

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ,
НАУКИ И КАДРОВОЙ ПОЛИТИКИ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
ОРДЕНОВ ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

Кафедра высшей математики и физики

ФИЗИКА

С ОСНОВАМИ БИОФИЗИКИ

ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

*Методические указания по выполнению лабораторных работ
для студентов, обучающихся по специальностям
общего высшего образования
6-05-0811-02 Производство продукции животного происхождения,
6-05-0831-01 Водные биоресурсы и аквакультура*

Горки
БГСХА
2023

УДК 535(072)
ББК 22.3я73
Ф50

*Рекомендовано методической комиссией
факультета биотехнологии и аквакультуры.
Протокол № 2 от 24 октября 2022 г.*

Авторы:

старший преподаватель *А. В. Цвыр*;
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент *Л. Е. Кириленко*;
кандидат педагогических наук, доцент *О. М. Астахова*;
старшие преподаватели *М. П. Подобед*, *Т. М. Чубукова*;
ассистент *Н. А. Дубина*

Рецензент:

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент *Н. И. Кудрявец*

Физика с основами биофизики. Оптические явления :
Ф50 методические указания по выполнению лабораторных работ /
А. В. Цвыр [и др.]. – Горки : БГСХА, 2023. – 72 с.

Приведены указания по изучению теоретического материала, описания лабораторных установок, порядок выполнения работ, методика обработки опытных данных и список рекомендуемой литературы.

Для студентов, обучающихся по специальностям общего высшего образования 6-05-0811-02 Производство продукции животного происхождения, 6-05-0831-01 Водные биоресурсы и аквакультура.

УДК 535(072)
ББК 22.3я73

© УО «Белорусская государственная
сельскохозяйственная академия», 2023

ВВЕДЕНИЕ

Оптикой называется раздел физики, в котором изучаются явления и закономерности, связанные с возникновением, распространением и взаимодействием света с веществом.

Выполнение лабораторных работ по оптике способствует развитию у студентов навыков самостоятельной работы и помогает лучшему усвоению теоретического курса.

В ходе лабораторной работы студент углубляет и закрепляет теоретические знания по физике, знакомится с простейшими методами научных исследований в области физики и с физическими методами исследования, которые применяются в биологических дисциплинах, овладевает методами математической обработки результатов физического эксперимента.

Выполняя лабораторные работы, можно проверить научно-теоретические положения отдельных явлений, законов, более глубоко понять их, развить наблюдательность, внимание, память, навыки проведения измерений, научиться пользоваться измерительными приборами, ознакомиться с оборудованием, аппаратурой, техникой физического эксперимента.

В ряде случаев выполнение лабораторных работ опережает изучение лекционного материала. Это вызывает необходимость предварительной подготовки к их выполнению. В целях повышения эффективности предварительной самостоятельной работы студентов перед описанием опытной части лабораторных работ даются краткая теория и рекомендации по изучению теоретического материала.

По каждой лабораторной работе студент готовит отчет. При составлении отчета на титульном листе необходимо указать название кафедры, номер и наименование работы, фамилию и инициалы исполнителя, факультет, курс, группу, дату выполнения работы.

Вторая и последующая страницы отчета должны содержать:

- 1) цель выполняемой работы;
- 2) краткую теорию, где приводятся схематический чертеж или рисунок, электрическая или оптическая схема, а также необходимые определения;
- 3) рабочие формулы, их выводы;
- 4) таблицы результатов измерений и вычислений величин с указанием их единиц;

- 5) графики (при необходимости);
- 6) ответы на контрольные вопросы.

Произведя все необходимые вычисления и оформив работу, студент отчитывается по лабораторной работе.

Для получения зачета по лабораторной работе необходимо знать цель работы, порядок ее выполнения, понимать физические процессы и явления, которые изучаются в данной работе, знать принципиальную схему эксперимента и принцип действия приборов.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев, И. В. Курс физики: в 3 т. / И. В. Савельев. – Москва: Наука, 1989. – Т. 3. – 416 с.
2. Грабовский, Р. И. Курс физики: учеб. пособие / Р. И. Грабовский. – Санкт-Петербург: Лань, 2005. – 607 с.
3. Трофимова, Т. И. Краткий курс физики: учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – Москва: Высш. шк., 2006. – 560 с.
4. Детлаф, А. А. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва: Высш. шк., 1989. – 384 с.
5. Сена, А. А. Единицы физических величин и их размерности / А. А. Сена. – Москва: Наука, 1988. – 304 с.
6. Калитуха, П. Д. Лабораторные задания по оптике / П. Д. Калитуха. – Горки: БСХА, 1984. – 130 с.

Лабораторная работа 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ЛИНЗ

Цель работы: ознакомление с принципами построения изображений в линзах; определение фокусного расстояния линз.

Приборы и принадлежности: оптическая скамья с источником света и экраном, собирающая и рассеивающая линзы.

Линзой называют прозрачное тело, ограниченное с двух сторон сферическими или другими криволинейными поверхностями, одна из которых может быть плоской.

Плоскую поверхность можно рассматривать как криволинейную с бесконечно большим радиусом кривизны.

Если у краев толщина линзы больше, чем в средней части, то такая линза называется *вогнутой*, а если наоборот – *выпуклой*.

На рис. 1.1 изображены различные типы выпуклых линз.

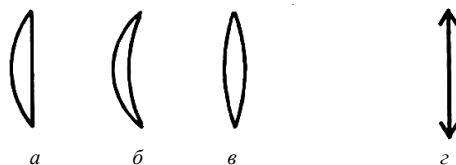


Рис. 1.1. Типы выпуклых линз:

a – плосковыпуклая; b – вогнуто-выпуклая (ее середина толще краев);
 c – двояковыпуклая; d – схематическое изображение двояковыпуклой линзы

На рис. 1.2 изображены различные типы вогнутых линз.

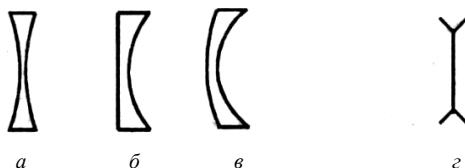


Рис. 1.2. Типы вогнутых линз:

a – двояковогнутая; b – плосковогнутая; c – выпукло-вогнутая
(ее края толще середины); d – схематическое изображение двояковогнутой линзы

Рассмотрим наиболее распространенные тонкие и осесимметричные двояковыпуклые и двояковогнутые сферические линзы, т. е. линзы, ограниченные сферическими поверхностями, толщина которых во много раз меньше радиусов кривизны этих поверхностей, и обладающие осью симметрии (рис. 1.3, 1.4). Вершины P_1 и P_2 сферических сегментов, образующих линзу, называются *полюсами* линзы.

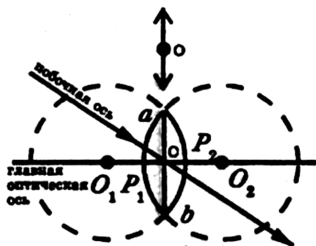


Рис. 1.3

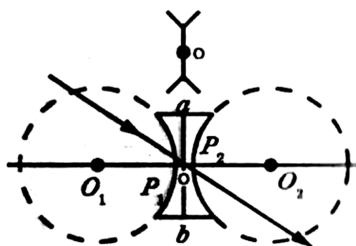


Рис. 1.4

Точка O , в которой у бесконечно тонкой линзы сливаются ее полюса, называется *оптическим центром* линзы. Любой луч, проходящий через оптический центр линзы, не преломляется, поскольку малую область линзы вблизи ее оптического центра можно рассматривать как очень тонкую плоскопараллельную пластинку, которая не изменяет направления падающих на нее лучей и смещением которой у тонкой линзы можно пренебречь. Такой луч называется *побочной осью* линзы.

Прямая, проходящая через центры O_1 и O_2 сферических поверхностей, образующих линзу, называется *главной оптической осью* линзы. У линзы имеется только одна главная оптическая ось, а побочных осей бесконечно много.

Плоскость ab , проходящая через главный оптический центр линзы O перпендикулярно ее главной оптической оси, называется *главной плоскостью* линзы.

Если на двояковыпуклую линзу пустить пучок лучей, параллельных главной оптической оси, то они отклонятся к этой оси. Выйдя из линзы, все лучи пересекутся в одной точке F , лежащей на главной оптической оси линзы. В этой точке суммируется (фокусируется) вся световая энергия, переносимая световыми лучами, вышедшими на линзы после преломления, поэтому точка F называется *действительным фокусом* линзы.

Расстояние OF между оптическим центром линзы и ее фокусом называется *фокусным расстоянием* линзы. Фокусное расстояние линзы тоже обозначают буквой F .

Для характеристики оптических свойств линзы введено понятие *оптической силы*.

Оптическая сила линзы D – это величина, обратная фокусному расстоянию F :

$$D = \frac{1}{F} . \quad (1.1)$$

Единица оптической силы в СИ – *диоптрия* (дптр).

Для построения изображения в линзе нужно выбрать два таких луча, испущенных светящейся точкой, про которые мы точно знаем, как они пойдут после преломления в линзе. Точка, в которой эти лучи пересекутся после преломления, и будет изображением нашей светящейся точки.

Построим изображение предмета AB в собирающей линзе. Пусть сначала предмет AB располагается за двойным фокусом $2F$ линзы

(рис. 1.5) и представляет собой прямую стрелку с началом в точке B , лежащей на главной оптической оси, и концом в точке A .

В этом случае достаточно построить изображение A_1 точки A , а затем опустить перпендикуляр на главную оптическую ось. Тогда точка B_1 , лежащая в основании этого перпендикуляра, и будет изображением точки B .

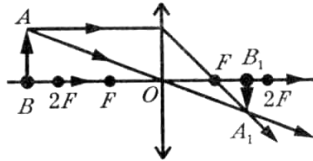


Рис. 1.5

В случае расположения предмета между фокусом и двойным фокусом изображение строится аналогично.

Если предмет расположен между фокусом и линзой, изображение будет получено на пересечении продолжения лучей (рис. 1.6).

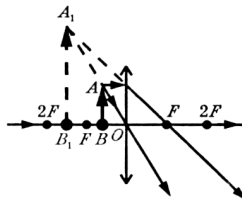


Рис. 1.6

В рассеивающей линзе изображение строится одинаково независимо от расположения предмета относительно линзы (рис. 1.7).

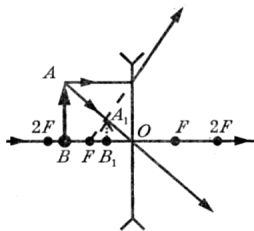


Рис. 1.7

Одним из наиболее точных способов определения фокусных расстояний линз является метод Бесселя, заключающийся в следующем. На оптическую скамью помещают предмет S и экран, на котором получают четкое изображение предмета S , даваемое линзой, расположенной между предметом и экраном. Если расстояние L от предмета до экрана достаточно велико и превышает учетверенное значение фокусного расстояния F , т. е. $L > 4F$, то можно найти два таких положения линзы, при которых на экране наблюдаются увеличенное $A^I B^I$ и уменьшенное $A^{II} B^{II}$ четкие изображения предмета. Уменьшенное изображение предмета получается, когда линза занимает положение I, увеличенное – когда линза занимает положение II (рис. 1.8).

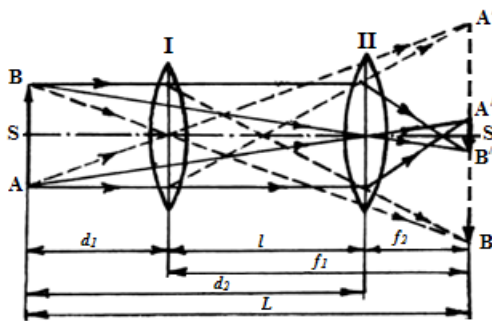


Рис. 1.8

Для положения I линзы обозначим расстояния от линзы до предмета и от линзы до изображения соответственно через d_1 и f_1 . Для положения II – через d_2 и f_2 . Поскольку для обоих положений расстояние от предмета до экрана одно и то же, то

$$d_1 + f_1 = d_2 + f_2. \quad (1.2)$$

Вспользуемся формулами линзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1} \quad \text{и} \quad \frac{1}{F} = \frac{1}{d_2} + \frac{1}{f_2}, \quad (1.3)$$

откуда

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1} = \frac{1}{d_2} + \frac{1}{f_2}, \quad \text{или} \quad \frac{f_1 + d_1}{d_1 f_1} = \frac{f_2 + d_2}{d_2 f_2}.$$

Поскольку $f_1 + d_1 = L$ и $f_2 + d_2 = L$, то $\frac{L}{d_1 f_1} = \frac{L}{d_2 f_2}$ и получаем равенство $d_1 f_1 = d_2 f_2$, которое возможно при условии $d_1 = f_2$ и $d_2 = f_1$. Обозначив расстояние между двумя положениями линзы через l , получим равенства:

$$d_2 = \frac{L+l}{2}, \quad d_1 = \frac{L-l}{2}, \quad f_1 = \frac{L+l}{2} \quad \text{и} \quad f_2 = \frac{L-l}{2}. \quad (1.4)$$

Подставляя эти величины в основную формулу линзы (1.3) для каждого из двух положений I и II, получим:

$$\frac{2}{L-l} + \frac{2}{L+l} = \frac{1}{F}, \quad (1.5)$$

откуда для фокусного расстояния получаем выражение

$$F = \frac{(L-l)(L+l)}{4L}, \quad (1.6)$$

являющееся расчетной формулой для нахождения фокусного расстояния методом Бесселя.

У реальных линз наблюдаются дефекты изображения. Один из них – *сферическая абберация*, которая заключается в том, что далекие от главной оптической оси, но параллельные ей лучи у двояковыпуклой линзы пересекаются не точно в фокусе, а ближе к линзе, перед фокусом, а у вогнутой линзы – за фокусом.

Другим недостатком линз является *хроматическая абберация* – разложение белого света на цветные лучи вследствие дисперсии. При этом синие и фиолетовые лучи преломляются сильнее, а красные – слабее, из-за чего изображение, даваемое линзой, оказывается размытым и имеющим цветной ореол.

Соединяя вместе специально подобранные стекла, можно уменьшить хроматическую абберацию. Такие линзы называются *ахроматическими*. Их используют в качестве объективов в оптических приборах.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить лабораторную установку: на горизонтальной оптической скамье 3 (рис. 1.9) расположены следующие приборы: линза 5, экран 2,

электрическая лампочка в кожухе с вырезом и предметом (в виде звездочки) I . Они устанавливаются так, чтобы центры их лежали на одной высоте, плоскость экрана была перпендикулярна длине оптической скамьи 3 , а ось линзы 5 параллельна ей.

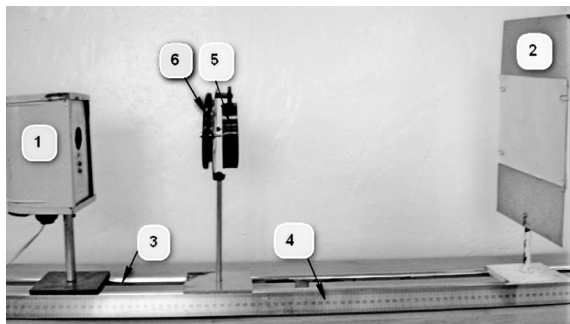


Рис. 1.9. Общий вид лабораторной установки

2. С разрешения преподавателя включить источник света I (рис. 1.9).

3. Расположить масштабную (метровую) линейку 4 между источником и экраном.

4. Экран 2 отодвинуть на расстояние $L = 100$ см от осветителя I .

5. На оптической скамье между предметом и экраном поместить собирающую линзу 5 ; перемещая ее вдоль скамьи, найти положение I , при котором наблюдается резкое увеличенное изображение предмета; зафиксировать на масштабной линейке данное положение. Далее, перемещая собирающую линзу, зафиксировать положение II , при котором на экране наблюдается резкое уменьшенное изображение предмета.

6. Определить по масштабной линейке расстояние l между увеличенным и уменьшенным изображениями предмета.

7. Опыт повторить, изменив расстояние между предметом и экраном – 95 и 90 см.

8. Фокусное расстояние F_1 собирающей линзы определить по зависимости (1.6).

9. Данные измерений и расчетов занести в табл. 1.1.

10. Присоединить к собирающей линзе 5 , фокусное расстояние F_1 которой определено, рассеивающую линзу 6 с неизвестным фокусным расстоянием F_2 , собрать систему из двух плотно сложенных линз, чтобы ее оптическая сила была положительной.

Т а б л и ц а 1.1. Данные опытов и определение фокусного расстояния собирающей линзы

Номер измерения	L , см	l , см	F_1 , см	F_{1cp} , см	ΔF_1 , см	ΔF_{1cp} , см
1	100					
2	95					
3	90					

11. Повторить пункты 3–7 и определить фокусное расстояние F системы линз по зависимости (1.6).

12. Все данные измерений и расчетов занести в табл. 1.2.

Т а б л и ц а 1.2. Данные опытов и определение фокусного расстояния системы линз

Номер измерения	L , см	l , см	F , см	F_{cp} , см	ΔF , см	ΔF_{cp} , см
1	100					
2	95					
3	90					

13. Зная фокусное расстояние системы линз F и собирающей линзы F_1 , определить фокусное расстояние рассеивающей линзы F_2 по зависимости

$$F_2 = \frac{FF_1}{F_1 - F}, \quad (1.7)$$

где F_1 , F_2 – фокусное расстояние собирающей и рассеивающей линз соответственно, см;

F – фокусное расстояние системы линз, см.

П р и м е ч а н и е. Для вычисления фокусного расстояния рассеивающей линзы в зависимость (1.7) вместо F и F_1 подставить из табл. 1.1, 1.2 средние величины фокусных расстояний системы линз и собирающей линзы.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой линза?
2. Назовите виды линз.
3. Что называется главным фокусом линзы?

4. Что называется оптической силой линзы?
5. Какими недостатками обладает изображение, даваемое отдельной линзой?
6. Как построить изображение в собирающей линзе?
7. Как построить изображение в рассеивающей линзе?

Лабораторная работа 2. ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА. ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА

Цель работы: изучение закона изменения интенсивности поляризованного света.

Приборы и принадлежности: установка для проверки закона Малюса.

Каждый возбужденный атом светящегося тела испускает электромагнитную волну, которая характеризуется колебанием двух взаимно перпендикулярных векторов – вектора индукции магнитного поля \vec{B} и вектора напряженности электрического поля \vec{E} . При действии света на вещество основное значение имеет электрическая составляющая световой волны. Поэтому для описания закономерностей поляризации будем использовать только световой вектор – вектор напряженности электрического поля \vec{E} .

В световых волнах, испускаемых множеством возбужденных атомов, векторы напряженности колеблются в самых разных плоскостях. Такой свет называют *естественным* (рис. 2.1).

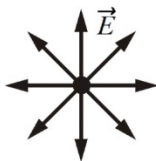


Рис. 2.1

Существуют прозрачные тела, пропускающие только такие световые волны, в которых вектор электрической напряженности \vec{E} – световой вектор – колеблется только в одной плоскости. Такие тела называются *поляризаторами*.

Свет, в котором вектор напряженности электрического поля световой волны колеблется только в одной плоскости, называется *поляризованным*.

Явление выделения из естественного света таких световых волн, в которых вектор напряженности колеблется только в одной плоскости, называется *поляризацией света*.

Проходя через поляризатор, электрический вектор естественного света разлагается на две взаимно перпендикулярные составляющие. Та составляющая, которая совпадает с главным сечением поляризатора, пропускается телом, а вторая составляющая поглощается им. Таким образом, в световом луче, прошедшем через поляризатор, остаются колебания вектора \vec{E} (и перпендикулярного ему вектора \vec{B}) преимущественно в одном направлении. Если такой поляризованный луч направить на экран и вращать поляризатор, то мы не заметим никакого изменения интенсивности светового пятна на экране. Наблюдаемая картина изменится, если между поляризатором и экраном поместить второй поляризатор. При вращении этого поляризатора интенсивность светового пятна на экране изменяется от нуля до некоторого максимума. Второй поляризатор позволяет обнаружить поляризованный луч света и называется *анализатором*.

Поляризованный свет находит широкое применение в науке и технике. В медицине поляризованное излучение низкой интенсивности в спектре солнечного света (видимая и инфракрасная часть с длиной волны от 480 до 3400 нм) применяют в физиотерапевтических процедурах. Лечебное действие такого излучения основано на повышении активности клеточных ферментов, улучшении функции тканевого дыхания, обменных процессов. Также поляризованный свет оказывает противовоспалительное, противоаллергическое и противоотечное действие за счет стабилизации клеточных мембран и снижения количества клеток эозинофилов в крови, улучшает микроциркуляцию, оказывает бронхорасширяющее действие.

Поляризованный свет используют в жидкокристаллических дисплеях, принцип работы которого основан на вращении плоскости поляризации и изменении интенсивности световой волны в соответствии с законом Малюса.

Устранение бликов поверхностей поляризационными очками – еще один из примеров применения явления поляризации света.

Общий вид и описание лабораторной установки

На вертикальной стойке I располагаются источник света S , конденсор K , диафрагма D , на горизонтальной площадке – поляризатор P , анализатор A , далее за анализатором находится фотоэлемент Φ , соединенный с микроамперметром 4 (рис. 2.2).

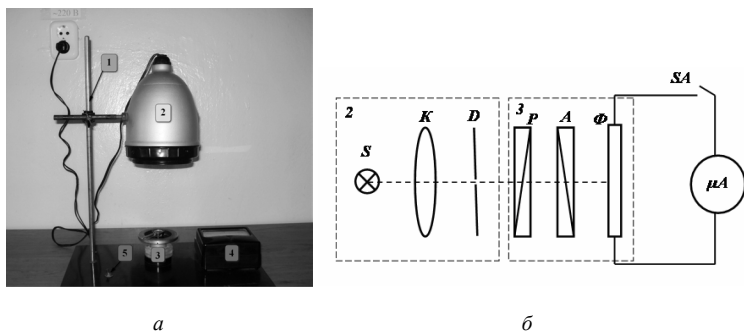


Рис. 2.2. Общий вид (а) и составляющие (б) лабораторной установки

Угол φ между главными сечениями поляризатора и анализатора может изменяться за счет вращения оправы поляризатора. Для отсчета величины угла анализатор снабжен шкалой с нониусом.

Закон изменения интенсивности поляризованного света, прошедшего через анализатор, в зависимости от взаимной ориентации главных сечений поляризатора и анализатора описывается выражением

$$I = I_0 \cos^2 \varphi, \quad (2.1)$$

где I – интенсивность поляризованного света, прошедшего через анализатор;

I_0 – интенсивность света, прошедшего через поляризатор.

Интенсивность света, прошедшего через анализатор, пропорциональна квадрату косинуса угла φ между сечениями анализатора и поляризатора (закон Малюса).

При повороте анализатора вокруг поляризованного луча изменяется интенсивность света, прошедшего через анализатор. Максимальная интенсивность света будет при $\varphi = 0^\circ$, т. е. когда главные сечения поляризатора P и анализатора A параллельны. Минимальная освещенность будет при $\varphi = 90^\circ$, т. е. когда главные сечения поляризатора P и анализатора A перпендикулярны или скрещены.

Вращая анализатор относительно поляризатора, можно ослабить прошедший свет в любое число раз и получить свет различной интенсивности.

Интенсивность света, прошедшего через поляризатор и анализатор, определяется фотоэлементом. Ток фотоэлемента регистрируется микроамперметром 4. Как известно, сила фототока пропорциональна свето-

вому потоку, падающему на фотозлемент. А падающий световой поток пропорционален интенсивности света, т. е. показания микроамперметра пропорциональны интенсивности падающего на фотозлемент света.

$$\frac{n}{n_0} = \frac{I}{I_0}, \quad (2.2)$$

где n – число делений микроамперметра при угле φ ;

n_0 – число делений микроамперметра при угле $\varphi = 0^\circ$;

I – интенсивность света, прошедшего через анализатор;

I_0 – интенсивность света, прошедшего через поляризатор.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Включить источник света.
2. Включить микроамперметр. Для этого необходимо выключатель SA (см. рис. 2.2, б) поставить в положение «Вкл.» (см. рис. 2.2, а).
3. На шкале поляризатора имеется два нониуса (рис. 2.3) с делениями (нониус I и нониус II).

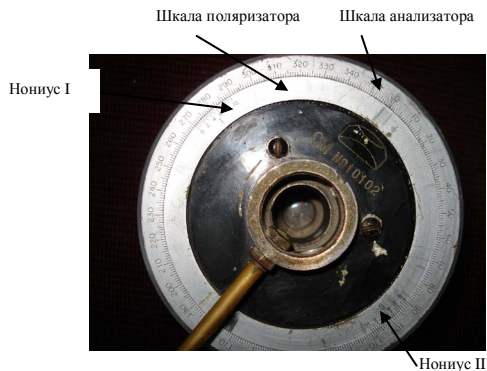


Рис. 2.3

Для проверки правильности установки поляризатора и анализатора, вращая шкалу поляризатора, установить нониус I или II так, чтобы нуль его шкалы совпадал с $\varphi = 90^\circ$ шкалы анализатора (плоскости поляризатора и анализатора в этом случае взаимно перпендикулярны), и тогда освещенность фотозлемента будет равна нулю (стрелка микроамперметра укажет на нуль).

В случае когда освещенность фотоэлемента не равна нулю (стрелка микроамперметра не стоит на нуле), необходимо отрегулировать установку (регулировка выполняется только преподавателем). Вращая шкалу поляризатора, устанавливают ее так, чтобы нуль шкалы I или II нониуса и $\varphi = 0^\circ$ шкалы анализатора совпадали. Записать в табл. 2.1 показания микроамперметра. В этом случае интенсивность света, пропущенного поляризатором и анализатором, и соответствующие показания микроамперметра будут максимальными ($n = n_0$).

Таблица 2.1. Экспериментальные данные

Показатели	Значения																		
Угол на шкале анализатора φ , град	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
Показания микроамперметра n																			
$\frac{n}{n_0}$																			

4. В дальнейшем устанавливать на шкале анализатора (см. рис. 2.3) углы от 0 до 180° через каждые 10° и снимать показания n микроамперметра. Результаты записывать в табл. 2.1.

5. Найти значения $\frac{n}{n_0}$ для каждого значения угла φ и результат занести в табл. 2.1.

6. Выключить микроамперметр выключателем SA и источник света.

7. Построить график зависимости $\frac{n}{n_0} = f(\varphi)$, откладывая по оси абсцисс углы φ , а по оси ординат – отношение $\frac{n}{n_0}$.

8. На этом же чертеже построить график теоретической зависимости интенсивности света от угла $\cos^2 \varphi = \frac{I}{I_0} = f(\varphi)$ (значения $\cos^2 \varphi$ даны в табл. 2.2).

Таблица 2.2. Значения $\cos^2 \varphi$

φ	φ	$\cos^2 \varphi$	φ	φ	$\cos^2 \varphi$
0°	180°	1,000	50°	130°	0,414
10°	170°	0,990	60°	120°	0,250
20°	160°	0,884	70°	110°	0,117
30°	150°	0,752	80°	100°	0,090
40°	140°	0,588	90°	90°	0,000

9. Сравнить экспериментальный и теоретический графики.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой световая волна согласно электромагнитной теории света?
2. Какой свет называется поляризованным?
3. Как получить поляризованный свет?
4. Какие изменения происходят в световом луче, прошедшем через поляризатор?
5. Что представляет собой анализатор? Каково его назначение?
6. Запишите формулу, выражающую закон Малюса. Поясните, какие величины обозначаются символами I , I_0 , φ .
7. В каких случаях интенсивность света, прошедшего через поляризатор и анализатор, максимальна, а в каких минимальна?
8. Каково применение поляризованного света?

Лабораторная работа 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Цель работы: изучение одного из методов определения длины световой волны с использованием явления дифракции света.

Приборы и принадлежности: оптическая скамья со щелевым источником света и объективом, дифракционная решетка, экран с миллиметровой бумагой, линейка с миллиметровыми делениями.

По современным представлениям *свет* – это электромагнитные волны, которые излучаются, распространяются и поглощаются отдельными порциями. Свет, имея электромагнитную природу, обладает свойством дуализма (двойственности). Это значит, что свет обладает и свойствами волны, и свойствами частицы.

Рассмотрим более подробно явления *дифракции* и *интерференции* света, на примере которых наиболее отчетливо проявляются его волновые свойства.

Дифракцией света называют явление огибания волнами препятствий, встречающихся на их пути, или в более широком смысле – любое отклонение распространения волн от закона прямолинейности распространения.

Явление дифракции объясняется с помощью *принципа Гюйгенса*: каждая точка фронта волны AB является источником новых, вторичных волн. Новое положение фронта волны A_1B_1 через время Δt представляет собой огибающую поверхность вторичных волн (рис. 3.1).

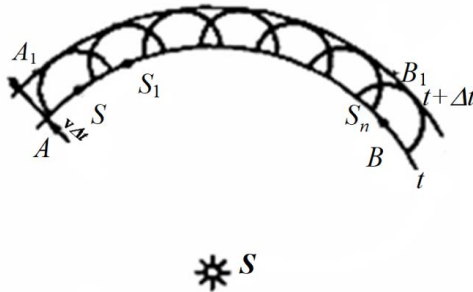


Рис. 3.1. Принцип Гюйгенса

Известно, что *фронтом волны* называют поверхность, до которой доходит волна в определенный момент времени. Если поверхность представляет собой плоскость, то волны называют *плоскими*, если сферу – *сферическими*.

Принцип Гюйгенса решает задачу о направлении распространения волнового фронта, но не затрагивает вопроса об интенсивности волн, распространяющихся по разным направлениям.

Френель дополнил принцип Гюйгенса идеей интерференции вторичных волн.

Согласно *принципу Гюйгенса – Френеля*, световая волна, возбуждаемая каким-либо источником S , может быть представлена как результат суперпозиции когерентных вторичных волн, излучаемых фиктивными источниками ΔS_1 и ΔS_2 (рис. 3.2).

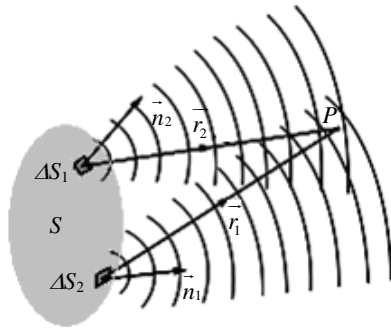


Рис. 3.2. Принцип Гюйгенса – Френеля

Когерентными волнами называют волны, которые имеют одинаковую длину (частоту) и разность фаз которых не изменяется с течением времени для фиксированных точек среды.

Фиктивными источниками вторичных волн могут служить бесконечно малые элементы любой замкнутой поверхности, охватывающей источник S .

Когерентные вторичные волны, идущие от фиктивных источников, распространяясь по всем направлениям, накладываются друг на друга, т. е. интерферируют.

Под *интерференцией* понимают явление наложения когерентных волн, при котором происходит пространственное перераспределение светового потока, вследствие чего в одних местах возникают максимумы интенсивности (светлые полосы), а в других – минимумы (темные полосы).

Необходимо учесть, что отчетливая устойчивая интерференционная картина наблюдается при соблюдении следующих условий:

- а) волны должны иметь одинаковую длину;
- б) разность фаз этих волн для каждой двух точек пространства не должна изменяться с течением времени;
- в) волны должны распространяться в одном направлении или под очень малым углом.

Условием образования отчетливой дифракционной картины является выполнение следующих двух условий:

- 1) размеры препятствия сравнимы с длиной волны;
- 2) расстояние от преграды до экрана наблюдения во много раз больше размеров препятствия.

Рассмотрим более подробно дифракцию в параллельных лучах (дифракцию Фраунгофера). Такой вид дифракции наблюдается в том случае, когда источник света и точка наблюдения бесконечно удалены от препятствия, вызвавшего дифракцию. Чтобы этот тип дифракции осуществить, достаточно точечный источник света поместить в фокусе собирающей линзы, а дифракционную картину исследовать в фокальной плоскости второй собирающей линзы, установленной за препятствием.

Пусть на узкую щель шириной $MN = a$ падает параллельный пучок лучей с длиной волны λ (рис. 3.3).

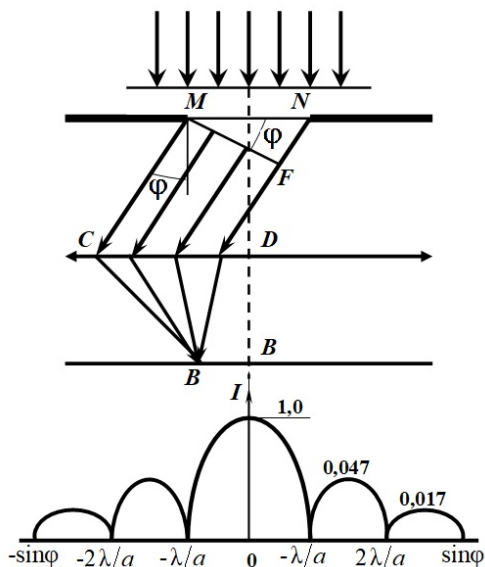


Рис. 3.3. Дифракция Фраунгофера

Согласно принципу Гюйгенса, каждая из освещаемых точек щели становится источником новых элементарных когерентных волн. Так как свет на щель падает нормально, то плоскость щели совпадает с фронтом падающей волны, следовательно, новые вторичные элементарные волны в плоскости щели колеблются в одинаковой фазе. Благодаря дифракции эти волны распространяются в пространстве за щелью по всем направлениям. В фокальную плоскость линзы, поставлен-

ной перед экраном, будут попадать лучи от разных точек щели, и, накладываясь друг на друга, волны будут интерферировать. Результат этой интерференции будет зависеть от оптической разности хода лучей.

Оптическая разность хода между крайними лучами MC и ND , идущими от щели в произвольном направлении φ ,

$$\Delta = NF = a \sin \varphi, \quad (3.1)$$

где F – основание перпендикуляра, опущенного из точки M на луч ND .

Разобьем открытую часть волновой поверхности в плоскости щели MN на зоны Френеля, имеющие вид полос, параллельных ребру M щели. Ширина каждой зоны выбирается так, чтобы разность хода от краев этих зон (для первой зоны Δ_1) была равна $\lambda / 2$, т. е. всего на ширине щели уместится $\Delta / (\lambda / 2)$ зон.

С учетом условия (3.1) число зон будет равно $2a \sin \varphi / \lambda$, т. е. число зон Френеля зависит от a , λ , φ . От числа зон Френеля зависит результат наложения всех вторичных волн. Амплитуды вторичных волн в плоскости щели будут равны, так как выбранные зоны Френеля имеют одинаковые площади и одинаково наклонены к направлению наблюдения. Следовательно, при интерференции света от каждой пары соседних зон Френеля амплитуда результирующих колебаний равна нулю, так как колебания от каждой пары соседних зон взаимно погашают друг друга.

Значит, если число зон Френеля $\Delta / (\lambda / 2)$ четное, т. е. если $\Delta / (\lambda / 2) = 2m$ (где $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$), то в точке B наблюдается дифракционный минимум, если же число зон нечетное $\Delta / (\lambda / 2) = 2m + 1$, то наблюдается дифракционный максимум, соответствующий действию одной нескомпенсированной зоны Френеля. С учетом того что $\Delta = a \sin \varphi$, условие дифракционного минимума имеет вид

$$a \sin \varphi = 2m \frac{\lambda}{2}, \quad (3.2)$$

а условие дифракционного максимума –

$$a \sin \varphi = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (3.3)$$

Отметим, что в прямом направлении ($\varphi = 0$) щель действует как одна зона Френеля и в этом направлении свет распространяется с наибольшей интенсивностью, т. е. в точке B_0 наблюдается центральный дифракционный максимум.

Из условий (3.2) и (3.3) можно найти направления на точки экрана, в которых амплитуда (а следовательно, и интенсивность) равна нулю ($\sin \varphi_{\min} = m\lambda / a$) или максимальная ($\sin \varphi_{\max} = (2m + 1)\lambda / 2a$).

При освещении щели белым светом центральный максимум имеет вид белой полосы. Боковые максимумы радужно окрашены, так как условие максимума при любых m различно для разных λ . Таким образом, справа и слева от центрального максимума наблюдаются максимумы первого ($m = 1$), второго ($m = 2$) и других порядков, обращенные фиолетовым краем к центру дифракционной картины. Однако они настолько расплывчаты, что отчетливого разделения различных длин волн с помощью дифракции на одной щели получить невозможно.

Большое практическое значение имеет дифракция, наблюдаемая при прохождении света через одномерную дифракционную решетку – систему параллельных щелей равной ширины, лежащих в одной плоскости и разделенных равными по ширине непрозрачными промежутками.

Дифракционная картина на решетке определяется как результат взаимной интерференции волн, идущих от всех щелей, т. е. в дифракционной решетке осуществляется многолучевая интерференция.

Если ширина каждой щели равна a , а ширина непрозрачных участков между щелями – b , то величина $d = a + b$ называется *постоянной (периодом) дифракционной решетки*. Величина d указывается в паспорте решетки или на самой решетке. Например, если на решетке написано $1/100$, это значит, что $d = 0,01$ мм.

Дифракционные решетки изготавливают путем нанесения тонких штрихов (царапин) на поверхности стеклянной пластинки (прозрачная решетка) или металлического зеркала (отражательная решетка).

В общем случае если дифракционная решетка состоит из N щелей, то:

- условие главных максимумов: $d \sin \varphi = \pm m\lambda$ ($m = 1, 2, 3, \dots$);
- условие главных минимумов: $a \sin \varphi = \pm m\lambda$ ($m = 1, 2, 3, \dots$);
- между двумя главными максимумами располагается $N - 1$ дополнительных минимумов, разделенных вторичными максимумами, создающими слабый фон. Условие дополнительных минимумов:

$d \sin \varphi = \pm m' \frac{\lambda}{N}$ (где m' может принимать все целочисленные значения, кроме $0, N, 2N, \dots$, при которых данное условие переходит в условие главных максимумов).

Положение главных максимумов зависит от длины волны λ , поэтому при пропускании через решетку белого света все максимумы, кро-

ме центрального ($m = 0$), разложатся в спектр, фиолетовая область которого будет обращена к центру дифракционной картины, красная – наружу.

Дифракционная решетка может быть использована как спектральный прибор для разложения света в спектр и измерения длин волн. Длину волны λ определяют по формуле

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{m}, \quad (3.4)$$

где d – постоянная решетки;

φ – угол, под которым наблюдается максимум;

m – порядок максимума.

В этом случае условие образования максимумов имеет вид

$$\Delta = k\lambda, \quad (3.5)$$

где $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ – порядок максимума.

Общий вид и описание лабораторной установки

Основной задачей при выполнении данной лабораторной работы является измерение углов, под которыми идут от решетки лучи, образующие на экране максимумы различных порядков m .

Во избежание ошибок при измерении дифракционных углов, вызванных неточностью установки решетки, плоскость которой может быть не вполне нормальна к падающим на нее лучам, необходимо при расчетах $\sin \varphi_1$ брать среднее значение OO_1 , отсчитанное от нулевого максимума вправо и влево до определенного цвета максимума первого порядка (рис. 3.4). Аналогично рассчитывается $\sin \varphi_2$.

Ввиду малости углов дифракции

$$\sin \varphi_1 \approx \text{tg } \varphi_1 = \frac{OO_1}{OC}, \quad \sin \varphi_2 \approx \text{tg } \varphi_2 = \frac{OO_2}{OC}, \quad (3.6)$$

где OC – расстояние от решетки до экрана, измеренное миллиметровой линейкой с точностью до миллиметра;

OO_1 – расстояние от центра нулевого максимума до определенного цвета максимума первого порядка, мм;

OO_2 – расстояние от центра нулевого порядка до того же цвета максимума второго порядка, отсчитанное в миллиметрах на миллиметровой бумаге.

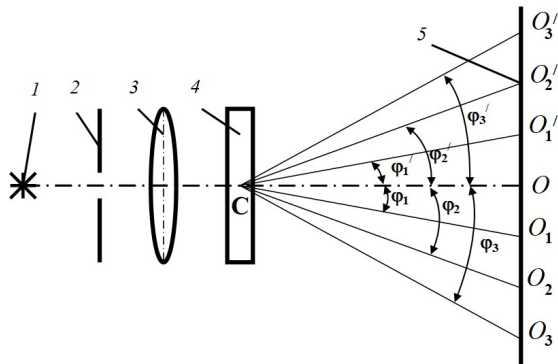


Рис. 3.4. Схема лабораторной установки:
 1 – источник света; 2 – щель; 3 – собирающая линза;
 4 – дифракционная решетка; 5 – экран

Общий вид лабораторной установки представлен на рис. 3.5. Она включает: оптическую скамью 1 со щелевым источником света 2, объектив с собирающей линзой 3, дифракционную решетку 4, экран с миллиметровой бумагой 5 и линейку с миллиметровыми делениями 6.

Источник света 2 и экран с миллиметровой бумагой 5 помещают на концах оптической скамьи 1. Для образования пучка параллельных лучей вблизи источника ставится щель, ширину которой можно изменять, и объектив с собирающей линзой 3. Перемещением объектива 3 вдоль скамьи получают на экране 5 резкое изображение щели. При такой установке щель находится в фокусе линзы и выполняет роль бесконечно удаленного источника света.

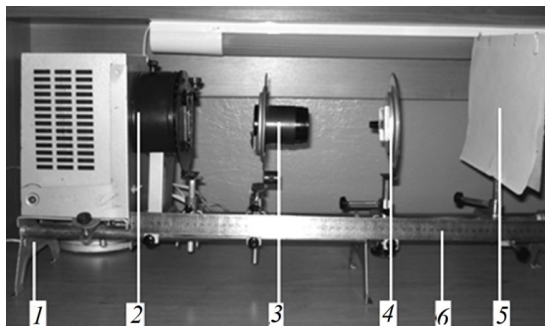


Рис. 3.5. Общий вид лабораторной установки

Дифракционную решетку 4 располагают параллельно экрану. При освещении решетки белым светом дифракционная картина имеет вид радужной окраски. Наиболее ярким является центральный максимум (белая линия), менее яркими – первый правый и левый максимумы, и еще менее яркими – вторые максимумы.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Затемнить помещение.
2. Карандашом на миллиметровой бумаге отметить центр нулевого максимума. В спектрах первого и второго максимума выбрать одинаковые цвета и по их центру провести линии.
3. Записать в таблицу расположение этих цветов.
4. Включить свет в аудитории.
5. Измерить расстояния OO_1 , OO_2 с помощью миллиметровой линейки, отсчитать расстояния OO_1 , OO_2 до соответствующих цветов максимумов первого и второго порядка.
6. Данные опыта записать в табл. 3.1.

Т а б л и ц а 3.1. Опытные данные для определения длины волны

Цвет максимума	Порядок максимума m	Расстояние от центра нулевого максимума до соответствующего цвета		Среднее значение OO_i	$\sin \varphi$	λ	Среднее значение λ для каждого цвета
		OO_i слева	OO_i справа				
Фиолетовый	1						
	2						
...
Красный	1						
	2						

7. По формуле (3.4) рассчитать длину волны λ .
8. Определить среднее значение λ для каждого цвета, используя вычисленные λ первого и второго порядка для каждого цвета.

Контрольные вопросы

1. Что такое свет с точки зрения электромагнитной теории?
2. Какие свойства света наиболее отчетливо подчеркивают его волновые свойства?

3. Что такое дифракция света? При каких условиях ее можно наблюдать?
4. Сформулируйте принцип Гюйгенса для дифракции волн.
5. В чем состоит отличие принципа Гюйгенса – Френеля от принципа Гюйгенса?
6. Что такое интерференция волн?
7. Объясните дифракцию Фраунгофера на одной щели.
8. Объясните дифракцию Фраунгофера на дифракционной решетке.
9. Почему центральный максимум является белым?
10. Объясните порядок расположения цветов в максимуме первого порядка по отношению к нулевому максимуму.
11. Запишите и объясните условие образования дифракционных максимумов и минимумов для щели и решетки.

Лабораторная работа 4. ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ

Цель работы: проведение градуировки спектроסקопа; измерение длин волн спектральных линий в видимой области; определение постоянной Ридберга.

Приборы и принадлежности: спектроскоп, спектральные трубки (гелий, ртуть, водород, неон), высоковольтный выпрямитель для возбуждения спектров, лампа дневного света.

Световые волны различной частоты, распространяющиеся в вакууме с максимально возможной скоростью ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с), попадая в оптически прозрачную среду, испытывают преломление. При этом скорость v волн уменьшается. Она определяется по формуле

$$v = \frac{c}{n}, \quad (4.1)$$

где n – абсолютный показатель преломления. Значение показателя преломления среды определяется в основном свойствами этой среды, однако в некоторой мере оно зависит еще от длины волны (или частоты) света, так как световые волны разной длины распространяются в данной среде с разной скоростью.

Поэтому одна и та же среда по-разному преломляет различные монохроматические лучи.

Зависимость показателя преломления среды от длины волны света носит название *дисперсии света*.

Согласно волновым представлениям видимый свет является электромагнитной волной с длиной от 400 до 750 нм. Разным длинам волн соответствует физиологическое восприятие разной цветности лучей. Для красного света длина волны больше, а для фиолетового – меньше.

Показатель преломления стекла в видимой области увеличивается с уменьшением длины волны. Поэтому белый луч света, пройдя сквозь стеклянную трехгранную призму, разлагается на ряд цветных пучков. Менее всего отклоняются красные лучи, более – фиолетовые. В результате на экране появляется окрашенная полоска, называемая *спектром* (рис. 4.1).

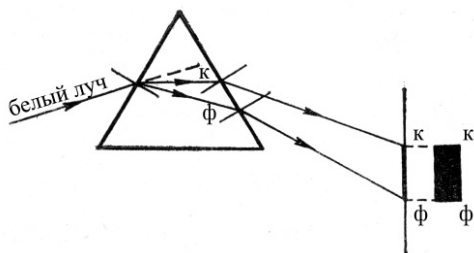


Рис. 4.1. Ход лучей в призме

Благодаря тому, что показатель преломления стекла быстрее изменяется с изменением длины волны в коротковолновой части спектра, фиолетовый участок спектра более растянут по сравнению с красным.

В луче белого света присутствуют все длины волн видимого света – от 400 до 750 нм. Поэтому спектр, получаемый от источника, дающего белый свет, представляет собой непрерывно окрашенную полоску, в которой цвета через бесконечное число оттенков переходят друг в друга. Такой спектр получил название *сплошного*.

Если же источник излучает свет лишь вполне определенных длин волн, спектр будет иметь вид отдельных окрашенных линий, расположенных на темном фоне на некотором расстоянии друг от друга. Такой спектр излучения называется *линейчатым*. Твердые тела и жидкости в раскаленном состоянии дают сплошные спектры. Раскаленным одноатомным газам и парам присущ линейчатый спектр. Спектры многоатомных газов и паров имеют вид отдельных окрашенных полос.

Это *полосатые спектры*. При большой разрешающей силе прибора полосы распадаются на отдельные линии, очень близко расположенные друг к другу. Каждый химический элемент, находясь в состоянии разреженного газа или пара, дает вполне определенный спектр излучения. Число спектральных линий, их цвета и взаимное расположение зависят от рода вещества и для каждого вещества являются характерными. Линии с одинаковыми длинами волн не повторяются в спектрах разных химических элементов.

Закономерности в строении линейчатых спектров отражают внутреннюю структуру атомов различных веществ.

Физические причины появления линейчатых спектров изучает раздел физики, называемый *квантовой механикой*. Исходя из гипотезы Планка о квантах излучения, Бор создал теорию, описывающую закономерности в спектре простейшего из атомов – атома водорода. Согласно этой теории, излучение атомом кванта света с длиной волны λ происходит в результате перехода электронов в атоме между стационарными орбитами. Переходу электрона с более дальней на более близкую к ядру орбиту соответствует излучение кванта света. Переход с более близкой на более дальнюю орбиту сопровождается поглощением энергии. Длины волн излучаемых линий определяются выражением

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (4.2)$$

где λ – длина волны излучаемого света;

R – постоянная Ридберга;

m – номер орбиты, на которую переходит электрон;

n – номер орбиты, с которой переходит электрон.

В теории водородного спектра, созданной Бором, постоянная Ридберга в СИ выражается зависимостью

$$R = \frac{m_e e^4}{8h^3 \epsilon_0^2 c}, \quad (4.3)$$

где $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса покоя электрона;

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона;

$h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка;

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная;

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

Подставляя значения этих констант в формулу (4.3), найдем $R = 1,097373 \cdot 10^7$ м⁻¹.

Более точная теория, учитывающая, что электрон и ядро в атоме водорода вращаются вокруг общего центра масс, приводит к значению постоянной Ридберга, равному $R = 1,0967758 \cdot 10^7$ м⁻¹.

В видимой области спектра водорода имеется серия линий, получившая название серии Бальмера. Излучается эта серия при переходах электрона в атоме водорода на вторую стационарную орбиту с уменьшением квантового числа (уменьшением радиуса орбиты).

В поле зрения спектроскопа, применяемого в данном задании, видны четыре линии этой серии: красная, зеленая, синяя и фиолетовая.

Длины волн всех линий видимой серии описываются формулой Бальмера:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (4.4)$$

Числовое значение n в этой формуле для длины волны красной, зеленой, синей и фиолетовой линий равно соответственно 3, 4, 5, 6. На рис. 4.2 схематически показаны переходы электрона с более дальних орбит на вторую и цвета линий, излучаемых атомом водорода при этих переходах.

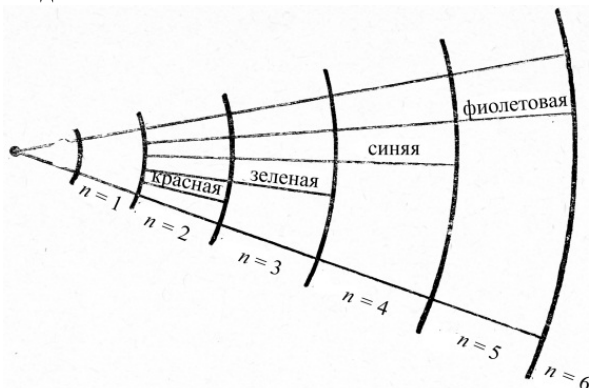


Рис. 4.2. Схема переходов электрона

Из формулы (4.4) для R получают выражение

$$R = \frac{1}{\lambda \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)}. \quad (4.5)$$

Зная длины волн линий спектральной серии в видимой области и соответствующие им значения числа n , можно опытным путем определить величину постоянной Ридберга.

Общий вид и описание лабораторной установки

Одним из основных приборов, применяемых для изучения спектров, является спектроскоп. Спектроскопы могут иметь разное устройство. В настоящей работе используется двухтрубный спектроскоп (рис. 4.3).

Он состоит из коллиматорной 1 и зрительной 2 труб, трехгранной прозрачной призмы 3 и отсчетного приспособления 4. Зрительная труба в пределах небольшого угла (5°) может поворачиваться в горизонтальной плоскости вокруг центральной стойки прибора при вращении барабанной головки отсчетного приспособления. Коллиматор имеет на конце щель, которая находится в главной фокальной плоскости объективной линзы коллиматора. Благодаря этому прошедший сквозь щель свет выходит из коллиматора параллельным пучком и падает на призму.

Образованные в результате дисперсии в призме 3 цветные пучки лучей сводятся объективом зрительной трубы в различных местах его фокальной плоскости. Каждый такой пучок дает изображение щели коллиматора. Такие изображения щели называются *спектральными линиями*, в спектроскоп они наблюдаются через окуляр зрительной трубы 2.

В поле зрения окуляра спектроскопа имеется визирная нить, расположенная вертикально. Резкой видимости визира добиваются путем перемещения внутренней оправы окуляра 5 по отношению к внешней 6. С визиром может быть совмещена каждая из линий спектра вращением головки винта отсчетного приспособления. Для получения резкой видимости спектральных линий перемещают внешнюю оправу окуляра 6 в зрительной трубе 2.

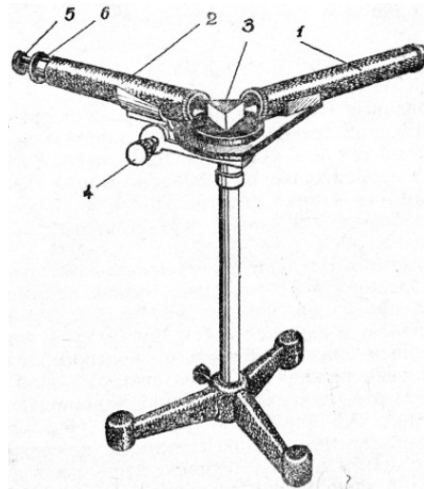
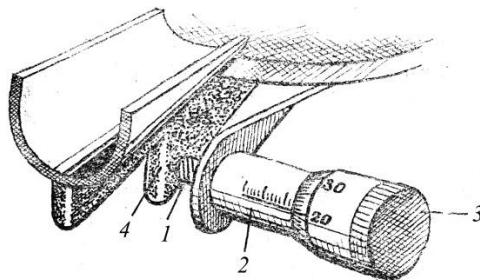


Рис. 4.3. Общий вид спектрографа:
 1 – коллиматорная труба; 2 – зрительная труба;
 3 – призма; 4 – отсчетное приспособление;
 5 – внутренняя оправа окуляра;
 6 – внешняя оправа окуляра

Отсчетное приспособление спектрографа (рис. 4.4) состоит из микро-винта 1 с шагом 1 мм, перемещающегося в цилиндрической гайке 2, неподвижно связанной со стойкой прибора.



Пример отсчета: $11 + 20 \cdot 0,02 = 11,40$.

Рис. 4.4. Отсчетное приспособление спектрографа:
 1 – микровинт; 2 – цилиндрическая гайка;
 3 – барабанная головка; 4 – выступ
 скобы подвижного кронштейна

На одном конце винта укреплена барабанная головка 3, другим концом винт упирается в выступ скобы 4 подвижного кронштейна, на котором укреплена зрительная труба. При вращении барабанной головки микровинт перемещает зрительную трубу. Обратный ход трубы обеспечивается пружиной. На поверхности цилиндрической гайки имеется продольная черта, с верхней стороны которой нанесена шкала с расстоянием между делениями 1 мм.

На скошенном крае барабанной головки нанесено 50 делений. Когда нулевое деление барабана совпадает с продольной чертой гайки, край барабана совмещается с одним из делений шкалы. Одному полному обороту микровинта соответствует перемещение края барабана вдоль шкалы на 1 мм. Следовательно, цена одного деления на барабане равна $1 \text{ мм} / 50 \text{ дел.} = 0,02 \text{ мм/дел.}$

Пример отсчета по микрометрическому устройству приведен на рис. 4.4. Число целых делений берут по продольной шкале до края барабана. Для определения сотых долей деления умножают номер деления барабана, совпадающего с продольной чертой на поверхности гайки, на цену одного деления шкалы барабанной головки.

Для определения длины волны излучения с помощью спектроскопа необходимо произвести градуировку его шкалы, т. е. установить зависимость между длинами волн и отсчетами по шкале, соответствующими этим длинам волн. Градуировка производится с помощью линейчатого спектра, длины волн которого известны. Таким спектром может быть спектр паров ртути, водорода, гелия и других газов или паров.

В данной работе для градуировки спектроскопа в качестве источника света с известным набором длин волн используется лампа дневного света. При прохождении электрического тока через лампу пары ртути, имеющиеся в колбе лампы, возбуждаются и излучают электромагнитные волны как в видимой, так и невидимой областях спектра. Ультрафиолетовый свет, поглощаясь люминофором, нанесенным на внутреннюю поверхность колбы, приводит к его свечению. Видимый же свет, излучаемый атомами ртути, частично проходит сквозь стенки лампы наружу. Поэтому при наблюдении в спектроскоп спектр, видимый в поле зрения окуляра, представляет собой наложение двух спектров: сплошного, даваемого люминофором, и линейчатого спектра паров ртути.

Сплошной спектр является для наших целей лишним, лишь мешающим наблюдению, и на него не следует обращать внимания. Линии, принадлежащие парам ртути, видны на фоне сплошного спектра, так

как их яркость больше яркости соответствующих участков сплошного спектра. На эти спектральные линии и следует наводить визирную нить спектроскопа.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Произвести настройку спектроскопа. Для этого включить лампу дневного света, направить щель спектроскопа на лампу и, глядя в окуляр, добиться резкой видимости визира и линий спектра.

2. Вращая головку микрометрического винта отсчетного приспособления, совместить с визиром линии спектра (при этом визирная нить должна закрывать собой линию спектра) и снять показания N отсчетного приспособления. Отсчеты N соответствующих цветов линий заносят в левую часть табл. 4.1. Наблюдение начинают с длинноволновой (красной) части спектра.

Таблица 4.1. Результаты измерений и вычислений

Известный спектр (ртуть)			Изучаемый спектр			$\Delta\lambda = \lambda_{\text{ист}} - \lambda,$ нм
Цвет линии	Отсчет N , дел.	Длина волны λ , нм	Цвет линии	Отсчет N , дел.	Длина волны λ , нм	
Красный		623				
Оранжевый		612				
Желтый		577				
Желто-зеленый		546				
Зеленый		491				
Голубой		436				
Фиолетовый		405				

3. Выключить лампу дневного света.

4. По полученным данным на миллиметровой бумаге построить градуировочную, или дисперсионную, кривую. Для этого в масштабе по оси абсцисс отложить данные отсчетов по спектроскопу, а по оси ординат – соответствующие им значения длин волн λ линий известного спектра. Полученные точки соединить плавной кривой. Рекомендуемый масштаб: по длине волны – 2 нм/мм, по отсчету – 0,02 дел./мм. За начало отсчета по длине волны принять нижнюю границу видимого спектра, равную 400 нм.

5. Определить длины волн, соответствующие линиям изучаемого спектра. Для этого необходимо:

а) подать питание от высоковольтного генератора на разрядную трубку с исследуемым веществом;

б) щель коллиматора расположить напротив светящейся спектральной трубки;

в) совмещая визир зрительной трубы со всеми линиями спектра, произвести отсчеты по спектро스코пу для каждой линии и занести значения в табл. 4.1;

г) выключить питание высоковольтного генератора;

д) длины волн, соответствующие видимым линиям изучаемого спектра, определить, пользуясь дисперсионной кривой.

6. Сравнить полученные значения длин волн с табличными значениями и определить абсолютные расхождения между опытными и истинными значениями по зависимости

$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{ист}} - \lambda.$$

7. Определить постоянную Ридберга. Для этого необходимо:

а) установить в держатель генератора газоразрядную трубку, наполненную водородом;

б) повторить последовательность действий, описанных в п. 5, занеся полученные данные в табл. 4.2;

Таблица 4.2. Результаты измерений и определение постоянной Ридберга

Цвет линии	Отсчет по барабану	Длина волны λ , нм		Квантовые числа		R , м^{-1}	$R_{\text{ср}}$, м^{-1}	ΔR
		опыт.	ист.	n	m			
Красный			656,3					
Зелено-голубой			486,1					
Фиолетово-синий			434,0					
Фиолетовый			410,0					

в) по формуле (4.5) вычислить постоянную Ридберга (R), используя значения λ , а также n и m для каждой спектральной линии;

г) найти среднее значение постоянной Ридберга ($R_{\text{ср}}$) и сравнить его с табличным значением $R_{\text{табл}} = 1,097373 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ по формуле $\Delta R = R_{\text{табл}} - R_{\text{ср}}$.

Контрольные вопросы

1. Что называют дисперсией света? Объясните явление разложения призмой белого света в спектр.
2. Для каких волн видимого спектра показатель преломления стекла наименьший, а для каких – наибольший?
3. Какой спектр называют линейчатым?
4. Из каких основных частей состоит спектроскоп? Объясните принцип его работы.
5. Как осуществляется градуировка спектроскопа?
6. Расскажите о методе изучения спектров излучения в данной работе.
7. Запишите формулу Ридберга для атома водорода.

Лабораторная работа 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

Цель работы: изучение закона преломления и явления полного внутреннего отражения света; ознакомление с методикой определения показателя преломления жидкостей с помощью рефрактометра; определение концентрации сахара в растворе.

Приборы и принадлежности: рефрактометр, набор растворов сахаристых веществ.

Первые законы оптических явлений были установлены на основе представлений о прямолинейных световых лучах. Они относились к изменениям направления распространения света при отражении или переходе его из одного прозрачного вещества в другое.

Простейший случай изменения направления света наблюдается при прохождении света через ровную и плоскую границу двух прозрачных веществ, например воздуха и стекла или стекла и воды и т.д.

Сохраняя прямолинейность распространения, световой луч отклоняется от первоначального направления. С количественной стороны преломление света определяется известным законом синусов, по которому отношение синусов угла падения и угла преломления для данных сред является величиной постоянной (рис. 5.1).

$$\frac{\sin r}{\sin i} = \frac{v_1}{v_2} = n_{2,1}, \quad (5.1)$$

где $n_{2,1}$ – показатель преломления второй среды относительно первой.

$$\text{Так как } v_1 = \frac{c_0}{n_{0,1}}; v_2 = \frac{c_0}{n_{0,2}}, \text{ то } \frac{\sin r}{\sin i} = \frac{\frac{c_0}{n_{0,1}}}{\frac{c_0}{n_{0,2}}} = n_{2,1},$$

где c_0 – скорость света в вакууме.

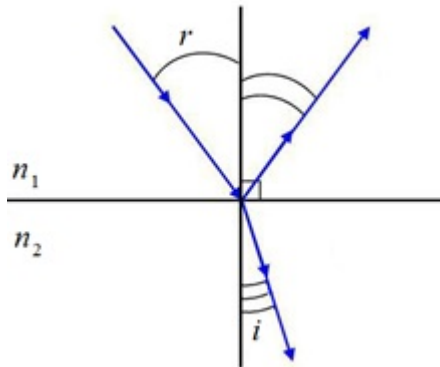


Рис. 5.1. Закон отражения света

Для всех оптических изотропных сред показатель преломления не зависит от угла падения луча и определяется свойствами двух сред, через границу раздела которых проходит свет. Он является функцией от длины света $n = f(\lambda)$. Показатель преломления среды относительно вакуума называется абсолютным. Обозначив абсолютный показатель преломления первой среды через $n_{0,1}$ и второй – через $n_{0,2}$, из закона синусов (5.1) можно выразить относительный показатель преломления второй среды относительно первой:

$$\frac{\sin r}{\sin i} = \frac{n_{0,2}}{n_{0,1}} = n_{2,1}. \quad (5.2)$$

Так как показатель преломления равняется отношению скоростей распространения света в двух данных средах и скорость света в вакууме является наибольшей, то абсолютный показатель преломления всех сред всегда больше единицы.

Относительный показатель преломления в зависимости от соотношения оптических плотностей сред может быть больше или меньше единицы. Принято называть среду оптически более плотной по сравнению с другой средой, если скорость распространения света в ней меньше, чем во второй среде. При переходе луча из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную $v_1 > v_2$ по закону

$$\text{синусов и } \frac{v_1}{v_2} = n_{2,1} > 1.$$

Если луч идет из оптически более плотной среды в менее плотную, то $v_1 < v_2$ и $\frac{v_1}{v_2} = n_{2,1} < 1$.

Как видно из закона синусов, при переходе луча из оптически более плотной среды в среду менее плотную угол падения луча r всегда меньше угла преломления i . С увеличением угла падения луча угол преломления приближается к 90° и при некотором значении угла падения угол преломления $i_{\text{пр}}$ составит 90° , т. е. преломленный луч скользит по поверхности раздела сред (рис. 5.2). Такой угол падения $r_{\text{пр}}$ называется предельным или критическим углом. При углах падения, превышающих предельный ($r > r_{\text{пр}}$), лучи полностью отражаются от границы раздела сред обратно, в первую среду. Это явление носит название полного внутреннего отражения.

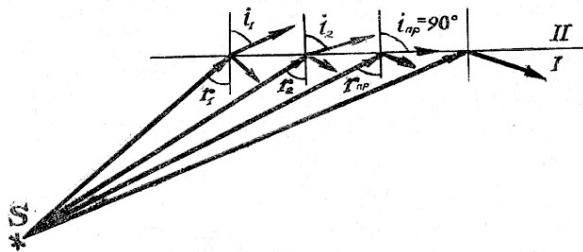


Рис. 5.2. Явление полного внутреннего отражения

Данное явление объясняет распространение света по световодам. Световоды – это пучки прозрачных гибких волокон толщиной до 0,05 мм. Высокопрозрачные световоды изготавливают из весьма чистых материалов. Основным методом этого производства – вытягивание световода из расплава кварцевого стекла; наружная оболочка из того

же кварца легируется примесями, снижающими показатель преломления (бор, германий, фосфор).

За счет многократного полного отражения свет может быть направлен по любому пути – прямому и изогнутому (рис. 5.3).

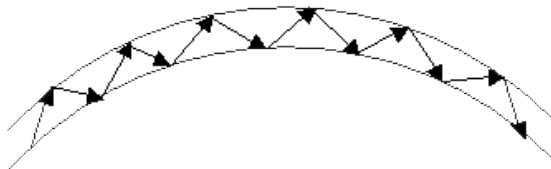


Рис. 5.3. Распространение светового луча в световоде

Волокна собираются в жгуты. Жгуты из волокон используются в медицине для исследования внутренних органов. С помощью одного световода освещают нужный объект, посредством другого передают его изображение в фотокамеру или глаз. Также световоды применяются для передачи большого объема информации в компьютерных сетях, для освещения недоступных мест, в рекламе, бытовой осветительной технике.

Природной волоконно-оптической системой является сетчатка глаза, поскольку светочувствительные элементы – палочки и колбочки – представляют весьма тонкие светопроводящие волокна.

Полное внутреннее отражение существенно для роста растений. У растений элементом, чувствительным к свету, является пигмент фитохром. Красный свет с $\lambda \approx 660$ нм переводит молекулу фитохрома в активное состояние, в результате чего запускаются биохимические реакции, приводящие к росту растения, его ориентировке и т. д. Естественно было искать молекулы фитохрома в наземной части растения. Однако у злаков, например овса, фасоли, концентрация фитохрома в клетках, находящихся на 2–3 см ниже земли, оказалась в 10 раз больше, чем в клетках, находящихся над землей. Поэтому после скашивания эти растения активно растут. Оказалось, что световодом служит стебель овса, который проводит свет на 4–5 см.

На явлении полного внутреннего отражения основан принцип действия рефрактометра – прибора, позволяющего определять показатель преломления жидких прозрачных веществ. В рефрактометрах используется зависимость предельного угла полного внутреннего отражения

от показателя преломления вещества. Рефрактометры используются в медицине для определения концентрации растворенного вещества (концентрации белка в сыворотке крови, концентрации раствора сахара и т. д.).

Для угла падения, равного предельному, по закону синусов имеем:

$$\frac{\sin r_{\text{пр}}}{\sin 90^\circ} = \frac{\sin r_{\text{пр}}}{1} = n_{2,1}. \quad (5.3)$$

Как видно из зависимости (5.3), для определения показателя преломления необходимо измерить предельный угол $r_{\text{пр}}$ для данных сред.

Показатели преломления вещества зависят от их химического состава и состояния – температуры, давления и т. д. Зная показатель преломления, можно определить состав вещества.

Идея изучения химического состава веществ по их показателям преломления впервые была высказана М. В. Ломоносовым в середине XVIII столетия. Он создал первый в мире рефрактометр для определения показателей преломления жидкостей и исследовал различные жидкие вещества.

В настоящее время рефрактометры стали необходимой принадлежностью научных лабораторий и промышленных предприятий, связанных с изготовлением оптических стекол, синтетических материалов, органических соединений и других прозрачных веществ.

Общий вид и описание лабораторной установки

Рефрактометр, примененный в данной работе, производственного типа. Он используется для быстрого определения содержания сахаристых веществ в растворах.

Для определения сахаристости требуется всего несколько капель исследуемой жидкости, которые помещают между двумя гипотенузными гранями призмы 3 и 2 (рис. 5.4). От источника света лучи направляются зеркалом 1 на осветительную призму 2. Матовой гипотенузной поверхностью осветительной призмы свет рассеивается, и, так как слой жидкости очень мал, лучи с наибольшим углом падения являются скользкими. Далее лучи, выходящие из призмы, попадают в призму прямого зрения 4 и зрительную трубу, которая состоит из объектива 5 и окуляров 9 и 10. Прямоугольная призма 6 поворачивает луч на 90° по конструктивным соображениям.

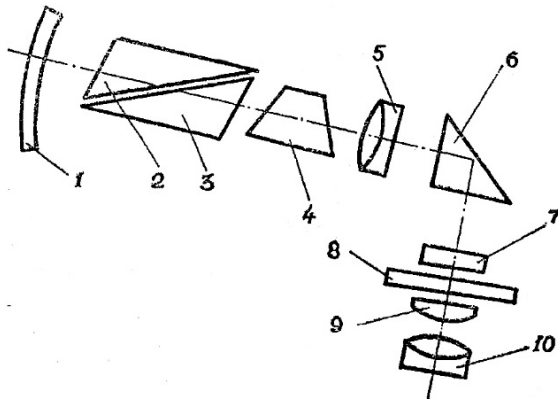


Рис. 5.4. Схема рефрактометра

Для определения процентного содержания сахара в растворе и соответствующего показателя преломления в поле зрения зрительной трубы совмещают границу светотени со штрихом сетки 7 и по шкале 8 производят отсчет показателя преломления и процентного содержания сахара.

Грань AB верхней осветительной призмы матовая и служит для освещения жидкости, нанесенной тонким слоем в узкий зазор между призмами. Свет, рассеянный матовой гранью верхней призмы, проходит плоскопараллельный слой исследуемой жидкости и падает на диагональную грань A_1B_1 нижней измерительной призмы под разными углами – от 0 до 90° (рис. 5.5).

Так как показатель преломления вещества призмы N больше, чем показатель преломления жидкости n ($N > n$), то луч M_1O , падающий на диагональную грань измерительной призмы под углом $i \approx 90^\circ$, пойдет под предельным углом преломления $r_{пр}$. Всякий другой луч, падающий на грань измерительной призмы под углом, меньшим 90° , пойдет в ней под углом, меньшим $r_{пр}$ (см. пунктирный луч, рис. 5.5). Это приводит к тому, что пучок, идущий в направлении TE , представляет собой границу распространения световых лучей, прошедших призму со стороны наименьших углов i' .

В результате этого поле зрения окуляра рефрактометра окажется разделенным на две половины (светлую и темную). Значение угла i' , а следовательно, и положение границы между темной и светлой ча-

стью поля зрения окуляра рефрактометра зависят только от показателя преломления n жидкости.

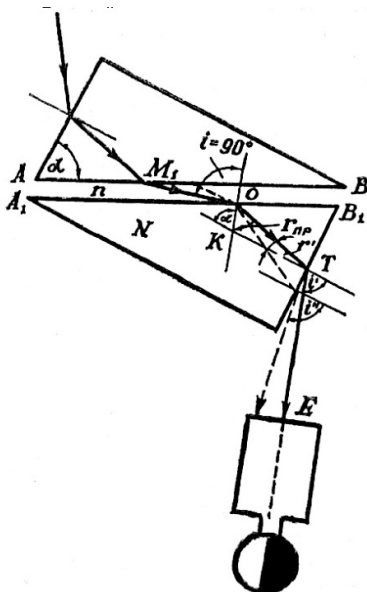


Рис. 5.5. Ход лучей в призмах рефрактометра

На практике в поле зрения окуляра рефрактометра расположены две шкалы, видимые одновременно с границей раздела. По одной шкале отсчитывается показатель преломления вещества, по другой – процентная концентрация растворов.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить устройство рефрактометра РПЛ-3.
2. Поднять верхнюю камеру с призмой 7 (рис. 5.6).
3. Нанести несколько капель дистиллированной воды на поверхность призмы, находящейся в нижней камере 5, и опустить верхнюю камеру с призмой.
4. Включить блок питания 13 рефрактометра в сеть.
5. На боковую грань верхней призмы направить через специальное окошечко в обойме призмы лучи от осветителя 8.

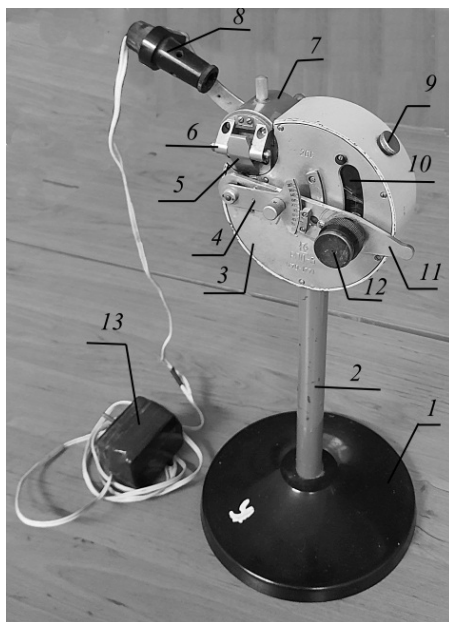


Рис. 5.6. Внешний вид рефрактометра РПЛ-3:

- 1 – основание; 2 – колонка; 3 – корпус;
- 4 – дисперсионный лимб с ручкой; 5 – нижняя камера с призмой;
- 6 – шарнир соединения нижней и верхней камер;
- 7 – верхняя камера с призмой; 8 – осветитель;
- 9 – пробка для ввода ключа установки нуля; 10 – шкала;
- 11 – рукоятка; 12 – окуляр; 13 – блок питания

6. Наблюдая через окуляр 12 зрительной трубы, передвижением окуляра установить границу раздела темной и светлой части поля зрения на резкую видимость. При освещении призм рефрактометра белым светом линия раздела может получить радужную окраску, которая уничтожается медленным вращением дисперсионного лимба 4.

7. Закончив установку на резкую видимость поля зрения, перемещением рукоятки 11 совместить пунктирную визирную линию в поле зрения прибора с границей раздела.

8. По левой шкале с точностью до тысячных долей произвести отсчет, дающий значение показателя преломления химически чистой воды. При этом отсчет по правой шкале, дающий процентное содержание сахаристых веществ, должен быть равен нулю.

9. Значения показателя преломления и процентное содержание сахара занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1. **Опытные данные**

Исследуемая жидкость	Показатель преломления n	Содержание сахара в растворе, %
Дистиллированная вода (H ₂ O)		
Раствор № 1		
Раствор № 2		
Раствор № 3		

10. Выключить блок питания осветителя из сети.

11. Протереть призмы фильтровальной бумагой и нанести несколько капель раствора № 1 на нижнюю призму.

12. Повторить пп. 4–7 для раствора № 1, а затем для растворов № 2 и 3, занося в таблицу соответствующие значения показателей преломления и процентного содержания сахара.

13. По данным опыта построить график зависимости показателя преломления от процентного содержания сахара в растворе.

14. По окончании работы протереть поверхности призм фильтровальной бумагой.

Контрольные вопросы

1. Что называется относительным показателем преломления? Когда он больше единицы, меньше единицы?

2. Что называется абсолютным показателем преломления? Каков его физический смысл?

3. Что называется явлением полного внутреннего отражения? В каком случае оно возникает? Что такое предельный угол?

4. Где применяется явление полного внутреннего отражения?

5. Расскажите, как определяются показатель преломления и концентрация сахаристых растворов с помощью рефрактометра.

Лабораторная работа 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ ПИРОМЕТРИИ

Цель работы: изучение законов теплового излучения; ознакомление с методикой измерения температуры оптическим пирометром; определение яркостной и действительной температур, суммарной испускательной способности и длины волны максимума испускательной способности в спектре излучения тела.

Приборы и принадлежности: оптический пирометр, лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), лампа накаливания, источник постоянного тока.

Электромагнитные волны всех длин излучаются атомами светящегося тела. Энергия, расходуемая при этом телом на излучение, может пополняться из различных источников. Например, свечение, которым сопровождается целый ряд химических реакций, происходит за счет энергии, выделяемой при реакции.

Свечение разряженных газов при прохождении через них тока происходит за счет энергии источника тока и т. д. Самым распространенным является свечение нагретых тел. Оно происходит за счет тепла, сообщаемого извне.

Тепловым излучением называется электромагнитное излучение, испускаемое веществом за счет теплового движения его атомов и молекул. Тепловому излучению соответствует сплошной спектр. Его интенсивность и спектральный состав зависят от температуры, химической природы и агрегатного состояния нагретого тела. Все тела обладают излучательной и поглощательной способностью. Испускательная способность тела является основной количественной характеристикой теплового излучения и представляет собой энергию, излучаемую единицей площади поверхности тела за единицу времени при данной температуре тела T :

$$R_s(T) = \frac{dW_1}{Sdt}, \quad (6.1)$$

где dW_1 – энергия, излучаемая телом;

S – площадь излучающего тела;

dt – время, в течение которого происходит излучение.

Испускательную способность еще называют энергетической светимостью. Энергия dW_1 , излучаемая телом, уносится электромагнитными волнами различной длины ($0 \leq \lambda \leq \infty$). Поэтому вводится понятие спектральной испускательной способности $r_{\lambda, T}$ – испускательной способности при данной температуре T для данного интервала длин волн $d\lambda$:

$$r_{\lambda, T} = \frac{dR_3(T)}{d\lambda}, \quad (6.2)$$

где $d\lambda$ – интервал длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$.

Отсюда

$$dR_3(T) = r_{\lambda, T} d\lambda. \quad (6.3)$$

Суммарная испускательная способность (интегральная энергетическая светимость) складывается из элементарных $dR_3(T)$, т. е.

$$R_3(T) = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} dR_{3, T} = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} r_{\lambda, T} d\lambda. \quad (6.4)$$

Спектральной характеристикой поглощения является поглощательная способность тела $a_{\lambda, T}$ – доля поглощенной энергии dW_2 по отношению ко всей энергии dW , доставляемой за единицу времени на единицу площади поверхности падающими на нее электромагнитными волнами с длинами волн в интервале от λ до $\lambda + d\lambda$:

$$a_{\lambda, T} = \frac{dW_2}{dW}. \quad (6.5)$$

Для разных тел величины излучательной и поглощательной способности при одинаковых условиях резко отличаются, но, как установил Кирхгоф, отношение испускательных способностей $r_{\lambda, T}$ к поглощательным способностям $a_{\lambda, T}$ тел не зависит от физической природы тел и является одной и той же функцией длины волны λ излучения и абсолютной температуры T и равно испускательной способности абсолютно черного тела $r_{0\lambda, T}$:

$$\frac{r_{1\lambda, T}}{a_{1\lambda, T}} = \frac{r_{2\lambda, T}}{a_{2\lambda, T}} = \dots = \frac{r_{0\lambda, T}}{a_{0\lambda, T}} = r_{0\lambda, T}, \quad (6.6)$$

где $r_{1\lambda, T}$, $r_{2\lambda, T}$ – испускательные способности нечерных тел;

$r_{0\lambda, T}$ – испускательная способность абсолютно черного тела при одной и той же температуре и для одной и той же длины волны;

$a_{1\lambda, T}$, $a_{2\lambda, T}$, $a_{0\lambda, T}$ – соответственно поглощательные способности вышеуказанных тел.

Тело, полностью поглощающее все падающее на него излучение, называется *абсолютно черным*. Поглощательная способность абсолютно черного тела $a_{0\lambda, T}$ равна единице для всех длин волн и температур. В природе абсолютно черных тел нет, однако некоторые из них по своим свойствам близки к ним (сажа, платиновая чернь, черный бархат и т. д.). Из закона Кирхгофа (6.6) следует:

$$r_{\lambda, T} = r_{0\lambda, T} a_{\lambda, T}. \quad (6.7)$$

Тело, поглощательная способность которого меньше единицы и не зависит от длины волны света, направления его распространения и поляризации, называется *серым* или *нечерным*. Для всех нечерных тел $a_{\lambda, T} < 1$, следовательно, $r_{\lambda, T} < r_{0\lambda, T}$. Это значит, что излучательная способность нечерного тела $r_{\lambda, T}$ всегда меньше излучательной способности абсолютно черного тела $r_{0\lambda, T}$ при одинаковой температуре T и длине волны λ .

Определение вида функции $r_{0\lambda, T}$ явилось основной задачей в развитии учения о тепловом излучении, при решении которой были установлены основные законы теплового излучения абсолютно черных тел.

Закон Стефана – Больцмана, выражающий связь между суммарной испускательной способностью (интегральной энергетической светимостью) абсолютно черного тела и его абсолютной температурой, формулируется следующим образом: суммарная испускательная способность абсолютно черного тела прямо пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры, т. е.

$$R_{\Sigma, T} = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} r_{0\lambda, T} d\lambda = \sigma T^4, \quad (6.8)$$

где $\sigma = 5,675 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана.

Второй основной закон излучения абсолютно черного тела, получивший название закона смещения, открыл в 1893 г. В. Вин. Длина волны λ_{\max} , на которую приходится максимум спектральной излу-

тельной способности $r_{0\lambda, T}$ абсолютно черного тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре T , т. е.

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}. \quad (6.9)$$

Постоянная Вина b не зависит от температуры и равна $2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$. Как видно из закона Вина, с повышением температуры максимум излучательной способности смещается в сторону коротких длин волн.

Рассмотренные законы получения абсолютно черного тела не определяют общего вида функции $r_{0\lambda, T}$. Решение этой задачи было дано в 1900 г. Планком. Основываясь на гипотезе о квантах излучения, он получил теоретически формулу для $r_{0\lambda, T}$:

$$r_{0\lambda, T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (6.10)$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – постоянная Планка;

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – скорость света в вакууме;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постоянная Больцмана.

Формула Планка дает результаты, хорошо совпадающие с опытными данными, и, как частный случай, включает в себя законы Стефана – Больцмана и Вина.

Общий вид и описание лабораторной установки

Основываясь на законах теплового излучения, можно определять температуры раскаленных и самосветящихся тел по характеру их излучения. Такие методы определения температур носят название оптической пирометрии, которая позволяет измерять температуры свыше $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Методы оптической пирометрии являются простыми, удобными и дают надежные результаты. В зависимости от того, на каком из законов излучения основано измерение температуры, различают несколько методов оптической пирометрии, каждый из которых имеет свои специфические особенности.

В данной работе применяется яркостный метод, основанный на изменении яркости свечения и цвета накаливаемых тел с изменением их температуры. В монохроматических лучах яркость свечения источника света зависит только от его температуры. Яркость абсолютно черного тела связана с его излучательной способностью соотношением

$$b_{0\lambda, T} = \frac{1}{\pi} r_{0\lambda, T}. \quad (6.11)$$

Подставив в эту зависимость вместо величины $r_{0\lambda, T}$ ее значение из формулы Планка (6.10), получим:

$$b_{0\lambda, T} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}. \quad (6.12)$$

Из выражения (6.12) непосредственно видно, что яркость зависит только от температуры, если измерение производится в лучах определенной длины волны. Поэтому, определив яркость для данной длины волны λ , можно найти температуру излучающего тела. Последнее справедливо только для абсолютно черного тела, так как для нечерных тел яркость всегда меньше, чем для абсолютно черного тела при равных условиях. Поэтому температура тела, определенная по его монохроматической яркости, несколько меньше истинного значения его температуры. Таким образом, *яркостная температура* – это температура, до которой надо нагреть абсолютно черное тело, чтобы его монохроматическая яркость была равна монохроматической яркости реального физического тела. От яркостной температуры можно перейти к истинной, если известно отношение монохроматических яркостей данного реального физического тела и абсолютно черного тела для выбранного цвета излучения и измеряемого интервала температур. Такое отношение яркостей называют коэффициентом монохроматической излучательной способности.

Яркостный метод измерения температур раскаленных тел сводится к определению их монохроматических яркостей. Непосредственное измерение абсолютного значения яркости затруднительно, поэтому пользуются методом сравнения яркости наблюдаемого тела с эталоном яркости. За эталон яркости принимается тело, для которого способом сравнения с искусственным абсолютно черным телом установлена зависимость яркости от его температуры.

В оптическом пирометре с исчезающей нитью переменного накала эталоном яркости является нить пирометрической лампы накаливания.

Оптическая система пирометра позволяет рассматривать нить лампы на фоне изображения накаливаемого тела. Доведя изменением тока яркость нити накала до совпадения с яркостью накаливаемого тела, можно температуру исследуемого тела считать равной температуре нити фотометрической лампы. Достижение равенства яркостей, называемое

фотометрическим равновесием, воспринимается наблюдателем как исчезновение нити лампы на фоне изображения тела (рис. 6.1).



Рис. 6.1. Принцип действия яркостных пирометров

При фотометрическом равновесии производится отсчет яркостной температуры по шкале пирометра, градуированной в градусах Цельсия. При всех измерениях для длительного сохранения неизменности характеристик фотометрической лампы температура ее нити не должна превышать $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$. При измерении более высоких температур в интервале $1200\text{--}2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдаемая яркость тела ослабляется введением между телом и фотометрической лампой светофильтра, поглощающего часть излучения исследуемого тела.

Оптический пирометр с исчезающей нитью широко применяется для измерения высоких температур во многих отраслях промышленности. Он включает в себя следующие основные части:

1) *оптическую систему*, состоящую из объектива Об, окуляра Ок, диафрагм, красного светофильтра Ск для наблюдения нити фотометрической лампы Л на фоне изображения накаливаемого исследуемого тела в красных лучах и ослабляющего светофильтра Со (рис. 6.2);

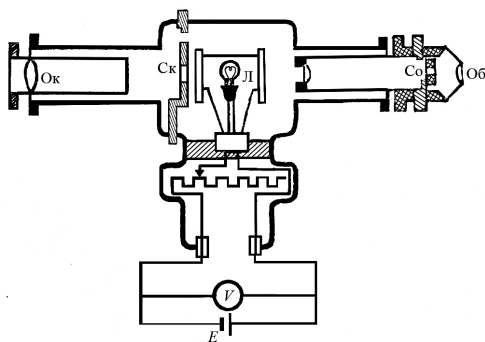


Рис. 6.2. Схема пирометра

2) *фотометрическую лампу*, являющуюся эталоном измеряемой яркостной температуры. Ее нить подключена к аккумулятору через реостат, которым регулируется ток накала нити и тем самым ее температура;

3) *вольтметр V со шкалой*, проградуированной в градусах Цельсия яркостной температуры.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить устройство лабораторной установки (рис. 6.3, 6.4).

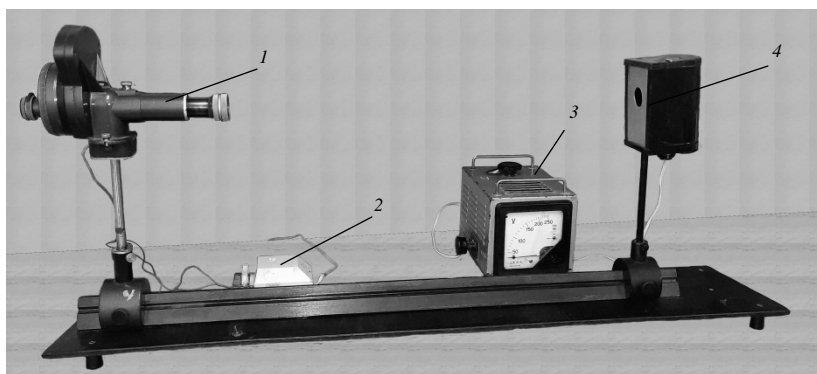


Рис. 6.3. Общий вид лабораторной установки с пирометром типа ОППИР-017:
1 – пирометр; 2 – блок питания пирометра; 3 – ЛАТРа; 4 – исследуемая лампа

2. Рукоятку, расположенную на корпусе ЛАТРа 3, повернуть до упора против часовой стрелки. В этом случае на выходных зажимах ЛАТРа будет отсутствовать напряжение.

3. Включить вилку выпрямителя в сеть, тем самым включив сам пирометр. Довести накал нити фотометрической лампы приблизительно до 1400 °С по шкале прибора.

4. Поворотом обоймы на окуляре ввести красный светофильтр Ск. Медленно перемещая рукой тубус окуляра и наблюдая через окуляр, получить в поле зрения резкое изображение нити фотометрической лампы.

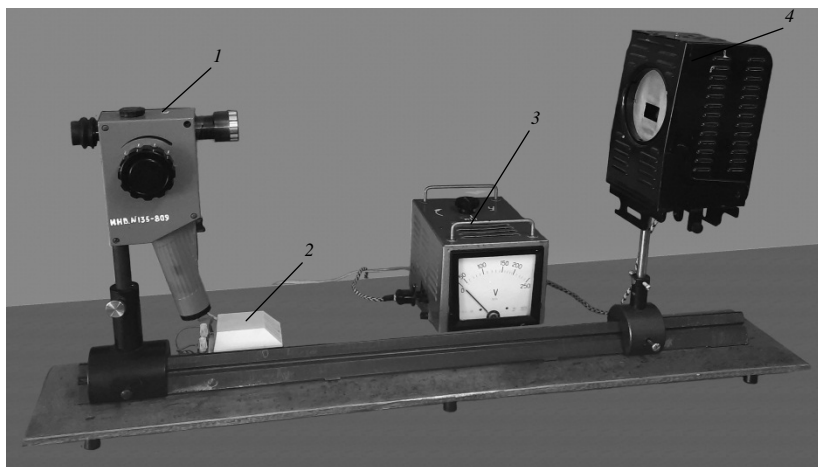


Рис. 6.4. Общий вид лабораторной установки с пирометром типа «Промінь»:
1 – пирометр; 2 – блок питания пирометра; 3 – ЛАТР; 4 – исследуемая лампа

5. Включить в сеть через ЛАТР 3 исследуемую лампу 4 для измерения температуры нити накаливания. Изменять температуру нити накаливания необходимо, подавая напряжение на исследуемую лампу от 160 до 220 В.

6. Перемещая пирометр 1 вокруг его вертикальной оси на небольшой угол и перемещая исследуемую лампу 4, добиться совмещения изображений нити исследуемой лампы накаливания и среднего участка нити фотометрической лампы пирометра. Медленно перемещая рукой тубус объектива, необходимо получить резкое изображение нити исследуемой лампы накаливания, совмещенной с нитью фотометрической лампы пирометра.

7. Изменяя поворотом кольца реостата яркость нити фотометрической лампы, добиться исчезновения в поле зрения среднего участка нити фотометрической лампы на фоне изображения участка нити исследуемой лампы накаливания, температура нити которой изменяется. При этом в местах наложения участков обеих нитей яркость не должна отличаться от яркости наклаывающихся участков.

8. Определить яркостную температуру нити по соответствующей шкале прибора. Данные занести в табл. 6.1.

Т а б л и ц а 6.1. **Опытные данные и вычисляемые величины по определению температуры исследуемого нагретого тела**

№ п/п	Напряжение, В	Яростная температура, °С	Действительная температура, °С	$R_{\lambda, T}$, Вт/м ²	λ_m , м
1	160				
2	180				
3	200				
4	220				

Повторить опыт 4 раза.

9. Истинную температуру исследуемой нити накаливания определить по формуле

$$T = \frac{T_{\text{я}}}{1 + \frac{k\lambda \ln \alpha_{\lambda, T}}{hc} T_{\text{я}}} = \frac{T_{\text{я}}}{1 + \beta T_{\text{я}}},$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж · К⁻¹ – постоянная Больцмана;

$\lambda = 660$ нм = $660 \cdot 10^{-9}$ м – длина волны;

$\alpha_{\lambda, T}$ – коэффициент поглощения для вольфрама, $\lambda = 0,46$;

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка;

$c = 3 \cdot 10^8$ м · с⁻¹ – скорость света в вакууме.

$$\beta = \frac{k\lambda \ln \alpha_{\lambda, T}}{hc} \approx -36 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1} \approx -0,000036 \text{ К}^{-1}.$$

10. Используя табл. 6.3, сравнить данные, предварительно взяв коэффициент монохроматической излучательной способности данного вещества исследуемой нити лампы накаливания из табл. 6.2.

Т а б л и ц а 6.2. **Коэффициенты монохроматической излучательной способности некоторых металлов и сплавов в красных лучах с длиной волны $\lambda = 0,66$ мкм**

Материал	Коэффициент монохроматической излучательной способности материалов	
	в твердом состоянии	в жидком состоянии
Вольфрам	0,43	–
Железо	0,35	0,37
Молибден	0,37	0,40
Тантал	0,49	–
Константан	0,35	–
Нихром	0,35	–

11. Зная яркостную температуру нити исследуемой лампы накаливания, по закону Стефана – Больцмана (6.8) вычислить суммарную испускательную способность этой лампы накаливания при данной температуре.

Таблица 6.3. Таблица зависимости действительной температуры от яркостной температуры, измеренной оптическим пирометром, при различных значениях коэффициентов излучательной способности (температуры выражены в градусах Цельсия, вычислены для значения $\lambda = 0,66$ мкм)

Коэффициент излучательной способности	Измеренные яркостные температуры									
	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1600	1800	2000
0,30	870	980	1100	1210	1330	1450	1570	1820	2070	2330
0,35	860	970	1080	1200	1310	1430	1550	1790	2030	2280
0,40	850	960	1070	1180	1300	1410	1530	1760	2000	2240
0,43	844	954	1064	1174	1288	1404	1518	1748	1982	2222
0,45	840	950	1060	1170	1280	1400	1510	1740	1970	2210
0,50	840	950	1050	1160	1270	1380	1490	1720	1950	2180
0,55	830	940	1050	1150	1260	1370	1480	1700	1910	2150
0,60	830	930	1040	1150	1250	1360	1470	1690	1910	2130

12. Зная яркостную температуру нити исследуемой лампы накаливания, по закону смещения Вина (6.9) определить длину волны максимума в спектре излучения тела.

Полученные данные и вычисленные величины занести в табл. 6.1.

Контрольные вопросы

1. Какое излучение называется тепловым?
2. Что называется испускательной и поглощательной способностью тел?
3. Какое тело называют абсолютно черным?
4. Сформулируйте закон Кирхгофа для теплового излучения.
5. Сформулируйте закон Стефана – Больцмана.
6. Сформулируйте закон смещения Вина.
7. Поясните принцип действия оптического пирометра.

Лабораторная работа 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕМЕНТА

Цель работы: изучение законов фотоэффекта; ознакомление с явлением фотоэлектронной эмиссии; определение интегральной чувствительности селенового фотоэлемента; снятие спектральной характеристики исследуемого фотоэлемента.

Приборы и принадлежности: фотоэлемент, чувствительный гальванометр с зеркальной шкалой или микроамперметр, лампочка накаливания, оптическая скамья, набор светофильтров, линейка.

Фотоэлектрическим эффектом (фотоэффектом) называется высвобождение электронов под действием света. Различают два вида фотоэффекта: внешний и внутренний. Внешний фотоэффект – вырывание фотоэлектронов из твердых или жидких тел – обычно наблюдается при освещении щелочных металлов, например калия, цезия, натрия и др. Внутренний фотоэффект происходит внутри диэлектрика или полупроводника и связан с переходом электронов из связанного состояния в свободное без вылета наружу. Внутренний фотоэффект может проявляться в виде изменения электрической проводимости в однородных полупроводниках (фоторезистор), в неоднородных полупроводниках (фотодиод в режиме фотопреобразователя) или создания ЭДС в неоднородных полупроводниках (фотодиод в режиме фотогенератора).

Внешний фотоэффект был впервые исследован в 1888–1890 гг. русским ученым, профессором Московского университета А. Г. Столетовым. В металлах лучистая энергия оптического диапазона воздействует только на свободные электроны, их концентрация при освещении металла не изменяется, поэтому внутренний фотоэффект в них проявляется гораздо слабее, чем в полупроводниках.

Схема опыта Столетова приведена на рис. 7.1. Электрическая цепь, состоящая из батареи Б, гальванометра Г, цинковой пластины К и медной сетки А, замыкалась слоем воздуха, находящимся между сеткой и пластиной.

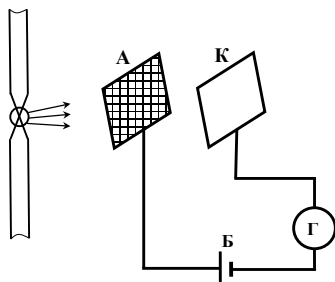


Рис. 7.1. Схема опыта Столетова

При естественной ионизации воздуха ток в цепи был очень малым. При освещении цинковой пластины электрической дугой ток резко возрастал. Это явление наблюдалось только при отрицательном заряде пластины и при освещении ее ультрафиолетовыми лучами.

На основании проведенных измерений Столетов установил следующие закономерности фотоэффекта: а) под действием света вещество теряет только отрицательные заряды; б) явление вызывается преимущественно ультрафиолетовыми лучами.

А. Г. Столетов опытным путем установил следующие основные законы фотоэффекта:

- 1) максимальная начальная скорость фотоэлектронов определяется частотой света и не зависит от его интенсивности;
- 2) для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т. е. минимальная частота ν_0 света, при которой еще возможен внешний фотоэффект; величина ν_0 зависит от химической природы вещества и состояния его поверхности;
- 3) число фотоэлектронов, вырываемых из катода за единицу времени, пропорционально интенсивности света.

Последний закон означает прямую пропорциональность между силой фототока i и световым потоком Φ , падающим на поверхность вещества:

$$i \propto \Phi. \quad (7.1)$$

Свет одновременно обладает волновыми и корпускулярными свойствами. По квантовой (корпускулярной) теории световой поток можно рассматривать как поток частиц-квантов, обладающих определенной порцией энергии. Световые кванты называются также фотонами. Энергия кванта выражается формулой

$$\varepsilon = h\nu, \quad (7.2)$$

где ε – энергия кванта;

h – постоянная Планка, равная $6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с;

ν – частота света.

Основываясь на квантовой природе света, Эйнштейн применил к фотоэффекту закон сохранения энергии и составил уравнение, которое устанавливает связь между энергией кванта света $h\nu$, возбуждающего фотоэффект, работой, которая расходуется на выход электрона из металла A , и кинетической энергией вылетающего электрона $\frac{m\nu^2}{2}$.

Это уравнение имеет следующий вид:

$$h\nu = A + \frac{m\nu^2}{2}. \quad (7.3)$$

Из уравнения Эйнштейна видно, что скорость фотоэлектронов возрастает с увеличением частоты света и не зависит от его интенсивности. Согласно формуле (7.3) с уменьшением частоты света кинетическая энергия фотоэлектронов уменьшается, так как работа выхода постоянна для данного освещаемого вещества.

При некоторой достаточно малой частоте $\nu = \nu_0$ или длине волны $\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}$ кинетическая энергия $\frac{m\nu^2}{2}$ фотоэлектрона станет равной нулю и фотоэффект прекратится. Это будет иметь место при $h\nu_0 = A$, т. е. когда вся энергия фотона расходуется на совершение работы выхода электрона. Тогда

$$\nu_0 = \frac{A}{h} \quad \text{или} \quad \lambda_0 = \frac{hc}{A}. \quad (7.4)$$

По формулам (7.4) определяют красную границу (порог фотоэффекта). Из этих формул следует, что красная граница зависит от величины работы выхода, т. е. от материала фотокатода. Длину волны λ_0 , соответствующую частоте ν_0 , называют *красной границей фотоэффекта*. Например, для германия ($\Delta W = 0,67$ эВ) красная граница фотоэффекта лежит в инфракрасной области ($\lambda = 1,7$ мкм).

Приборы, в основе устройства которых лежит явление фотоэффекта, называются *фотоэлементами*. Фотоэлементы очень разнообразны

по своей конструкции и типу. Они находят широкое применение в разных областях техники: телемеханике (управление работой машин на расстоянии), звуковом кино, установках для передачи изображений по проводам, во многих измерительных приборах. Фотоэффект используется в науке и технике для преобразования световой энергии в электрическую.

Различают фотоэлементы с внешним фотоэффектом (вакуумные и газонаполненные) и фотоэлементы, основанные на внутреннем фотоэффекте.

Фоторезистором называется полупроводниковый прибор с внутренним фотоэффектом, в котором используется явление фотопроводимости. Впервые это явление было обнаружено у селена У. Смитом в 1673 г.

При включении фоторезистора в электрическую цепь и его освещении ток в цепи сильно возрастает за счет увеличения концентрации свободных носителей заряда. На значение фототока влияет также спектральный состав светового потока.

Фотодиод представляет собой полупроводниковый фотоэлектрический прибор с внутренним фотоэффектом, имеющий один электронно-дырочный переход и два вывода.

Фотодиоды изготавливают из германия, кремния, селена, сернистого серебра, арсенида галлия, индия, сульфида калия и других полупроводниковых материалов.

В режиме фотогенератора используется фотогальванический эффект – разновидность внутреннего фотоэффекта, связанная с образованием разности потенциалов (фото-ЭДС) при освещении неоднородного полупроводника. В этом случае фотодиод представляет собой фотогальванический элемент, преобразующий лучистую энергию в электрическую.

Фотодиоды, работающие в режиме фотогенератора, используются в солнечных батареях. Теоретически максимально допустимый КПД солнечных элементов составляет около 30 %.

Общий вид и описание лабораторной установки

В данной работе используется селеновый фотоэлемент с запирающим слоем (рис. 7.2).

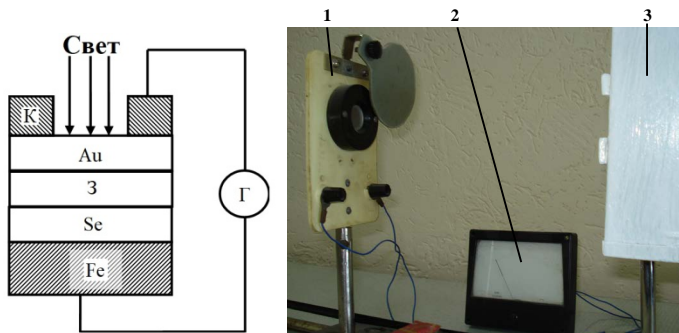


Рис. 7.2. Схема и общий вид лабораторной установки для определения интегральной чувствительности селенового фотоэлемента:
 1 – фотоэлемент; 2 – гальванометр; 3 – источник света

Данный фотоэлемент представляет собой железную пластину Fe, покрытую полупроводящим слоем селена Se, на который нанесена тонкая прозрачная пленка золота Au. К пленке золота плотно прижимается кольцо K, служащее электродом. На границе селена и пленки золота образуется так называемый запирающий слой Z, т. е. слой, обладающий свойством пропускать свободные электроны только от селена к золоту. От золота к селену электроны переходить не могут. Образование запирающего слоя происходит вследствие возникновения контактной разности потенциалов между золотом и селеном. При контакте золота и селена электроны из слоя селена переходят в пленку золота, так как работа выхода электронов из селена меньше работы выхода электронов из золота.

При падении света на фотоэлемент в селеновом слое освобождаются электроны. В своем хаотическом движении они частично переходят в пленку золота, а обратно вернуться не могут. Поэтому под действием света между золотом и селеном образуется разность потенциалов.

Если железную пластинку и кольцо замкнуть через гальванометр Г, то он покажет наличие тока. Сила такого фототока определяется по формуле

$$i = k\Phi, \quad (7.5)$$

где i – сила тока, возникающая в фотоэлементе под действием светового потока Φ , падающего на светочувствительную поверхность фотоэлемента, мкА;

k – интегральная чувствительность фотоэлемента, которая измеряется отношением величины фототока, возникающего в фотоэлементе при освещении его светочувствительной поверхности сложным по спектральному составу белым светом, к световому потоку, падающему на фотоэлемент.

Различные фотоэлементы имеют неодинаковую интегральную чувствительность. Для вакуумных фотоэлементов k равно примерно 50–100, селенового – 600, германиевого – 30 000 мкА/лм.

Если фотоэлемент освещается монохроматическим светом, то его чувствительность, зависящая от длины волны света, падающего на фотоэлемент, называется *спектральной*. При освещении фотоэлемента его чувствительность понижается – происходит утомление фотоэлемента, которое обусловлено уменьшением количества электронов в поверхностном слое катода. Во время темновых пауз, когда светочувствительная поверхность фотоэлемента закрыта крышкой, утомление исчезает. С течением времени изменяется интегральная и спектральная чувствительность фотоэлемента – происходит его старение.

Из формулы (7.5) следует, что интегральная чувствительность фотоэлемента равна:

$$k = \frac{i}{\Phi}. \quad (7.6)$$

Световой поток Φ , падающий на светочувствительную поверхность фотоэлемента S , определяется по формуле

$$\Phi = ES. \quad (7.7)$$

Освещенность светочувствительной поверхности фотоэлемента зависит от силы света источника I и расстояния между ним и фотоэлементом r :

$$E = \frac{I}{r^2}. \quad (7.8)$$

Из формул (7.6)–(7.8) получим:

$$k = \frac{i}{\Phi} = \frac{i}{ES} = \frac{ir^2}{IS}. \quad (7.9)$$

Силу света I выразим через световой поток $\Phi_{\text{ист}}$, испускаемый источником света $I = \frac{\Phi_{\text{ист}}}{4\pi}$. В нашем случае источником света является лампа накаливания, и ее световой поток определяется по табл. 7.1.

Таблица 7.1. Значения светового потока лампы в зависимости от ее мощности

Мощность лампы, Вт	Световой поток, лм
40	340
60	540
75	698
100	1050
150	1854

Таким образом, после подстановки получаем:

$$k = \frac{ir^2}{IS} = \frac{ir^2 4\pi}{\Phi_{\text{ист}} S}, \text{ или } k = \frac{4\pi ir^2}{\Phi_{\text{ист}} S}. \quad (7.10)$$

Порядок выполнения лабораторной работы

Задание 1. Определение интегральной чувствительности фотоэлемента

1. Установить на одном конце оптической скамьи источник света, на другом – фотоэлемент и подключить к фотоэлементу микроамперметр.

2. Измерить расстояние r между источником света и фотоэлементом. Значение занести в табл. 7.2.

Таблица 7.2. Опытные данные и расчетные величины по определению интегральной чувствительности фотоэлемента

№ п/п	r , м	i , мкА	k_i , мкА/лм	$k_{\text{ср}}$, мкА/лм	Δk_i , мкА/лм	$\Delta k_{\text{ср}}$, мкА/лм	$\frac{\Delta k_{\text{ср}}}{k_{\text{ср}}}$	$k = k_{\text{ср}} \pm \Delta k_{\text{ср}}$

3. Включить источник света и, открыв на короткое время (необходимое для отсчета по шкале микроамперметра) крышку, закрывающую светочувствительную поверхность, определить величину фототока. Данные занести в табл. 7.2.

4. Приблизить фотоэлемент к источнику света и повторить измерения при пяти других положениях фотоэлемента, выбирая расстояние r между источником света и фотоэлементом таким, чтобы стрелка микроамперметра не выходила за пределы шкалы.

5. Вычислить площадь фотоэлемента по формуле

$$S = \frac{\pi d^2}{4},$$

где d – диаметр светочувствительной поверхности (указан на оправе фотоэлемента).

6. Вычислить интегральную чувствительность фотоэлемента по формуле (7.10) для каждого положения фотоэлемента на оптической скамье. Значения светового потока лампы в зависимости от ее мощности взять из табл. 7.1.

7. Вычислить среднее значение $k_{\text{ср}}$. Результаты вычислений занести в табл. 7.2.

8. Определить абсолютные $\Delta k_i = |k_{\text{ср}} - k_i|$ и относительные $\frac{\Delta k_{\text{ср}}}{k_{\text{ср}}}$ погрешности результатов эксперимента.

9. Записать измеренную интегральную чувствительность k в интервальной форме.

Задание 2. Снятие спектральной характеристики фотоэлемента

1. Установить фотоэлемент на оптической скамье на таком расстоянии, чтобы при открытии крышки фотоэлемента стрелка микроамперметра находилась в пределах максимальных значений шкалы.

2. В держатель на корпусе осветителя установить красный светофильтр.

3. Открыть крышку фотоэлемента. Измерить фототок, который показывает при этом микроамперметр. Занести значение в табл. 7.3.

4. Повторить пп. 2 и 3 со светофильтрами других цветов.

5. По данным опыта построить график зависимости величины фототока от длины волны, откладывая по оси абсцисс λ , а по оси ординат – i .

Таблица 7.3. Опытные данные и расчетные величины по снятию спектральной характеристики фотоэлемента

Цвет светофильтра	Эффективная максимальная длина волны пропускаемого света λ , нм	Величина фототока i , мкА
Красный	650	
Оранжевый	600	
Желтый	580	
Зеленый	540	
Синий	460	
Фиолетовый	430	

Контрольные вопросы

1. Что такое фотоэффект?
2. Назовите виды фотоэффекта.
3. В чем заключается опыт Столетова?
4. Сформулируйте законы фотоэффекта.
5. Что называется интегральной чувствительностью фотоэлемента, спектральной чувствительностью?
6. Запишите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Поясните его.
7. Что такое красная граница фотоэффекта?
8. Как устроен селеновый фотоэлемент? Почему нельзя освещать фотоэлемент длительное время?

Лабораторная работа 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: изучение устройства и принципа работы гелий-неонового лазера; определение длины волны лазерного излучения с помощью дифракционной решетки.

Приборы и принадлежности: лазер газовый ЛГН-109, оптическая скамья, экран, дифракционные решетки, проволоочки разной толщины, поляриод.

Лазерное излучение широко применяется в различных областях науки и производства. В сельскохозяйственном производстве лазерная обработка семян позволяет повысить урожайность зерновых культур, улучшить мукомольные и хлебопекарные свойства зерна. Все эти достоинства позволяют рекомендовать лазерную технологию при выра-

щивании сельхозкультур как в крупных, так и в мелких фермерских хозяйствах.

При лазерной обработке семян картофеля, свеклы увеличивается плотность корнеплодов, что повышает их устойчивость к механическим повреждениям при уборке и перевозке, способствует лучшей сохранности.

Использование лазерного облучения в лесном хозяйстве позволяет получить больше качественных семян с единицы площади и ускоряет сроки выращивания посадочного материала для искусственного лесовосстановления. Рассмотрим принцип работы и устройство лазера более подробно.

Согласно квантовым представлениям свет – это совокупность частиц – квантов. Кванту света соответствует энергия $E = h\nu$.

Рассмотрим в некоторой среде два энергетических уровня – 1 и 2 с энергиями E_1 и E_2 ($E_1 < E_2$). Это могут быть два любых уровня из неограниченного набора уровней, свойственных данной среде. Однако удобно принять уровень 1 за основной. Предположим, что атом (или молекула) вещества первоначально находится в состоянии, соответствующем уровню 2. Поскольку $E_2 > E_1$, атом будет стремиться перейти на уровень 1. Следовательно, из атома должна выделиться соответствующая разность энергий $E_2 - E_1$ (рис. 8.1, а).

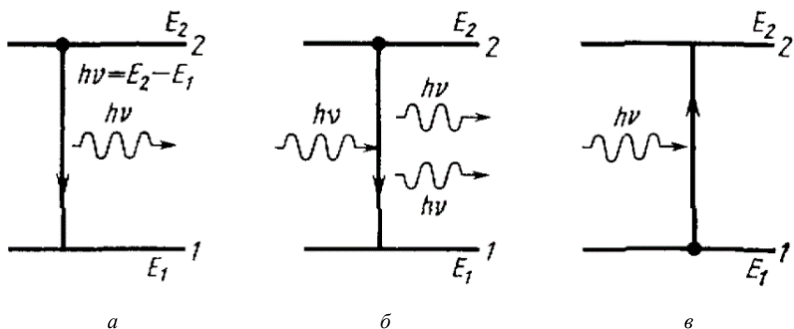


Рис. 8.1. Схематическое представление трех процессов:
а – спонтанное излучение; б – вынужденное излучение; в – поглощение

Когда энергия выделяется в виде электромагнитной волны, частота излучения определяется по формуле, полученной Планком:

$$\nu = \frac{(E_2 - E_1)}{h}, \quad (8.1)$$

где h – постоянная Планка.

Процесс испускания фотона возбужденным атомом без каких-либо внешних воздействий называется *спонтанным*, или *самопроизвольным*, *излучением* (см. рис. 8.1, *а*). Чем больше вероятность спонтанных переходов, тем меньше среднее время жизни атома в возбужденном состоянии. За среднее время жизни τ атомов принимается время, в течение которого общее число возбужденных атомов уменьшается в $e = 2,72$ раза. В большинстве случаев $\tau \approx 10^{-8}$ с.

В некоторых случаях возбужденные энергетические состояния могут существовать достаточно долго (10^{-3} с и более). Такие состояния называются *метастабильными*. На них может накапливаться большое количество атомов, т. е. достигаться большая их населенность. Под *населенностью* понимают число атомов N , находящихся в единице объема.

Переход может происходить также и безызлучательным путем. В этом случае избыток энергии $E_2 - E_1$ выделяется в какой-либо иной форме (например, разность энергий может перейти в кинетическую энергию окружающих молекул).

Предположим, что атом первоначально находится на верхнем уровне 2 и на вещество падает электромагнитная волна с частотой ν , определяемой выражением (8.1), т. е. с частотой, равной частоте спонтанно испущенной волны. Поскольку частоты падающей волны и излучения, связанного с атомным переходом, равны друг другу, имеется конечная вероятность того, что падающая волна вызовет переход ($2 \rightarrow 1$) атома с уровня 2 на уровень 1. При этом разность энергий $E_2 - E_1$ выделится в виде электромагнитной волны, которая добавится к падающей (см. рис. 8.1, *б*). Это и есть явление *вынужденного*, или *индуцированного*, *излучения*.

Предположим, что атом первоначально находится на уровне 1. Если это основной уровень, то атом будет оставаться на нем до тех пор, пока на него не подействует какое-либо внешнее возмущение. Пусть на вещество падает электромагнитная волна с частотой ν , определяемой выражением (8.1). В таком случае существует конечная вероятность того, что атом перейдет на верхний уровень 2 (см. рис. 8.1, *в*). В этом заключается процесс *поглощения*.

Если достигнуть неравновесного состояния, для которого число атомов в возбужденном состоянии будет больше числа атомов в основном состоянии, то среда будет действовать как усилитель. В этом случае говорят, что в системе существует *инверсия населенностей*. Процесс создания инверсии населенностей называют *накачкой*. Среда, в которой осуществлена инверсия населенностей, называется *активной средой*.

Если частота излучения активной среды попадает в СВЧ-диапазон, то соответствующий усилитель называется *мазером*. Слово «мазер» (англ. *maser*) образовано из начальных букв слов следующей фразы: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation – усиление микроволн с помощью вынужденного излучения. Если частота перехода соответствует оптическому диапазону, то усилитель называется *лазером* (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

Все лазеры обязательно состоят из трех основных компонентов:

- активная среда;
- система накачки;
- оптический резонатор.

В качестве активной среды используют все агрегатные состояния вещества. В гелий-неоновом лазере активной средой является смесь гелия (He) и неона (Ne) в пропорции 5:1, находящаяся в стеклянной колбе под низким давлением (обычно около 300 Па) (рис. 8.2).

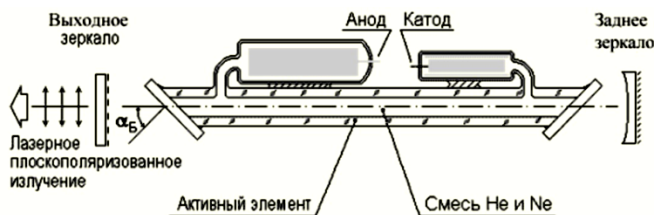


Рис. 8.2. Устройство излучателя гелий-неонового лазера

С помощью системы накачки в активной среде создается инверсия населенности.

В гелий-неоновом лазере накачка осуществляется с помощью электрического разряда в смеси гелия и неона и происходит в два этапа: гелий служит носителем энергии возбуждения, а лазерное излучение дает неон.

Чтобы усилитель света превратить в генератор, необходимо ввести подходящую положительную обратную связь. Для этих целей служит оптический резонатор. В гелий-неоновом лазере положительная обратная связь получается путем размещения активной среды между двумя плоскопараллельными зеркалами с высоким коэффициентом отражения (см. рис. 8.2). Данную систему зеркал называют *открытым резонатором* или *резонатором Фабри – Перо*. Световая электромагнитная волна, распространяющаяся в направлении, перпендикулярном зеркалам, будет поочередно отражаться от них, усиливаясь при каждом прохождении через активную среду. Выходное зеркало делают частично прозрачным, чтобы выделить пучок полезного излучения.

Лазерное излучение характеризуется чрезвычайно высокой степенью монохроматичности, когерентности, направленности, поляризованности и яркости. К свойствам можно также отнести генерацию световых импульсов малой длительности, но очень большой мощности.

Высокая монохроматичность и когерентность лазерного излучения обеспечивает успешное применение лазеров в спектроскопии, иницировании химических реакций, в разделении изотопов, в системах измерения линейных и угловых скоростей, во всех приложениях, основанных на использовании интерференции, в системах связи и локации. Особо следует, очевидно, выделить применение лазеров в голографии.

Высокая плотность энергии и мощность лазерных пучков, возможность фокусировки лазерного излучения в пятно малых размеров используются в лазерных системах термоядерного синтеза, в таких технологических процессах, как лазерная резка, сварка, сверление, поверхностное закаливание и размерная обработка различных деталей. Эти же свойства и направленность лазерного излучения обеспечивают успешное применение лазеров в компьютерной и военной технике.

Направленность лазерного излучения, его малая расходимость применяются при провешивании направлений (в строительстве, геодезии, картографии), для целенаведения и целеуказания, в локации, в том числе и для измерения расстояний до искусственных спутников Земли, в системах связи через космос и подводной связи.

Порядок выполнения лабораторной работы

Задание 1. Изучение характеристик и устройства лазера ЛГН-109

1. С разрешения преподавателя, не включая лазер в сеть, снять наружный металлический кожух лазера, предварительно выкрутив четыре декоративных болтика в углах кожуха.

2. Визуально определить расположение основных элементов лазера: активного элемента, источника питания и оптического резонатора. Обратит внимание на то, что:

а) активный элемент представляет собой газоразрядную трубку, наполненную гелий-неоновой смесью, с оптическими окнами на торцах. Катод активного элемента (так называемый холодный, работающий по принципу автоэлектронной эмиссии) представляет собой полый дюралюминиевый цилиндр и располагается в баллоне газоразрядной трубки. Анод в виде кольца из сплава ковар впаян в правый наколенник газоразрядной трубки;

б) источник питания содержит трансформатор напряжения и схему умножения напряжения, собранную на диодах и конденсаторах. Предназначен для возбуждения и поддержания разряда в активном элементе лазера;

в) оптический резонатор образован сферическим и плоским зеркалами, закрепленными на жесткой несущей конструкции.

3. Ознакомиться с основными характеристиками лазера.

Гелий-неоновый лазер ЛГН-109 – источник непрерывного когерентного 100%-ного поляризованного излучения. Длина волны лазерного излучения – $630 \cdot 10^{-9}$ м. Мощность излучения исходного пучка – 1 мВт, диаметр пучка – 0,3 см, расходимость пучка – $2,9 \cdot 10^{-3}$ рад, масса – 7 кг, напряжение – (220 ± 11) В, частота тока питания – 50 Гц, потребляемая мощность – 40 Вт.

Попадание излучения ЛГН-109 на кожу человека не оказывает вредного биологического воздействия. Прямое попадание лазерного излучения в глаз опасно и вредно для зрения.

4. В присутствии преподавателя включить лазер в сеть и пронаблюдать работу лазера. Внутренний прозрачный кожух обеспечивает полную защиту от поражения электрическим током. Свечение разряда активного элемента не содержит когерентного лазерного излучения и неопасно для зрения.

5. Выключить лазер. Надеть металлический кожух и закрутить четыре болтика.

Задание 2. Определение длины волны лазерного излучения с помощью дифракционной решетки

Вид лабораторной установки представлен на рис. 8.3.

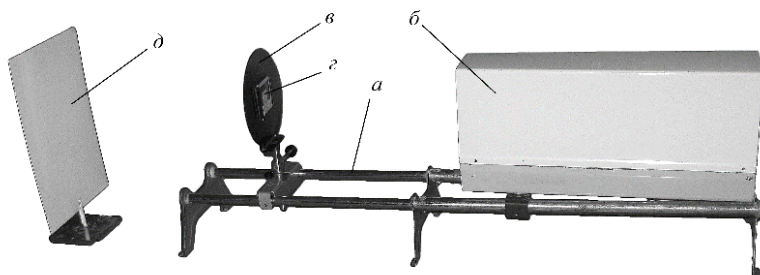


Рис. 8.3. Общий вид лабораторной установки:
a – оптическая скамья; *б* – гелий-неоновый лазер; *в* – держатель;
z – дифракционная решетка; *д* – экран

На оптической скамье расположены лазер *б* и держатель *в*, в который устанавливаются различные объекты (дифракционная решетка, тонкая проволока, поляроид и др.).

Порядок выполнения задания следующий:

1. В держатель перпендикулярно лазерному лучу установить дифракционную решетку. Период решетки $d = 0,01$ мм.

2. Включить лазер.

3. Экран *д* установить перпендикулярно к оси лазера. На экране должна появиться отчетливая картина максимумов, расположенных симметрично относительно центрального максимума *O* (рис. 8.4).

Перемещая вдоль луча дифракционную решетку, получить отчетливую дифракционную картину и пронаблюдать, как она изменяется в зависимости от перемещения решетки. Сделать вывод.

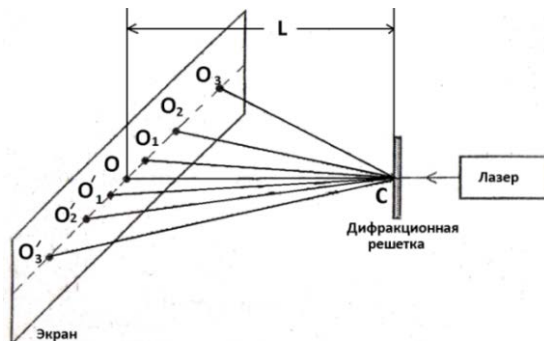


Рис. 8.4. Схема наблюдения дифракции

4. Определить расстояние $L = OC$ от дифракционной решетки до экрана.

5. Измерить расстояния $x_1 = OO_1$ и $x'_1 = OO'_1$ от центрального максимума O до максимумов первого порядка O_1 и O'_1 , расположенных симметрично по обе стороны от центрального максимума O .

Аналогично измерить расстояния $x_2 = OO_2$ и $x'_2 = OO'_2$, $x_3 = OO_3$ и $x'_3 = OO'_3$ от центрального до второго и третьего максимумов в обе стороны.

6. Занести измеренные расстояния в табл. 8.1.

Таблица 8.1. Опытные данные и расчетные величины по определению длины волны лазерного излучения

Порядок максимума	Расстояние между максимумами центрального и данного порядка		$x = \frac{x_k + x'_k}{2}$	$\sin \varphi$	λ_i	$\lambda_{\text{ср}}$
	x_k	x'_k				
1						
2						
3						

7. Выключить лазер.

8. Из условия образования максимумов для дифракционной решетки ($d \sin \varphi = k\lambda$, где d – постоянная решетки; φ – угол, под которым наблюдается максимум; $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ – порядок максимума; λ – длина волны) определить длину волны лазерного излучения:

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k}, \quad (8.2)$$

где $\sin \varphi$ определить из соотношения

$$\sin \varphi = \frac{x}{\sqrt{L^2 + x^2}}. \quad (8.3)$$

В формулу (8.3) вместо x следует подставлять среднее значение для данного порядка:

$$x = \frac{x_k + x'_k}{2}. \quad (8.4)$$

9. Результаты измерений записать в табл. 8.1. Длину волны $\lambda_{\text{ср}}$ определить как среднее арифметическое из трех вычислений:

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \lambda_i. \quad (8.5)$$

Задание 3. Наблюдение дифракционных картин и определение поляризованности лазерного излучения

1. Включить лазер.
2. В держатель вставить поочередно проволоочки разной толщины. Перемещая винт регулировки наклона держателя, добиться того, чтобы луч лазера попадал точно на проволоку. На экране появится дифракционная картина. Схематически зарисовать дифракционные картины для каждой проволоочки.
3. В два держателя вставить две дифракционные решетки (одну из них следует поворачивать на различные углы относительно оси лазерного луча). Зарисовать схематически различные картинки.
4. В держатель вставить поляроид и, медленно вращая его относительно оси лазерного луча, пронаблюдать на экране изменение яркости светового пятна. Сделать вывод.
5. Выключить лазер.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой свет с точки зрения квантовой теории?

2. Что называют средним временем жизни атомов в возбужденном состоянии?
3. Какое излучение называют спонтанным?
4. Какое излучение называют индуцированным?
5. Что необходимо для того, чтобы вещество усиливало падающее на него излучение?
6. Что называется инверсией населенностей?
7. Что такое накачка?
8. Какие энергетические состояния называют метастабильными?
9. Из каких основных частей состоит лазер?
10. Каковы свойства лазерного излучения?
11. Где применяют лазерное излучение?

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Список рекомендуемой литературы	4
Лабораторная работа 1. Определение основных характеристик тонких линз	4
Лабораторная работа 2. Изучение свойств поляризованного света. Проверка закона Малюса	12
Лабораторная работа 3. Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки	17
Лабораторная работа 4. Изучение спектральных закономерностей	26
Лабораторная работа 5. Определение показателя преломления жидкостей	35
Лабораторная работа 6. Определение основных характеристик теплового излучения методом оптической пирометрии	44
Лабораторная работа 7. Исследование фотоэлемента	54
Лабораторная работа 8. Определение длины волны лазерного излучения	62