

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

О. М. Лелюшкина

**ФИЗИКА.
ОПТИКА И АТОМНАЯ ФИЗИКА**

Утверждено редакционно-издательским советом ФГБОУ ВО "КГТУ"
в качестве учебно-методического пособия по выполнению лабораторных работ
по физике для студентов бакалавриата в области техники и технологий

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2024

УДК 535, 539

Рецензент

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий
кафедрой физики КГТУ Н.Я. Синявский

Лелюшкина, О. М.

Физика. Оптика и атомная физика: учеб.-метод. пособие по выполнению
лаб. работ для студ. бакалавриата в области техники и технологий /
О. М. Лелюшкина. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО "КГТУ", 2024. – 64 с.

В данном пособии приведены методические указания к выполнению
лабораторных работ в лаборатории оптики и атомной физики. Сюда включены
работы по волновой оптике, элементам квантовой механики и атомной физике.
Рис. – 39, табл. – 10, список лит. – 32 наименования

Учебно-методическое пособие рассмотрено и одобрено кафедрой физики
ФГБОУ ВО "КГТУ" 13 марта 2024 г., протокол № 05

Учебно-методическое пособие рассмотрено и рекомендовано к печати на
заседании методической комиссии института рыболовства и аквакультуры
ФГБОУ ВО "КГТУ" 26 февраля 2024 г., протокол № 02

УДК 535, 539

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
"Калининградский государственный
технический университет", 2024 г.
© Лелюшкина О. М., 2024 г.

Оглавление

Введение.....	4
Лабораторная работа № 4.1. Определения длины волны монохроматического света с помощью интерференции от двух щелей.....	6
Лабораторная работа № 4.2. Исследование интерференции света с помощью бипризмы Френеля.....	14
Лабораторная работа № 4.3. Изучение явления дифракции света. определение длины волны монохроматического света с помощью дифракционной решётки.....	19
Лабораторная работа № 4.4. Изучение закона Малюса.....	24
Лабораторная работа № 4.5. Определение концентрации раствора оптически активного вещества, с помощью явления вращения плоскости поляризации.....	30
Лабораторная работа № 4.6. Изучение закона поглощения света.....	36
Лабораторная работа № 4.7. Изучение внешнего фотоэлектрического эффекта.....	42
Лабораторная работа № 4.8. Изучение атомных спектров с помощью призмного спектрографа.....	52
Приложения.....	60

ВВЕДЕНИЕ

Физика – одна из важнейших естественно-научных дисциплин.

Целью освоения курса физики является ознакомление студентов с основными законами физики и возможностями их применения при решении задач, возникающих в последующей профессиональной деятельности. Физика создает универсальную базу для общепрофессиональных и специальных дисциплин. В задачи курса физики входит ознакомление студентов с современной физической картиной мира, приобретение навыков экспериментального исследования физических явлений и процессов, изучение теоретических методов анализа физических явлений, обучение грамотному применению положений фундаментальной физики к научному анализу ситуаций, с которыми будущему инженеру придется столкнуться при создании новой техники и технологий, а также выработка у студентов научного мировоззрения.

Оптика и атомная физика – заключительный раздел курса физики для студентов 1 и 2 курсов по направлению подготовки в области техники и технологий.

Роль оптической части курса физики является уникальной, поскольку именно в оптическом диапазоне был открыт корпускулярно-волновой дуализм электромагнитных волн, который является одним из базовых представлений квантовой механики.

Лабораторный практикум по оптике и атомной физике является очень важным, так как оптические методы являются наиболее тонкими и точными. Задачами данного практикума являются:

- формирование навыков измерения оптических величин и постоянных;
- овладение практическими навыками проведения исследований, методами обработки и анализа результатов измерений;
- получение навыков работы с точными измерительными приборами;
- знакомство с методами исследования и подтверждения основных законов оптики и атомной физики;
- формирование умения грамотно представлять результаты эксперимента и делать из них самостоятельные выводы.

В данном пособии приведены методические указания к выполнению лабораторных работ в лаборатории оптики и атомной физики. Сюда включены работы по волновой оптике, элементам квантовой механики и атомной физике.

Методические указания к каждой лабораторной работе содержат краткую вводную теоретическую часть, раскрывающую суть физических явлений, изучаемых в выполняемой работе; описание лабораторных установок и методику проведения экспериментов и обработки результатов измерений. Материал поясняется необходимыми математическими выкладками, конечными формулами и иллюстрируется рисунками и схемами. Каждая лабораторная работа знакомит студентов с соответствующими приборами, например:

поляриметром, дифракционной решеткой, спектрометром, вакуумным фотоэлементом, поляризатором, полупроводниковым лазером.

Для каждой лабораторной работы нумерация рисунков, таблиц и формул своя.

В результате прохождения лабораторного практикума студенты должны приобрести навыки работы с приборами и оборудованием физической лаборатории, навыки использования различных методик физических измерений и обработки экспериментальных данных, а также навыки применения методов физико-математического анализа к решению конкретных естественно-научных и технических проблем.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.1.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СВЕТА С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ОТ ДВУХ ЩЕЛЕЙ

Цель работы: определить длину волны монохроматического света, используя метод Юнга.

Приборы и оборудование:

1. Оптическая скамья, включающая экран с двумя щелями.
2. Светофильтр.

Введение

Интерференция света – это явление наложения двух или нескольких когерентных световых волн, которое приводит к пространственному перераспределению интенсивности светового потока, в результате чего в одних точках наблюдаются максимумы, а в других – минимумы интенсивности.

Условием наблюдения интерференции является когерентность волн.

Когерентными называются волны, распространяющиеся в одном направлении с одинаковой частотой и обладающие постоянной во времени разностью фаз.

Соответственно, источники таких волн называются когерентными источниками.

Интерференция относится к явлениям, подтверждающим волновую природу света, поэтому наложение световых (электромагнитных) волн можно рассмотреть на примере сложения колебаний одного направления.

Пусть две волны одинаковой частоты ω , накладываясь друг на друга, возбуждают в некоторой точке пространства колебания одинакового направления:

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \alpha_1) \text{ и } x_2 = A_2 \cos(\omega t + \alpha_2),$$

где A_1 и A_2 – амплитуды складываемых колебаний, α_1 и α_2 – начальные фазы складываемых колебаний.

Под x понимают напряженность электрического E или магнитного H полей волны. Векторы \vec{E} и \vec{H} колеблются во взаимно перпендикулярных плоскостях. Напряженности электрического и магнитного полей подчиняются принципу суперпозиции.

Как известно, сложение двух колебаний одинаковой частоты и одинакового направления производится на основании векторной диаграммы (рисунок 1)

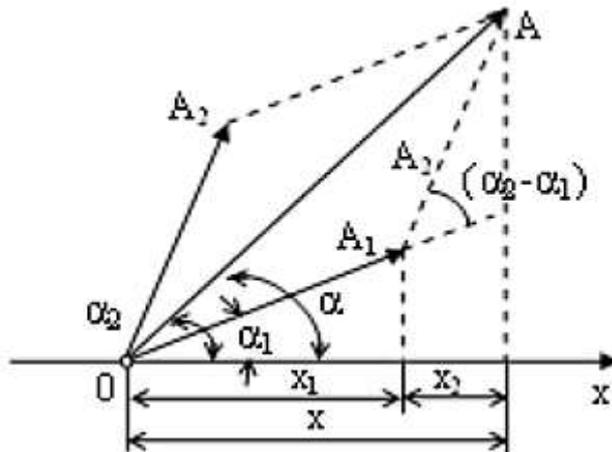


Рисунок 1 – Векторная диаграмма сложения колебаний.

В результате сложения двух колебаний одного направления получается результирующее колебание, амплитуда которого

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos\sigma. \quad (1)$$

Величина $\sigma = \alpha_2 - \alpha_1$ представляет собой разность начальных фаз складываемых колебаний.

Энергетической характеристикой волны является интенсивность I .

Интенсивность волны – это среднее значение энергии, переносимой волной в единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны.

Интенсивность волны пропорциональна квадрату амплитуды ($I \sim A^2$). С учетом этого, при наложении когерентных волн, с помощью формулы (1) получим выражение для интенсивности результирующей волны

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\sigma. \quad (2)$$

В точках пространства, где $\cos\sigma < 0$, интенсивность $I < I_1 + I_2$, а в точках пространства, для которых $\cos\sigma > 0$, интенсивность $I > I_1 + I_2$.

Особенно отчетливо явление интерференции проявляется в том случае, когда $I_0 = I_1 = I_2$, при этом $\cos\sigma = 1$ или $\cos\sigma = -1$.

Тогда по формуле (2): в максимумах, $I = 4I_0$ ($\cos\sigma = 1$), в минимумах же $I = 0$ ($\cos\sigma = -1$).

Для наблюдения интерференции необходимо получить когерентные источники световых волн.

Два естественных источника света не будут когерентными. Это обусловлено тем, что излучение светящегося тела складывается из волн, испускаемых многими атомами. Отдельные атомы излучают пучки волн длительностью порядка 10^{-8} с и протяженностью около 3 м. Фаза нового пучка никак не связана с фазой предыдущего. В испускаемой телом световой волне излучение одной группы атомов через время порядка 10^{-8} с сменяется излучением другой группы, причем фаза результирующей волны претерпевает случайные изменения. Интерференция не будет наблюдаться.

Когерентные световые волны можно получить, разделяя световую волну, излучаемую одним источником, на две волны. Эти две волны пройдут каждая свой оптический путь в двух различных средах и при наложении в какой-либо точке пространства позволят наблюдать интерференционную картину. Такой метод получения когерентных волн называется методом деления волнового фронта.

Пусть разделение на две когерентные волны происходит в точке O . После разделения каждая из этих волн, отразившись от зеркала Z_1 и зеркала Z_2 придут в точку P . До точки P , в которой наблюдается интерференция, одна волна в среде с показателем преломления n_1 прошла путь S_1 , а вторая – в среде с показателем преломления n_2 – путь S_2 (рисунок 2).

Величина $\Delta = n_2 S_2 - n_1 S_1$ называется оптической разностью хода волн

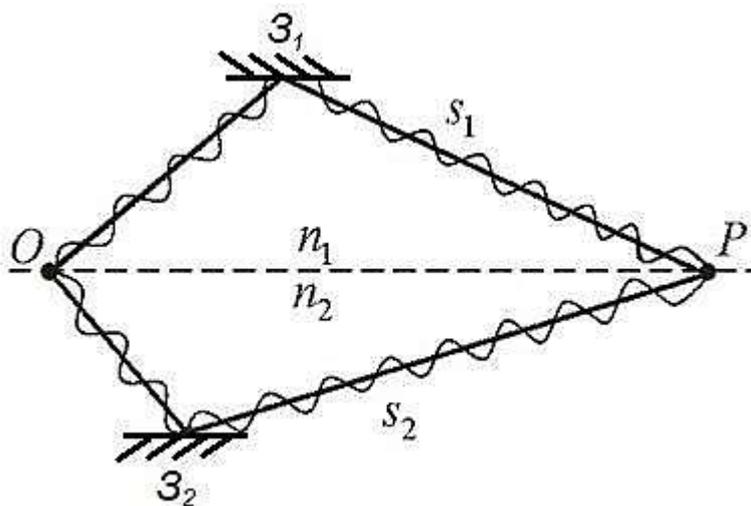


Рисунок 2 – Оптическая разность хода волн

Если обе волны распространяются в воздухе, то $n_1 = n_2 \approx 1$ и $\Delta = S_2 - S_1$.

Будет ли в точке P наблюдаться интерференционный максимум или минимум, зависит от оптической разности хода.

Условие максимума:

$$\Delta = \pm m \lambda_0 (m = 0, 1, 2, \dots) \text{ или } \Delta = \pm 2m \frac{\lambda_0}{2}, \quad (3)$$

где λ_0 – длина волны в вакууме, m – порядок интерференционного максимума или минимума.

Условие минимума:

$$\Delta = \pm (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2} (m = 0, 1, 2, \dots) \text{ или } \Delta = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda_0 \quad (4)$$

Одним из методов наблюдения интерференции света является метод Юнга.

В этом методе две когерентные волны излучаются двумя «мнимыми» источниками, представляющими собой две узкие щели в непрозрачном экране (рисунок 3).

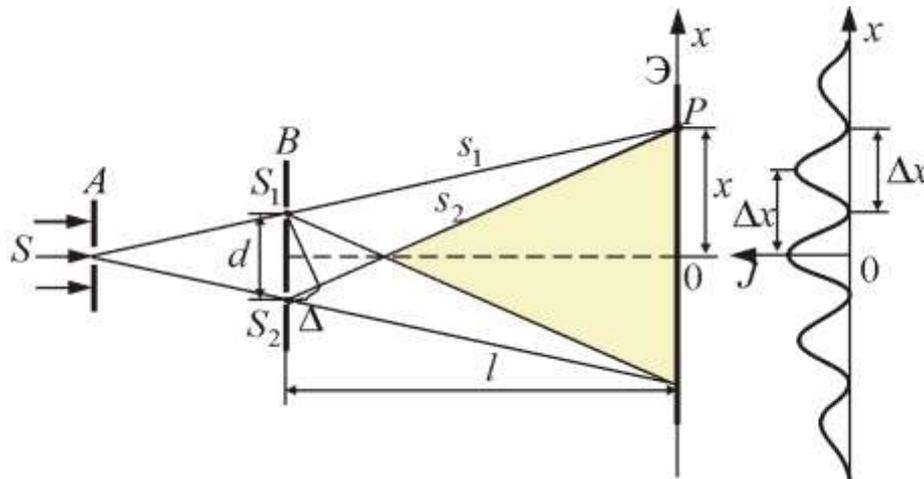


Рисунок 3 – Метод Юнга

S – источник света. S_1 и S_2 – две щели в непрозрачном экране, являющиеся мнимыми источниками света. d – расстояние между щелями, l – расстояние между щелями и экраном, на котором наблюдается интерференционная картина. P – точка наблюдения.

Интерференционная картина на экране представляет собой чередующиеся темные и светлые полосы. Картина на экране является симметричной относительно точки O . Точка O – это середина картины. Отрезок OP обозначим как x .

Вычислим ширину интерференционных полос. На рисунке 3 рассмотрим треугольники с гипотенузой S_1 и S_2 . По теореме Пифагора

$$S_1^2 = l^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2,$$

$$S_2^2 = l^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2,$$

$$S_2^2 - S_1^2 = (S_2 + S_1)(S_2 - S_1) = 2xd.$$

Для получения различимой интерференционной картины расстояние между источниками d должно быть значительно меньше l . При этих условиях можно принять $S_1 + S_2 \approx 2l$.

Тогда

$$S_2 - S_1 = \frac{xd}{l}$$

На рисунке 3 видно, что $\Delta = S_2 - S_1$ – это и есть разность хода волн. Таким образом

$$\Delta = \frac{xd}{l}.$$

Подставив в эту формулу условие максимума (3) и минимума (4), получим координаты интерференционных максимумов и минимумов

$$x_{max} = \pm \frac{kl}{d} \lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (5)$$

$$x_{min} = \pm \left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{l}{d} \lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots). \quad (6)$$

Расстояние между двумя соседними интерференционными максимумами или минимумами называется шириной интерференционной полосы

$$\Delta x = \frac{\lambda l}{d}. \quad (7)$$

Из этой формулы хорошо видно, что ширина интерференционной полосы не зависит от порядка максимума или минимума. Согласно формуле (7), расстояние между полосами растет с уменьшением расстояния d . При d сравнимом с l , расстояние между полосами было бы того же порядка, что и длина волны λ , то есть составляла бы несколько десятых долей микрометра. В этом случае отдельные полосы были бы совершенно неразличимы. Для того чтобы интерференционная картина стала отчетливой, необходимо соблюдение упомянутого выше условия: $d \ll l$.

Измерив расстояние между любыми несколькими темными или светлыми полосами ($x_N - x_0$), где N – количество полос, можно рассчитать ширину интерференционной полосы. Обозначим ширину интерференционной полосы через

$$\Delta x = \frac{x_N - x_0}{N} \quad (8)$$

Используя формулы (7) и (8), получим выражение для длины волны

$$\lambda = \frac{(x_N - x_0)d}{Nl}. \quad (9)$$

1. Описание лабораторной установки и метода измерений

Работа заключается в определении длины волны световых потоков, выделяемых определенным светофильтром. Для получения интерференционной картины применяется установка, имеющая вид, показанный на фото (рисунок 4).

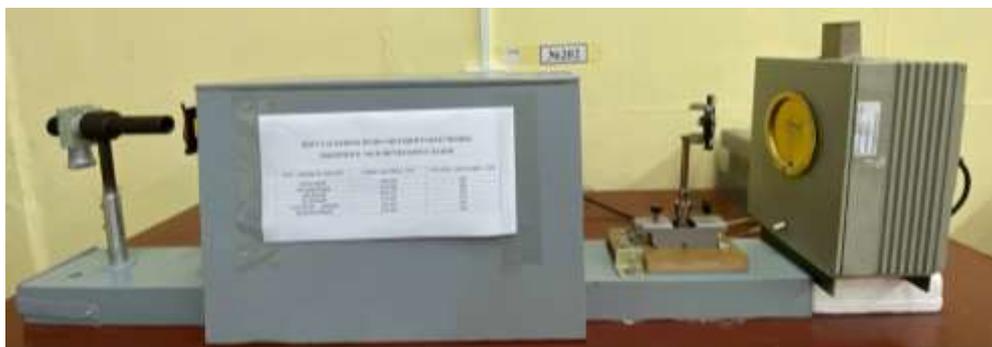


Рисунок 4 – Фото установки

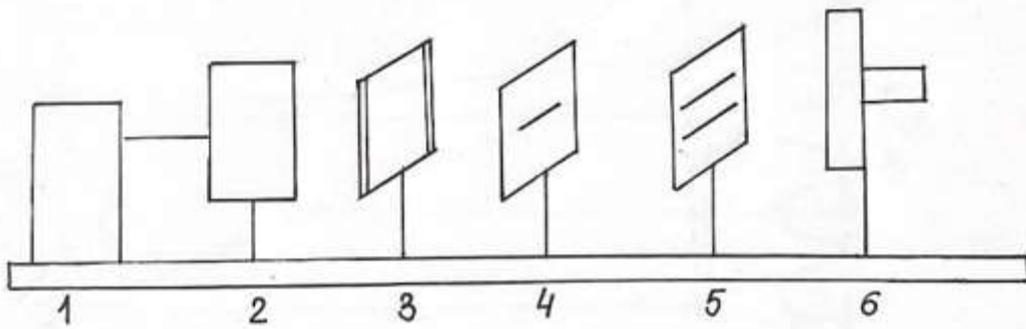


Рисунок 5 – Схема установки

На оптической скамье установлены следующие приборы: 1 – источник питания лампы; 2 – лампа; 3 – светофильтр; 4 – щель, являющаяся источником света; 5 – двойная щель; 6 – окулярный микрометр, с помощью которого наблюдается интерференционная картина и проводятся измерения.

Правила пользования окулярным микрометром:

Окулярный микрометр имеет две шкалы: внутреннюю линейную, изображенную на стекле, и внешнюю круговую – на барабанчике микрометра. Цена деления линейной шкалы – 1 мм, цена деления круговой шкалы – 0,01 мм.

При вращении барабанчика по экрану окулярного микрометра перемещается перекрестие и двойная риска вдоль линейной шкалы.

Совмещая перекрестие сначала с одной интерференционной полосой, а затем с другой, с помощью двойной риски, перемещающейся по внутренней линейной шкале, определяют целое число мм, а по внешней круговой шкале – десятые и сотые доли мм.

В лабораторной работе на установке с двумя щелями изображение, наблюдаемое через окуляр, представляет собой ряд горизонтальных параллельных, чередующихся тёмных и светлых полос, то есть интерференционную картину. Обычно наблюдается 4-5 интерференционных полос равной ширины, из них наиболее резко видны 2-3 полосы в середине и, соответственно, 2-3 максимума и минимума интенсивности света.

Прямыми измерениями в данной работе являются координаты x_0 и x_N , где x_0 – координата полосы, выбранной за нулевую; x_N – координата N-ой, ниже расположенной полосы.

Косвенным измерением является ширина интерференционной полосы Δx , определяемая по формуле (8) и длина волны λ монохроматического света, определяемая по формуле (9).

2. Порядок выполнения работы

1. Поставить светофильтр заданного типа (записать его цвет в протокол) и рассмотреть в окулярный микрометр интерференционную картину.

2. Измерить с помощью микрометра координату x_0 выбранной полосы верхней части наблюдаемой картины (принимая эту полосу за нулевую).

Для этого необходимо, плавно вращая барабан микрометра, установить сначала перекрестие приблизительно в центре выбранной нулевой полосы, после чего снять отсчеты по внутренней линейной и внешней круговой шкале (рисунок 6).

Для отсчета по внутренней шкале записать цифру, расположенную выше двойной риски. Например, на рисунке 6 – это цифра 4 мм.

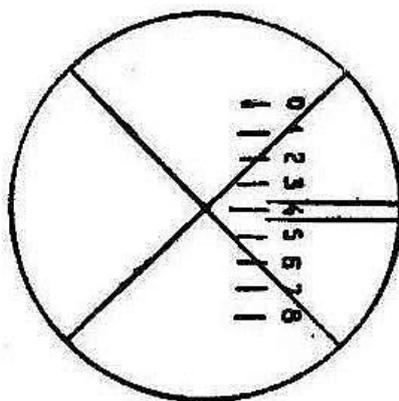


Рисунок 6 – Вид в окулярный микрометр

Для отсчета по внешней круговой шкале барабана надо записать число делений шкалы, находящихся напротив горизонтальной неподвижной риски, то есть число десятых и сотых долей миллиметра, которые добавляются к отсчету по внутренней шкале.

Например, отсчет по внешней шкале дает 48 делений; значит, координата этой линии $x_0 = 4,48$ мм.

Таблица 1

Тип светофильтра:							
Количество измерений	Число полос	x_0 мм	x_{0_i} мм	$x_{0_i}^2$	x_N мм	Δx_{N_i}	$\Delta x_{N_i}^2$
1							
2							
...							
		$\langle x_0 \rangle$		$\sum (\Delta x_0^2)$	$\langle x_N \rangle$		$\sum (\Delta x_N^2)$

3. Вращая барабан микрометра, переместить перекрестие на N полос вниз и установить перекрестие в центре N -й полосы. Определить координату x_N .

4. Повторить измерение координат тех же самых полос x_0 и x_N заданное преподавателем количество раз, результаты измерений занести в таблицу.

Примечание: число полос и количество измерений устанавливает преподаватель или инженер.

5. **Внимание!** После выключения лампы следующее включение возможно только после ее остывания (через 10–15 минут).

3. Обработка результатов измерений

1. Рассчитать средние значения прямых измерений $\langle x_0 \rangle$ и $\langle x_N \rangle$

2. Используя формулу (9), рассчитать длину волны в миллиметрах и перевести в нанометры.

3. Провести обработку результатов прямых измерений, то есть рассчитать погрешности Δx_0 и Δx_N , учитывая случайную погрешность и погрешность округления. При расчете погрешностей принять значение доверительной вероятности $p=0,95$ и цену наименьшего деления микрометра $h=0,01$ мм. Для проведения расчетов погрешностей использовать методическое указание к лабораторной работе №100. Учсть, что величины l и d также относятся к прямым измерениям, но их погрешности уже заданы.

4. Рассчитать погрешности ширины интерференционной полосы и длины волны как величины, полученной в результате косвенного измерения.

5. Сформулировать вывод по полученным результатам.

4. Контрольные вопросы

1. Что такое интерференция? Какие волны называются когерентными? Какие методы используются для получения когерентных волн?

2. Что такое оптическая разность хода? Условия максимума и минимума интерференции.

3. Метод Юнга. Вывод формулы ширины интерференционной полосы.

4. Почему расстояние от щелей до экрана должно быть значительно больше расстояния между щелями?

Литература

1. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – Москва: Высшая школа, 2002

2. Геворкян, Р.Г. Курс общей физики / Р.Г. Геворкян. – Москва: Высшая школа, 1979

3. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – Москва: Высшая школа, 2003

4. Обработка результатов экспериментальных измерений: [Электронный ресурс]. <https://portal.tpu.ru>

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА С ПОМОЩЬЮ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ

Цель работы: определить длину волны монохроматического света на установке с бипризмой Френеля

Оборудование: 1. Оптическая скамья с бипризмой Френеля.
2. Светофильтр.

Введение

Теория интерференции света подробно описана в методических указаниях к работе номер 4.1. Метод получения интерференционной картины с помощью бипризмы Френеля относится к методу деления волнового фронта. Бипризма Френеля представляет собой изготовленные из одного куска стекла две призмы с малым преломляющим углом θ и имеющие одну общую грань (рисунок 1). На расстоянии A от бипризмы располагается прямолинейный источник света S .

Из законов геометрической оптики следует, что в случае, когда преломляющий угол θ призмы очень мал и углы лучей, падающих на грань призмы не очень велики, все лучи отклоняются призмой на практически одинаковый угол, равный $\varphi = (n - 1)\theta$, где n – показатель преломления призмы

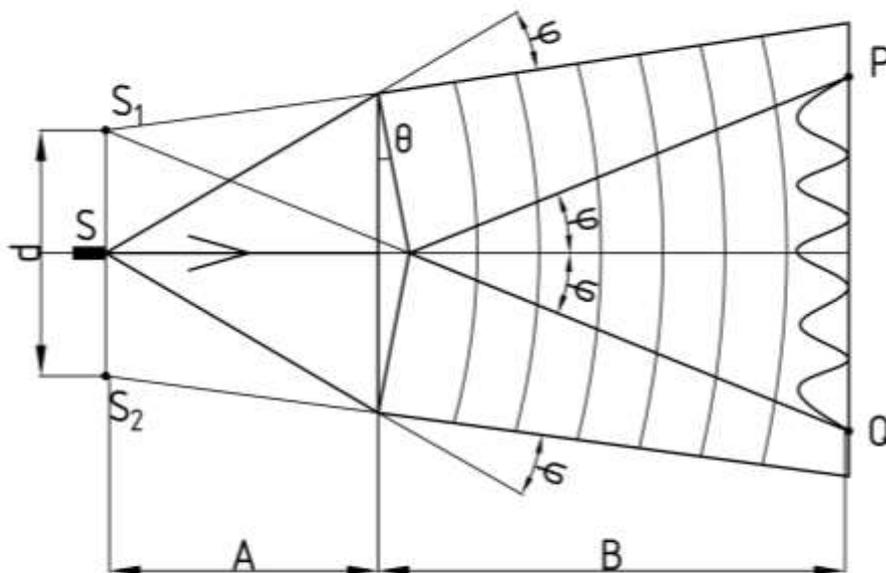


Рисунок 1 – Ход лучей через бипризму Френеля

PQ – область перекрытия волн на экране, S_1 и S_2 – мнимые когерентные источники света.

Угол падения лучей на бипризму невелик. Поэтому все лучи отклоняются от каждой из двух половинок призмы на одинаковый угол φ . В результате образуются две когерентные цилиндрические волны, исходящие из мнимых

источников S_1 и S_2 , лежащих в одной плоскости с источником S . Расстояние между источниками равно:

$$d = 2A \sin \varphi \approx 2A\varphi = 2A(n - 1)\theta, \quad (1)$$

(так как угол φ мал)

Дальнейший вывод расчётной формулы опирается на введение, описанное в работе № 4.1. Ширина интерференционной полосы определяется по формуле:

$$b = \frac{x_N - x_0}{N}. \quad (2)$$

Длина волны рассчитывается по формуле:

$$\lambda = \frac{(x_N - x_0)d}{Nl}.$$

С учётом формулы (1) и того, что расстояние от мнимых источников S_1 и S_2 до экрана $L=A+B$, получим формулу (3) для расчёта длины волны монохроматического света:

$$\lambda = \frac{2bA(n-1)\theta}{L}. \quad (3)$$

1. Описание лабораторной установки и метода измерений

Фото установки, используемой в данной работе для получения интерференционной картины, приведено на рисунке 2, схема приведена на рисунке 3

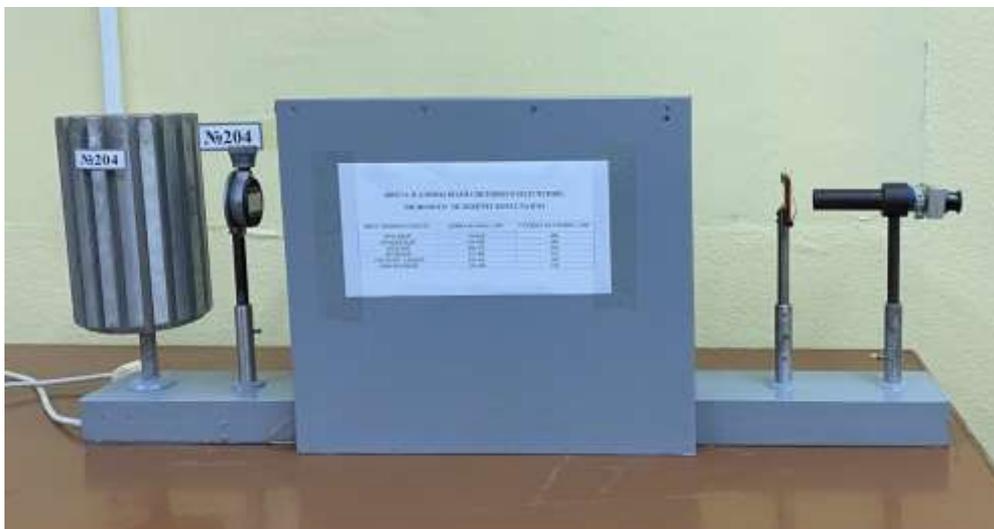


Рисунок 2 – Фото установки

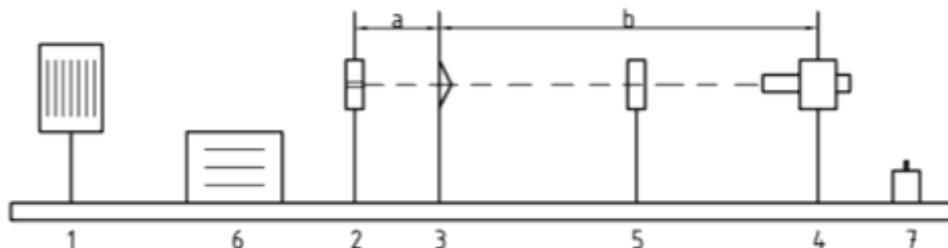


Рисунок 3 – Схема установки

Свет от ртутно-кварцевой лампы 1 через отверстие в кожухе лампы попадает на щель 2, которая, по сути, является щелевым источником излучения S. Щель направляет свет на бипризму Френеля 3, которая разделяет его на две когерентные волны. Интерференционная картина получается при наложении этих волн, и её можно видеть в фокальной плоскости окулярного микрометра 4.

Перед микрометром расположен держатель сменных фотофильтров 5, необходимых для выделения одной длины волны (монохроматический свет), для которой исследуется интерференционная картина и определяется ширина интерференционных полос с помощью окулярного микрометра.

Дроссель 6 является элементом цепи питания ртутно-кварцевой лампы. Тумблер 7 – включение лампы. Все оптические и электрические детали установки жёстко закреплены на оптической скамье. Оптические детали тщательно отъюстированы, то есть центры источника излучения (щель), бипризмы и окулярного микрометра с высокой точностью расположены на одной оптической оси. Установка накрыта кожухом для защиты от внешнего освещения, мешающего измерениям на окулярном микрометре. Параметры установки:

- расстояние от щели до бипризмы

$$A = (155 \pm 2) \text{ мм}$$

- расстояние от бипризмы до фокальной плоскости окулярного микрометра

$$B = (635 \pm 3) \text{ мм}$$

- показатель преломления бипризмы

$$n = 1,5$$

(не путать с количеством измерений)

- Преломляющие углы бипризмы

$$\theta = 27'.$$

Примечание: 1. Для выполнения измерений следует уточнить у преподавателя (или инженера) тип светофильтра и количество измерений. Рекомендуется измерять не более 6 интерференционных полос.

2. Для определения координат интерференционных полос применяется окулярный микрометр, правила пользования которым даны в части 2

лабораторной работы номер 4.1. Необходимо изучить эти правила перед выполнением измерений.

2. Порядок выполнения работы.

1. Поставьте светофильтр и запишите в таблицу 1 тип светофильтра.

2. Подсоедините установку к сети 220 В и тумблером 7 включите лампу.

Подождите 10 минут до полного разогревания ртутно-кварцевые лампы. В окуляре должна быть видна интерференционная картина, представляющая собой чередующиеся вертикальные параллельные светлые и тёмные линии (окраска светлых линий зависит от типа светофильтры). Окуляр позволяет также видеть изображение внутренней шкалы микрометра и двух скрещенных тонких линий, перемещающихся при повороте отсчётного барабана окуляра. (рисунок 4):

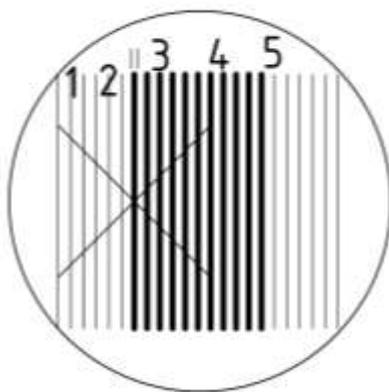


Рисунок 4 – Вид в окулярный микрометр

3. Согласно с правилами пользования отсчетных шкал окулярного микрометра, выполните измерения координаты x_0 , устанавливая сначала перекрестье в центре одной из тёмных линий в левой части наблюдаемого поля (линии № 0). Затем, плавно вращая отсчетный барабан микрометра, переместите перекрестье вправо на символ интерференционной полосы (считая только тёмные линии) и установите перекрестье в центре соответствующей тёмной линии в правой части наблюдаемого поля – определите координату N-ой линии x_N . Результаты занесите в таблицу 1.

4. Измерения повторите 5–10 раз (по заданию преподавателя) для тех же самых выбранных линий, заполняя таблицу.

Таблица 1.

Тип светофильтра:							
Количество измерений n	Число полос N	x_0 , мм	Δx_0 , мм	Δx_0^2 , мм ²	x_N , мм	Δx_N , мм	Δx_N^2 , мм ²
1							
2							
...							
		$\langle x_0 \rangle$...		$\sum (\Delta x_0^2)$...	$\langle x_N \rangle$...		$\sum (\Delta x_N^2)$...

5. Выключите тумблер 7 и отключите установку от сети.

Внимание! После выключения лампы следующее включение возможно только после её остывания (через 10–15 минут).

3. Обработка результатов измерений

1. Вычислите среднее значение прямых измерений координат $\langle x_0 \rangle$ и $\langle x_N \rangle$.

2. По формуле (2) и (3) вычислите среднее значение ширины интерференционной полосы и длины волны в мм. Переведите длину волны в нм.

3. Проведите обработку результатов прямых измерений, т.е. рассчитайте погрешности Δx_0 и Δx_N , учитывая случайную погрешность и погрешность округления. При расчёте погрешности принять значение доверительной вероятности $P = 0,95$ и цену наименьшего деления микрометра $h = 0,01$ мм.

4. Найдите погрешности ширины интерференционной полосы Δb и длины волны $\Delta \lambda$, как величин, полученных в результате косвенных измерений. Примечание: для проведения расчётов погрешности используйте методическое указание №100

5. Результат представьте в виде:

$$\lambda = \langle \lambda \rangle \pm \Delta \lambda \text{ (нм)}.$$

Сформулируйте вывод по полученным результатам.

4. Контрольные вопросы

1. Что такое интерференция? Условия максимума и минимума при интерференции.

2. Что такое когерентные волны и как они получаются в данной работе?

3. Ход лучей через бипризму Френеля.

4. Вывод расчётной формулы.

Литература

1. Савельев, И.В. Курс общей физики: учебное пособие: в 3-х т./ И.В. Савельев. - Москва: Наука 1988. Т.2

2. Ландсберг, Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг. - Москва: Физматлит, 2003

3. Трофимова, Т.И. Курс физики/ Т.И. Трофимова. - Москва: Высшая школа, 2003

4. Обработка результатов экспериментальных измерений: [Электронный ресурс]. <https://portal.tpu.ru>

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.3.

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ДИФРАКЦИИ СВЕТА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СВЕТА С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ.

Цель работы: определить длину волны излучения газового лазера с помощью дифракционной решетки.

Оборудование: 1. Оптическая скамья с дифракционной решёткой

Введение

Дифракцией называется совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями, например, вблизи границ непрозрачных или прозрачных тел, малых отверстий и т.п.

Дифракция приводит, например, к огибанию световыми волнами препятствий и проникновению света в область геометрической тени.

Дифракционной решеткой называется совокупность большого числа N одинаковых, отстоящих друг от друга на одно и то же расстояние щелей.

b – ширина щели, a – расстояние между щелями. Расстояние $d = a + b$ называется периодом решетки. Плоская световая волна падает на дифракционную решетку. Дифракционная картина наблюдается в фокальной плоскости собирающей линзы (рис. 1).

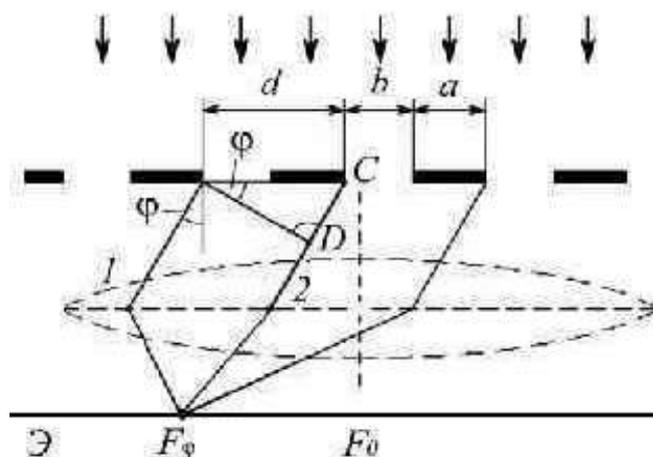


Рисунок 1 – Образование максимума на дифракционной решетке

На рисунке 1 видно, что разность хода лучей от соседних щелей (отрезок CD):

$$\Delta = d \sin \varphi$$

Условие

$$d \sin \varphi = K\lambda \quad (K = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

определяет положение максимумов интенсивности для монохроматического света с длиной волны λ . Эти максимумы называются главными. Число K определяет порядок главного максимума. При этом максимум нулевого порядка только один. Максимумов 1-го, 2-го и т.д. порядков имеется по 2 симметрично расположенных относительно центрального (нулевого) максимума (рисунок 2).

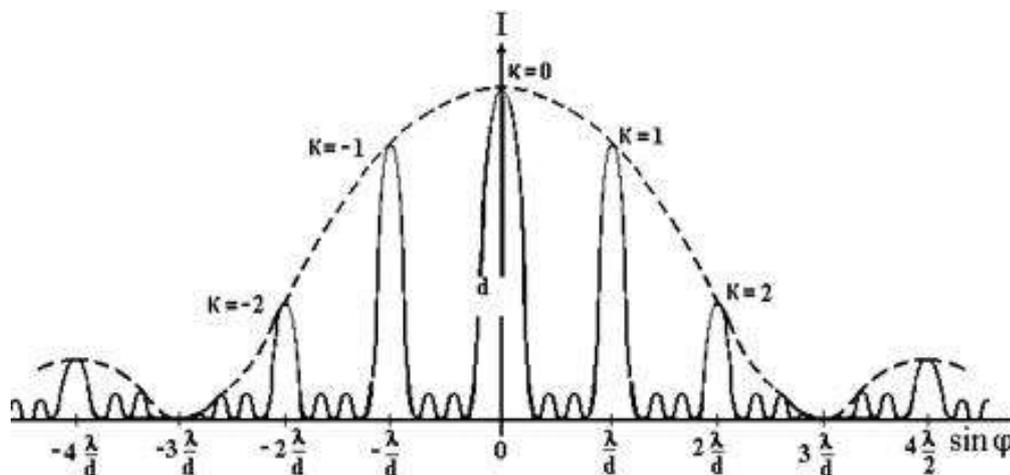


Рисунок 2 – Распределение интенсивности света

Количество главных максимумов можно определить, приняв $\varphi = 90^\circ$. Тогда

$$K_{max} = \frac{d}{\lambda} \quad (2)$$

K_{max} – максимальное число побочных максимумов, которые может дать решетка с периодом d (результат следует округлить до целого числа в сторону уменьшения).

Так как длина волны света λ – очень маленькая, величина (порядка нескольких сотен нанометров), для четкого наблюдения дифракции необходимо, чтобы расстояние d между соседними щелями было очень мало (соизмеримо с длиной волны).

При освещении дифракционной решетки белым светом, который представляет собой совокупность волн различной частоты (или длины волны) от красного до фиолетового, на экране наблюдается неокрашенный центральный максимум нулевого порядка и по обе стороны от него – дифракционные спектры 1-го, 2-го, 3-го и т.д. порядков. Эти спектры имеют вид радужных полос, в которых наблюдается непрерывный переход от окраски сине-фиолетового цвета у внутреннего края спектра к красной у внешнего края. Если свет представляет собой дискретный набор световых волн разной частоты, то тогда тоже получают спектры, но они не будут непрерывными (или сплошными). Таким образом, с помощью дифракционной решетки можно определить, какой набор частот входит в излучение, падающее на нее.

Для того, чтобы можно было четко видеть две близкие линии спектра, должно выполняться условие:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{NK}, \quad (3)$$

где $\Delta\lambda$ – минимальный интервал длин волн, которые можно увидеть отдельно на экране, N – число штрихов дифракционной решетки на единицу длины.

Условие (3) называется разрешающей способностью дифракционной решетки. Из этого условия следует, что чем больше штрихов имеет решетка на единицу длины, тем выше ее разрешающая способность, которая также повышается с номером спектра K . Но надо учитывать, что с увеличением K уменьшается интенсивность наблюдаемого спектра (см. рисунок 2)

Современные дифракционные решетки имеют до 18000 штрихов на 1 мм длины и дают разрешение $\Delta\lambda$ порядка 10^{-3} Å (ангстрем), $1 \text{ Å} = 10^{-10}$ м.

1. Описание установки и порядок выполнения работы.

На оптической скамье установлены лазер, дифракционная решётка, положение которой на скамье можно изменять, и экран для наблюдения дифракционной картины. Фото установки приведено на рисунке 2.



Рисунок 2 – Фото установки

1. Включите источник света лазера и установите все элементы установки на оптической скамье, используя дифракционную решетку с густотой штриховки $n = 294 \text{ мм}^{-1}$. При этом на экране отчетливо наблюдается дифракционная картина. Поворачивая решетку, выведите дифракционные точки на горизонтальную ось (X) экрана.

2. Используя линейку, определите координаты $X_{1,1}$ и $X_{1,2}$ для максимумов первого порядка ($K = 1$) слева и справа от центрального максимума (без учета знаков)

3. Аналогично, не перемещая решетку по скамье, определите координаты $X_{2,1}$ и $X_{2,2}$ для максимумов второго порядка ($K = 2$). Занесите данные в соответствующие колонки в таблицу 1, где L – расстояние от экрана до ближайшего торца дифракционной решетки.

4. Аналогичным образом проведите измерения для трех различных положений (расстояний) L дифракционной решетки на оптической скамье.

Таблица 1

K = 1					
L, мм	X _{1,1} , мм	X _{1,2} , мм	<X ₁ >, мм	sin φ ₁	λ, н · м
K = 2					
L, мм	X _{2,1} , мм	X _{2,2} , мм	<X ₂ >, мм	sin φ ₂	λ, н · м

2. Обработка результатов измерений

1. Рассчитайте средние значения координат <X₁>, <X₂>, результат занесите в таблицу 1.

$$\langle X_1 \rangle = \frac{X_{1,1} + X_{1,2}}{2}$$

$$\langle X_2 \rangle = \frac{X_{2,1} + X_{2,2}}{2}$$

2. Определите sin φ₁ и sin φ₂ (φ₁ – угол дифракции для K = 1; φ₂ – угол дифракции для K = 2) согласно рисунку 4.

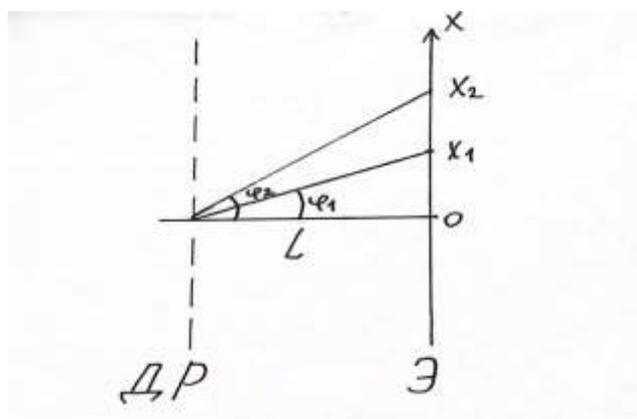


Рисунок 4

ДР – дифракционная решетка; Э – экран; L – расстояние от решетки до экрана; X₁ и X₂ – координаты соответствующих максимумов.

$$\sin \varphi_1 = \frac{\langle X_1 \rangle}{\sqrt{L^2 + \langle X_1 \rangle^2}}$$

$$\sin \varphi_2 = \frac{\langle X_2 \rangle}{\sqrt{L^2 + \langle X_2 \rangle^2}}$$

Синусы находим из соответствующих прямоугольных треугольников. Результаты запишем в таблицу 1.

3. Из формулы (1) получим длину световой волны

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{K}$$

где d – период дифракционной решетки.

Период связан с плотностью штриховки n данной решетки:

$$d = \frac{1}{n}$$

Таким образом

$$\lambda = \frac{\sin \varphi}{Kn} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\langle X_1 \rangle}{Kn\sqrt{L^2 + \langle X \rangle^2}} \quad (5)$$

По формуле (4) рассчитайте шесть значений длины волны и заполните таблицу 1.

4. Определите среднюю длину волны $\langle \lambda \rangle$ лазера по шести полученным значениям:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\sum_{i=1}^6 \lambda_i}{6}$$

5. По указанию преподавателя: либо рассчитайте $\Delta\lambda$ как случайную погрешность для шести полученных значений λ ; либо как косвенную погрешность $\Delta\lambda$, руководствуясь методическим пособием № 100.

Примечание:

В случае расчета $\Delta\lambda$ как косвенной погрешности, учитывайте только погрешность округления при измерении координат X и L (цена минимального деления при расчетах 1 мм). При этом расчет провести только для одной из строк в таблице 1 и для определения $\Delta\lambda$ использовать формулу (5).

3. Контрольные вопросы

1. В чем состоит суть явления дифракции света?
2. Ход лучей через дифракционную решетку. Условие главных максимумов. Как определить максимальный порядок спектра, который может дать данная решетка?
3. Что такое дифракционный спектр? Разрешающая способность дифракционной решетки.
4. Для чего применяется дифракционная решетка?

Литература

1. Годжаев, Н.М. Оптика / Н.М. Годжаев. – Москва: Высшая школа, 1977.
2. Савельев, И.В. Курс общей физики: учебное пособие: в 3-х т. / И.В. Савельев. – Москва: Наука, 1988. – Т.2
3. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – Москва: Высшая школа, 2002
4. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – Москва: Высшая школа, 2003
5. Обработка результатов экспериментальных измерений: [Электронный ресурс]. <https://portal.tpu.ru>

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.4. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА МАЛЮСА

Цель работы: Ознакомление с явлением поляризации света. Изучение закона Малюса.

Оборудование:

1. Оптическая скамья с поляризатором, анализатором, источником света, фотоприёмником и блоком питания;
2. Цифровой вольтметр В7-38.

Введение

Электромагнитные волны являются поперечными и представляют собой распространяющиеся в пространстве колебания двух взаимно перпендикулярных полей – электрического (\vec{E} – вектор напряженности электрического поля) и магнитного (\vec{H} – вектор напряженности магнитного поля).

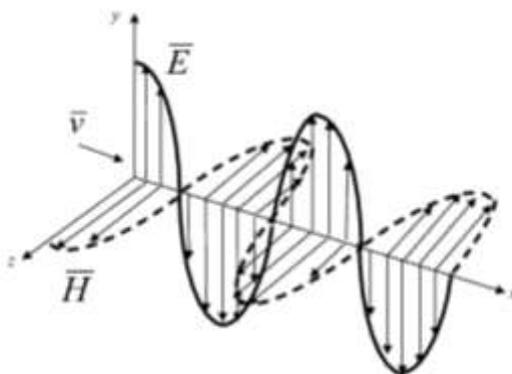


Рисунок 1 – Электромагнитная волна.

На рисунке 1 видно, что векторы \vec{E} и \vec{H} образуют с направлением распространения волны правовинтовую систему векторов. В фиксированной точке пространства векторы \vec{E} и \vec{H} изменяются со временем по гармоническому закону.

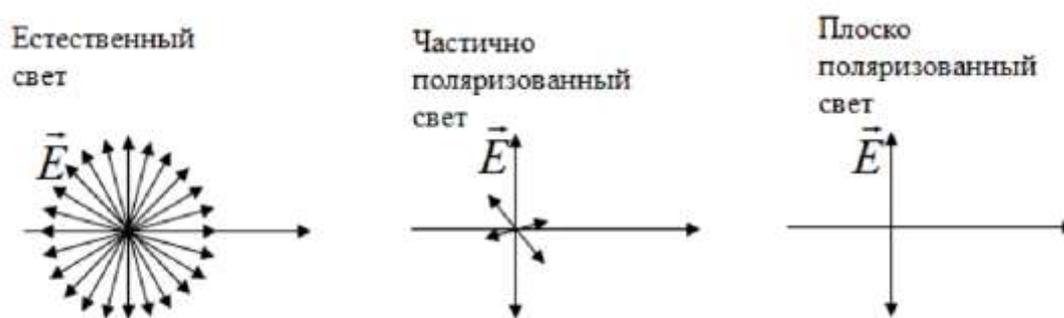
Они одновременно увеличиваются от нуля, затем через $1/4$ периода достигают наибольшего значения. Причем если вектор \vec{E} направлен вверх, то вектор \vec{H} направлен вправо (смотрим вдоль направления, по которому распространяется волна).

Световые волны представляют собой частный случай электромагнитных волн. Длины волн видимого света лежат в пределах $\lambda_0 = 0,40 \div 0,76$ мкм (400 ÷ 700 нм) (λ_0 – длина волны в вакууме). Частоты видимых световых волн лежат в пределах $\nu = (0,39 \div 0,75) * 10^{15}$ Гц.

При воздействии света на вещество основное значение имеет электрическая составляющая световой волны, поскольку именно она оказывает

более сильное воздействие на электроны в атомах вещества. Поэтому вектор \vec{E} называют световым вектором. Свет – суммарное электромагнитное излучение множества атомов вещества, излучающих независимо друг от друга. Поэтому все ориентации вектора \vec{E} будут равновероятны. Такой свет называется естественным.

Поляризованным светом называется свет, в котором колебания вектора \vec{E} каким-то образом упорядочены. На рисунке 2 изображены виды поляризованного света. Свет, в котором вектор \vec{E} колеблется только в одной плоскости, называется плоскополяризованным (линейно-поляризованным). Если концы вектора \vec{E} с течением времени описывают в плоскости, перпендикулярной лучу, окружность или эллипс, то свет называется циркулярно (по кругу) или эллиптически поляризованным.



(Свет распространяется перпендикулярно плоскости рис.)

Рисунок 2 – Виды поляризованного света.

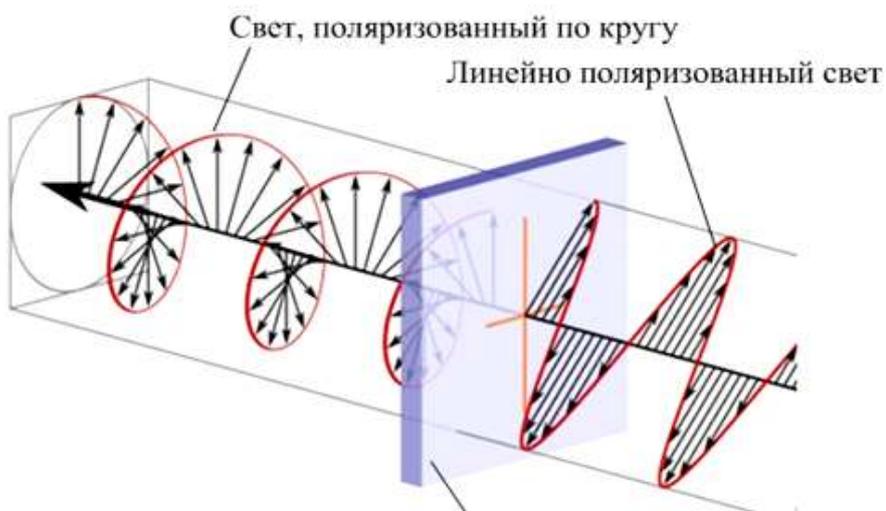


Рисунок 2а – Виды поляризованного света (продолжение)

Естественный свет можно преобразовать в плоскополяризованный, используя так называемые поляризаторы, пропускающие колебания только

одного определенного направления. Эти приборы свободно пропускают колебания, параллельные плоскости, которую называют плоскостью поляризатора и полностью или частично задерживают колебания, перпендикулярные к его плоскости.

Совершенный поляризатор полностью задерживает колебания, перпендикулярные его плоскости.

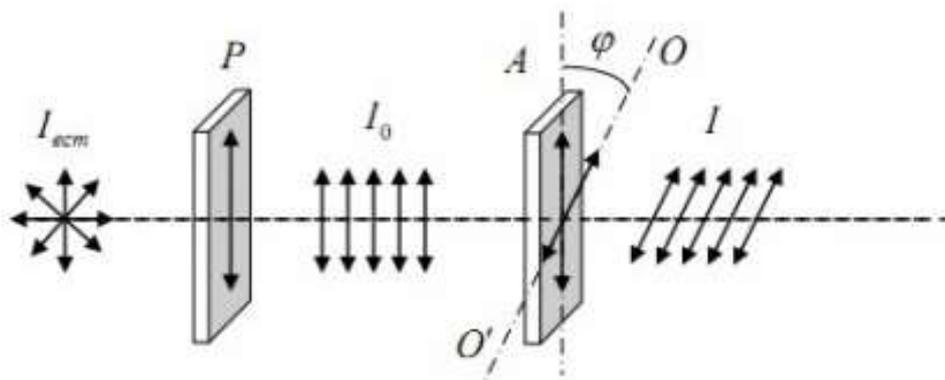


Рисунок 3 – Получение и исследование поляризованного света с помощью поляризатора и анализатора.

Естественный свет падает перпендикулярно поляризатору P, который представляет собой пластинку турмалина, вырезанную параллельно оптической оси кристалла OO'. После прохождения поляризатора P свет становится плоскополяризованным. Колебания вектора \vec{E} происходят в плоскости, параллельной плоскости поляризатора. Интенсивность плоскополяризованного света

$$I_0 = \frac{1}{2} I_{\text{ест}} . \quad (1)$$

Поставим за поляризатором P еще один поляризатор A (анализатор), и с его помощью будем анализировать интенсивность прошедшего света. Пусть ось пропускания анализатора OO' повернута относительно оси пропускания поляризатора OO' на угол φ . Тогда через анализатор A пройдет только составляющая вектора \vec{E} , параллельная оси OO'. Интенсивность света, вышедшего из анализатора подчиняется закону Малюса :

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

или, с учетом (1):

$$I = \frac{1}{2} I_{\text{ест}} \cos^2 \varphi . \quad (3)$$

При изменении угла φ интенсивность прошедшего света будет меняться от $I_{\text{max}} = \frac{1}{2} I_{\text{ест}}$, когда поляризаторы параллельны, до $I_{\text{min}} = 0$, когда поляризаторы скрещены ($\varphi = 90^\circ$).

1. Описание лабораторной работы и метода измерений.



Рисунок 4 – Фото установки

Принципиальная схема установки по изучению закона Малюса представлена на рисунке 5

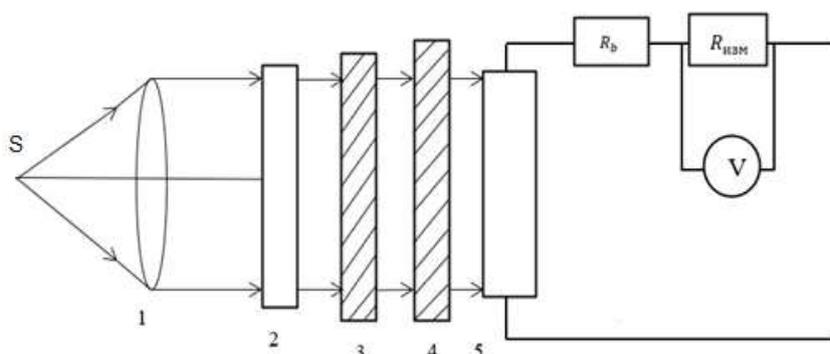


Рисунок 5 – Схема установки

Естественный свет от лампы накаливания S через конденсор 1 и матовое стекло 2 попадает на поляризатор 3. Линейно-поляризованный свет, интенсивность которого определяется формулой (1), после поляризатора 3 попадает на анализатор 4, по устройству аналогичный поляризатору, и закрепленный на вращающейся части угломера вместе с нониусом. Интенсивность света, прошедшего через систему поляризатор-анализатор, измеряется фотоприёмником 5, чувствительным элементом которого является фотоэлектрический преобразователь (типа элемента солнечной батареи). Под действием света, падающего на фотопреобразователь, на его клеммах возникает разность потенциалов, пропорциональная интенсивности падающего света. К клеммам фотопреобразователя параллельно измерительному сопротивлению $R_{изм}$ подключён цифровой вольтметр V , показания которого также будут пропорциональны измеряемой интенсивности света. Поворачивая указатель нониуса угломера, мы тем самым изменяем угол между плоскостями поляризатора и анализатора, в результате чего показания

вольтметра изменяются и достигают своего минимума, когда плоскости поляризации становятся взаимно-перпендикулярными (скрещенными).

Примечание: поляризаторы, используемые в данной установке, в скрещенном положении не полностью задерживают световой поток (не являются идеальными). По этой причине показания вольтметра не достигают нулевого значения. Поэтому при обработке данных в этой лабораторной работе учитывается поправка U_{min} и вычитается из всех отсчётов по вольтметру. Установка подключена к сети ~ 220 В через стабилизатор напряжения.

2. Порядок выполнения работы

1. Установите переключатель цифрового вольтметра в режим измерения постоянного напряжения (утопите кнопки $V=$), подключите стабилизатор к сети ~ 220 В, включив его тумблером «Сеть». При этом загорится сигнальная лампочка, вольтметр покажет некоторое значение напряжения.

2. Включите установку тумблером, расположенным на её станине. При этом должна загореться электролампа, помещенная в кожух на выходе из которого имеется регулируемая диафрагма. С помощью диафрагмы можно изменять площадь выходного отверстия кожуха и, следовательно, изменять начальную интенсивность света, испускаемого лампой.

3. Вращая угломер, добейтесь минимального показания U_{min} вольтметра и запишите его в таблицу, а также зафиксируйте в таблице величину соответствующего угла $\alpha_{U_{min}}$.

4. Вращая угломер, снимите зависимость показаний вольтметра от величин углов между плоскостями поляризатора и анализатора. Измерения проводите через 10° для углов $\pm 90^\circ$ относительно $\alpha_{U_{min}}$. Значения углов α и соответствующих напряжений U занесите в таблицу.

Примечание: для более удобного отсчёта углов используйте только верхний полукруг шкалы угломера

5. Выключите установку тумблером на станине и отключите от сети.

3. Обработка результатов

1. В ряду полученных значений напряжения при разных углах α найдите максимальное значение напряжения U_{max} и соответствующий угол $\alpha_{U_{max}}$ и занесите их в таблицу.

Таблица 1

№ замера	$\alpha_{U_{min}} =$	$U_{min} =$	$\alpha_{U_{max}} =$	$U_{max} =$	
	α , град	U , дел	$\alpha^* = \alpha - (\alpha_{U_{min}} - 90^\circ)$	$\cos^2 \alpha^*$	$\frac{(U - U_{min})}{(U_{max} - U_{min})}$
1					
...					
18					

2. Рассчитайте и занесите в таблицу значения углов α^* и значения дроби $\frac{(U-U_{min})}{(U_{max}-U_{min})}$.

3. В описании лабораторной работы и метода измерений уже было (смотрите часть II) замечено, что показания вольтметра пропорциональны измеряемой интенсивности света (с учетом поправки U_{min}). Таким образом, величина $(U - U_{min}) \sim I$ пропорциональна интенсивности I света, прошедшего через систему поляризатор – анализатор, а величина $(U_{max} - U_{min}) \sim I_0$ пропорциональна интенсивности I_0 плоскополяризованного света, полученного после прохождения через поляризатор и падающего на анализатор.

4. Постройте на миллиметровой бумаге формата А4 два графика: зависимость $\frac{(U-U_{min})}{(U_{max}-U_{min})} = f(\alpha^*)$, аналог $\frac{I}{I_0} = f(\alpha^*)$ и $\frac{(U-U_{min})}{(U_{max}-U_{min})} = f(\cos^2\alpha)$, аналог $\frac{I}{I_0} = f(\cos^2\alpha)$

5. В выводе к лабораторной работе объясните форму полученных графиков с учетом закона Малюса.

4. Контрольные вопросы.

1. Что такое электромагнитные волны? Свет как частный случай электромагнитных волн.

2. Что такое световой вектор? Почему при изучении поляризации света мы говорим только о световом векторе?

3. Какие бывают виды поляризации?

4. Как получить плоскополяризованный свет? Что такое совершенный поляризатор?

5. Сформулируйте закон Малюса и запишите формулу для него.

Литература

1. Ландсберг, Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг. – Москва: Физматлит, 2003

2. Савельев, И.В. Курс общей физики: учебное пособие: в 3-х т. / И.В. Савельев. – Москва: Наука, 1988. Т.2

3. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – Москва: Высшая школа, 2003

4. Обработка результатов экспериментальных измерений: [Электронный ресурс]. <https://portal.tpu.ru>

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА ОПТИЧЕСКИ АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА С ПОМОЩЬЮ ЯВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Цель работы: Определение концентрации раствора глюкозы по углу поворота плоскости поляризации.

Оборудование:

1. Круговой поляриметр.
2. Трубка с раствором глюкозы

Введение

Понятие о явлении поляризации света, виды поляризации, закон Малюса подробно изложены в теоретическом введении к работе № 4.4. Изучив эти положения, можно перейти к вопросу о вращении плоскости поляризации плоско поляризованного света.

Некоторые вещества, называемые оптически активными, обладают способностью вызывать вращение плоскости поляризации проходящего через них плоско поляризованного света. К числу таких веществ принадлежат кристаллические тела (кварц, киноварь), чистые жидкости (скипидар, никотин) и растворы оптически активных веществ в неактивных растворителях (водные растворы сахара, глюкозы, винной кислоты и др.). Для растворов угол поворота плоскости поляризации (φ) зависит от толщины слоя вещества (L) и от концентрации раствора c :

$$\varphi = [\alpha] \cdot c \cdot L. \quad (1)$$

Здесь $[\alpha]$ – коэффициент, называемый удельной постоянной вращения. Постоянная вращения зависит от вида вещества, его концентрации и от длины волны света.

В зависимости от направления вращения плоскости поляризации оптически активные вещества подразделяются на право - и левовращающиеся.

Молекулы или кристаллы одной разновидности являются зеркальным отражением молекул или кристаллов другой разновидности.

Оптическая активность обуславливается:

1. Строением молекул вещества (их асимметрией);
2. Особенности расположения частиц в кристаллической решетке.

В лабораторной работе № 4.4 сказано, что если пропустить естественный свет между скрещенными поляризатором и анализатором, то поле зрения окажется темным (свет через скрещенные поляризатор и анализатор не проходит).

Принципиальная схема установки представлена на рисунке 1. Если между скрещенными поляризаторами и анализатором поместить оптически активное вещество, то поле зрения анализатора просветляется. Поворачивая анализатор,

можно определить угол φ , при котором поле зрения вновь становится тёмным. φ – угол поворота плоскости поляризации оптически активного вещества.



Рисунок 1 – Принципиальная схема установки

Определив угол поворота плоскости поляризации φ раствором оптически активного вещества, можно найти концентрацию раствора, используя формулу (1)

$$c = \frac{\varphi}{[\alpha] \cdot L} \quad (2)$$

1. Описание лабораторной работы и метода измерений

В данной работе используются круговой поляриметр СМ – 3 (рисунок 2)



Рисунок 2

Поляриметр – прибор, предназначенный для измерения угла вращения плоскости поляризации оптически активными прозрачными анизотропными растворами и жидкостями.

На рисунке 3 схематично показан общий вид прибора.

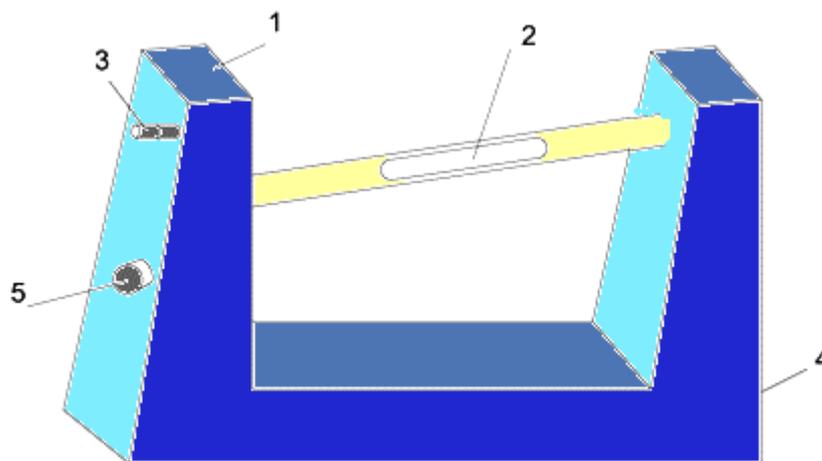


Рисунок 3

- 1 – корпус, 2 – кюветное отделение, закрытое крышкой,
3 – окуляр с поворотной втулкой наблюдательной головки,
4 – тумблер «сеть» (включение лампы), 5 – ручка поворота плоскости поляризации анализатора

В поляриметре применен принцип уравнивания яркости поля зрения, разделённого на две части. Разделение поля зрения на части осуществлено введением в оптическую систему поляриметра хроматической фазовой пластинки.

Яркости полей сравнения уравнивают вблизи полного затемнения поля зрения. Угол между плоскостями поляризации поляризатора и анализатора при равенстве минимальных яркостей полей сравнения составляет $86,5^\circ$.

Свет от лампы, пройдя через конденсор и поляризатор, одной частью пучка проходит через хроматическую фазовую пластинку, защитное стекло и анализатор, а другой частью пучка – только через защитное стекло, кювету и анализатор. Вид полей зрения поляриметра представлен на рисунке 4

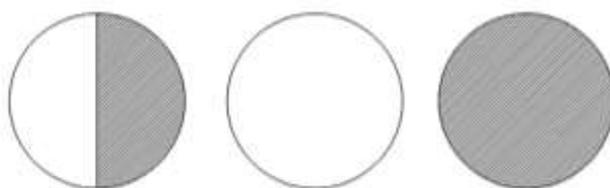


Рисунок 4 – Вид полей зрения

Уравнивание яркостей полей сравнения производят путём вращения анализатора.

Если между анализатором и поляризатором ввести кювету с оптически активным раствором, то равенство яркостей полей сравнения нарушается. Оно

может быть восстановлено поворотом анализатора на угол, равный углу поворота раствором плоскости поляризации.

Определив разность двух отсчётов, соответствующих равенству яркостей полей сравнения с оптически активным раствором (в кювете) и без него, можно найти угол вращения плоскости поляризации данным раствором.

По углу вращения плоскости поляризации возможно определение концентрации оптически активных веществ.

Заполним раствором оптически активного вещества трубку длиной L .

Пусть эта трубка с веществом дает вращения плоскости поляризации на угол φ . Тогда формула (2) представляет собой рабочую формулу для расчёта концентрации раствора:

$$c = \frac{\varphi}{[\alpha] \cdot L},$$

где для используемого в работе раствора глюкозы

$$[\alpha] = 0,526 \frac{\text{град} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}}$$

Длина прилагаемой к прибору трубки

$$L = (0,200 \pm 0,001) \text{ м}$$

Формула (2) показывает, что концентрация раствора пропорциональна углу поворота плоскости поляризации.

Угол поворота плоскости поляризации вычисляется по формуле

$$\varphi = \varphi_A - \varphi_0, \quad (3)$$

где φ_0 – нулевой отсчёт по шкале прибора при отсутствии кюветы с раствором; φ_A – отсчёт по шкале прибора при наличии кюветы с раствором оптически активного вещества.

2. Порядок выполнения работы

1. Включите вилку поляриметра в сеть $\sim 220 \text{ В}$,
2. Включите тумблер на задней стенке – должна загореться лампочка внутри корпуса;
3. Убедитесь в отсутствии кюветы с раствором внутри кюветного отделения и закройте крышку кюветного отделения;
4. Вращая втулку трубки 3, настройте резкость изображения контуров полей сравнения, при этом для наилучшей видимости зрачок глаза наблюдателя должен совпадать с осью поляриметра.
5. Для определения нулевого отсчета φ_0 (проводится без кюветы) выполните следующие действия (рисунок 5):

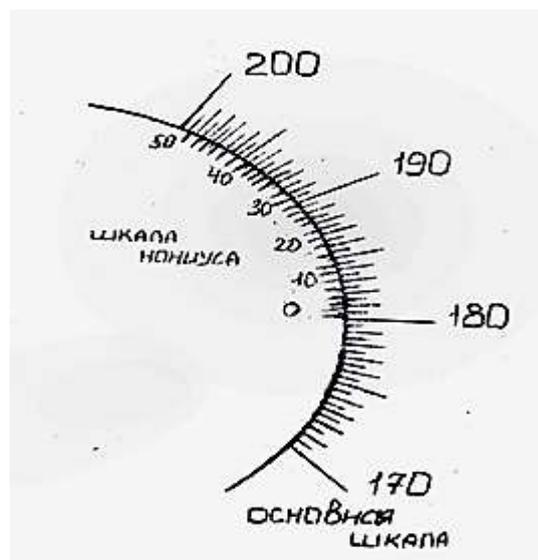


Рисунок 5 – Вид шкалы поляриметра.

Вращая втулку лимба 5, установите в начале нуля нониуса в районе $\sim 170^\circ$ основной шкалы. При этом глаз должен чётко видеть вертикальную границу раздела полей сравнения (одна половина круга будет светлой, а другая темной);

Поворачивая далее втулку лимба 5, в районе $\sim 180^\circ$ основной шкалы, получите минимальную и равномерную яркость полей сравнения (При этом граница раздела исчезнет и поле станет тёмным).

Выполните измерения угла φ_0 , пользуясь основной шкалой и шкалой нониуса с учётом того, что минимальное деление основной шкалы равно $0,5^\circ$, а шкалы нониуса $0,02^\circ$.

Занесите в таблицу полученные результаты.

Таблица 1.

n	φ_0 град.	$\Delta\varphi_0$	$\Delta\varphi_0^2$	φ_A	$\Delta\varphi_A$	$\Delta\varphi_A^2$
1						
...						
...						
	$\langle \varphi_0 \rangle$		$\sum (\Delta\varphi_0^2)$	$\langle \varphi_A \rangle$		$\sum (\Delta\varphi_A^2)$

6. По заданию преподавателя выполните аналогичным образом 5–10 измерений φ_A , занося их в таблицу.

Перед каждым последующим измерением специально сбивайте настройку тёмного поля, вращая втулку лимба 5, и снова настраиваете. (см. пункт 3)

7. Для определения φ_A вначале установите в поляриметр кювету с исследуемым раствором и закройте крышку кюветного отделения 2.

При этом поля сравнения станут светлыми.

Вращая втулку лимба 5 (в сторону увеличения угла), снова добейтесь равенства полей сравнения, но при минимальной яркости (при этом не видно границы раздела полей и поле станет равномерно тёмным).

8. Аналогично измерению φ_0 , пользуясь основной шкалой и шкалой нониуса, определите значение φ_A и занесите его в таблицу.

Слегка сбив настройку, проведите измерения φ_A 5-10 раз (по указанию преподавателя), занесите их в таблицу.

9. По окончании измерений выключите тумблер поляриметра и отключите его от сети.

3. Обработка результатов измерений

1. Вычислите среднее значение измеренных величин $\langle \varphi_0 \rangle$ и $\langle \varphi_A \rangle$ и заполните полностью таблицу. По формуле (3) рассчитайте среднее значение угла поворота плоскости поляризации φ .

По формуле (2) рассчитайте величину средней концентрации раствора глюкозы.

2. Пользуясь методическими указаниями №100 по расчёту погрешностей, рассчитайте абсолютные погрешности $\Delta\varphi_0$ и $\Delta\varphi_A$, как погрешности прямых измерений с учетом случайной погрешности и погрешности округления (при этом $h=0,02$ град., а доверительная вероятность $P=0,95$).

Прямым измерением в данной работе является также длина трубки L , но ее погрешность уже задана.

3. Косвенными измерениями в данной работе является угол поворота плоскости поляризации φ и концентрация раствора глюкозы C , при расчете которых руководствуйтесь методическими указаниями №100.

Результат запишите в виде:

$$\varphi = (\langle \varphi \rangle \pm \Delta\varphi) \text{ град}$$

$$C = (\langle C \rangle \pm \Delta C) \text{ кг/м}^3$$

4. Сделайте вывод по результатам выполнения лабораторной работы.

4. Контрольные вопросы

1. Что такое плоско поляризованный свет? Как его можно получить из естественного света? (смотри Л.Р. 4.4)

2. Закон Малюса.

3. Принцип действия поляриметра.

4. Что такое оптически активные вещества? От чего зависит угол поворота плоскости поляризации?

Литература

1. Савельев, И.В. Курс общей физики: учебное пособие: в 3-х т. / И.В. Савельев. – Москва: Наука, 1988. – Т.2.

2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – Москва: Высшая школа, 2003.

3. Обработка результатов экспериментальных измерений: [Электронный ресурс]. <https://portal.tpu.ru>

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.6. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА.

Цель работы: определение коэффициента поглощения света веществом.

Оборудование:

1. Камера для изучения поглощения света.
2. Микроамперметр.
3. Штангенциркуль.
4. Стеклянные образцы.
5. Стабилизатор напряжения.

Введение

При прохождении световой волны через вещество часть энергии волны затрачивается на возбуждение колебаний электронов среды. Частично эта энергия вновь возвращается излучению в виде вторичных волн, порождаемых электронами; частично же они переходят в энергию движения атомов, то есть во внутреннюю энергию вещества. Поэтому интенсивность света при прохождении через вещество уменьшается – свет поглощается в веществе.

Опыт показывает, что интенсивность света при прохождении через вещество убывает по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha x}, \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность света при входе в вещество, x – толщина поглощающего слоя, α – постоянная, зависящая от свойств поглощающего вещества и называемая коэффициентом поглощения.

Соотношение (1) носит название закона Бугера.

Напомним, что интенсивность световой волны – это среднее значение энергии, переносимой волной в единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны.

Из закона Бугера следует, что коэффициент поглощения – это величина, обратная такой толщине слоя, при прохождении которой интенсивность убывает в e раз.

Физический смысл закона Бугера состоит в том, что показатель поглощения не зависит от интенсивности света, α , следовательно, и от толщины поглощающего слоя.

С. И. Вавилов установил, что закон Бугера выполняется в широких пределах изменения интенсивности света.

Однако коэффициент поглощения зависит от длины волны λ (или частоты ω). У вещества, атомы (или молекулы) которого практически не воздействуют друг на друга (газы и пары металлов при невысоких давлениях), коэффициент поглощения для большинства длин волн близок к нулю и лишь для очень узких спектральных областей (шириной в несколько сотых ангстрема) обнаруживаются резкие максимумы (рисунок 1)



Рисунок 1 – Зависимость коэффициента поглощения от частоты ω для газов и паров металлов

Эти максимумы соответствуют резонансным частотам колебаний электронов внутри атомов.

Газы при высоких давлениях, а также жидкости и твёрдые тела дают широкие полосы поглощения (рисунок 2)

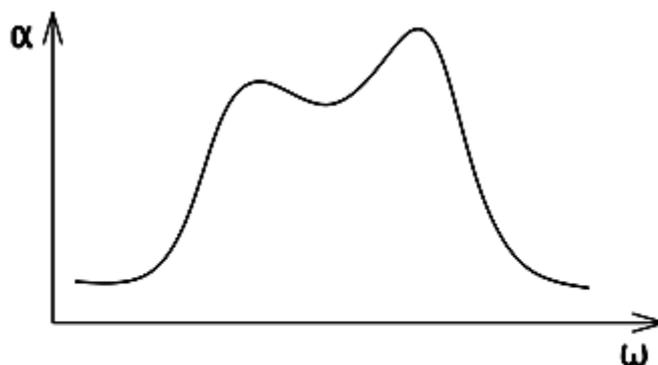


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента поглощения от частоты для жидкостей и твёрдых тел

Для того, чтобы наиболее точно определить коэффициент поглощения, необходимо экспоненциальную зависимость преобразовать в линейную. Это возможно сделать, прологарифмировав выражение Бугера (1):

$$\ln I = \ln I_0 - \alpha x \quad (2)$$

или

$$\ln \frac{I_0}{I} = \alpha x \quad (3)$$

Построив линейную зависимость, где по оси ординат отложен $\ln \frac{I_0}{I}$, а по оси абсцисс – толщина поглощающего слоя x (3), можно получить коэффициент поглощения:

$$\alpha = \frac{\ln \frac{I_0}{I}}{x} \quad (4)$$

1. Описание лабораторной работы и метода измерений

Установка для изучения поглощения света состоит из осветителя и фотоэлемента, между которыми устанавливается исследуемый образец. Ток фотоэлемента измеряется микроамперметром и в силу вышесказанного зависит от толщины поглощающего слоя вещества.

Так как коэффициент поглощения зависит от длины волны, а источник света, используемый в установке, немонохроматичен, то для монохроматизации падающего излучения перед фотоэлементом установлен светофильтр.

Исследуемые образцы представляют собой квадратные пластины, не калиброванные по толщине, нарезанные из обычного стекла.

Установка запитана от стабилизатора напряжения. Для ограничения светового потока в камеру помещена диафрагма, вырезанная из картона.



Рисунок 3 – Фото установки

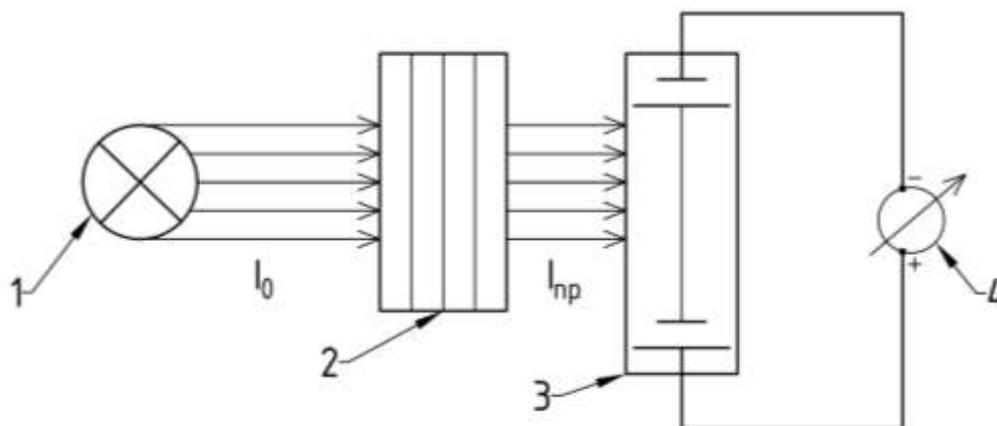


Рисунок 4 – Блок-схема установки

- 1 – электролампа
- 2 – стопка стеклянных пластин
- 3 – фотовентиль (элемент солнечной батареи)

4 – микроамперметр (М24; класс точности 1,5; предел шкалы 100 единиц; цена минимального деления 2 единицы)

2. Порядок выполнения работы

1. Включите установку в сеть ~220 В, при этом загорится рабочая лампа, микроамперметр покажет некоторое значение силы тока.

2. После прогрева в течение 5 минут, закройте крышку камеры и снимите отсчёт I_0 в делениях по микроамперметру в отсутствии стеклянных пластин – поглотителей.

3. Измерьте однократно в произвольном месте толщину первой из имеющихся пластин, запишите значение в таблицу. Протрите прилагаемой салфеткой обе стороны пластины, удерживая её за ребра.

4. Откройте крышку камеры и положите первую пластину внутрь камеры. Закрыв крышку, снимите отсчёт по микроамперметру, запишите значение в таблицу. Значения показаний прибора отсчитывайте с точностью до половины его минимального деления. Начиная со второго стекла, в таблицу включите сумму толщин двух стёкол и т.д. по нарастающей. Таким образом, толщина поглощающего слоя будет все время увеличиваться.

5. Последовательно укладывая обмеренные пластины друг на друга в камеру прибора (примерно 12 штук), снимите зависимость показаний микроамперметра от толщины поглощающего слоя стекла. При повторении показаний измерения прекратите. Занесите результаты в таблицу 1:

Таблица 1.

Количество стёкол	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Толщина слоя, x , мм													
Интенсивность света, $I_{пр.}$ дел.													
$\ln \frac{I_0}{I_{пр}}$													

6. Отключите установку от сети и удалите стекла из камеры прибора.

3. Обработка результатов измерений

1. На миллиметровой бумаге формата А4 постройте график зависимости интенсивности прошедшего через стекла света от толщины поглощающего слоя $I_{пр} = f(x)$. Оцифровку с оси $I_{пр}$ не начинайте с нуля! Кривую проведите плавно по средним значениям.

2. Вычислите величины $\ln \frac{I_0}{I_{пр}}$, занесите результаты в таблицу.

3. Определите значение коэффициента поглощения α одним из двух способов по выбору преподавателя.

1 способ

По формуле (4) рассчитайте 12 значений коэффициента α с точностью до четвёртого знака после запятой и найдите среднее значение. Заполните таблицу 2.

Таблица 2.

№	$\alpha_i, \text{мм}^{-1}$	$\Delta\alpha_i$	$\Delta\alpha_i^2$
1			
...			
12			
	$\langle\alpha\rangle =$		$\sum \Delta\alpha_i^2 =$

Рассчитайте случайную погрешность $\Delta\alpha_{\text{сл}}$, значение доверительной вероятности примите $P = 0,95$.

Запишите результат

$$\alpha = \langle\alpha\rangle \pm \Delta\alpha$$

При этом размерность коэффициент поглощения представьте в основных единицах системы СИ.

2 способ

Для более точного определения коэффициента поглощения α используйте «метод парных точек», так как искомую величину α можно определить как угловой коэффициент (тангенс угла наклона линейного графика $\ln \frac{I_0}{I_{\text{пр}}} = f(x)$).

На миллиметровой бумаге по оси абсцисс откладывайте толщину x поглощающего слоя, а по оси ординат значения $\ln \frac{I_0}{I_{\text{пр}}}$.

В результате на координатной плоскости будут отмечены $N = 12$ точек (через любую пару точек можно провести прямую, тангенс угла наклона которой к оси абсцисс будет численно равен коэффициенту поглощения).

Согласно «методу парных точек» надо взять 1-ю и $(\frac{N}{2}+1)$ точки (т.е. 7-ю в нашем случае) и через них проходит прямая с условным коэффициентом α_1 (см. рисунок 4). Следующей паре точек (2-я и $\frac{N}{2}+2$; т.е. 2-я и 8-я) отвечает коэффициент α_2 и так далее. Таким образом мы получим $\frac{N}{2}$, то есть 6 значений коэффициента α , которые надо занести в таблицу 3.

Таблица 3.

№	$\alpha_i, \text{мм}^{-2}$	$\Delta\alpha_i$	$\Delta\alpha_i^2$
1			
2			
...			
6			
	$\langle\alpha\rangle =$		$\sum \Delta\alpha_i^2 =$

Далее заполните полностью таблицу, определите $\langle\alpha\rangle$ и случайную погрешность для 6 значений α при доверительной вероятности $P = 0,95$. При расчёте α_i оставляйте четыре цифры после запятой. Ответ запишите в виде:

$$\alpha = \langle\alpha\rangle \pm \Delta\alpha,$$

при этом перевести полученные результаты в систему СИ.

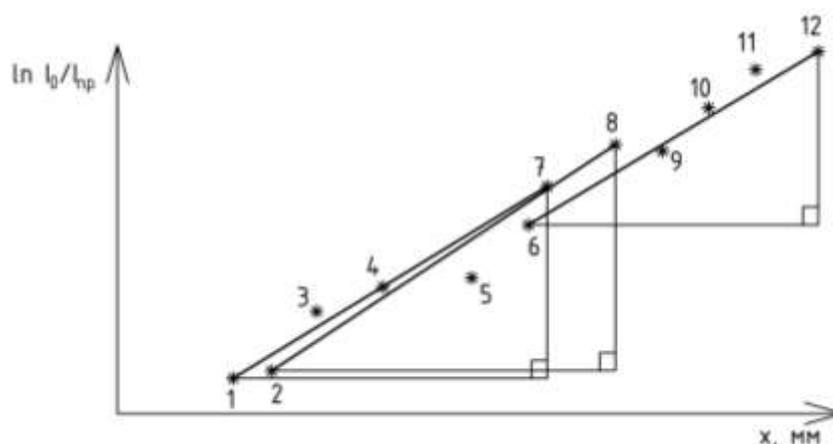


Рисунок 5 – Метод парных точек

Сделайте вывод по результатам выполнения лабораторной работы.

4. Контрольные вопросы

1. Какие процессы обуславливают поглощение света?
2. Закон Бугера. Границы применимости закона.
3. Физический смысл коэффициента поглощения.
4. От чего зависит коэффициент поглощения?

Литература

1. Ландсберг, Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг. – Москва: Физматлит, 2003
2. Савельев, И.В. Курс общей физики: учебное пособие: в 3-х т./ И.В. Савельев. – Москва: Наука, 1988. – Т.2
3. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – Москва: Высшая школа, 2003
4. Обработка результатов экспериментальных измерений: [Электронный ресурс]. <https://portal.tpu.ru>

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4.7.

ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА.

Цель работы:

1. Ознакомление с законами внешнего фотоэффекта.
2. Экспериментальное исследование вольт-амперной характеристики вакуумного фотоэлемента.
3. Определение работы выхода для данного фотоэлемента.

Оборудование:

1. Блок электропитания и измерения.
2. Блок фотоэлемента.
3. Стабилизатор напряжения.

Введение

Внешним фотоэффектом (или фотоэлектрической эмиссией) называется испускание электронов твердыми или жидкими телами под действием электромагнитного излучения. Это явление было открыто Г. Герцем в 1887 г. В 1888–1889 гг. А.Г. Столетов исследовал законы фотоэффекта на установке, схема которой показана на рисунке 1.

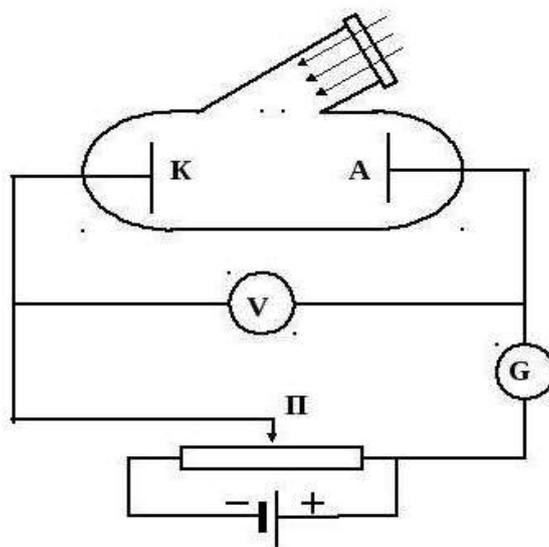


Рисунок 1 – Схема установки для исследования внешнего фотоэффекта

Фотоэлемент в виде вакуумной двухэлектродной лампы имеет металлический катод К, который при освещении его через кварцевое окошко О ультрафиолетовым светом испускает со своей поверхности электроны. Вылетевшие из катода электроны, достигая анода А, обеспечивают протекание в цепи электрического тока, который фиксируется гальванометром G. Напряжение между катодом и анодом измеряется вольтметром V. Специальная схема подключения источника позволяет изменять полярность напряжения, подаваемого на фотоэлемент, с помощью переключателя П.

Полученная на такой установке вольт–амперная характеристика $I(U)$ (т.е. кривая зависимости фототока I от напряжения между электродами U) приведена на рисунке 2.

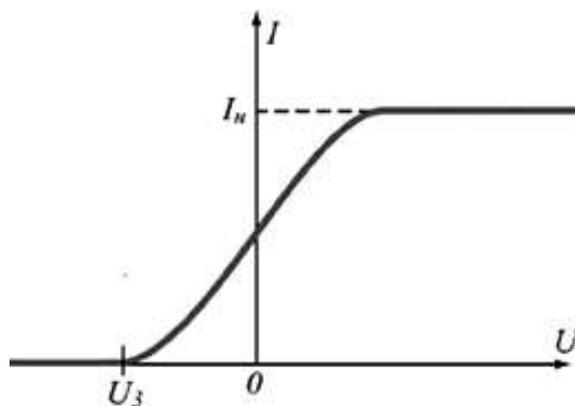


Рисунок 2 – Вольт–амперная характеристика внешнего фотоэффекта снята при неизменном световом потоке Φ

А.Г. Столетовым были установлены три закона фотоэффекта:

1) При фиксированной частоте света число электронов, вылетающих из фотокатода, пропорционально интенсивности света. То есть количество электронов, вырываемых светом с поверхности металла за 1 секунду, прямо пропорционально поглощаемой за это время энергии световой волны. Поэтому величина фототока насыщения I_n зависит только от интенсивности световой волны, падающей на катод.

2) Максимальная скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности света, а определяется только его частотой.

3) Для каждого вещества фотокатода существует минимальная частота (или максимальная длина волны), при которой внешний фотоэффект еще возможен. Эта частота $\nu_{кр}$ или длина волны $\lambda_{кр}$ называется красной границей внешнего фотоэффекта. Она определяет величину задерживающего напряжения U_3 , при которой фототок прекращается. Эта величина определяется формулой:

$$\frac{mv_{max}^2}{2} = eU_3, \quad (1)$$

где m – масса электрона;

v_{max} – максимальная скорость вылетающих электронов;

e – заряд электрона.

Все попытки объяснить явление фотоэффекта на основе законов электродинамики Максвелла, согласно которому свет – это электромагнитная волна, непрерывно распределенная в пространстве, оказались безрезультатными.

Объяснение фотоэффекта было дано в 1905 г. А. Эйнштейном, развившим идеи М. Планка о прерывистом испускании света. Согласно Эйнштейну и Планку свет – это поток особых частиц – фотонов. Фотон – это порция электромагнитного излучения, несущая определенную энергию.

Согласно формуле Планка, энергия одного фотона (или кванта), пропорциональна частоте излучения ν :

$$\varepsilon_{\phi} = h\nu = \frac{hc}{\lambda_0}, \quad (2)$$

где h – постоянная Планка;
 c – скорость света в вакууме;
 λ_0 – длина волны света в вакууме.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта объясняется законом сохранения энергии и выглядит следующим образом:

$$\varepsilon_{\phi} = A_{\text{вых}} + E_{k \text{ max}}, \quad (3)$$

где A – работа выхода электронов из металла, то есть энергия, которую надо затратить для того, чтобы электрон мог покинуть металл;
 $E_{k \text{ max}}$ – максимальная кинетическая энергия выбитых электронов.

Работа выхода зависит от вида металла, а также от состояния поверхности металла (в частности, находящихся на ней окислов и адсорбированных на ней веществ).

Используя формулу (1), уравнение Эйнштейна можно представить в следующем виде:

$$h\nu = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} + eU_3. \quad (4)$$

Используя уравнение (4), можно получить следующие графики $I(U)$ зависимости фототока от напряжения между катодом и анодом (рисунки 3 и 4).

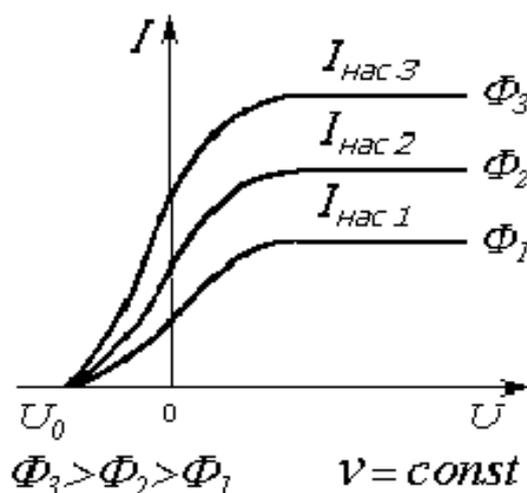


Рисунок 3 – Вольт–амперные характеристики фотоэлемента при различных интенсивностях светового потока Φ

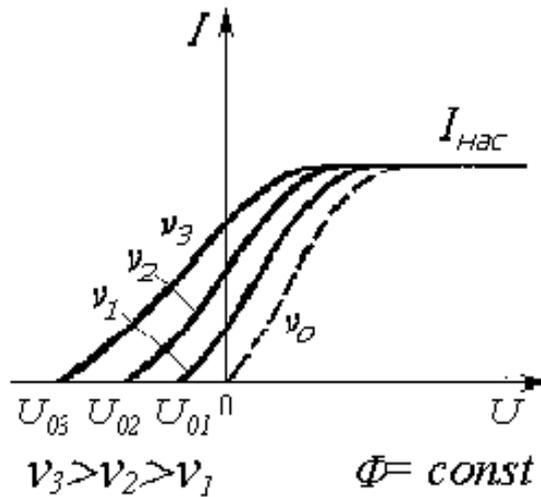


Рисунок 4 – Вольт–амперные характеристики фотоэлемента при различных частотах света, падающего на катод и одинаковой интенсивности светового потока

Из формулы (3) следует, что в случае, когда работа выхода A превышает энергию фотона $h\nu$, электроны не могут покинуть металл. Следовательно, для возникновения фотоэффекта необходимо выполнить условие $h\nu \geq A_{\text{вых}}$, или

$$\nu \geq \nu_{\text{кр}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h} \quad (5)$$

или

$$\lambda \leq \lambda_{\text{кр}} = \frac{hc}{A_{\text{вых}}} \quad (6)$$

1. Описание лабораторной работы и метода измерений



Рисунок 5 – Фото лабораторной установки

Исследование вольтамперных характеристик вакуумного фотоэлемента выполняется на установке, состоящей из двух блоков: блока №1 и блока №2 (рисунок 6)

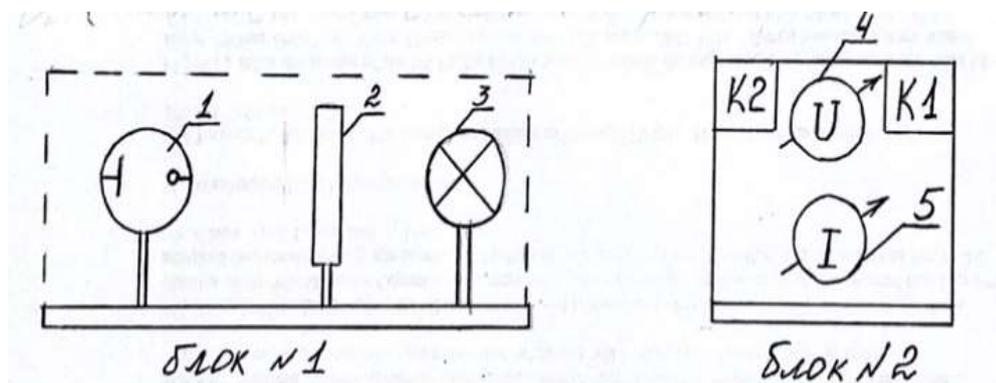


Рисунок 6 – Блок – схема установки для исследования вольтамперной характеристики фотоэлемента; 1 – фотоэлемент; 2 – светофильтр; 3 – электролампа; 4 – вольтметр; 5 – гальванометр

Блок №1 представляет собой удлиненную платформу, на которой неподвижно закреплен вакуумный фотоэлемент 1, в качестве которого используется фотоэлектронный умножитель ФЭУ – 1 с отключенным эмиттером.

Такой фотоэлемент представляет собой круглую стеклянную колбу диаметром 38,5 мм.

Половина внутренней поверхности колбы изнутри покрыта тонким сурьмяно–цезиевым ($SbCs_3$) слоем с малой величиной работы выхода фотоэлемента. Красная граница для такого фотокатода равна $\nu_{кр} = 4 \cdot 10^{14}$ Гц.

Анод выполнен в виде небольшого медного кольца. Из колбы откачан воздух. Два проводника, припаянные к катоду и аноду, выведены сквозь стекло наружу и соединены с вилкой, закрепленной в цоколе, на котором установлена стеклянная колба.

Электролампа 3, являющаяся источником света, может перемещаться вдоль платформы. Для ее перемещения используется рычаг на лицевой панели блока №1, движущийся в указанных на прорези пределах.

Между фотоэлементом и электролампой установлен желтый светофильтр 2, пропускающий излучение на частоте: $\nu = (5,2 \pm 0,3) \cdot 10^{14}$ Гц.

Примечание: большая ширина интервала $\Delta\nu = (\pm 0,3) \cdot 10^{14}$ Гц объясняется тем, что в данном опыте источником света является электролампа с непрерывным (сплошным) спектром излучения.

Блок №1 помещен в металлический кожух для защиты от внешнего электромагнитного поля, создающего электронаводки в контуре, которые могут вызывать помехи в процессе измерения фототока.

В блоке №2 расположен выпрямитель, выходное напряжение которого подается на анод фотоэлемента и измеряется вольтметром 4 типа М45М с ценой деления шкалы:

$$C_U = 2 \cdot 10^{-2} \text{ В/дел.}$$

Величина напряжения регулируется потенциометром К1. Переключатель К2 используется для изменения полярности напряжения, подаваемого на анод фотоэлемента. Положение переключателя К2 при положительном анодном напряжении обозначается знаком «+», а при отрицательном анодном напряжении – знаком «-».

На панели блока №2 указаны также направления поворота регулятора потенциометра К1, соответствующие двум положениям переключателя К2. При положительном анодном напряжении для его увеличения регулятор К1 следует поворачивать «по ходу часовой стрелки», а при отрицательном анодном напряжении для его увеличения регулятор К1 следует поворачивать «против хода часовой стрелки».

Для измерения фототока в блоке №2 установлен гальванометр 5 типа М195/1. В данной работе используется гальванометр с минимальной ценой деления шкалы $C_1 = 10^{-8}$ А/дел.

Регистрация показаний гальванометра выполняется с помощью светового луча.

Примечание: в процессе измерений гальванометром типа М195/1 должны быть устранены механические толчки, вибрации; запрещается передвигать прибор, облакачиваться на стол; ходить вдоль стола следует осторожно. Кроме того, в помещении должны быть устранены любые сторонние электрические помехи.

Принципиальная схема установки для исследования вольтамперной характеристики вакуумного фотоэлемента приведена на рисунке 7

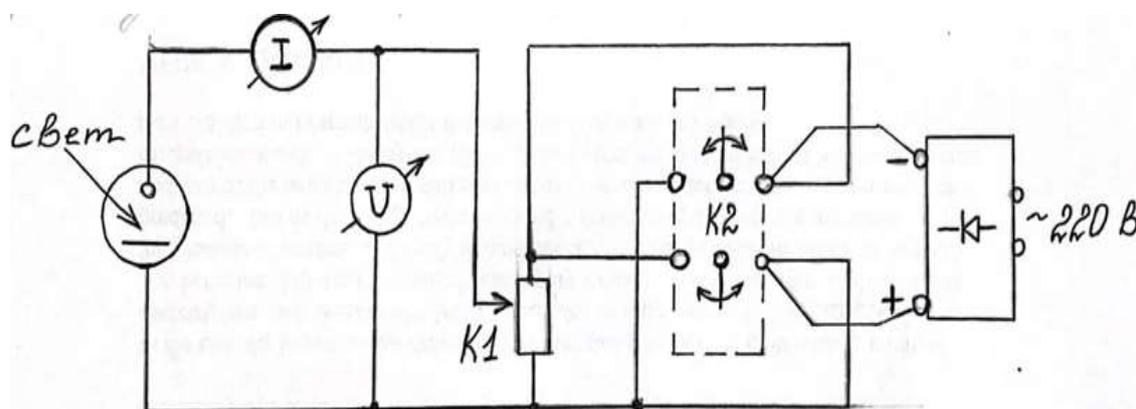


Рисунок 7 – Принципиальная схема установки для исследования вольтамперной характеристики фотоэлемента

Схема представляет собой электрическую цепь, состоящую из двух контуров. Контур имеет общую ветвь, в которой находится потенциометр К1, регулирующий напряжение на аноде фотоэлемента, включенного в контур, изображенный слева.

Контур в правой части схемы содержит переключатель К2, позволяющий менять полярность напряжения на аноде фотоэлемента.

С помощью переключателя К2 на потенциометр К1 подается постоянное напряжение $U = 1,12\text{В}$ от выпрямителя, расположенного в блоке К2. Регулировка напряжения с помощью потенциометра К1 выполняется в пределах $U = (0 \div 1,04)\text{В}$.

Для электропитания установки применяется стабилизатор напряжения, расположенный на лабораторном столе. К стабилизатору подключена колодка с тремя розетками, на которые подается стабилизированное напряжение 220В переменного тока.

К розеткам последовательно подключаются:

1. Осветитель шкалы гальванометра, образующий световой луч – «зайчик» (блок №2);
2. Электролампа (блок №1);
3. Выпрямитель (блок №2);

Технические данные измерительных приборов:

Вольтметр – класс точности 1,0; предел шкалы 75 дел; цена минимального деления 0,02 В/дел. Амперметр – цена минимального деления 10^{-8}А/дел .

2. Порядок выполнения работы

1. Перед началом выполнения работы необходимо подготовить таблицу для записи данных прямых измерений.

Таблица 1

Положительное напряжение		Отрицательное напряжение	
U, дел.	I, дел.	U, дел.	I, дел.
0	$I_0 = \dots$	0	$I_0 = \dots$
4		2	
8		4	
12		
16		18	
....		19	
52		20	

В первой строке при $U_0 = 0$ должен быть указан начальный ток I_0 , величина которого указана преподавателем. Диапазон значений $I_0 = (10 \div 16)$ делений шкалы гальванометра.

Примечание: согласно закону Столетова величина I_0 пропорциональна интенсивности светового потока, падающего на катод фотоэлемента, которая, в свою очередь, обратно пропорциональна квадрату расстояния от электролампы до катода. Значения анодного напряжения U и фототока I заносятся в таблицу в виде числа делений шкалы вольтметра и гальванометра.

2. Подсоединить к электросети стабилизатор напряжения и установить тумблер на его лицевой панели в положение «Вкл.» (должен загореться индикатор под тумблером).

3. Включить в расположенную на рабочем столе розетку осветитель шкалы гальванометра (черный кабель с белой вилкой). Проверить и отрегулировать установку нуля шкалы гальванометра. Регулировка должна проводиться с участием инженера или преподавателя.

4. Проверить установку переключателя цены деления гальванометра. Он должен быть установлен на метке $C_1 = 1 \cdot 10^{-8}$ А/дел.

5. С помощью рычага, движущегося вдоль прорези на левой стенке блока №1, установить указатель вблизи метки с заданным числом делений шкалы гальванометра I_0 .

6. Включить в розетку электролампу в блоке №1 (белый кабель с черной вилкой). При этом гальванометр (блок №2) регистрирует фототок, появившийся в результате вылета электронов из катода фотоэлемента под действием света. Отрегулировать положение электролампы так, чтобы показания гальванометра составляли заданное число делений шкалы, определяющее величину I_0 .

7. Включить выпрямитель (блок №2) – (черный кабель с черной вилкой). Установить (проверить) начальное положение К1 блока №2 (стрелка вольтметра должна быть на нуле).

8. Установить переключатель К2 на блоке №2 в положение «+».

9. Занести в таблицу значение I_0 при $U_0 = 0$.

Плавное вращение регулятора К1 «по ходу часовой стрелки», повышать положительное анодное напряжение фотоэлемента. При этом через равные интервалы – через 4 деления шкалы вольтметра – регистрировать увеличивающийся фототок с помощью гальванометра и заносить данные в таблицу.

Внимание!

а) Регистрацию показаний гальванометра выполнять при минимальной амплитуде колебаний «зайчика» шкалы, не превышающей $(1 \div 2)$ делений шкалы.

б) Анодное напряжение повышать до $U_{max} = 52$ деления шкалы вольтметра при $10 \text{ дел.} < I_0 < 14 \text{ дел.}$ При $14 \text{ дел.} < I_0 < 16 \text{ дел.}$ Повышать до $U_{max} = 38$ делений шкалы вольтметра.

10. Достигнув значения U_{max} и зарегистрировав соответствующую величину фототока I_{max} в таблице, уменьшите до нуля напряжение на вольтметре, очень плавно и медленно вращая регулятор К1 «против хода часовой стрелки». После того, как стрелка вольтметра вернется в нулевое положение, обратит внимание на величину фототока. Эта величина должна быть равна начальному значению I_0 .

11. Установить переключатель К2 на блоке №2 в положение «-» и убедиться, что стрелка вольтметра находится на нуле. При этом на аноде фотоэлемента появится отрицательный заряд (отрицательное анодное напряжение).

12. Плавное вращение регулятора К1 «против хода часовой стрелки», повышать отрицательное напряжение на аноде фотоэлемента и через каждые 2

деления шкалы вольтметра в интервале $(0 \div 18)$ делений этой шкалы регистрировать с помощью гальванометра уменьшающийся фототок, занося данные в таблицу.

13. Затем продолжить повышать отрицательное анодное напряжение, но через одно деление шкалы вольтметра, и фиксировать фототок, вплоть до момента смещения индикатора гальванометра в положение, близкое к нулевому отсчету.

Внимание!

Эту часть измерений необходимо выполнять с особой тщательностью, так как в ней регистрируются показания вольтметра, определяющие величину задерживающего напряжения.

14. Заполнив таблицу, необходимо выключить установку, отключая вилки в обратном порядке, чем при включении.

3. Обработка результатов измерений

1. На миллиметровой бумаге (формата А4), используя полученные в опыте данные прямых измерений, построить вольт–амперную характеристику вакуумного фотоэлемента $I = f(U)$. При этом на горизонтальной оси должны быть показания вольтметра в делениях шкалы. Справа от нуля – положительное анодное напряжение; слева – отрицательное анодное напряжение. На вертикальной оси должны быть показания гальванометра в делениях.

2. Графическая зависимость должна представлять собой непрерывную гладкую линию.

3. Определить по графику величину задерживающего напряжения U_3 в делениях и, зная цену минимального деления вольтметра, запишите величину U_3 , выраженную в вольтах.

$$U_3 = \dots(\text{В})$$

4. Из формул (1 – 3) следует, что работа выхода для данного вида фотоэлемента может быть определена по формуле:

$$A = h\nu - eU_3 .$$

Подставляя в формулу среднее значение частоты падающего на фотокатод света и значение задерживающего напряжения, найти среднее значение работы выхода. При вычислениях взять из справочника значения постоянной Планка (h) и заряда электрона (e) с тремя значащими цифрами и принять эти величины точными.

5. Значения ν и $\Delta\nu$ заданы (см. II). Рассчитать погрешность прямого измерения ΔU_3 , учитывая погрешность округления и приборную погрешность.

6. Погрешность ΔA рассчитать как погрешность косвенного измерения.

7. Записать результат

$$A = \langle A \rangle \pm \Delta A \text{ (Дж)}$$

и перевести в эВ:

$$A = \langle A \rangle \pm \Delta A \text{ (эВ)}$$

8. Сделайте вывод по результатам выполнения лабораторной работы.

4. Контрольные вопросы.

1. Дайте определение внешнего фотоэффекта и сформулируйте его законы.
2. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
3. Что такое задерживающее напряжение и от чего оно зависит?
4. Что такое ток насыщения и от чего он зависит?
5. Что такое красная граница фотоэффекта?

Литература

1. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – Москва: Высшая школа, 2003.
2. Годжаев, Н.М. Оптика / Н.М. Годжаев. – Москва: Высшая школа, 1977.
3. Курс физики: учебник для вузов: в 2-х т. / под ред. В.Н. Лозовского. – Санкт-Петербург: Лань, 2000. Т. 2.
4. Обработка результатов экспериментальных измерений: [Электронный ресурс]. <https://portal.tpu.ru>

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.8. ИЗУЧЕНИЕ АТОМНЫХ СПЕКТРОВ С ПОМОЩЬЮ ПРИЗМЕННОГО СПЕКТРОГРАФА

Цель работы:

- 1) Ознакомление с принципом действия призмного спектрографа.
- 2) Регистрация спектров ртутной и водородной ламп.
- 3) Определение постоянной Ридберга.

Оборудование:

1. Призмный спектрограф.
2. Ртутная лампа.
3. Водородная лампа.

Введение

В 1911 г. Резерфорд и его сотрудники исследовали рассеяние α -частиц при прохождении через тонкие металлические слои. α -частицы – ядра атомов гелия, испускаемые некоторыми веществами при радиоактивном распаде. Результаты отчетов свидетельствуют в пользу ядерной модели атомов, предложенной Резерфордом. Согласно этой модели, положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома имеет радиус, значительно меньший, чем радиус самого атома ($r_{\text{атома}} \sim 10^{-10}$ м; $r_{\text{ядра}} \sim 10^{-15}$ м). Таким образом, можно было предположить, что электроны в атоме образуют механически равновесные системы, располагаясь так, чтобы силы притяжения каждого из них к ядру, уравновешивались силами взаимного отталкивания электронов друг от друга. Однако было доказано, что такие же статические системы, состоящие из ядра и нескольких электронов, взаимодействующих по закону Кулона, не могут быть механически устойчивы (теорема Ирншоу). Это обстоятельство привело Резерфорда к мысли о планетарной модели атома, по которой электроны в атоме вращаются вокруг ядра подобно тому, как планеты вращаются вокруг Солнца.

Рассмотрим модель простейшего атома - атома водорода (рисунок 1)

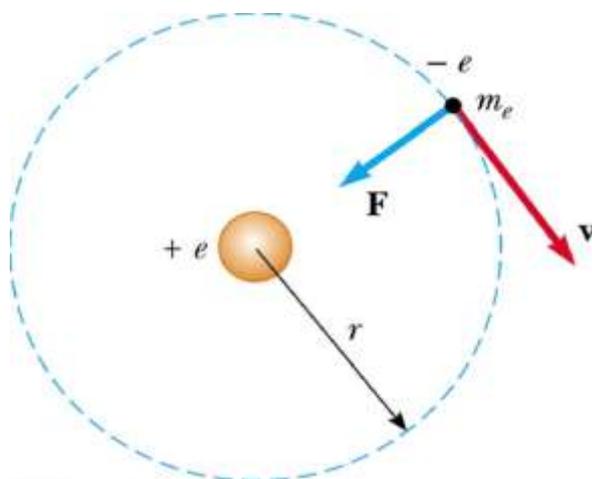


Рисунок 1 – Модель атома водорода.

На электрон, имеющий заряд $-e$ действует сила со стороны положительно заряженного ядра $+e$, определяемая законом Кулона:

$$F_k = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (1)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная.

По второму закону Ньютона сила Кулона сообщает электрону центростремительное ускорение

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{mv^2}{r}, \quad (2)$$

где m – масса электрона, $\frac{v^2}{r}$ – его центростремительное ускорение.

Согласно классической электродинамике, заряженная частица (электрон) при движении с ускорением должны постоянно излучать электромагнитные волны, а, следовательно, терять свою энергию на излучение. В соответствии с этим энергия электрона должна уменьшиться, что будет вызывать уменьшение радиуса орбиты r , что приведет, в конце концов, к падению электрона на ядро и к прекращению существования атома.

Таким образом, планетарная модель атома оказалась неустойчивой с точки зрения электродинамики.

Как показывают расчеты, сделанные на основании законов классической физики, время существования такой модели, имеет порядок 10^{-8} с.

Однако в действительности ничего подобного не происходит. Атомы устойчивы и в невозбужденном состоянии могут существовать неограниченно долго, совершенно не излучая электромагнитные волны.

Не согласующийся с отчетом вывод о неизбежной гибели атома вследствие потери энергии на излучение – это результат применения законов классической физики к явлениям, происходящим внутри атома. Отсюда следует, что к явлениям атомных масштабов законы классической физики неприменимы. Явления атомных масштабов — это микромир – мир атомов, молекул, элементарных частиц.

Выход из крайне затруднительного положения в теории атома был найден в 1913 г. великим датским физиком Нильсом Бором (1885-1962) на пути развития квантовых представлений о процессах в природе. Эйнштейн оценивал сделанную Бором работу «как высшую музыкальность в области мысли», всегда его поражавшую. Основываясь на разрозненных опытных фактах, Бор предложил свои постулаты.

1. Из бесконечного множества электронных орбит, возможных с точки зрения классической механики, осуществляются в действительности только некоторые дискретные орбиты, удовлетворяющие условию:

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

Число n – главное квантовое число, mvr – момент импульса электрона на n -ой орбите, h – постоянная Планка.

Часто используют обозначение $\frac{h}{2\pi} = \hbar$. И тогда выражение (3) принимает вид:

$$mvr = n\hbar \quad (3a)$$

2. Излучение испускается или поглощается в виде световых квантов с энергией $h\nu = \hbar\omega$. При переходе электрона из одного стационарного состояния в другое (ν – частота излученного кванта, ω – циклическая частота). Энергия светового кванта равна разности энергии тех стационарных состояний, между которыми совершается квантовый переход электрона в атоме:

$$\hbar\omega = E_n - E_m \quad (4)$$

где n и m – номера состояний.

Исходя из своих постулатов для стационарных орбит, Бор создал полуклассическую теорию атома водорода.

Исключив скорость v из уравнений (2) и (3a), получили выражения для радиусов допускаемых орбит в атоме водорода:

$$r_n = 4\pi\epsilon_0 \frac{2\hbar^2}{me^2} \cdot n^2 \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

Радиус первой орбиты водородоподобного атома называется боровским радиусом, его значение равно:

$$r_1 = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м.} \quad (6)$$

Энергия атома складывается из кинетической энергии электрона (ядро неподвижно) и энергии взаимодействия электрона с ядром

$$E_n = \frac{mv_n^2}{2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r_n} \quad (7)$$

Используя формулы (3a) и (7), получим:

$$E_n = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{2 \cdot r_n} \quad (8)$$

или

$$E_n = - \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \frac{m \cdot e^4}{2 \cdot \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (9)$$

Подставив в эту формулу значения констант и приняв $n=1$, получим значение энергии основного состояния (т.е. состояния с минимальной энергией) атома водорода:

$$E_n = -2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = -13,6 \text{ эВ} \quad (10)$$

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

С помощью постулатов Бора можно объяснить дискретный (линейный) спектр излучения веществ, находящихся в атомарном состоянии (газы, пары металлов).

Для атома водорода длина волны излучения может быть выражена из соотношений (4) и (9):

$$\hbar\omega = \frac{hc}{\lambda} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \frac{me^4}{2\hbar^2} \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right) \quad (11)$$

или

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{me^4}{2\hbar^2 \cdot h \cdot c} \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (12)$$

Все постоянные, которые входят в эту формулу, можно объединить в одну константу, которая называется постоянной Ридберга и обозначается R . Тогда формула (12) принимает вид (обобщённая формула Бальмера):

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (13)$$

m – номер орбиты, с которой переходит электрон, n – номер орбиты, на которую переходит электрон при излучении кванта с длиной волны λ .

В видимой части излучения для атома водорода находятся длины волн, соответствующие $n=2$ и $m= 3,4,5,6$. Эта серия излучения называется серией Бальмера.

Причём:

$m = 3$ – соответствует красной линии в спектре

$m = 4$ – голубой линии

$m = 5$

$m = 6$ } – фиолетовым линиям

Спектральные линии при $m > 6$ глаз человека не видит и для их регистрации требуются специальные методы.

1. Описание лабораторной работы и метода измерений

Установка состоит из призмного спектрографа (монохроматор УМ-2) и двух источников излучения: ртутной и водородной газоразрядных ламп.

Принципиальная схема регистрации спектрального состава излучения призмным спектрографом УМ-2, предназначена для изучения спектра излучения в видимой области.



Рисунок 2 – Фото установки

Спектром называется совокупность длин волн (или частот) в излучении исследуемого источника света.

Для изучения спектра в призмённых приборах используются явление дисперсии, то есть зависимость показателя преломления вещества от длины волны (или частоты) излучаемого света.

На рисунке 3 показано устройство призмённого спектрографа (схематический вид сверху)

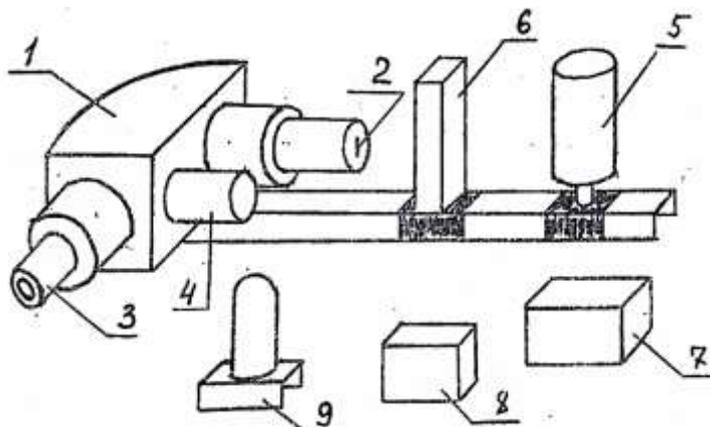


Рисунок 3 – Схема установки

Свет от источника S проходит через узкую щель 1, через линзу 2 и попадает на призму 3, преломляющую лучи разных длин волн на разные углы и направляющую их на линзу 4.

Линзы 2 и 4 формируют в фокальной плоскости 5 изображение входной щели в виде вертикальной окрашенной линии, которая называется линией спектра.

Эти спектральные линии можно наблюдать в окуляр 6 и совмещать с индикатором – вертикальным тонким указателем в фокальной плоскости прибора, совмещая центр линии с его вершиной.

Для совмещения линий спектра с индикатором призма поворачивается с помощью передаточного механизма, соединённого с регулятором настройки спектра. Этот регулятор представляет собой вращающийся барабан, на котором нанесена спиральная шкала делений, отсчёт по шкале выполняется посредством специального указателя, движущегося по спиральной канавке при вращении барабана – регулятора настройки спектра.

Для спектральных измерений должна выполняться предварительная градуировка шкалы барабана с помощью эталонных спектров, в качестве которых обычно используются атомные спектры ртути или железа в излучении от газоразрядных источников света.

Примечание: при точных научных исследованиях ширина входной щели обычно равна сотым долям миллиметра; для более грубых измерений ширину щели увеличивают до десятых долей миллиметра.

Длины волн регистрируемого человеческим глазом излучения находятся в интервале от 400 нм до 750 нм ($1\text{нм}=10^{-9}\text{ м}$)

Для иллюстрации принципа действия призмного спектрографа рассмотрим три примера:

а) если входная щель освещается монохроматическим источником, то есть излучающим только на одной длине волны, то в окуляре будет единственное изображение входной щели – одна линия.

б) если входная щель освещается источником дискретного спектра, включающего в себя, например, три длины волны; $\lambda_1=680\text{нм}$, $\lambda_2=540\text{нм}$, $\lambda_3=490\text{нм}$, то в окуляре будут видны три разделённые линии (красного, зелёного и голубого цвета)

в) при освещении входной щели солнечным светом, имеющим непрерывный (сплошной) спектр, в окуляре будут видны линии, примыкающие друг к другу и образующие сплошную радужную полосу, окрашенную во все цвета от фиолетового до красного.

В данной лабораторной работе для градуировки шкалы барабана в качестве эталона используется атомный спектр ртути.

Примечание. Видимая часть спектра ртути содержит около 40 длин волн, соответствующих переходам электронов атомов ртути с разных энергетических уровней на более низкие. В таблице 1 указаны только 12 округленных значений длин волн основных линий спектра.

Таблица 1

Ртутная лампа			Водородная лампа		
Цвет линии ртути	Длина волны $\lambda_{\text{рт. нм.}}$	Показания барабана $N_{\text{рт дел.}}$	Цвет линии водорода	Показания барабана $N_{\text{в дел.}}$	Длина волны $\lambda_{\text{в. нм.}}$
Фиолетовый	405		Фиолетовый		
Фиолетовый	408				
Фиолетовый	411				
Синий (яркая)	435				
Голубой (ср. яркость)	492		Голубой		
Зеленый (ярк.)	546				
Желтый (ярк.)	578				
Красный	612		Красный		
Красный	623				
Красный	672				
Красный	691				
Красный	709				

Некоторые яркие линии образованы несколькими энергетическими переходами, которым соответствуют близкие длины волн. Например, ярко-жёлтая линия спектра (округленная длина волны $\lambda = 578\text{ нм}$) образована двумя

энергетическими переходами и при малой ширине входной щели эту линию можно “расщепить” на 2 линии $\lambda = 577$ нм и $\lambda = 579$ нм.

Ярко-синяя линия ($\lambda = 435$ нм – округлённая) образована четырьмя энергетическими переходами и может быть соответственно расщеплена на 4 линии в приборах с большой дисперсией. (В монохроматоре УМ-2 эта линия расщепляется на 3 линии).

Сплошной фон на некоторых участках спектра объясняется излучением молекул примесных элементов и раскалённых электродов внутри ламп.

2. Порядок выполнения работы

1. Как уже было описано в части 1 для изучения спектра атомов водорода вначале надо провести градуировку монохроматора.

1.1.1. Отсчетный барабан монохроматора переведите в среднее положение и установите входную щель $d = (0,1 \div 0,2)$ мм. Установите ртутную лампу на расстоянии $(5 \div 10)$ см от входной щели.

1.1.2. Подключите блок питания к сети переменного тока тумблером «Вкл». Входное окно кожуха ртутной лампы должно осветиться голубым светом. Если лампа не выключилась, нажмите кнопку «Пуск».

1.1.3. Плавно вращая отсчетный барабан и наблюдая в окуляр 3, установите последовательно спектральные линии ртути напротив указателя так, чтобы его острие оказалось в центре линии. Сделайте отсчеты по барабану и занесите значения в подготовленную таблицу с указанными длинами волн.

После этого выключите ртутную лампу и отключите блок питания от сети.

2. Изучение спектра водородной лампы.

2.2.1. Поставьте на оптическую скамью водородную лампу около входной щели вплотную к ее тубусу.

2.2.2. Подключите блок питания водородной лампы к сети переменного тока и включите его.

Перед проведением измерений выключите в лаборатории освещение, окна должны быть плотно закрыты шторами.

2.2.3. Выполните измерения для спектра водорода согласно пункту 2.1.2. и занесите в таблицу значения.

Примечание. Так как интенсивность спектральных линий водорода намного меньше интенсивности линий ртути, то для их надежной регистрации необходимо несколько увеличить входную щель и дать глазу адаптироваться. Для этого достаточно некоторое время (~ 1 мин.) до выполнения пункта.

2.3. Смотреть в окуляр, экранируя глаз от внешнего освещения. Рекомендуется также, наблюдая спектр, слегка поворачивать туда – сюда лампу и таким способом добиться максимальной яркости линий.

2.4. Выключите блок питания водородной лампы и отключите его от сети.

3. Обработка результатов измерений

1. Постройте на миллиметровой бумаге формата А4 градуировочную кривую, то есть кривую зависимости числа делений на барабане от длины волны в спектре ртутной лампы $N_{рт} = f(\lambda_{рт})$ для интервала длин волн от 405 нм до 709 нм.

Примечание. Для каждого спектрографа градуировка имеет индивидуальный характер, так как невозможно изготовить абсолютно одинаковые сложные оптические системы. Кроме того, градуировки изменяются с течением времени.

2. По градуировочной кривой определите длины волн наблюдавшихся спектральных линий атомов водорода и занесите их в таблицу.

3. Рассчитайте, используя формулу (13) постоянную Ридберга для каждой линии, включая и четвертую (ненаблюдаемую) линию.

Длина волны четвертой (ненаблюдаемой) линии равна $\lambda = 410$ нм.

Вычислите среднее значение постоянной Ридберга R .

4. По заданию преподавателя может быть рассчитана случайная погрешность определения величины R , для чего принять величину доверительной вероятности $P = 0,9$.

5. Запишите полученный результат в виде $R = \langle R \rangle \pm \Delta R$ (m^{-1}) и сделайте вывод по результатам, полученным в лабораторной работе.

4. Контрольные вопросы

1. Модель атома Резерфорда. Недостатки модели Резерфорда.
2. Постулаты Бора.
3. Вывод обобщённой формулы Бальмера на основе постулатов Бора.
4. Понятие о спектрах. Виды спектров.

Литература

1. Ландсберг, Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг. – Москва: Физматлит, 2003
2. Савельев, И.В. Курс общей физики: учебное пособие: в 3-х т. / И.В. Савельев. – Москва: Наука, 1988. – Т.2
3. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – Москва: Высшая школа, 2003
4. Обработка результатов экспериментальных измерений: [Электронный ресурс]. <https://portal.tpu.ru>

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Таблица 1 – Коэффициенты Стьюдента

$n \backslash p$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
2	1,0	1,38	2,0	3,1	6,3	12,7	31,8	63,7	636,6
3	0,82	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	9,9	31,6
4	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8	12,9
5	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	4,6	8,6
6	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	4,0	6,9
7	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
8	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	3,5	5,4
9	0,71	0,90	1,1	1,4	1,8	2,3	2,9	3,4	5,0
10	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3	4,8
11	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,2	2,8	3,2	4,6
12	0,70	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,1	4,5
13	0,70	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,1	4,3
14	0,69	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,0	4,2
15	0,69	0,87	1,1	1,3	1,8	2,1	2,6	3,0	4,1
20	0,69	0,87	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,9	3,9
30	0,68	0,85	1,1	1,3	1,7	2,0	2,5	2,8	3,7
40	0,68	0,85	1,1	1,3	1,7	2,0	2,4	2,7	3,6
60	0,68	0,85	1,0	1,3	1,7	2,0	2,4	2,7	3,5
120	0,68	0,85	1,0	1,3	1,7	2,0	2,4	2,6	3,4
∞	0,67	0,84	1,0	1,3	1,6	2,0	2,3	2,6	3,3

Учебное издание

Лелюшкина Оксана Михайловна

ФИЗИКА. ОПТИКА И АТОМНАЯ ФИЗИКА

Редактор И. Голубева

Подписано в печать 19.06.2024 г. Формат 60 × 90 1/16.

Уч.-изд. л. 5,4. Печ. л. 4,0. Тираж 30 экз. Заказ № 62.

Издательство федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
"Калининградский государственный технический университет"
236022, Калининград, Советский проспект, 1