по формуле:

$$\Delta\lambda = \left(\frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta L}{L}\right)\lambda_{ср.}, \qquad (3.7)$$

где Δb=0,01 *мм*, Δl=0,5 *мм*, ΔL=0,5 *мм*.

Записать окончательный результат в виде: $\lambda = \lambda_{ср.} \pm \Delta\lambda$.

3.7.2.8 Установить в ширму 2 пластину с отверстием известного диаметра D. Включить лазер в сеть. Путем небольших поворотов вокруг оси, совпадающей с лучом, добиться четкой дифракционной картины в виде светлых и темных колец (максимумов и минимумов), располагающихся на экране по горизонтальной линии (рисунок 3.1 в).

3.7.2.9 Линейкой 4 измерить расстояние L между экраном и ширмой.

3.7.2.10 На миллиметровой бумаге, укрепленной на экране 3, острием карандаша отметить средний диаметр первого темного кольца. **После этого лазер следует немедленно выключить.**

3.7.2.11 Измерить средний диаметр первого темного кольца d. Подсчитать синус угла дифракции φ для центрального светлого пятна по формуле:

$$\sin\varphi \approx \mathrm{tg}\varphi \approx \frac{d/2}{L} = \frac{d}{2L}. \qquad (3.8)$$

3.7.2.12 Диаметр отверстия D узнать у преподавателя. По формуле (3.5) подсчитать длину световой волны.

3.7.2.13 Значения величин D, L, d, $\sin\varphi$, λ занести в таблицу 3.3.

Таблица 3.3

№	D, *м*	L, *м*	d, *м*	$\sin\varphi$	λ, *м*	$\lambda_{ср.}$, *м*
1						
2						
3						

Опыт повторить три раза для различных значений L.

3.7.2.14 Рассчитать абсолютную погрешность измерения длины волны по формуле:

$$\Delta\lambda = \left(\frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta L}{L}\right)\lambda_{ср.}, \qquad (3.9)$$

где ΔD=0,005 *мм*, Δd=0,5 *мм*, ΔL=0,5 *мм*.

Записать окончательный результат в виде: $\lambda = \lambda_{ср.} \pm \Delta\lambda$.

3.7.3 Определение толщины тонкой нити и диаметра мелкой частицы

3.7.3.1 Установить ширму 2 с нитью перпендикулярно лучу на расстоянии 1 – 0,5 *м* от экрана. Включить лазер в сеть. Путем небольших поворотов вокруг оси, совпадающей с лучом, добиться четкой дифракционной картины в виде светлых и темных пятен (максимумов и минимумов), располагающихся на экране по горизонтальной линии (рисунок 3.1 б).

3.7.3.2 Проделать пункты 3.7.2.2 – 3.7.2.4.

3.7.3.3 По формуле (3.2) подсчитать толщину нити b. Длина волны излучения гелий-неонового лазера λ = 0,63 *мкм*.

3.7.3.4 Значения величин λ, L, l_k, k, $\sin\varphi$, b занести в таблицу 3.3.

Таблица 3.3

№	λ, *м*	L, *м*	l_k, *м*	k	$\sin\varphi$	b, *м*	$b_{ср.}$, *м*
1							
2							
3							

Опыт повторить три раза для различных значений L.

3.7.3.5 Абсолютную погрешность измерения толщины нити определить по формуле:

$$\Delta b = \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta l}{l} \right) b_{ср.}, \qquad (3.10)$$

где $\Delta\lambda$=0,003 *мм*, Δl=0,5 *мм*, ΔL=0,5 *мм*.

Записать окончательный результат в виде: $b = b_{ср.} \pm \Delta b$.

3.7.3.6 Установить в ширму 2 пластину с мелкими круглыми частицами. Включить лазер в сеть. Путем небольших поворотов вокруг оси, совпадающей с лучом, добиться четкой дифракционной картины в виде светлых и темных колец (максимумов и минимумов), располагающихся на экране по горизонтальной линии (рисунок 3.1 в).

3.7.3.7 Проделать пункты 3.7.2.9 – 3.7.2.11.

3.7.3.8 По формуле (3.5) рассчитать диаметр D мелкой круглой частицы. (Длина волны излучения гелий-неонового лазера λ = 0,63 *мкм*.)

3.7.3.9 Значения величин λ, L, d, $\sin\varphi$, D занести в таблицу 3.4.

Таблица 3.4

№	λ, *м*	L, *м*	d, *м*	$\sin\varphi$	D, *м*	$D_{ср.}$, *м*
1						
2						
3						

Опыт повторить три раза для различных значений L.

3.7.3.10 Рассчитать абсолютную погрешность измерения по формуле:

$$\Delta D = \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta d}{d} \right) D_{ср.}, \qquad (3.11)$$

где $\Delta\lambda$=0,003 *мм*, Δd=0,5 *мм*, ΔL=0,5 *мм*.

Записать окончательный результат в виде: $D = D_{ср.} \pm \Delta D$.

3.7.4 Записать выводы по работе.

3.8 Контрольные вопросы

А) Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля.

Б) Что такое зоны Френеля?

В) Выведите условия нулевого максимума и последующих максимумов и минимумов при дифракции от щели в параллельных лучах.

Г) Запишите условия максимумов и минимумов при дифракции от круглого отверстия в параллельных лучах.

Д) Как изменяется интенсивность максимумов по мере удаления от центрального максимума?

Е) Сформулируйте принцип Бабине.

Ж) В установке (рисунок 3.3) отверстие или преграда освещается белым светом. Какую картину можно наблюдать на экране?

Е) Где может применяться дифракционный метод определения размеров преград?

3.9 Рекомендуемая литература

1. Трофимова, Т. И. Курс физики: учебное пособие для вузов / Т. И. Трофимова. - Москва: Академия (Academia), 2008. – 557 с.

2. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 4. Волны. Оптика: учебное пособие для втузов / И. В. Савельев. – Москва: АСТ: Астрель, 2008. – 256 с.

3. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И. В. Савельев. - Москва: АСТ: Астрель, 2008. – 368 с.

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

4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

4.1 Цель работы

Изучение дифракционной решетки, наблюдение дифракционного спектра решетки, определение длины световых волн, излучаемых лампой накаливания.

4.2 Оборудование

Дифракционная решетка, гелий-неоновый лазер ЛГ- 209, экран с полоской миллиметровой бумаги, метровая линейка, линейка длиной 50 см с укрепленной на конце лампочкой для наблюдения сплошных спектров.

4.3 Метод измерений

По прямым измерениям расстояния между симметричными максимумами первого и второго порядков определяют длины световых волн.

4.4 Подготовка к работе

В ходе домашней подготовки к выполнению лабораторной работы студенты знакомятся с теоретической частью (п. 4.5) настоящего методического указания. Кроме того, ими подготавливается бланк отчета по лабораторной работе, содержащей титульный лист (см. Приложение А); цель работы (п. 4.1); краткое описание экспериментального оборудования (п. 4.2); письменные ответы на контрольные вопросы (п. 4.8) при использовании теоретической части (п. 4.5) и рекомендуемой литературы (п. 4.9).

4.5 Теоретическая часть

Дифракционная решетка представляет собой ряд параллельных щелей одинаковой ширины a, разделенных непрозрачными промежутками шириной *в*. Сумму $a + b = d$ называют шагом дифракционной решетки или периодом решетки. Встречаются решетки с периодом от 0,02 *мм* до 0,001 *мм* и даже меньше. Число щелей N в решетке достигает значений 10^3-10^5.

Рассмотрим установку, схема которой изображена на рисунке

4.1 а, где 1 - решетка, 2 - линза, 3 - экран. Экран располагается на фокусном расстоянии F от линзы. На рисунке 4.1 штрихами обозначены непрозрачные промежутки шириной b, а просветами – щели дифракционной решетки шириной a. На рисунке 4.1 б изображена картина, наблюдаемая на экране. Светлыми полосками изображены максимумы освещенности (главные максимумы).

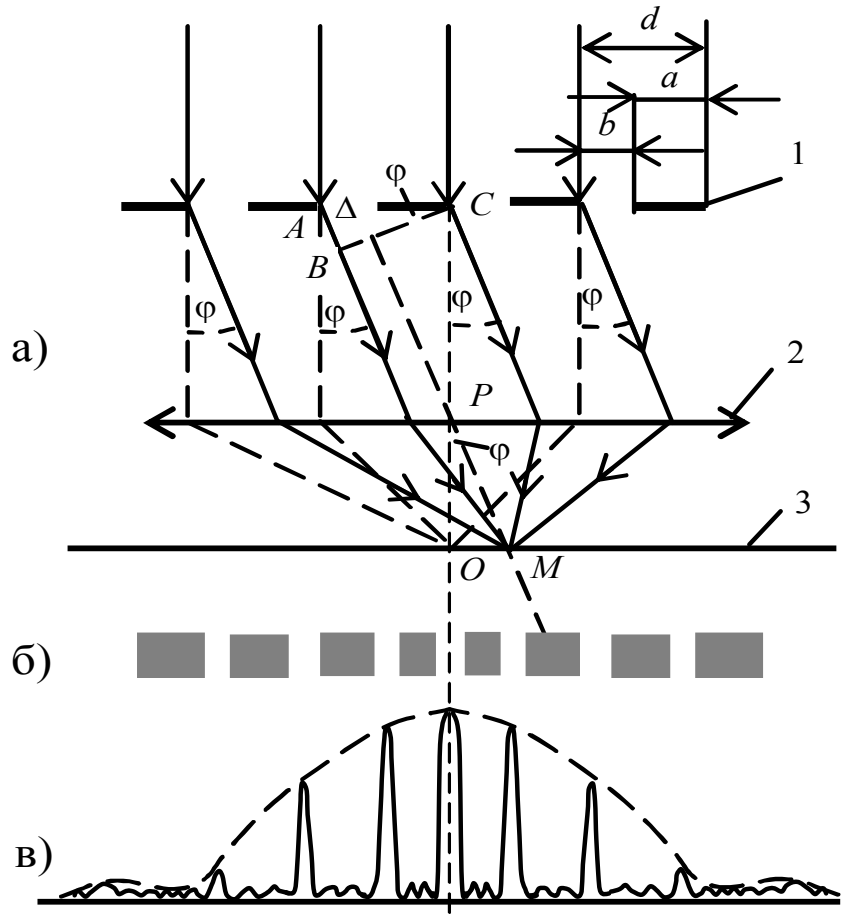


Рисунок 4.1 – Схема установки

Пусть на решетку перпендикулярно к ней падает плоская монохроматическая волна с длиной λ. Согласно принципу Гюйгенса от каждой точки щели по всем направлениям распространяются вторичные волны. Рассмотрим волны (лучи), которые дифрагируют от щелей под углом φ к первоначальному направлению. Собирающая линза 2 сводит эти волны на экране в точку M. Для нахождения этой точки через оптический центр линзы P проводим штриховую линию PM, параллельную дифрагирующим лучам. В точке M вторичные волны от всех щелей интерферируют. Результат интерференции волн в точке M зависит от разности хода волн Δ между соответственными лучами (лучами, исходящими из точек соседних щелей, отстоящих на расстоянии d друг от

друга). Рассмотрим соответственные лучи, изображенные на рисунке 4.1 а и исходящие из точек A и C. Из точки C опустим перпендикуляр на луч, исходящий из точки A, получим прямоугольный треугольник ABC, в котором $\angle ACB = \varphi$. До плоскости решетки от источника света лучи проходят одинаковые пути (т.к. они параллельны), от BC до точки M оптический путь рассматриваемых лучей одинаков (линза оптической разности хода не вносит). Отсюда следует, что разность хода между соответственными лучами от соседних щелей

$$\Delta = AB = AC\sin\varphi = d\sin\varphi,$$

где d - период решетки. Такая же разность хода будет между соответственными лучами от любых двух соседних щелей.

Известно, что при наложении волн с разностью хода $\Delta = k\lambda$, где $k = 0, 1, 2, \ldots$, волны друг друга усиливают. Таким образом, при выполнении условия

$$d\sin\varphi = k\lambda, \qquad (4.1)$$

где $k = 0, 1, 2, \ldots$, волна от первой щели будет усилена волной от второй щели, волна от второй щели волной от третьей и т. д.

При выполнении условия (4.1) в точке M получится главный максимум. Несколько таких максимумов изображено на рисунке 4.1 б. В центре дифракционной картины получается нулевой максимум (узкая яркая линия), симметрично по обе стороны от него располагаются максимумы первого порядка ($k = 1$), затем максимумы второго порядка ($k = 2$), и т.д. Соотношение (4.1) обычно называют условием главных **максимумов** дифракционной решетки.

Распределение интенсивности (освещенности экрана) приведено на рисунке 4.1 в. Между двумя соседними главными максимумами располагаются (N-2) побочных максимумов, разделенных минимумами, где N - число щелей в решетке. Из-за малой интенсивности побочных максимумов они обычно не наблюдаются.

Из соотношения (4.1) видно, что расстояние от k-того максимума до 0-ого зависит от длины волны λ. С увеличением λ это расстояние увеличивается. На рисунке 4.2 приведены спектры для света с длиной волны λ_1 - рисунок 4.2 а и λ_2 - рисунок 4.2 б. Т.к. $\lambda_2 > \lambda_1$, то расстояние x_2 второго максимума для света с λ_2 больше расстояния x_1, для максимума того же порядка, полученного со светом с длиной волны λ_1.

На рисунке 4.2 в показана дифракционная картина при освещении решетки белым светом. В направлении, совпадающим с нормалью к

поверхности решетки, будет видна белая полоса (дифракционный максимум нулевого порядка для всех длин волн). В направлениях, составляющих определенные углы с нормалью к поверхности решетки, наблюдаются главные дифракционные максимумы первого, второго и т.д. порядков, имеющие радужную окраску. Фиолетовый конец спектра обращен к центру дифракционной картины, красный - наружу. Дифракционные спектры расположены симметрично относительно центрального максимума и могут накладываться друг на друга.

Основное назначение дифракционных решеток – измерение длины волны спектральных линий.

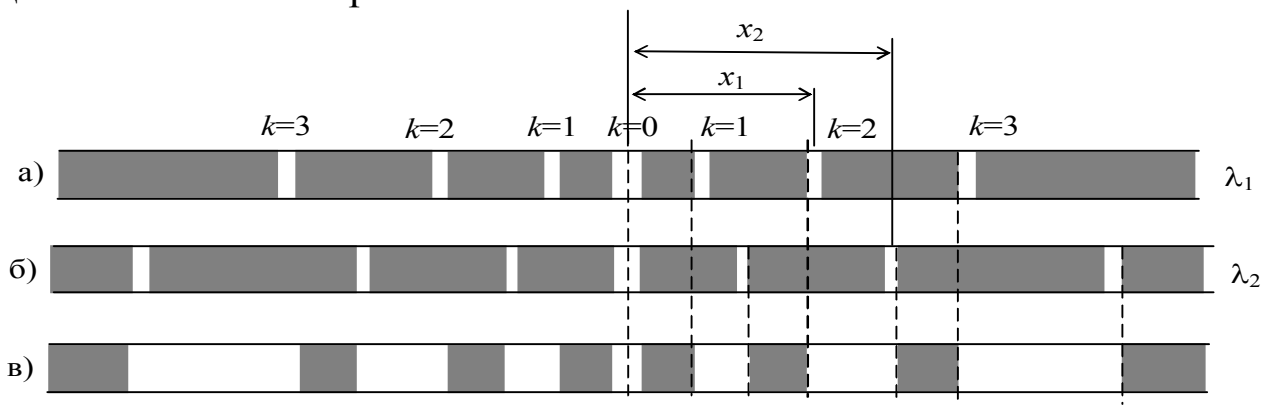


Рисунок 4.2 – Спектры для света с длиной волны λ_1 и λ_2

4.6 Устройство и принцип работы

Установка для измерения шага дифракционной решетки изображена на рисунке 4.3.

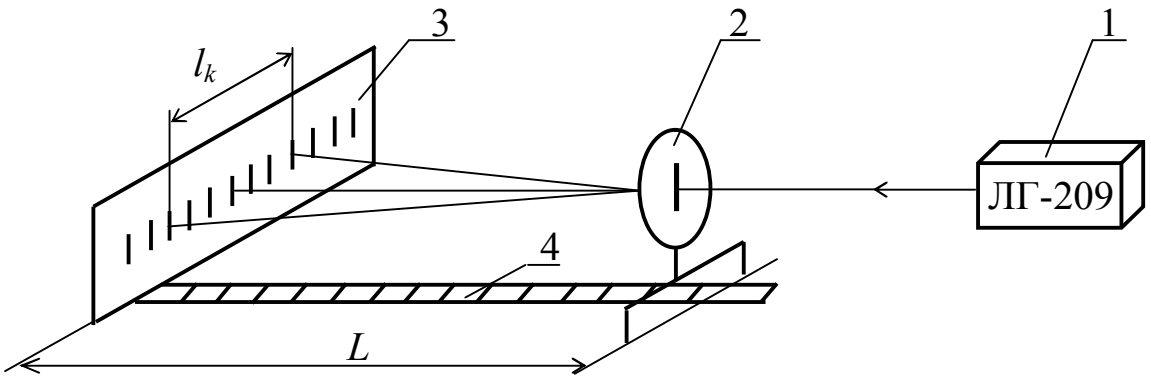


Рисунок 4.3 – Схема установки для измерения шага дифракционной решетки

Параллельный монохроматический пучок света от лазера 1 падает на исследуемую дифракционную решетку. На экране 3 наблюдается дифракционная картина в виде светлых и темных пятен.

Установка для измерения длин волн крайних фиолетовых и красных лучей видимого спектра изображена на рисунке 4.4.

При выполнении этой части работы применяется следующий метод наблюдения дифракционных спектров. В середине миллиметровой линейки 1, изображенной на рисунке 4.4, помещается лампочка 2, раскаленная нить которой является источником света. На расстоянии L, равном 0,5 *м* располагается дифракционная решетка, а за ней глаз наблюдателя. Параллельные лучи, дифрагирующие под углом +φ и -φ, удовлетворяющие условию $d\sin\varphi = k\lambda$, глаз собирает на сетчатке в точках M и N. Соответственно этому наблюдатель видит свет, исходящий из точек A и B линейки. При малых углах дифракции $\sin\varphi \approx tg\varphi \approx \frac{l_k}{2L}$.

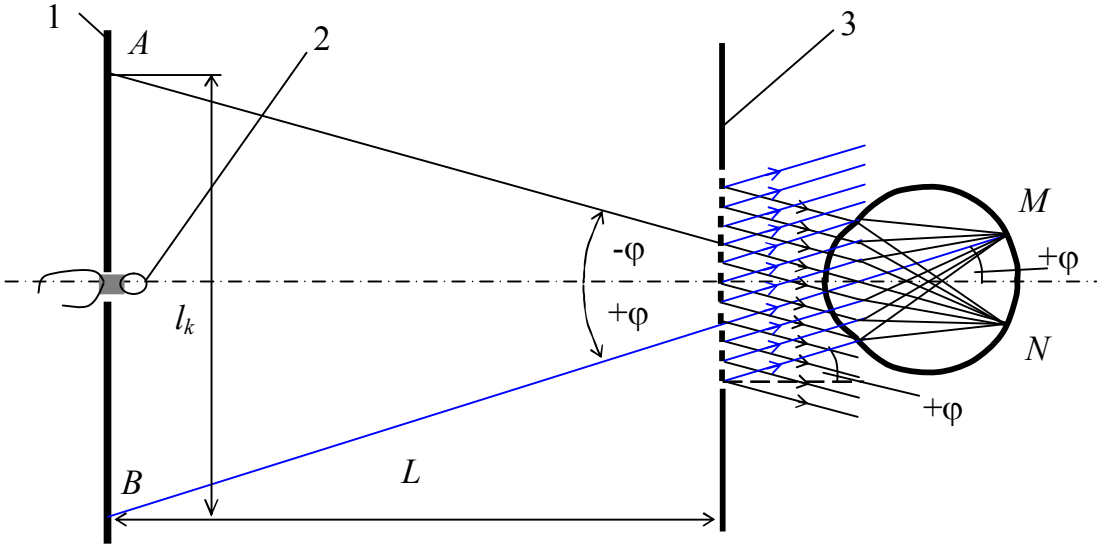


Рисунок 4.4 – Схема установки для измерения длин волн крайних фиолетовых и красных лучей видимого спектра

4.7 Методика проведения эксперимента

4.7.1 Измерение шага дифракционной решетки

4.7.1.1 На столе расположить приборы по схеме, изображенной на рисунке 4.3, где 1 - лазер ЛГ-209, 2 – исследуемая решетка, 3 - экран, 4 - линейка.

4.7.1.2 Включить лазер в сеть (с разрешения преподавателя). Перпендикулярно пути луча, на расстоянии около 1-1,5 *м* от экрана установить исследуемую решетку. На экране 3 наблюдайть дифракционную картину в виде светлых пятен (главных максимумов), располагающихся по горизонтальной линии.

4.7.1.3 Измерить расстояние L от решетки до экрана, на котором

укреплена миллиметровка. С точностью до миллиметра измерить расстояние l_1 и l_2 между симметричными максимумами первого и второго порядков.

4.7.1.4 Рассчитать $\sin\varphi_1$ и $\sin\varphi_2$ для максимумов первого и второго порядков (k= 1, k = 2). Ввиду малости углов дифракции в этой работе:

$$\sin\varphi \approx tg\varphi \approx \frac{l_k}{2L}. \qquad (4.2)$$

4.7.1.5 По найденным значениям $\sin\varphi_1$ и $\sin\varphi_2$ и известной длине волны излучения гелий-неонового лазера (λ=0,63 мкм) по формуле:

$$d = \frac{k\lambda}{\sin\varphi} \qquad (4.3)$$

найти шаг d исследуемой решетки. Затем найти среднее значение шага решетки d.

4.7.1.6 Измеренные величины l, L, k и найденные значения d занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

№	L, *м*	k	l, *м*	$\sin\varphi$	d, *м*	$d_{ср.}$, *м*
1		1				
		2				
2		1				
		2				
3		1				
		2				

4.7.1.7 Рассчитать абсолютную погрешность измерения шага дифракционной решетки по формуле:

$$\Delta d = \left(\frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta L}{L}\right) d_{ср.}, \qquad (4.4)$$

где Δl = 0,5 мм, ΔL = 0,5 см

4.7.2 Измерение длин волн крайних фиолетовых и красных лучей видимого спектра

4.7.2.1 При выполнении этой части работы плоскость дифракционной решетки 3 расположить параллельно линейке 1 (рисунок 4.4)

4.7.2.2 Включить лампочку в сеть и на фоне линейки наблюдать цветные спектры первого и второго порядков. Измерить расстояние $l_ф$

между фиолетовыми краями спектров первого порядка (k=1), затем $l_{кр.}$ между красными краями спектров этого же порядка. Аналогичные измерения провести для спектров второго порядка (k=2).

4.7.2.3 Измерить расстояние L между дифракционной решеткой и лампочкой.

4.7.2.4 Значения $l_ф$, $l_{кр.}$, L и шаг дифракционной решетки d занести в таблицу 4.2. Подсчитать $\lambda_{ф.}$ и $\lambda_{кр.}$.

Таблица 4.2

L, м	k	$L_{кр.}$, м	$L_{ф.}$, м	d, м	$\lambda_{кр.}$, м	$\lambda_{ф.}$, м
	1					
	2					

Найти средние значения граничных длин волн: $\lambda_{кр.}$= , $\lambda_{ф.}$= .

4.8 Контрольные вопросы

А) Получите условие главных максимумов при дифракции от решетки.

Б) Объясните, почему при освещении решетки белым светом спектры первого и второго порядков имеют радужную окраску, а спектр нулевого прядка виден белым.

В) Запишите и объясните условие минимума, ограничивающего нулевой максимум.

Г) Как зависит дифракционная картина от числа щелей в спектре?

4.9 Рекомендуемая литература

1. Трофимова, Т. И. Курс физики: учебное пособие для вузов / Т. И. Трофимова. - Москва: Академия (Academia), 2008. – 557 с.

2. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 4. Волны. Оптика: учебное пособие для втузов / И. В. Савельев. – Москва: АСТ: Астрель, 2008. – 256 с.

3. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И. В. Савельев. - Москва: АСТ: Астрель, 2008. – 368 с.

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

5 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА: ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКЕ С ПОМОЩЬЮ КОМПАКТ-ДИСКА

5.1 Цель работы

Исследование дифракции света на отражательной дифракционной решетке и измерение расстояния между строками записи информации на компакт-дисках.

5.2 Оборудование

Небольшая пластинка, вырезанная из компакт-диска, гелий-неоновый лазер, экран для наблюдения дифракционных максимумов, устройство для придания пластине необходимой ориентации, линейка с делениями на сантиметры и миллиметры.

5.3 Метод измерений

Определение расстояния между строками записи информации на компакт-дисках проводится с помощью гелий-неонового лазера (λ = 630 нм).

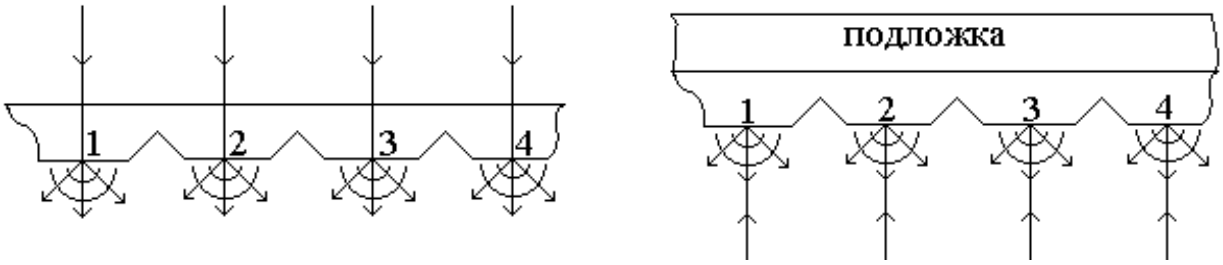
5.4 Подготовка к работе

В ходе домашней подготовки к выполнению лабораторной работы студенты знакомятся с теоретической частью (п. 5.5) настоящего методического указания. Кроме того, ими подготавливается бланк отчета по лабораторной работе, содержащей титульный лист (см. Приложение А); цель работы (п. 5.1); краткое описание экспериментального оборудования (п. 5.2); письменные ответы на контрольные вопросы (п. 5.8) при использовании теоретической части (п. 5.5) и рекомендуемой литературы (п. 5.9).

5.5 Теоретическая часть

Различают два вида дифракционных решеток: решетки, работающие на пропускание света и отражательные дифракционные решетки. Решетки первого вида представляют собой совокупность большого числа узких параллельных щелей, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга. Такую решетку можно изготовить путем нанесения рисок алмазным резцом на поверхности стеклянной пластины. Узкие полоски неповрежденного стекла на такой пластине

играют роль щелей, а риски – роль непрозрачных промежутков. На рисунке 5.1 а приведен участок сечения такой решетки и свет, дифрагирующий от щелей 1, 2, 3 и т. д.



а) б)

Рисунок 5.1 – Схемы дифракционных решеток: а) прозрачная; б) отражательная

В научных лабораториях применяют в основном отражательные решетки. Получают их путем нанесения параллельных равноотстоящих рисок на поверхности хорошо отражающей металлической пленки, на пленке алюминия, например, нанесенной на поверхность стеклянной или пластмассовой пластины. На рисунке 5.1 б изображен профиль сечения такой решетки плоскостью, перпендикулярной рискам. Выступы 1, 2, 3 …, отражательной решетки играют такую роль, как и щели решетки, работающей на пропускание света, а риски – роль непрозрачных промежутков. Пусть на отражательную решетку перпендикулярно к ней падает пучок монохроматического света (плоская волна). Тогда согласно принципу Гюйгенса от каждого выступа решетки будут распространяться вторичные сферические волны, пучки расходящихся лучей (рисунок 5.1 б). Вследствие этого свет уклоняется от первоначального направления огибает риски, дифрагирует. Поэтому решетку и называют дифракционной.

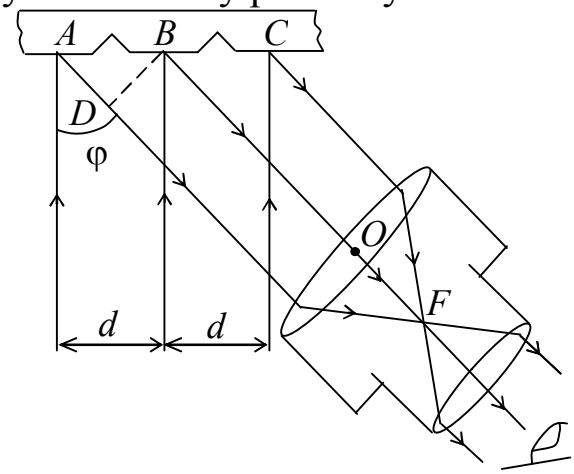


Рисунок 5.2 – Схема установки для наблюдения максимумов

Рассмотрим волны (лучи), дифрагирующие под углом φ к первоначальному направлению. На пути этих лучей установим зрительную трубу, ось которой параллельна этому пучку лучей (рисунок 5.2). Объектив трубы (линза *O*) соберет эти волны в главном фокусе, где они накладываются друг на друга. Вторичные волны являются частями первичной волны, поэтому они

когерентны и при наложении в точке интерферируют. Результат интерференции зависит от разности хода волн, идущих от соседних выступов решетки. Найдем разность хода волн, приходящих в точку F от двух соседних выступов A и B (рисунок 5.2).

Для этого из толчки B опустим перпендикуляр на луч, идущий от выступа A. Видно, что ход волн от точки A до F (расстояние ADF) больше, чем ход волны от выступа B до точки F на отрезок AD. В треугольнике ABD угол $\angle ABD = \varphi$, как углы с взаимно перпендикулярными сторонами, таким образом, искомая разность хода волн

$$\Delta = AD = AB \sin\varphi = d\sin\varphi, \qquad (5.1)$$

где d - постоянная решетки (шаг решетки).

Известно, что при наложении двух когерентных волн они усиливают друг друга при выполнении условия:

$$\Delta = k\lambda, \qquad (5.2)$$

где k=0, 1, 2, ….

Условие (5.2) называют условием возникновения **максимумов** при интерференции света. Если условие (5.2) выполняется, то волна от выступа B усиливает волну от выступа A, волна от выступа C усиливает волну от B. Иначе говоря, волны от всех выступов решетки усиливают друг друга. При этом в точке F наблюдается главный максимум освещенности. Если k=1 , то максимум называют первым, при k=2 наблюдается второй максимум и т. д. Из соотношений (5.1) и (5.2) следует, что **главные максимумы** наблюдаются при выполнении условия:

$$d\sin\varphi = k\lambda, \qquad (5.3)$$

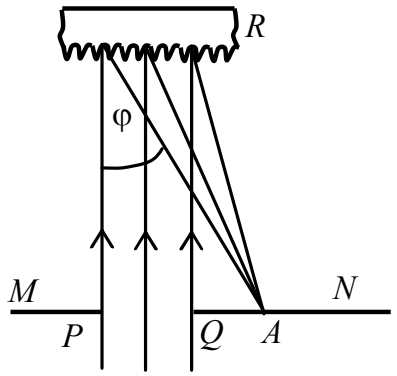


Рисунок 5.3 – Схема установки для наблюдения максимумов без зрительной трубки

Расчеты показывают, что между двумя соседними максимумами находится N - 2 побочных максимумов, но при большом числе N выступов в решетке их интенсивность так мала, что они практически не наблюдаются. Для изображенной на рисунке 5.2 установки при наблюдении всех возможных максимумов зрительную трубу надо перемещать по дуге окружности изменяя угол оси трубы от 0° до 90°.

Дифракционные максимумы от отражательной решетки можно наблюдать и без зрительной трубы. Рассмотрим уста-

новку, схема которой изображена на рисунке 5.3, где R - отражательная решетка, MN - экран, непрозрачная пластина с отверстием PQ. Через это отверстие направим на решетку пучок лучей монохроматического света (луч лазера), тогда в любую точку экрана, точку A, будут приходить вторичные волны от всех выступов решетки, на которые попадает свет. При их нахождении в точке A они интерферируют. Если при угле дифракции φ выполняется условие (5.3), то в точке A наблюдается **главный максимум** - светлое пятно. Максимум нулевого порядка (k=0) совпадает с серединой отверстия в экране, максимумы одного и того же порядка располагаются симметрично относительно отверстия PQ .

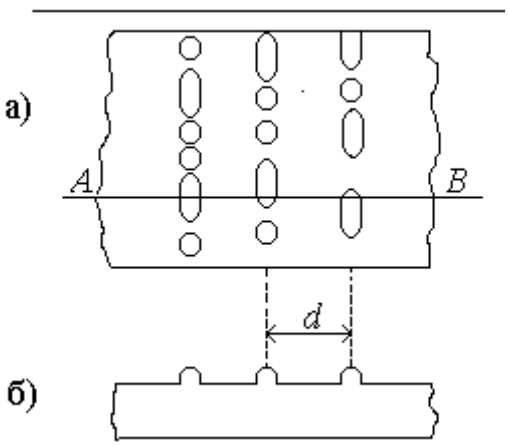


Рисунок 5.4 – Схематическое изображение участка диска с записанной информацией

Для изучения дифракции света от отражательных решеток можно воспользоваться пластиной, вырезанной из компакт-диска. Такие диски применяются для записи информации в компьютерах. На рисунке 5.4 а схематически показан участок диска с записанной на нем информацией в виде точек и черточек, выступающих над поверхностью металла на высоту порядка 0,1 - 0,2 *мкм*, а их ширина – 0,5 - 0,6 *мкм*. На рисунке 5.4 б приведено сечение участка диска по линии AB. Видно, что между выступами, строками, записанной информации, находятся полоски нетронутой металлической пленки, которые играют роль выступов отражательной решетки, рассмотренной ранее.

Основная задача этой работы – определение расстояния между строками записи информации d (рисунок 5.4 б), иначе говоря, определение шага решетки.

5.6. Устройство и принцип работы

Схема установки приведена на рисунке 5.5.

Луч лазера 1 через отверстие в экране 2 направляется на поверхность оптического компакт-диска 3, помещенного в юстируемый зажим. Зажим с помощью микровинтов позволяет поворачивать плоскость диска вокруг вертикальной и горизонтальной осей, а также перемещать его в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Ком-

пакт-диск следует установить так, чтобы лазерный пучок падал на него нормально на одну из точек горизонтального диаметра диска. В этом случае луч нулевого порядка дифракции отразится обратно в отверстие на экране, а лучи, соответствующие первому и второму порядкам дифракции, попадут на экран и расположатся симметрично центральному отверстию. Абсолютно строгой симметрии можно не добиваться.

Поскольку записанная на компакт-диске дифракционная решетка образована концентрическими линиями, форма дифракционных максимумов на экране может для некоторых участков быть дугообразной.

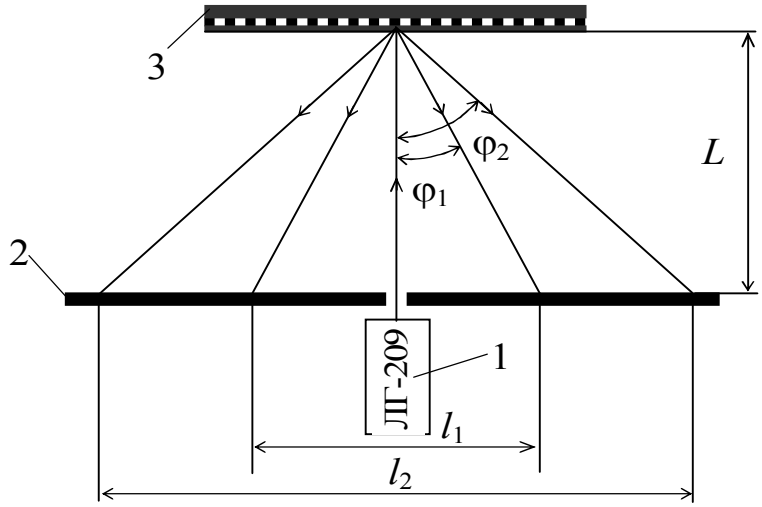


Рисунок 5.5 – Схема установки для изучения дифракции от отражательной решетки

5.7 Методика проведения эксперимента

5.7.1 Расположить приборы по схеме (рисунок 5.5).

5.7.2 Включить лазер в сеть. Экран 2 расположить перпендикулярно лазерному лучу так, чтобы луч проходил через отверстие в экране.

5.7.3 С помощью микровинтов расположить компакт-диск 3 так, чтобы луч лазера был перпендикулярен пластине компакт-диска и попадал приблизительно в его центр и добиться положения, при котором максимумы первого и второго порядков располагаются на экране по горизонтальной прямой, а максимум нулевого порядка попадает прямо в отверстие экрана (рисунок 5.5).

5.7.4 Измерить расстояния L, l_1 и l_2 (рисунок 5.5). Вычислить значения синусов углов дифракции φ_1 и φ_2 по формуле:

$$\sin\varphi = \frac{l_k}{2\sqrt{\left(\frac{l_k}{2}\right)^2 + L^2}}, \qquad (5.4)$$

где k=1 для максимума первого порядка и k=2 для максимума второго порядка.

5.7.5 Из выражений (5.3) и (5.4) следует, что расстояние между строками записи информации на компакт-диске d (шаг решетки) можно рассчитать по формуле:

$$d = \frac{k\lambda}{\sin\varphi_k}, \qquad (5.5)$$

где λ - длина волны излучения гелий-неонового лазера (λ =0,63 *мкм*).

Определить шаг решетки d.

5.7.6 Найти число строк информации, располагающихся на отрезке в 1 *мм* по формуле: $m = \frac{1}{d}$.

5.7.7 Данные измерений и вычислений занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1

№ опыта	Номер максимума, k	L, *мм*	l_1, *мм*	l_2, *мм*	sinφ	d, *мм*	m, *мм*$^{-1}$	$d_{ср.}$, *мм*	$m_{ср}$
1									
2									
3									
4									
5									

5.7.8 Опыт повторить пять раз для различных L.

5.7.9 Рассчитать среднее значение шага решетки - $d_{ср.} = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i}{n}$ и среднее значение числа строк на 1 *мм* – $m_{ср.} = \frac{1}{d_{ср.}}$.

5.7.10 Наиболее вероятную погрешность Δd и истинное значение $d_{ист.}$ рассчитать по формулам:

$$\Delta d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(< d > - d_i\right)^2}{n(n-1)}}; \quad d_{ист.} = d_{ср.} + \Delta d.$$

5.7.11 Записать выводы по работе.

5.8 Контрольные вопросы

А) Приведите примеры явления дифракции света. Как эти явления объясняются на основе принципа Гюйгенса?

Б) В установке (рисунок 5.3) решетка освещается белым светом. Какая картина будет наблюдаться на экране?

В) Как подсчитывается разрешающая способность дифракционной решетки?

Г) Запишите условие возникновения первого минимума после нулевого максимума.

5.9 Рекомендуемая литература

1. Трофимова, Т. И. Курс физики: учебное пособие для вузов / Т. И. Трофимова. - Москва: Академия (Academia), 2008. – 557 с.

2. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 4. Волны. Оптика: учебное пособие для втузов / И. В. Савельев. – Москва: АСТ: Астрель, 2008. – 256 с.

3. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И. В. Савельев. - Москва: АСТ: Астрель, 2008. – 368 с.

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

6 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА: ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ АТОМОВ ВОДОРОДА И РТУТИ

6.1 Цель работы

Исследование спектров атомов ртути и водорода, определение длин волн видимой части спектра водорода, определение постоянной Ридберга по спектру водорода.

6.2 Оборудование

Ртутная лампа, водородная лампа, монохроматор УМ-2, источник питания.

6.3 Метод измерений

По известным длинам волн спектра ртути проводят градуировку монохроматора УМ-2. По графику градуировки определяют длины волн спектра водорода, с помощью которых определяют постоянную Ридберга.

6.4 Подготовка к работе

В ходе домашней подготовки к выполнению лабораторной работы студенты знакомятся с теоретической частью (п. 6.5) настоящего методического указания. Кроме того, ими подготавливается бланк отчета по лабораторной работе, содержащей титульный лист (см. Приложение А); цель работы (п. 6.1); краткое описание экспериментального оборудования (п. 6.2); письменные ответы на контрольные вопросы (п. 6.8) при использовании теоретической части (п. 6.5) и рекомендуемой литературы (п. 6.9).

6.5 Теоретическая часть

Каждый элемент имеет характерный только для него спектр излучения, состоящий из отдельных линий. Эти линии образуют группы – так называемые серии. Наиболее простой линейчатый спектр дает атомарный водород. Спектр водорода состоит из нескольких серий: серии Лаймана - в крайней ультрафиолетовой области, серии Бальмера - в видимой и близкой ультрафиолетовой области, серии Пашена, Брэкетта, Пфунда и т. д. - в инфракрасной области спектра. На рисунке 6.1 представлена схема линий серии Бальмера для водорода. Эта серия располагается в диапазоне видимого света и состоит из ряда линий. Линия с

наибольшей длиной волны (или наименьшей частотой) называется H_α (красная), следующая – H_β (голубовато-зеленая), следующая - H_γ (фиолетовая 1-ая), следующая - H_δ (фиолетовая 2-ая) и т. д.

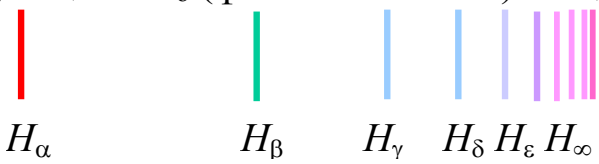


Рисунок 6.1 – Схема линий серии Бальмера для водорода

В 1913 г. Нильс Бор постулировал дискретность энергетических состояний атомов, откуда с необходимостью следует квантовый характер поглощения и излучения света.

Первый постулат Бора гласит: атом может находиться лишь в определенных дискретных энергетических состояниях, в которых он не излучает, несмотря на ускоренные движения входящих в его состав заряженных частиц. Такие состояния называются стационарными.

Согласно второму постулату атом излучает или поглощает энергию лишь при скачкообразном переходе из одного стационарного состояния в другое. При этом частота излученного или поглощенного кванта света пропорциональна разности энергии начального W_m и конечного W_n состояний:

$$h\nu = W_m - W_n, \qquad (6.1)$$

где h – постоянная Планка; ν - частота света; m – уровень с которого переходит электрон; n – уровень на который переходит электрон.

Постулаты Бора имеют чрезвычайно общий характер и применимы к любому атому или атомной системе. Их правильность многократно подтверждена экспериментально. Таким образом, теория Бора хорошо описывает физический механизм поглощения и излучения света.

Каждое стационарное состояние атома характеризуется определенной энергией W_1, W_2, W_3, …, W_∞. Поэтому принято говорить об энергетических уровнях данного атома и наглядно представлять их в виде схемы уровней энергии (рисунок 6.2). Горизонтальные прямые фиксированных значений W_∞ обозначают скачкообразные переходы электрона в атоме из одного стационарного состояния в другое. Стрелками вверх показано поглощение света. Стрелки вниз означают испускание кванта света с соответствующим уменьшением энергии атома. Частоты излучения и поглощения могут быть легко рассчита-

ны по формуле (6.1). Важно подчеркнуть, что спектральные переходы возможны строго между определенными уровнями энергии. Никаких промежуточных переходов в атоме быть не может. Следовательно, не может быть и квантов света с промежуточными значениями энергии, а значит и частоты ν.

В современной квантовой механике строго доказано, что атомы каждого химического элемента имеют присущий только им набор возможных стационарных энергетических состояний. Переходы между этими состояниями и образуют спектр частот излучения (или поглощения), характерный только для данного элемента. Именно поэтому оказывается возможным отождествление химического элемента по его спектру испускания или поглощения, т.е. качественный спектральный анализ.

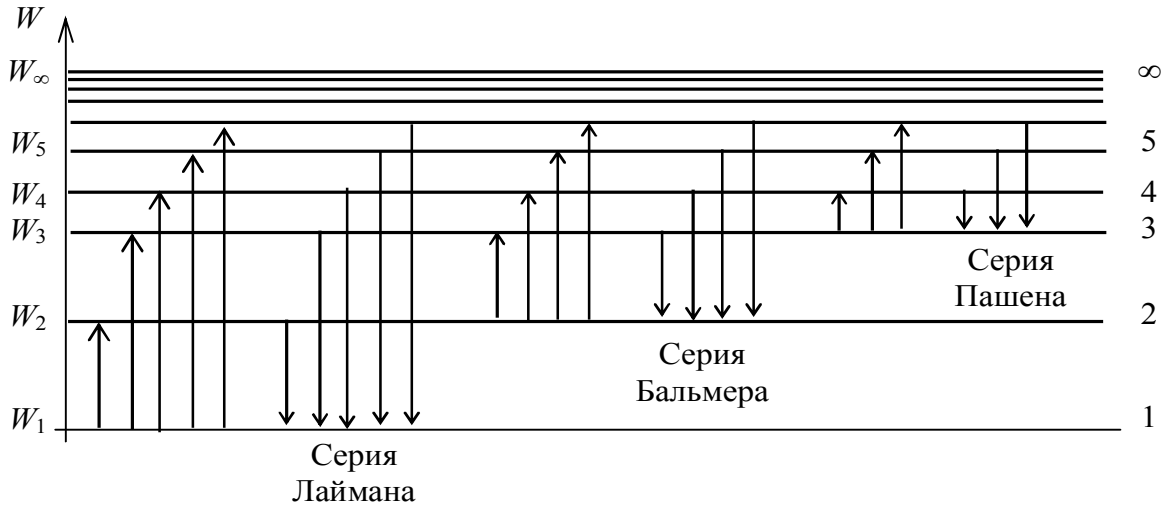


Рисунок 6.2 – Схема энергетических уровней (состояний) атома водорода и переходы между уровнями

Число спектральных линий одинаковых атомов может быть очень велико. Например, спектр железа только в видимой и ультрафиолетовой областях содержит около 60 тысяч линий. У других многоэлектронных атомов число линий того же порядка. Следовательно, не исключено случайное совпадение некоторых частот в спектре различных атомов, что называется в спектроскопии "наложением" линий. Поэтому качественный спектральный анализ следует проводить по нескольким наиболее интенсивным линиям в исследуемом спектре. Совпадение измеренных длин волн этих линий с табличными данными надежно показывает присутствие элемента в источнике излучения.

Каждой линии соответствует определенная частота ν и длина волны λ, которые связаны соотношением

$$c=\nu\cdot\lambda, \tag{6.2}$$

где c – скорость света, $c=3\cdot10^8$ *м/с*.

Подставляя (6.2) в (6.1) получаем:

$$\frac{1}{\lambda}=\frac{W_m-W_n}{hc}.$$

Длину волны λ для любой линии спектра атома водорода можно найти по формуле, полученной Бором

$$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{n^2}-\frac{1}{m^2}\right), \tag{6.3}$$

где R – постоянная Ридберга.

Серия линий Лаймана возникает при переходе электронов из энергетически более высоких стационарных состояний в первое. Для этих линий n=1, а m=2, 3,… , а частоты находятся в ультрафиолетовой области спектра. Линии видимой части спектра – серия Бальмера – характеризуется переходами из состояний с номерами m=3, 4, 5,… в состояние с номером n=2. Эти переходы изображены на рисунке 6.2.

Исходя из выше сказанного, для серии Бальмера длины волн спектральных линий определяются по формуле:

$$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{m^2}\right). \tag{6.4}$$

6.6 Устройство и принцип работы

Для исследования спектров излучения применяется универсальный монохроматор УМ-2, оптическая схема которого представлена на рисунке 6.3.

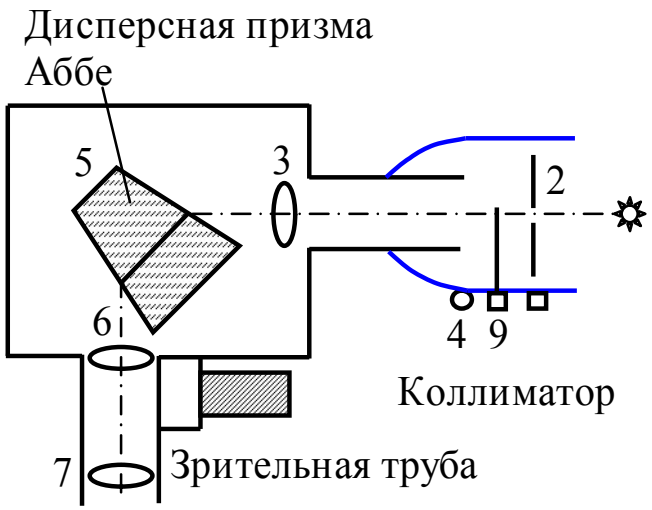


Рисунок 6.3 – Принципиальная схема монохроматора УМ-2

Основными частями монохроматора являются коллиматор, дисперсионная призма Аббе и зрительная трубка. Свет от источника 1 попадает на входную щель 2 монохроматора. Щель находится в фокусе линзы 3 и входит в подвижную часть монохроматора, в коллиматор. Вращая маховичок 4, можно перемещать коллиматор вдоль оптической оси. Пройдя линзу 3, свет параллельным пучком падает на призму 5 и разлагается в спектр. Линза 6 фокусирует спектр в области наблюдения. Наблюдают спектр через окуляр 7. Окуляр имеет накатное кольцо, вращением которого можно добиться наиболее резкой картины наблюдения спектра. В нижней части щели 2 находится микрометрический винт, позволяющий изменять ширину щели.

Картину спектра наблюдают, вводя на середину поля зрения нужную его область. Для этого вращают барабан длин волн 8, расположенный справа от зрительной трубы монохроматора. Барабан снабжен шкалой, позволяющей определить повороты в градусах. **Цена деления шкалы составляет 2°**. Отсчет положения спектральной линии производится в момент совмещения линии со стрелкой–указателем в центре поля зрения. Стрелка–указатель и картина спектра должны наблюдаться одинаково резко. Для этого устанавливают окуляр на резкое наблюдение стрелки–указателя, а затем, вращая маховичок 4, добиваются резкой картины наблюдения спектра. Входная щель имеет заслонку 9, прерывающую световой поток. В рабочем положении заслонка должна быть открыта.

Шкала барабана градуируется в длинах волн. Для этого используется хорошо изученный спектр излучения ртути. Для градуирования необходимо определить, какому значению угла поворота барабана соответствует длина волны описанной линии спектра ртути.

6.7 Методика проведения эксперимента

6.7.1 Градуировка монохроматора УМ-2 по спектру ртути

Прежде чем приступить к изучению спектра водорода, монохроматор нужно проградуировать, т. е. определить длины волн, соответствующие делениям шкалы барабана. Для этого используется источник с известным спектром. В данной работе используется спектр ртути.

6.7.1.1 Вблизи входной щели 2 монохроматора (рисунок 6.3) установить кожух с ртутной лампой и подключить ее к блоку питания. Включить блок в сеть 220 *В*, тумблер блока "сеть" перевести в положение "Вкл" и нажать кнопку "Пуск". Лампа иногда загорается и без нажатия кнопки. Для достижения максимальной яркости ртутной лампы потребуется некоторое время (3 – 5 *мин*).

Внимание! Излучение ртутной лампы содержит в себе не только видимый свет, используемый при измерениях, но и ультрафиолетовое излучение, которое опасно для зрения. Избегайте попадания прямых и отраженных лучей от ртутной лампы на незащищенный глаз.

6.7.1.2 Установить входную щель 0,1 *мм* с помощью микрометрического винта 2 (рисунок 6.3) и открыть заслон 9. Наблюдая через окуляр 7 за спектром, вывести в поле зрения наиболее яркую красную линию λ_1=623 *нм*. Если изображение стрелки-указателя размыто, то необходимо вращением окуляра добиться максимальной резкости.

6.7.1.3 Вращая барабан длин волн 8 (рисунок 6.3) необходимо найти все линии ртути, указанные в таблице 6.1, последовательно устанавливая точно против стрелки указателя все линии ртути и записывая в таблицу 6.1 соответствующие им деления барабана 8. Выключить ртутную лампу.

Таблица 6.1

Линия	Длина волны, λ, *нм*	Угол поворота барабана, γ, *град*
красная	623	
желтая	577	
зеленая яркая	546,1	
зеленая слабая	491,6	
синяя	435,8	
фиолетовая	407,7	

6.7.1.4 По данным таблицы 6.1 на миллиметровой бумаге построить график $\lambda = f(\gamma)$.

6.7.2 Определение длин волн видимой части спектра водорода и постоянной Ридберга по спектру водорода

6.7.2.1 Заменить ртутную лампу на водородную. Подключить ее к блоку питания и включить разряд.

6.7.2.2 Вращая барабана длин волн 8 (рисунок 6.3) последовательно совместить все линии спектра водорода с стрелкой-указателем, записывая каждый раз соответствующие им деления барабана в таблицу 6.2. По полученным данным и градуировочному графику определить длины волн в спектре водорода, результаты записать в таблицу 6.2. Выключить водородную лампу.

Линия	Угол поворота барабана, γ, *град*	Длина волны, λ, *нм*	m	R, $м^{-1}$
красная			3	
голубая			4	
фиолетовая первая			5	
фиолетовая вторая			6	

6.7.2.3 Используя формулу (6.4) вычислить значения постоянной Ридберга, результаты записать в таблицу 6.2. Рассчитать среднее значение постоянной Ридберга R по формуле: $R_{ср.} = \frac{\sum_{i=1}^{n} R_i}{n}$.

6.7.2.4 Рассчитать абсолютную погрешность измерения по формуле:

$$\Delta R = \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right) R_{ср.},$$

где $\Delta\lambda$=0,003 *мм*.

Записать окончательный результат в виде: $R = R_{ср.} \pm \Delta R$.

6.7.3 Записать выводы по работе.

.

6.8 Контрольные вопросы

А) Перечислите серии спектра водорода. Какому переходу соответствует головная линия в каждой серии?

Б) Запишите формулу Бора для каждой серии спектра водорода.

В) В каком диапазоне электромагнитных волн находятся линии серии Бальмера?

Г) Сформулируйте и поясните постулаты Бора.

6.9 Рекомендуемая литература

1. Трофимова, Т. И. Курс физики: учебное пособие для вузов / Т. И. Трофимова. - Москва: Академия (Academia), 2008. – 557 с.

2. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 4. Волны. Оптика: учебное пособие для втузов / И. В. Савельев. – Москва: АСТ: Астрель, 2008. – 256 с.

3. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И. В. Савельев. - Москва: АСТ: Астрель, 2008. – 368 с.

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

7 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ СТЕФАНА – БОЛЬЦМАНА С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОГО ПИРОМЕТРА

7.1 Цель работы

Ознакомление с работой оптического пирометра, изучение законов теплового излучения и экспериментальное определение постоянной Стефана-Больцмана при помощи оптического пирометра.

7.2 Оборудование

Установка для накаливания никелевой пластинки, оптический пирометр ОППИР – 09, батарея аккумуляторов на 38, масштабная металлическая линейка.

7.3 Метод измерений

В настоящей работе для бесконтактного определения температуры нагретого тела использован метод оптической пирометрии.

7.4 Подготовка к работе

В ходе домашней подготовки к выполнению лабораторной работы студенты знакомятся с теоретической частью (п. 7.5) настоящего методического указания. Кроме того, ими подготавливается бланк отчета по лабораторной работе, содержащей титульный лист (см. Приложение А); цель работы (п. 7.1); краткое описание экспериментального оборудования (п. 7.2); письменные ответы на контрольные вопросы (п. 2.8) при использовании теоретической части (п. 7.5) и рекомендуемой литературы (п. 7.9).

7.5 Теоретическая часть

Все тела, температура ($t°$) которых больше нуля излучают электромагнитные волны за счет энергии теплового движения атомов и молекул вещества (то есть за счет его внутренней энергии). Если тело имеет температуру больше абсолютного нуля (обладает внутренней энергией), то оно излучает. Например, сильно нагретые тела светятся. **Электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии, называют тепловым или температурным излучением.** Тепловое излучение характеризуется сплошным спектром, положение максимума которого зависит от температуры. **При высоких температурах излучаются короткие (ви-**

димые и ультрафиолетовые) электромагнитные волны, при низких - преимущественно длинные (инфракрасные).

Теплообменом при излучения (**радиационным теплообменом**) называют самопроизвольный процесс передачи энергии в форме теплоты от более нагретого к менее нагретому, осуществляющийся путем теплового излучения и поглощения электромагнитных волн этими телами.

Тепловое излучение – практически единственный вид излучения, который может быть **равновесным** (т.е. в единицу времени поглощается столько же энергии, сколько и излучается). Оно характеризуется сплошным спектром.

Пусть с элемента поверхности тела с площадью S (рисунок 7.1) за время t волнами всех длин уносится энергия W. Величину

$$R = \frac{W}{St} \tag{7.1}$$

называют **энергетической светимостью тела**, которая в системе СИ измеряется в Дм/м с или Вт/м, зависит от абсолютной температуры, с увеличением которой она растет.

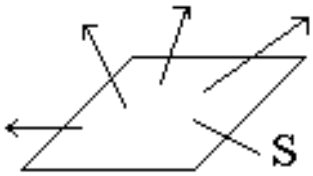


Рисунок 7.1 – Элемент поверхности тела

Для характеристики **излучательной** способности тела вводят величину

$$r_1 = \frac{dW}{Std\lambda}, \tag{7.2}$$

где dW – энергия, которую уносят волны с длиной волны от λ до $\lambda + d\lambda$;

S – площадь излучающей поверхности;

t – время излучения.

Спектральная плотность энергетической светимости r_λ зависит и от температуры и от длины волны $r_\lambda = f(T, \lambda)$. Энергетическая светимость тела R и спектральная плотность энергетической светимости r_λ связана между собой соотношением:

$$R = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda . \qquad (7.3)$$

Пусть на поверхности тела волны с длиной от λ до λ + dλ приносят энергии dW. Часть этой энергии dW' тело поглощает. Величину

$$a_\lambda = \frac{dW_\lambda^{'}}{dW} \qquad (7.4)$$

называют **поглощательной способностью тела**.

Как и спектральная плотность энергетической светимости поглощательная способность зависит и от температуры и от длины волны $a_\lambda = f(T, \lambda)$. Так как поглощаемая энергия $dW_\lambda^{'}$ всегда меньше энергии dW_λ, падающей на тело, поглощательная способность тела a_λ всегда меньше единицы. Поглощательная способность у различных тел разная. Она тем больше, чем чернее тело (слой сажи, черный бархат). Можно представить себе тело, у которого для всех длин волн поглощательная способность $a_\lambda = 1$. Такое тело называют **абсолютно черным**. Идеальной моделью черного тела является замкнутая полость с небольшим отверстием, внутренняя поверхность которой зачернена. Луч света, попавший внутрь такой полости, испытывает многократные отражения от стенок, и практически полностью поглощается. Вследствие чего открытые окна домов со стороны улицы кажутся черными, хотя внутри комнат достаточно светло из-за отражения света от стен.

Кирхгоф, опираясь на второй закон термодинамики и анализируя условия равновесного излучения в изолированной системе тел, установил **количественную связь между спектральной плотностью энергетической светимости и поглощательной способностью тел**:

$$\frac{r_\lambda}{a_\lambda} = (r_\lambda)_z , \qquad (7.5)$$

где $(r_\lambda)_z$ – спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела.

Соотношение (7.5) является математическим выражением закона Кирхгофа.

Для всех тел при данной температуре отношение спектральной плотности энергетической светимости тела к его поглощательной способности есть величина постоянная, равная спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела при той же температуре.

Для абсолютно черного тела справедлив также закон Стефана-

Больцмана, которой утверждает, что энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры:

$$R_z = \sigma T^4, \tag{7.6}$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана.

Если тело является абсолютно черным, а его коэффициент поглощения для всех длин волн одинаков, то тело называют серым. Для серого тела из соотношений (7.5) и (7.6) можно получить:

$$R = a\sigma T^4, \tag{7.7}$$

где a – поглощательная способность тела.

7.6 Устройство и принцип работы

7.6.1 Описание оптического пирометра

Закон теплового излучения лежит в основе действия различных пирометров – приборов для измерения высоких температур. В заводской практике довольно часто применяют пирометры с «исчезающей» нитью. В литейных цехах, например, с их помощью измеряют температуру расплавленных металлов.

Внешний вид пирометра изображен на рисунке 7.2. Основными его частями являются: 1 – тубус объектива зрительной трубы; 2 – тубус окуляра зрительной трубы; 3 – кольцо, поворотом которого регулируют ток накала; 4 – шкала; 5 – красный светофильтр; 6 – дымчатый светофильтр; 7 – винт вертикального перемещения прибора; 8 – винт горизонтального перемещения прибора.

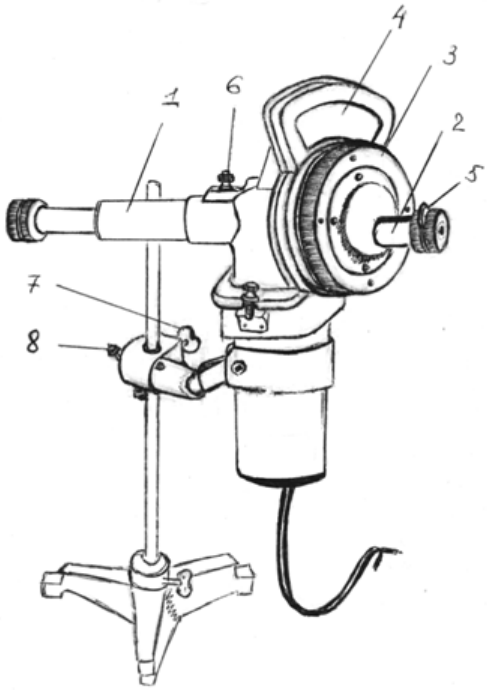
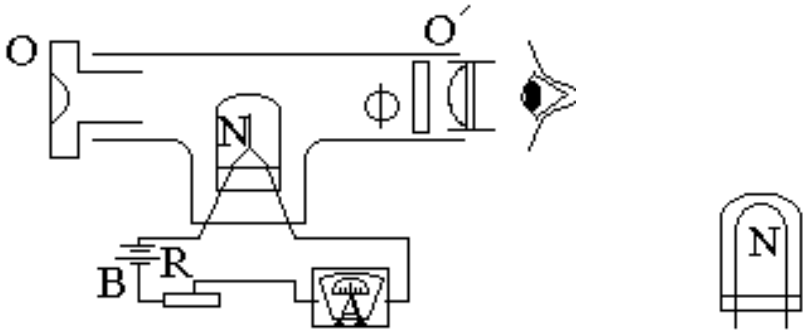


Рисунок 7.2 – Схема оптического пирометра

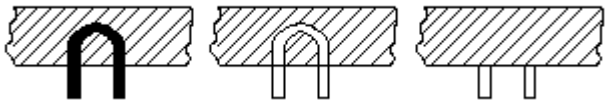
Оптическая схема устройства пирометра с «исчезающей» нитью приведена на рисунке 7.3а. В пирометре имеется зрительная труба с окуляром О и объективом О′. При измерении трубу направляют на исследуемое раскаленное тело и перемещением объектива О добиваются его резкого видения.



а) б)

Рисунок 7.3 – Оптическая схема устройства пирометра с «исчезающей» нитью

Тело резко видно, когда его изображение получается в фокальной плоскости окуляра О′. В этой же плоскости располагается и нить накаливания N пирометрической лампы. Форма нити приведена на рисунок 7.3б. Таким образом, наблюдатель видит нить накаливания на фоне изображения исследуемого тела, в данной работе – на фоне раскаленной никелевой пластины (рисунок 7.4а). Нить пирометрической лампы включается в цепь батареи В. Ток накала нити регулируется реостатом R и измеряется прибором А. Шкала прибора А проградуирована в градусах Цельсия по излучению абсолютно черного тела. При проведении измерения плавно уменьшают сопротивление реостата, увеличивая тем самым накал нити. При малом токе нить накала кажется темной на фоне раскаленной пластины (рисунок 7.4а). При слишком большом токе накала яркость свечения нити больше яркости свечения пластины (рисунок 7.4б). При некотором токе накала яркости свечения нити и пластины совпадают и нить «исчезает» на фоне пластин (рисунок 7.в). При этом стрелка измерительного прибора А показывает практически истинную температуру исследуемого тела, если его излучение мало отличается от излучения абсолютно черного тела. Как раз такое излучение дает никелевая пластина, покрытая окалиной.



а) б) в)

Рисунок 7.4 – Нить накаливания на фоне изображения исследуемого тела

Для удобства сравнения яркостей нити и тела перед окуляром О′ при измерениях вводят фильтр Ф из красного стекла (λ = 0,66 мкм).

7.6.2 Установка для накала никелевой пластины

Схема электрической цепи этой установки приведена на рисунке 7.5.

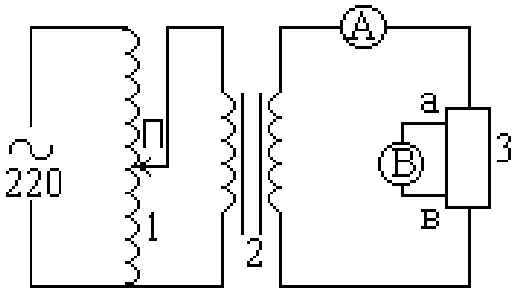


Рисунок 7.5 – Схема электрической цепи установки

При увеличении напряжения, подаваемого на первичную обмотку трансформатора 2 (рисунок 7.5) увеличивается ток, текущий по пластине 3, а, следовательно, увеличивается мощность, развиваемая током в никелевой пластине.

$$P = IU, \tag{7.8}$$

где I – ток в пластине;

U – напряжение между «усиками» *а* и *в* пластины.

При установившейся высокой температуре (T = 1000 C) практически вся подводимая мощность излучается пластиной. Потерями энергии за счет конвекционных потоков воздуха и за счет теплопроводности подводящих проводов можно пренебречь с такой энергией приносимой излучением на пластину от стен лаборатории и окружающих предметов из-за их более низкой температуры. На этом основании можно записать:

$$IU = 2SR, \tag{7.9}$$

где R – энергетическая светимость поверхности никелевой пластины;

$2S$ – суммарная площадь двух сторон излучающей пластины.

Никелевая пластина излучает как серое тело, поэтому из соотношений (7.7) и (7.9) получаем:

$$IU = a\sigma T^4 2S\,. \qquad (7.10)$$

Из соотношения (7.10) получаем расчетную формулу для постоянной Стефана-Больцмана:

$$\sigma = \frac{JU}{2SaT^4}\,. \qquad (7.11)$$

7.7 Методика проведения эксперимента

7.7.1 С помощью миллиметровой линейки измеряют ширину никелевой пластины и расстояние между «усиками » *а* и *в*, присоединенными к вольтметру (рисунок 7.5). Находят площадь *S* одной стороны пластины.

7.7.2 Зрительную трубу пирометра направляют на никелевую пластину. Перемещением окуляра О′ (рисунок 7.3) добиваются резкого видения нити пирометрической лампы, затем перемещением объектива О добиваются резкого видения никелевой пластины. Установку пирометра считают законченной, когда верхняя часть нити лампы проецируется на середину никелевой пластины.

7.7.3 Поворачивают рукоятку автотрансформатора против часовой стрелки до упора. Включают автотрансформатор в сеть. Плавно поворачивая рукоятку автотрансформатора по часовой стрелке увеличивают ток накала пластины. Доводят ток накала пластины до значения, указанного преподавателем ($I = 60 - 80\ A$). Записывают показания амперметра и вольтметра.

7.7.4 Подключают пирометр к батареи аккумуляторов. Поворотом рукоятки 5 (рисунок 7.2) вводят в поле зрения красный фильтр. Плавно поворачивая по часовой стрелке рифленое кольцо 3 (рисунок 7.2) увеличивают яркость свечения нити лампы до ее «исчезновения» на фоне никелевой пластины. По нижней шкале пирометра измеряют температуру *t* раскаленной пластины в градусах Цельсия. По формуле $T = t + 273$ находят абсолютную температуру пластины.

7.7.5 По формуле (7.11) вычисляют значения постоянной Стефана-Больцмана.

7.7.6 Повторяют все измерения при других значениях тока и вновь вычисляют постоянную Стефана-Больцмана. Затем находят среднее значение постоянной.

7.7.7 Относительную погрешность измерений находят по фор-

муле:

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta S}{S} + 4\frac{\Delta T}{T}, \qquad (7.12)$$

где ΔI, ΔU, ΔS, ΔT – абсолютные погрешности тока, напряжения, площади пластины и температуры.

Класс точности амперметра на 100 *А* равен 1,5, поэтому

$$\Delta I = 100\times1{,}5\times10^{-2}\ \text{А}$$

Класс точности вольтметра на 3 В равен 0,5, поэтому

$$\Delta U = 3\times0{,}5\times10^{-2}\ \text{В}$$

Погрешности измерения температуры $T = 10$ К.

Погрешность $\frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$, где a и b – ширина и длина пластины, $\Delta a = \Delta b = 1$ мм.

Взяв вычисленное значение σ_φ найти $\Delta\sigma$ по значению относительной погрешности. Результат работы записать в виде

$$\sigma = \sigma_\varphi \pm \Delta\sigma$$

7.8 Контрольные вопросы

А) Какими величинами характеризуется тепловое излучение тела и его поглощательная способность?

Б) Какое тело называют абсолютно черным? Как его осуществить?

В) Каков физический смысл постоянной Стефана-Больцмана?

Г) Получите расчетную формулу (7.11).

Д) Как связана энергетическая светимость и спектральная плотность энергетической светимости?

Е) Сформулируйте закон Кирхгофа для теплового излучения.

7.9 Рекомендуемая литература

1. Трофимова, Т. И. Курс физики: учебное пособие для вузов / Т. И. Трофимова. - Москва: Академия (Academia), 2008. – 557 с.

2. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 4. Волны. Оптика: учебное пособие для втузов / И. В. Савельев. – Москва: АСТ: Астрель, 2008. – 256 с.

3. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И. В. Савельев. - Москва: АСТ: Астрель, 2008. – 368 с.

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

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)
ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ И.С.ТУРГЕНЕВА»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ Н.Н. ПОЛИКАРПОВА

Кафедра: машиностроения

Лабораторная работа № ___
ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ ШАРОВ

Выполнил: Студент гр. 81-КТ
Петров И. И.

Проверил: Преподаватель
Иванов С. С.

Орел, 2018 г.

Лист согласования

Авторы:	доктор технических наук, доцент, зав. кафедры машиностроения	_____	Л. Ю. Фроленкова
	кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технической физики	_____	С. Н. Ромашин
	кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технической физики	_____	М. В. Хорошилова
Рецензент:	доктор физико-математических наук, профессор кафедры технической физики	_____	В. С. Шоркин

Настоящий практикум по выполнению лабораторных работ по курсу «Физика», часть 3 «Оптика, квантовая природа излучения» содержит требования по подготовке, выполнению, оформлению и отчету лабораторных работ, краткие теоретические сведения, необходимые для выполнения экспериментальной части работ, алгоритм выполнения экспериментов, а также контрольные вопросы для самопроверки и списки литературных источников.

Практикум по выполнению лабораторных работ по курсу «Физика», часть 3 «Оптика, квантовая природа излучения»

рассмотрен и одобрен:
на заседании кафедры машиностроения «01» 11 2018 г., протокол № 18,
зав. кафедрой машиностроения, д.т.н., доцент

Л. Ю. Фроленкова

на заседании НМС Политехнического института имени Н.Н. Поликарпова» «__» ___ 2018 г., протокол № ___

Председатель НМС д.т.н., профессор А. Н. Новиков