

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Омский государственный университет путей сообщения

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ВОЛНОВОЙ ОПТИКЕ,
КВАНТОВОЙ И АТОМНОЙ ФИЗИКЕ

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний
к выполнению лабораторных работ по физике

Омск 2014

УДК 53 (076.5)
ББК 22.2я73
А84

Лабораторный практикум по волновой оптике, квантовой и атомной физике: Методические указания к выполнению лабораторных работ по физике / С. В. Вознюк, С. А. Гельвер, Е. М. Кондриков, С. Н. Крохин, Р. С. Курманов, С. Н. Смердин; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2014. 41 с.

Методические указания включают в себя описание семи лабораторных работ по волновым процессам в физических системах, элементам квантовой и атомной физики. Содержат краткие теоретические сведения в соответствии с программой курса физики технических вузов и описание методики проведения каждой лабораторной работы. В ряде работ приведены дополнительные практические задания, предназначенные для наиболее успевающих студентов,

Предназначены для студентов второго курса всех факультетов очной формы обучения.

Библиогр.: 7 назв. Табл. 13. Рис. 18.

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор В. Е. Митрохин;
канд. физ.-мат. наук, доцент В. Н. Сергеев.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Лабораторная работа 1. Интерференция света	6
Лабораторная работа 2. Дифракция света	9
Лабораторная работа 3. Поляризация света	12
Лабораторная работа 4. Преломление света	15
Лабораторная работа 5. Внешний фотоэффект	19
Лабораторная работа 6. Оптические спектры атомов	26
Лабораторная работа 7. Лазерное излучение и его свойства	31
Библиографический список	39

ВВЕДЕНИЕ

При изучении физических закономерностей важным является их экспериментальное исследование. Лабораторный практикум является обязательной формой изучения материала в курсе общей физики. Лабораторные работы по физике помогут подробнее изучить некоторые физические явления и ознакомиться с физическими приборами, получить практические навыки применения основных методов физических измерений и обработки полученных результатов [1, 2].

Данные методические указания содержат описание семи лабораторных работ. В каждой работе представлены краткие теоретические сведения, которые помогут понять сущность волновых и квантовых проявлений свойств света, разобраться со строением атомов и квантовым механизмом излучения света. Кроме описания обязательных для выполнения лабораторных работ в данных методических указаниях приведены дополнительные практические задания, предназначенные для наиболее успевающих студентов.

При подготовке к выполнению лабораторной работы студенты должны заранее (в часы, отведенные для самостоятельной работы) изучить теорию к данной работе по учебному пособию и конспекту лекций, а также порядок ее проведения по данным методическим указаниям. Теоретический материал разделов «Волновая оптика» и «Квантовая и атомная физика» подробно изложен в учебных пособиях [3 – 5].

При этом в рабочую тетрадь (дневник) необходимо записать название работы и цель ее проведения, указать перечень приборов и принадлежностей, используемых в работе, начертить схему установки, привести рабочие формулы с расшифровкой входящих в них величин и формулы для расчета погрешностей, начертить таблицы для записей результатов измерений.

После получения допуска к выполнению лабораторной работы необходимо ознакомиться с принципом действия приборов, со схемой установки и после проверки схемы преподавателем приступить к выполнению лабораторной работы. Результаты измерений и их инструментальные погрешности записываются в таблицы, которые проверяются и визируются преподавателем.

По результатам измерений в рабочей тетради приводятся расчеты искомых величин и погрешностей; записи конечных результатов вычислений в стандартном виде в соответствии с правилами округления; вывод (краткий анализ полученных результатов и погрешностей, сравнение их с табличными значениями и т. п.).

Полное оформление результатов лабораторной работы должно быть выполнено не позднее чем к следующему лабораторному занятию. Результаты работы необходимо будет защитить на следующем или специально предназначенном для защиты работ занятии. При этом надо быть готовым ответить на контрольные вопросы:

- 1) Как в лабораторной работе достигается поставленная цель?
- 2) Пояснить расчет погрешностей в лабораторной работе.
- 3) Проанализировать полученные результаты.
- 4) Сформулировать определения физических величин и физических законов, используемых в лабораторной работе.

Навыки, полученные студентами в физической лаборатории при использовании измерительными приборами и обработке результатов измерений, пригодятся им в процессе дальнейшего обучения и самостоятельной работы.

Методические указания полностью соответствуют учебным планам «третьего поколения», реализуя компетентностный подход в обучении физике.

Лабораторная работа 1

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Ц е л ь р а б о т ы: измерить длину волны излучения лазера при наблюдении интерференционных полос равного наклона.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: гелий-неоновый лазер, оптическая скамья, рассеивающая линза, плоскопараллельная пластинка, экран, измерительная линейка.

1.1. Сведения из теории

Интерференцией света называется явление наложения двух или нескольких *когерентных волн* друг на друга, при котором наблюдается устойчивое пространственное перераспределение результирующей интенсивности в виде максимумов и минимумов.

Волны, у которых разность фаз не зависит от времени, называются *когерентными волнами* (для этого необходимо, чтобы волны были *монохроматическими* (с одинаковой частотой) и разность начальных фаз у них была постоянной).

Интерференционная картина в плоскопараллельных пластинках (пленках) определяется длиной волны падающего света λ , толщиной пластинки d , ее показателем преломления n , а также углом падения лучей. Каждому углу падения лучей соответствует своя интерференционная полоса. Интерференционные полосы (темные и светлые), возникающие в результате наложения лучей, падающих на плоскопараллельную пластинку под одинаковыми углами, называются полосами равного наклона.

1.2. Описание установки

Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рис. 1.1.

Сгенерированный лазером 1 световой пучок, расходящийся в форме конуса из рассеивающей линзы 2 и освещающий плоскопараллельную стеклянную пластину 4, используется для получения полос равного наклона. Отраженные от передней и задней поверхностей пластины когерентные световые пучки дают интерференционную картину в виде концентрических колец на экране 3.

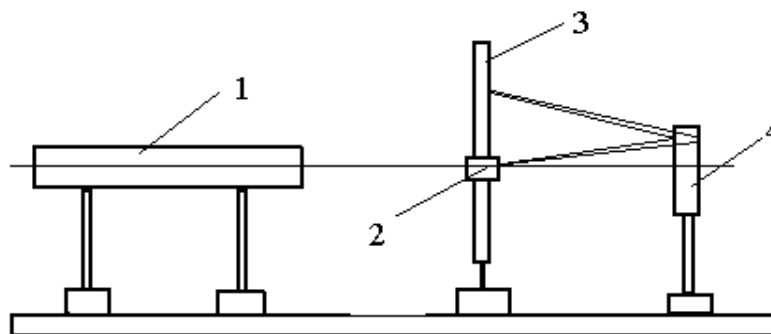


Рис. 1.1. Схема лабораторной установки для наблюдения интерференционных полос равного наклона

1.3. Задание

Получить систему концентрических светлых и темных интерференционных колец на экране 3, произвести все необходимые измерения и рассчитать длину волны лазерного излучения по формуле (1.1):

$$\lambda = \frac{d(R_k^2 - R_m^2)}{4(k - m)nL^2}, \quad (1.1)$$

где d – толщина пластинки (указана на установке);

R_k – радиус темного кольца с номером k ;

R_m – радиус темного кольца с номером m ;

n – показатель преломления стекла, $n = 1,5$;

L – расстояние от рассеивающей линзы до стеклянной пластинки.

1.4. Порядок выполнения работы

1) Собрать установку согласно схеме, приведенной на рис. 1.1.

2) Включить лазер.

3) Поворачивая стеклянную пластину 4, добиться на экране 3 (см. рис. 1.1) появления системы концентрических светлых и темных интерференционных колец.

4) Измерить радиусы R_m темных интерференционных колец, фиксируя каждый раз значение m . Для этого желательно закрепить на экране лист чистой бумаги и карандашом или ручкой отметить местоположение колец.

5) Измерить расстояние L от экрана с рассеивающей линзой до стеклянной пластинки.

6) Результаты измерений записать в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Результаты измерений параметров
по интерференционным полосам равного наклона

d , мм	L , мм	n	m	R_m , мм

7) Выключить лазер.

8) Произвести оценочный (приблизительный) расчет длины волны по формуле (1.1), приняв значение m равным номеру первого измеренного темного кольца, k – номеру последнего измеренного темного кольца. Результаты расчета подписать у преподавателя.

9) Рассчитать по формуле (1.1) еще четыре раза длину волны λ , комбинируя значения m и k таким образом, чтобы разность $k - m$ была максимально возможной.

10) Выполнить математическую обработку полученных значений длины волны в соответствии с методикой расчета погрешностей косвенных измерений (как невоспроизводимые измерения) [1].

11) Записать окончательный результат (с учетом правил округления)

12) Сравнить полученное значение длины волны излучения лазера с табличным значением ($\lambda = 633 \text{ нм}$) и сделать вывод.

Лабораторная работа 2

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Ц е л ь р а б о т ы: определить длину волны излучения лазера с помощью дифракционной решетки.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: гелий-неоновый лазер, оптическая скамья, дифракционная решетка, экран, измерительная линейка.

2.1. Сведения из теории

Дифракцией света называется явление отклонения света от прямолинейного направления распространения при прохождении его вблизи препятствий. Благодаря дифракции свет попадает в область геометрической тени, огибает препятствия.

Дифракцию можно наблюдать на дифракционной решетке – прозрачной пластинке с нанесенными на нее параллельными непрозрачными полосами. Дифракционная картина на экране определяется как результат взаимной интерференции волн, идущих от всех щелей, т. е. *в дифракционной решетке осуществляется многолучевая интерференция* когерентных дифрагированных пучков света, идущих от всех щелей.

Количество полос, приходящееся на единицу длины решетки, n связано с постоянной (периодом) дифракционной решетки d соотношением $d = 1 / n$.

Положение дифракционных максимумов на экране (рис. 2.1) можно вычислить по формулам:

$$d \sin \varphi_m = \pm m \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots; \quad (2.1)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_m = \frac{\Delta x_m}{2L}, \quad (2.2)$$

где φ_m – угол дифракции – угол отклонения лучей от первоначального направления и попадания на экран в точку с максимумом m ;

m – номер максимума на экране ($m = 0$ – нулевой или центральный максимум);

Δx_m – расстояние на экране между максимумами одного порядка с номером m ;

L – расстояние от дифракционной решетки до экрана.

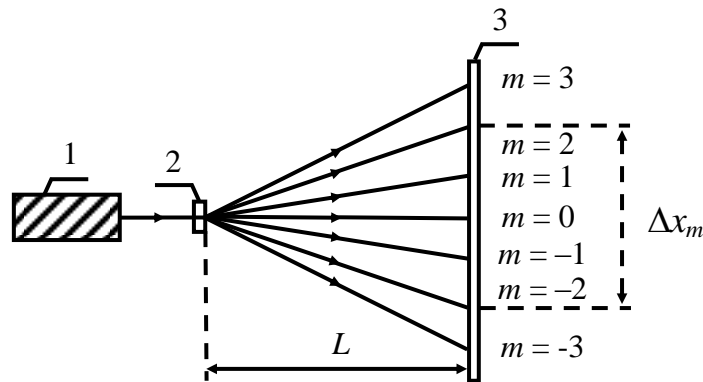


Рис. 2.1. Схема лабораторной установки для наблюдения дифракционной картины, полученной с помощью дифракционной решетки

2.2. Описание установки

Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рис. 2.1 (вид сверху). Дифракционная картина наблюдается на экране 3 при прохождении через дифракционную решетку 2 практически параллельного светового пучка, выходящего из лазера 1.

После включения лазера необходимо установить дифракционную решетку перпендикулярно оси светового пучка, выходящего из лазера. Для этого решетку поворачивают так, чтобы световой блик, отраженный назад к лазеру от плоскости решетки, попал точно на середину выходного окна лазера.

Ввиду монохроматичности лазерного излучения на экране наблюдаются дифракционные максимумы красного цвета.

Максимумы располагаются на экране вдоль горизонтальной прямой, перпендикулярной пучку, симметрично относительно центрального (нулевого) максимума. Номера порядков отсчитываются в обе стороны от центрального максимума: ближние к нему считаются первыми, следующие – вторыми и т. д. Под расстоянием Δx_m между дифракционными максимумами понимают расстояние между серединами наблюдаемых светящихся полос.

2.3. Задание

Получить на экране дифракционные максимумы различных (положительных и отрицательных) порядков (систему светящихся полос), произвести все необходимые измерения и рассчитать длину волны лазерного излучения по формуле:

$$\lambda \approx \frac{\Delta x_m}{2mnL}. \quad (2.3)$$

2.4. Порядок выполнения работы

- 1) Включить лазер и установить дифракционную решетку так, чтобы ее плоскость была перпендикулярна лазерному лучу.
- 2) Измерить расстояние L от плоскости решетки до экрана.
- 3) Измерить расстояние Δx_m для первых трех максимумов.
- 4) Результаты измерений записать в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Результаты измерения параметров
по дифракции света на решетке

m	Δx_m , мм	L , мм	N , мм ⁻¹

5) Изменить расстояние L от плоскости решетки до экрана и еще раз выполнить задания п. 2 – 4.

6) Вычислить для каждого значения Δx_m длину волны λ по формуле (2.3) и результаты расчета подписать у преподавателя. Значение n указано на дифракционной решетке.

7) Произвести математическую обработку полученных значений длины волны λ в соответствии с методикой расчета косвенных измерений (как невоспроизводимые измерения) [1].

8) Записать окончательный результат (с учетом правил округления в стандартной форме).

9) Сравнить полученное значение длины волны излучения лазера с табличным значением ($\lambda = 633$ нм) и сделать вывод.

2.5. Дополнительное задание

Если условия проведения эксперимента позволяют предположить, что $\sin \varphi_m \cong \operatorname{tg} \varphi_m$, то зависимость $x_m = f(m)$ является линейной, что позволяет методом наименьших квадратов определить длину волны излучения лазера. Для выполнения этого задания рекомендуем ознакомиться с материалом, изложенным в методических указаниях [2], и провести необходимые действия.

Лабораторная работа 3

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Ц е л ь р а б о т ы: изучить свойства поляризованного света, проверить справедливость закона Малюса.

Приборы и принадлежности: лампа накаливания, оптическая скамья, поляроид, люксметр.

3.1. Сведения из теории

Поляризацией света называется явление упорядочивания колебаний вектора напряженности электрического поля и напряженности магнитного поля световой волны при прохождении света сквозь некоторые вещества или при отражении светового потока.

Плоскость поляризации – плоскость, в которой совершает колебания световой вектор (вектор напряженности электрического поля).

Квант света, излученный атомом, всегда плоско поляризован. Однако излучение макроскопического источника света (электрической лампочки, Солнца, свечи) является суммой излучения огромного числа атомов. Каждый из атомов излучает квант примерно за 10^{-8} секунды, и если все атомы будут излучать свет с различной поляризацией, то поляризация всего пучка будет меняться на протяжении таких же промежутков времени. Поэтому в естественном свете все эффекты, связанные с поляризацией, усредняются, и его называют неполяризованным.

Для получения поляризованного света применяют оптические устройства, которые называют *поляризаторами*. Поляризаторы пропускают колебания светового вектора, которые совершаются в плоскости, называемой *плоскостью пропускания поляризатора*, и задерживают колебания светового вектора, перпендикулярные этой плоскости. Действие поляризаторов может быть основано на различных оптических явлениях – отражение света от диэлектриков под уг-

лом Брюстера (стопа Столетова), двойное лучепреломление (призма Николя) и дихроизм.

Поляризаторы, действие которых основано на явлении дихроизма, называются *поляроидами*. Поляроиды обычно представляют собой тонкие пластиковые пленки с введенными в них одинаково ориентированными кристалликами дихроичного вещества.

Если на пути линейно поляризованного света с интенсивностью I_0 поставить поляризатор (называемый в этом случае анализатором) и если плоскость поляризации этой волны образует с плоскостью пропускания поляризатора угол α , то интенсивность света I , прошедшего через анализатор, определяется *законом Малюса*:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha. \quad (3.1)$$

Из этого закона следует, что интенсивность света, прошедшего через анализатор, изменяется по закону $\cos^2 \alpha$ и периодически будет проходить через максимумы и минимумы.

3.2. Описание установки

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3.1.

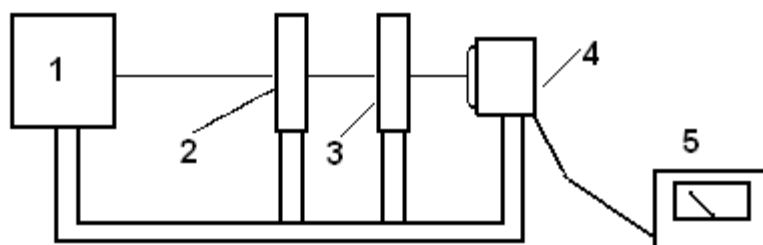


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки для исследования свойств линейно поляризованного света

Лампа накаливания 1, укрепленная на установке, излучает естественный неполяризованный свет. Вышедший из лампы световой пучок попадает на поляроид 2, выполняющий функцию поляризатора света. Свет, прошедший через поляроид 2, становится плоско поляризованным. Установка содержит также поляроид 3, выполняющий функцию анализатора света. Корпус поляроидов снабжен шкалой от 0 до 360°. Поляроиды можно поворачивать в плоскости, перпендикулярной оптической оси установки. Выходящий из поляроида 3 свет попадает на

фотоприемник 4 люксметра. При повороте поляроидов изменяется интенсивность света, попадающего на фотоприемник. Сигнал с фотоприемника регистрируется измерительным прибором 5, который предназначен для измерения освещенности с непосредственным отсчетом по шкале в люксах. Так как освещенность пропорциональна интенсивности световой волны, то по показаниям люксметра можно определить, как интенсивность световой волны зависит от угла поворота поляроида.

3.3. Задание

Произвести измерение углов поворота поляроида и соответствующей освещенности, и экспериментально проверить справедливость закона Малюса (3.1).

3.4. Порядок выполнения работы

1) Включить лампу.

2) Установить поляроид 2 в положение ноль градусов по шкале, расположенной на корпусе поляроида. Вращая поляроид 3, установить максимальное значение показаний люксметра. Это будет соответствовать нулевому отсчету шкалы градусов поляроида 2. Если шкалы люксметра недостаточно или отклонение стрелки прибора мало, то следует перейти на более чувствительный диапазон измерений люксметра.

3) Прикрыть рукой световое излучение. Оценить паразитную засветку фотоприемника и, если засветка больше одного деления шкалы, ее следует вычитать из дальнейших результатов измерения освещенности.

Таблица 3.1

Экспериментальные результаты проверки закона Малюса

Угол α , град	0	15	30	45	60...		360
Освещенность E , лк							

4) Поворачивая поляроид 2 каждый раз на 15° в интервале от 0 до 360° , произвести измерение углов и соответствующей освещенности. Результаты измерений занести в табл. 3.1.

5) Построить график зависимости освещенности E от угла поворота α . Поскольку освещенность пропорциональна интенсивности света, прошедшего

через анализатор, полученный график будет также описывать зависимость $I = I_0 \cos^2 \alpha$ с точностью до постоянного множителя.

6) Убедиться в выполнимости закона Малюса. Для этого на построенном ранее графике зависимости освещенности E от угла поворота α нанести точки для интенсивности света, прошедшего через поляроид, рассчитанные по формуле (3.1). Величину I_0 принять равной максимальному значению освещенности из табл. 3.1. Значения угла α взять из интервала $0 - 90^\circ$.

7) Сделать соответствующий вывод.

Лабораторная работа 4

ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

Цель работы: определить показатель преломления одного из сортов стекла: легкого (крон) или тяжелого (флинт).

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: гониометр, призма из стекла, светодиод, источник питания.

4.1. Сведения из теории

По электромагнитной теории свет – это электромагнитная волна, которая распространяется в вакууме со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, а в любой другой прозрачной среде ее скорость меньше. Скалярная физическая величина, показывающая, во сколько раз уменьшается скорость света в данной среде по сравнению с вакуумом, называется *показателем преломления*.

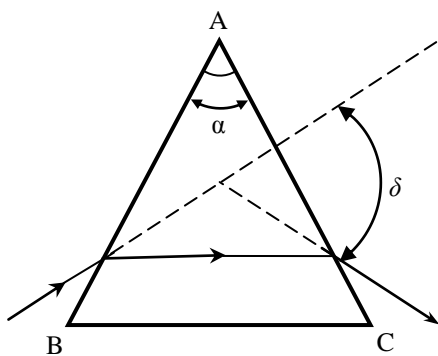


Рис. 4.1. Ход лучей в призме

В данной лабораторной работе показатель преломления стекла определяют, измеряя преломляющий угол призмы α – угол между гранями АВ и АС призмы – и угол наименьшего отклонения

лучей δ от первоначального направления после преломления в призме (рис. 4.1).

Зная значения α и δ , по формуле

$$n = \frac{\sin \frac{\alpha + \delta}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} \quad (4.1)$$

определяют показатель преломления стекла призмы.

4.2. Описание установки

Экспериментальная установка содержит гониометр, основными частями которого являются коллиматор 1, зрительная труба 2 и предметный столик 3.

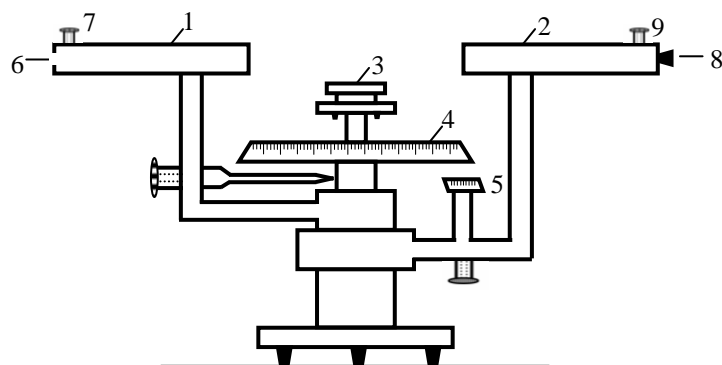


Рис. 4.2. Схема гониометра

Коллиматор 1 скреплен со шкалой 4 и неподвижен относительно оси гониометра. Зрительная труба может вращаться около этой же оси. На одной оси со шкалой закреплен подвижный предметный столик, на который устанавливается исследуемая призма.

Шкала разделена на 360° (большие деления). В каждом большом делении шкалы содержатся два малых – по $30'$. Вдоль шкалы вместе со зрительной трубой движется жестко скрепленный с ней нониус 5, на котором тридцать делений. Следовательно, цена деления нониуса – $1'$.

Коллиматор 1 имеет на одном конце вертикальную щель 6, ширина которой регулируется винтом 7. Из коллиматора выходит параллельный пучок лучей.

Зрительная труба 2 имеет вертикальную нить, называемую визирной нитью, которая должна быть отчетливо видна через окуляр 8.

Для освещения щели коллиматора при установке зрительной трубы на «бесконечность» и при определении преломляющего угла призмы α используют квазимонохроматическое излучение светодиода.

Установка зрительной трубы на бесконечность осуществляется следующим образом: осветив щель коллиматора, поворачивают зрительную трубу так, чтобы ее ось была направлена по оси коллиматора. Вращая окуляр 8, нужно добиться четкого изображения нити, а затем, вращая винт 9, добиться четкого изображения щели.

4.3. Задание

Определить преломляющий угол α и угол наименьшего отклонения δ призмы и по формуле (4.1) рассчитать показатель преломления стекла призмы.

4.4. Порядок выполнения работы

Упражнение 1. Определение преломляющего угла призмы α .

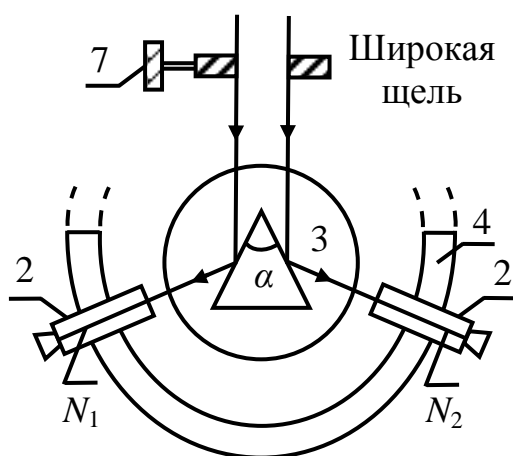


Рис. 4.3. Схема экспериментальной установки для нахождения преломляющего угла призмы

1) Включить источник света и установить винтом 7 (рис. 4.3) максимальную ширину щели коллиматора.

2) Поместить на предметный столик гониометра 3 призму из испытываемого стекла преломляющим углом к коллиматору так, как показано на рис. 4.3.

3) На преломляющие грани призмы направить параллельный пучок лучей.

4) Измерить преломляющий угол призмы α , для чего необходимо, освещая щель коллиматора светом светодиода, поворачивать зрительную трубу 2 влево (см. рис. 4.3) до тех пор, пока *отраженные* лучи не попадут в поле зрения. Вертикальную нить окуляра установить на середину светящейся полоски и сделать отсчет N_1 по шкале 4.

5) Зрительную трубу повернуть вправо (см. рис. 4.3) и, повторив действия п. 4, сделать отсчет N_2 по шкале 4.

6) Результаты измерений записать в табл. 4.1.

Т а б л и ц а 4.1

Результаты измерений преломляющего угла призмы

Отсчеты по лимбу положения трубы		Преломляющий угол
N_1 , град	N_2 , град	α , град

7) Рассчитать преломляющий угол призмы по формуле: $\alpha = \frac{N_2 - N_1}{2}$.

8) Провести многократные измерения и их математическую обработку.

Упражнение 2. Определение угла наименьшего отклонения δ .

1) Включить источник света и винтом 7 (рис. 4.4) установить узкую ширину щели.

2) Установить зрительную трубу против щели коллиматора и сделать отсчет N_0 по шкале 4.

3) Установить призму на предметный столик (см. рис. 4.4) так, чтобы линия ее основания составляла с осью коллиматора ОМ острый угол ВОМ (положение столика при этом должно быть таким, чтобы его можно было поворачивать по часовой стрелке и против нее).

4) Расположить зрительную трубу так, чтобы было видно изображение щели (см. рис. 4.4).

5) Поворачивать ручкой 10 предметный столик в таком направлении, чтобы изображение щели двигалось к направлению неотклоненного луча, а дойдя до некоторого положения, останавливалось и начинало двигаться в противоположном направлении. Момент остановки изображения щели соответствует отклонению лучей на угол наименьшего отклонения δ . Разность отсчетов по шкале неотклоненного положения трубы (против коллиматора) N_0 и показаний при угле наименьшего отклонения N_1 и есть $\delta = N_1 - N_0$.

6) Результаты измерений занести в табл. 4.2.

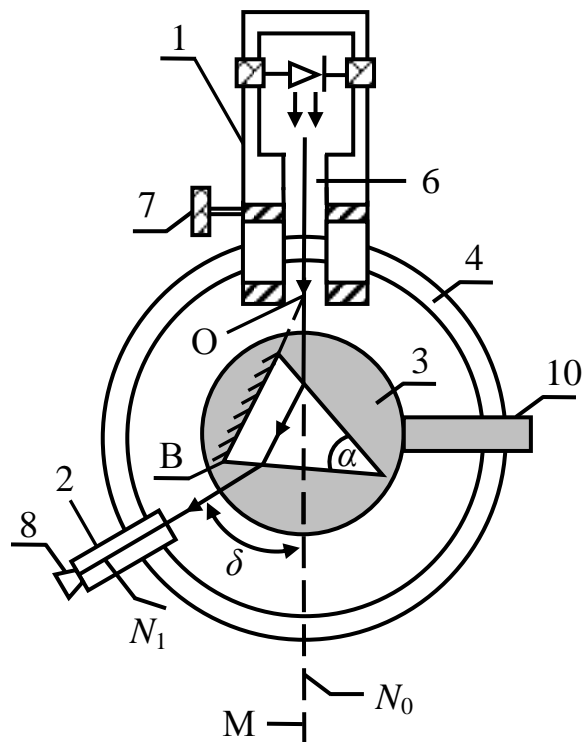


Рис. 4.4. Схема экспериментальной установки для определения наименьшего угла отклонения

Т а б л и ц а 4.2

Результаты измерений угла наименьшего отклонения

Отсчеты по лимбу положения трубы		Угол наименьшего отклонения
N_0 , град	N_1 , град	α , град.

7) Провести многократные измерения и их математическую обработку.

8) Определить показатель преломления призмы по формуле (4.1) и произвести математическую обработку результатов измерений.

9) Сравнить полученное значение показателя преломления стекла призмы с его табличным значением (для легкого стекла (крон) $n = 1,51$; для тяжелого стекла (флинт) $n = 1,71$) и сделать вывод.

Лабораторная работа 5

ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ

Цель работы: проверить справедливость первого и второго законов Столетова.

Приборы и принадлежности: вакуумный фотоэлемент, галогенная лампа, набор светофильтров, электронный блок (микроамперметр, вольтметр, источник питания и реостаты).

5.1. Сведения из теории

Под *внешним фотоэффектом* понимают явление вырывания электронов из твердых и жидких тел под действием электромагнитного излучения.

Явление внешнего фотоэффекта хорошо описывается тремя законами Столетова:

- 1 – фототок насыщения пропорционален световому потоку;
- 2 – скорость вылетевших электронов не зависит от интенсивности света, а зависит от его частоты;
- 3 – для каждого физического тела существует красная граница фотоэффекта, т. е. такая частота ν_0 (или длина волны λ_0), начиная с которой наблюдается это явление.

Эйнштейн, опираясь на гипотезу Планка, что излучение или поглощение электромагнитной энергии происходит только порциями, и закон сохранения и превращения энергии предложил уравнение, описывающее внешний фотоэффект:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}. \quad (5.1)$$

В уравнении (5.1):

$W = h \cdot \nu$ – энергия кванта;

h – постоянная Планка;

ν – частота электромагнитной волны;

$A_{\text{вых}}$ – работа выхода электрона;

$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$ – максимальная кинетическая энергия электрона.

Из уравнения (5.1) следует, что явление внешнего фотоэффекта будет наблюдаться только при условии:

$$\nu \geq \nu_0 = \frac{A_{\text{вых}}}{h} \quad (5.2)$$

и что максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона зависит не от интенсивности света, а от его частоты и работы выхода $A_{\text{вых}}$. При уменьшении частоты света скорость выбитых электронов уменьшается и при некоторой частоте ν_0 становится равной нулю. Частоту ν_0 , ниже которой фотоэффект у данного металла не наблюдается, называют красной границей фотоэффекта (или *граничной частотой фотоэффекта*).

На основе явления внешнего фотоэффекта созданы физические приборы разных типов, получившие название фотоэлементов, нашедшие применение в многочисленных технических устройствах.

Фотоэлементы разных типов отличаются друг от друга спектральной и вольт-амперной характеристиками. *Спектральная характеристика* определяет область спектра, в которой может применяться фотоэлемент.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) фотоэлемента (рис. 5.1) выражает зависимость фототока I от разности потенциалов U между электродами. С увеличением U фототок растет до определенного предельного значения I_n – тока насыщения, который согласно первому закону Столетова пропорционален световому потоку Φ , падающему на катод:

$$I_n \sim \Phi. \quad (5.3)$$

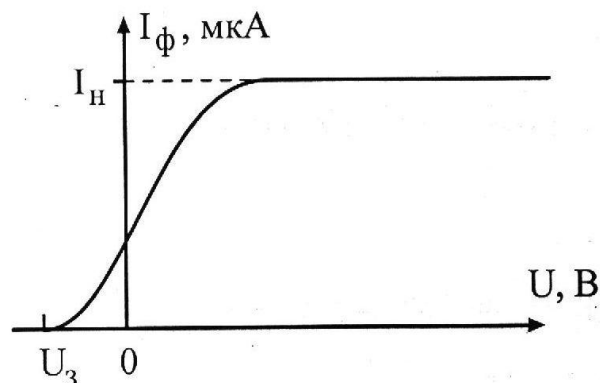


Рис. 5.1. Вольт-амперная характеристика фотодиода

Фототок полностью прекращается при создании задерживающего напряжения U_3 обратной полярности по сравнению с ускоряющим. При $U = U_3$ кинетическая энергия всех фотоэлектронов, движущихся к аноду, снижается до нуля под действием электрического поля:

$$eU_3 = \frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2}. \quad (5.4)$$

В соответствии с уравнениями (5.1) и (5.4) имеем:

$$U_3 = \frac{h}{e}\nu - \frac{A_{\text{вых}}}{e}. \quad (5.5)$$

Согласно уравнениям (5.4) и (5.5) задерживающее напряжение, а следовательно, и скорость вылетевших фотоэлектронов зависят только от частоты электромагнитного излучения и не зависят от его интенсивности.

Соотношение (5.5) указывает на возможность экспериментального определения работы выхода $A_{\text{вых}}$ и постоянной Планка h по зависимости задерживающего напряжения U_3 от частоты ν падающего на фотоэлемент света. Согласно урав-

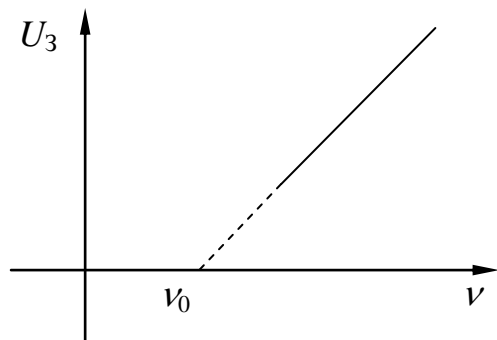


Рис. 5.2. Зависимость задерживающей разности потенциалов от частоты падающего электромагнитного излучения

нению (5-5) зависимость $U_3 = f(\nu)$ представляет собой прямую линию (рис. 5.2).

Этот способ определения A основан на экстраполяции графика до значения $U_3 = 0$.

Проверка первого закона Столетова состоит в построении графика зависимости фототока насыщения I_n от светового потока Φ , падающего на фотокатод. При изменении накала лампы изменяется и спектральный состав света, поэтому для изменения Φ в работе изменяют расстояние от лампы до фотоэлемента. Если лампу считать изотропным источником света с силой света I_0 , то на расстоянии r от нее освещенность

$$E = \frac{I_0}{r^2}. \quad (5.6)$$

Световой поток, падающий на фотокатод с площадью S ,

$$\Phi = E \cdot S = \frac{I_0 S}{r^2}. \quad (5.7)$$

Согласно выражению (5.7) для первого закона Столетова должно выполняться соотношение:

$$\frac{I_{n2}}{I_{n1}} = \frac{r_1^2}{r_2^2}, \quad (5.8)$$

где I_{n2} и I_{n1} – фототоки насыщения при световых потоках Φ_2 и Φ_1 ;

r_2 и r_1 – соответствующие расстояния между источником излучения и фотоэлементом.

5.2. Описание установки

Фотоэффект изучают на установке (рис. 5.3), состоящей из вакуумного фотоэлемента 5 и галогеновой лампы 2, размещаемых на оптической скамье 6, а также цифровых микроамперметра и вольтметра 10 и 11, конструктивно объединенных вместе с реостатами в один электронный блок приборов. Вакуумный фотоэлемент заключен в защитный кожух 4 с окном и представляет собой стеклянный баллон, половина которого изнутри покрыта тонким слоем щелочного металла. Этот слой является катодом фотоэлемента. Анодом служит металлическое кольцо, расположенное в центре баллона. Источником света является галогеновая лампа 2, напряжение на которой может регулироваться ручкой реостата 8а, размещенной в левой части лицевой панели электронного блока. Квaziмонохроматическое излучение получают с помощью светофильтров, закрепленных во вращающейся оправе 3 («центральная» длина волны λ пропускания светофильтра указана под светофильтром, а полосы пропускания светофильтров – на кожухе 4 фотоэлемента). Фототок измеряют цифровым микроамперметром 10. Напряжение на фотоэлементе может изменяться вращением ручек реостатов 8б и 8в и измеряется цифровым вольтметром 11. Для переключения режимов задерживающего и ускоряющего напряжения служит специальный переключатель полярности 7, расположенный в нижней части панели электронного блока.

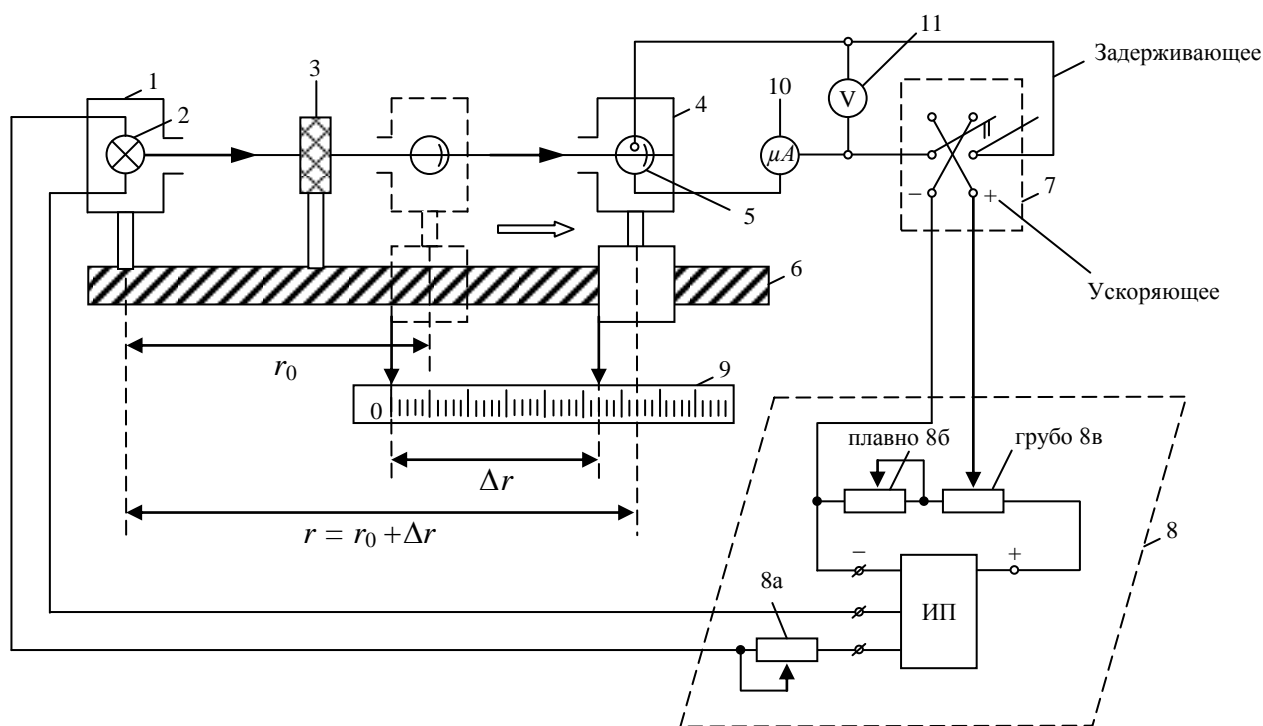


Рис. 5.3. Схема экспериментальной установки

5.3. Задание

Проверить справедливость законов внешнего фотоэффекта.

5.4. Порядок выполнения работы

Упражнение 1. Проверка первого закона Столетова.

1) Поставить перед входом окна кожуха фотоэлемента указанный преподавателем светофильтр. Значения длины волны λ , наименьшее расстояние r_0 между источником света и фотоэлементом занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Зависимость фототока от приложенного к фотоэлементу напряжения при постоянном световом потоке

	$\lambda =$ нм;						$r_0 =$ см		
Напряжение U , В	0	1	2	3	5	7	...	17	19
Фототок I , мкА (при Φ_1) $r_1 =$									
Фототок I , мкА (при Φ_2) $r_2 =$									

2) На оптической скамье расположить входное окно кожуха фотоэлемента на расстоянии 3 – 5 мм от кассеты светофильтров.

3) Включить электронный блок приборов и установить тумблером 7 режим ускоряющего напряжения.

4) Установить потенциометром «накал лампы» 8а максимальный накал галогеновой лампы.

5) Снять зависимость фототока от приложенного к фотоэлементу напряжения. Результаты записать в табл. 5.1.

6) Не меняя светофильтр, увеличить расстояние между источником света и фотоэлементом на 40 – 70 мм и повторить измерения согласно п. 5.

7) Построить графики зависимости $I = f(U)$ для двух значений световых потоков и определить по ним фототоки насыщения.

8) Рассчитать отношения фототоков насыщения и соответствующих квадратов расстояний и убедиться в справедливости соотношения (5.8).

9) Сделать вывод.

Упражнение 2. Проверка второго закона Столетова.

1) По заданию преподавателя установить перед входом окна кожуха фотоэлемента указанный светофильтр (на оптической скамье расположить входное окно кожуха фотоэлемента на расстоянии 3 – 5 мм от кассеты светофильтров).

2) Установить потенциометром «накал лампы» 8а максимальный накал галогеновой лампы.

3) Определить задерживающее напряжение. Для этого вывести в крайнее положение потенциометры 8б и 8в, вращая ручки грубо и плавно против часовой стрелки. При этом значение напряжения на шкале вольтметра 11 должно быть равно нулю (либо очень малым). Затем, медленно вращая ручку потенциометра 8б плавно и наблюдая за показаниями микроамперметра 10, добиться таких его показаний, когда на цифровом табло будут «мигать» значения фототока 0,00 и 0,01. При этом напряжение на шкале вольтметра будет соответствовать задерживающему напряжению. Величину задерживающего напряжения и расстояние, на котором находится фотоэлемент, записать в табл. 5.2.

4) Измерить пять значений задерживающего напряжения, изменяя расстояние между фотоэлементом и лампой с шагом, указанным преподавателем, заноса данные в табл. 5.2.

Т а б л и ц а 5.2

Зависимость задерживающего напряжения от расстояния

$\lambda =$					
Расстояние r , м					
Задерживающее напряжение U_z , В					

5) Установить другой светофильтр и провести аналогичные измерения согласно п. 1 – 4.

6) Проанализировать полученные результаты и сделать вывод.

5.5. Дополнительное задание

Определить постоянную Планка и работу выхода электрона из материала катода.

5.6. Порядок выполнения задания

1) На оптической скамье расположить входное окно кожуха фотоэлемента на расстоянии 3 – 5 мм от кассеты светофильтров.

2) Установить максимальный накал галогеновой лампы.

3) Вывести потенциометры, регулирующие напряжение на фотоэлементе, на ноль, вращая ручки грубой и плавной регулировок против хода часовой стрелки.

4) Тумблер на электронном блоке включить в режим задерживающего напряжения.

5) Поставить перед окном кожуха фотоэлемента светофильтр с максимальной длиной волны пропускания. Длину волны и ширину полосы пропускания светофильтра записать в табл. 5.3.

Т а б л и ц а 5.3

Зависимость задерживающего напряжения от длины волны (или частоты) падающего на фотоэлемент квазимонохроматического света

Цвет светофильтра							
λ , нм							
$\nu \times 10^{14}$, Гц							
$2\Delta\lambda$, нм							
$\nu_{\max} \times 10^{14}$, Гц							
$\nu_{\min} \times 10^{14}$, Гц							
Задерживающее напряжение U_3 , В							

6) Медленно вращая ручки плавной и грубой регулировок, уменьшить фототок до нуля. Полученное значение задерживающего напряжения записать в табл. 5.3.

7) Заменить светофильтр очередным с меньшей длиной волны и выполнить действия, указанные в п. 5 и 6. Аналогично определить задерживающее напряжение всех оставшихся светофильтров. Результаты измерений занести в табл. 5.3.

8) Рассчитать среднюю, минимальную и максимальную частоту полос пропускания по формулам:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}; \quad (5.9)$$

$$\nu_{\max} = \frac{c}{\lambda - \Delta\lambda}; \quad (5.10)$$

$$\nu_{\min} = \frac{c}{\lambda + \Delta\lambda}, \quad (5.11)$$

где c – скорость света; ν и λ – средняя частота и длина волны пропускания светофильтра; $2\Delta\lambda$ – ширина полосы пропускания.

Данные занести в табл. 5.3.

9) Построить зависимость задерживающего напряжения от частоты пропускания светофильтра, здесь же отложить полосы пропускания светофильтров (рис. 5.4).

10) Так как зависимость задерживающего напряжения от частоты носит линейный характер (см. формулу (5.5)), провести прямую линию с минимальным углом наклона к оси частот, проходящую через все полосы пропускания, аналогично начертить прямую линию с максимальным углом наклона (см. рис. 5.4).

11) Используя построенные графики, определить максимальное и минимальное значение постоянной Планка по формуле $h = \frac{\Delta U}{\Delta \nu} e$, которая следует из уравнения (5.5).

12) Вычислить погрешность измерения постоянной Планка.

13) Сравнить полученное значение постоянной Планка с ее табличным значением ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с) и сделать вывод.

14) Используя графики зависимости задерживающего напряжения от частоты, определить значения частоты ν_0 , при которых $U_z = 0$ (экстраполируя зависимости графиков задерживающего напряжения от частоты до пересечения с осью частот).

15) Найти среднее значение ν_0 .

16) Рассчитать работу выхода электрона из материала катода фотоэлемента по формуле (5.2).

17) Рассчитать погрешность измерения и сделать вывод.

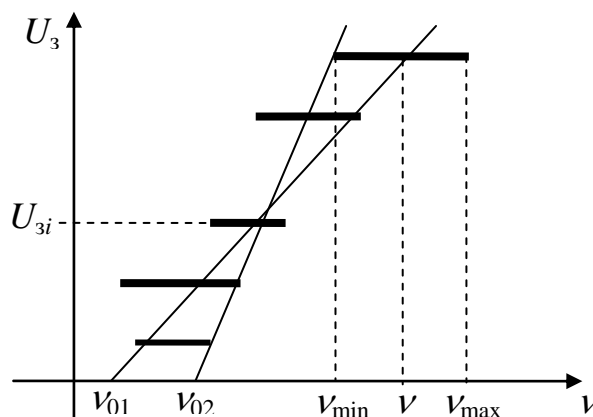


Рис. 5.4. График зависимости задерживающего напряжения от частоты с максимальным и минимальным углами наклона

Лабораторная работа 6

ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ АТОМОВ

Ц е л ь р а б о т ы: определить длину волн видимой части спектра излучения атомов водорода и рассчитать постоянную Ридберга.

Приборы и принадлежности: монохроматор УМ-2, ртутная лампа, источник питания ртутной лампы, водородная трубка, источник питания водородной трубки, оптическая скамья, собирающая линза.

6.1. Сведения из теории

Все вещества испускают электромагнитное излучение. Спектральный состав излучения веществ весьма разнообразен, но при этом все спектры можно разделить на три типа: сплошной, полосатый и линейчатый.

Непрерывный (сплошной) спектр, как показывает опыт, дают тела, находящиеся в твердом или жидком состоянии, а также сильно сжатые газы.

Полосатые спектры создаются не атомами, а молекулами, не связанными или слабо связанными друг с другом.

Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном состоянии. В этом случае свет излучают атомы, которые практически не взаимодействуют друг с другом, в момент перехода атома из какого-либо возбужденного состояния в состояние с меньшей энергией. Это самый фундаментальный, основной тип спектров.

Длину волн видимых спектральных линий, например, для атомов водорода, можно рассчитать по *обобщенной формуле Бальмера*:

$$\frac{1}{\lambda_{mn}} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (6.1)$$

где λ_{mn} – длина волны спектральной линии, излученной атомом водорода при переходе его из возбужденного состояния с номером m в состояние с номером $n = 2$;

R – постоянная Ридберга, $R = 10973731,77 \text{ м}^{-1}$

В данной лабораторной работе изучается видимая часть спектра атома водорода, принадлежащая серии Бальмера ($n = 2$) и состоящая из наиболее ярких четырех линий: красной ($\lambda = 656 \text{ нм}$, $m = 3$), зелено-голубой ($\lambda = 486 \text{ нм}$, $m = 4$), синей ($\lambda = 434 \text{ нм}$, $m = 5$), фиолетовой ($\lambda = 410 \text{ нм}$, $m = 6$).

6.2. Описание установки

Общий вид лабораторной установки представлен на рис. 6.1. Основной частью установки является монохроматор 1. Источниками света в данной уста-

новке являются ртутная лампа 3 и водородная трубка 2, источники питания ртутной лампы 5 и водородной трубки 6.

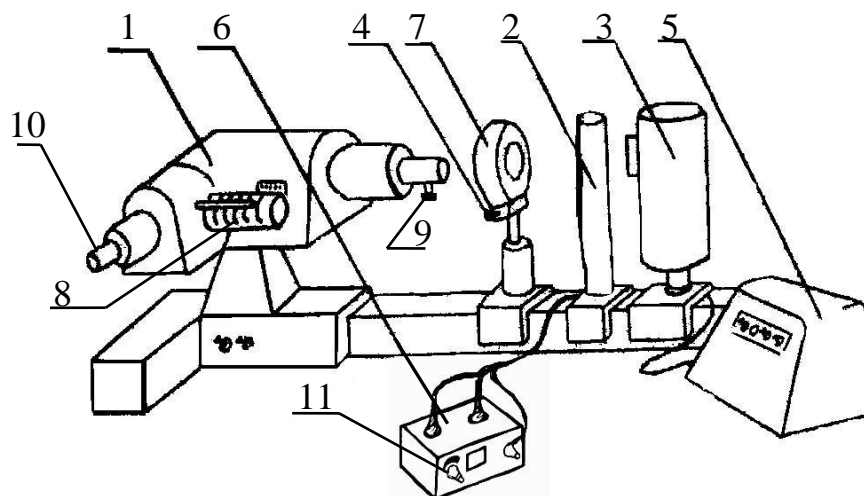


Рис. 6.1. Схема лабораторной установки для изучения оптических спектров

Через объектив 10 зрительной трубы монохроматора можно наблюдать изображение спектра. В поле зрения наблюдателя будет находиться указатель (черная стрелка). Отсчетный барабан 8 монохроматора соединен поворотным механизмом с его диспергирующей призмой. При вращении отсчетного барабана призма поворачивается и в поле зрения появляются различные участки исследуемого спектра. На барабане нанесены деления – градусы, цена малого деления шкалы – 2° . Вращая отсчетный барабан, указатель совмещают с наблюдаемой спектральной линией и снимают показания на барабане по указателю, скользящему по спиральной канавке.

При выполнении указанных действий необходимо следить за указателем (слегка придерживая его пальцем), чтобы он не перескочил на соседнюю канавку.

6.3. Задание

Проградуировать монохроматор, т. е. установить соответствие между делениями шкалы барабана и длиной волн света. В качестве источника света следует использовать ртутную лампу. Значения длины волн наиболее ярких спектральных линий ртути с визуальной оценкой их относительной яркости приведены на рис. 6.2.

Определить длину волн видимой части спектра излучения атома водорода и рассчитать постоянную Ридберга по формуле (6.1).



Рис. 6.2. Спектральные линии атомов ртути

6.4. Порядок выполнения работы

Упражнение 1. Градуировка шкалы барабана монохроматора.

1) Убрать водородную трубку 2 (см. рис. 6.1) с оптической скамьи, на которой остаются ртутная лампа 3 и линза 7. **Всякое перемещение ртутной лампы во включенном и в выключенном состоянии запрещается. Ртутная лампа излучает волны и в ультрафиолетовой области, поэтому снимать с нее защитный кожух и защитное стекло запрещается.**

2) Включить источник питания (ЛАТР) и выставить на нем напряжение 220 В. Включить ртутную лампу. Для этого тумблеры «Сеть» и «Лампа ДРШ» на пульте управления необходимо последовательно перевести в положение «Вкл» и нажать на кнопку «Пуск». Если лампа не зажглась, то следует вновь нажать кнопку «Пуск». Через 10 – 15 с после загорания лампы снизить напряжение на ЛАТРе до 150 – 170 В.

3) Для проверки правильности освещения входной щели ее закрывают колпачком или листом белой бумаги. Перемещая линзу 7 по скамье и вращая регулировочный винт 4, получают в центре колпачка равномерно освещенное пятно. Расстояние между монохроматором и лампой установить не менее 50 см. Ширина входной щели (а значит, и ширина спектральных линий) регулируется микрометрическим винтом 9.

4) Наблюдая в окуляр монохроматора спектр ртутной лампы, сопоставить его со стандартным, представленным на рис. 6.2. При нечеткой видимости произвести дополнительную настройку объектива 10 монохроматора или попросить помощи преподавателя.

5) Вращая барабан, произвести отсчеты по шкале барабана, последовательно совмещая с острием указателя спектральные линии ртути от красной до фиолетовой. Результаты измерений записать в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Результаты измерений по спектральным линиям ртути

Номер опыта	Цвет спектральных линий	Длина волны, нм	Отсчет по барабану, град
1	Красный	690	
2	Красный	612	
3	Желтый	579	
4	Желтый	577	
5	Зеленый	546	
6	Голубой	492	
7	Фиолетовый	436	
8	Фиолетовый	405	

6) Поворачивая микрометрический винт 9, немного увеличить ширину щели (чтобы желтые линии излучения ртутной лампы слились в одну широкую) и затем выключить ртутную лампу.

7) По данным табл. 6.1 построить градуировочный график, откладывая по оси ординат значения длины волн в пределах от 400 до 700 нм, а по оси абсцисс – деления шкалы барабана в градусах. При построении графика не следует начинать с нулевых значений.

Упражнение 2. Определение постоянной Ридберга.

1) Установить газоразрядную водородную трубку вплотную к входной щели монохроматора. Обязательно нужно прочитать предупреждения на источнике питания. Регулировочным винтом 11 уменьшить напряжение на источнике питания до нуля, включить источник питания и увеличивать напряжение до момента загорания трубки. После появления свечения трубки наблюдать спектральные линии в окуляр монохроматора.

2) Вращая барабан, совместить с острием указателя красную линию в спектре излучения атома водорода и произвести отсчет по шкале барабана. Результат измерений занести в табл. 6.2.

3) По градуировочному графику определить длину волны красной линии спектра водорода и по формуле (6.1) вычислить значение постоянной Ридберга. Результаты занести в табл. 6.2.

4) Зная длину волны зелено-голубой линии спектра водорода, определить по градуировочному графику примерное показание шкалы барабана монохрома-

тора для данной линии. Это значение выставить по шкале и убедиться в наличии этой линии. Затем снять отсчет по шкале барабана, наведя указатель на линию. Опыт повторить для синей и фиолетовой линий. По графику определить соответствующую длину волн линий. Результаты измерений записать в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Результаты измерений по спектральным линиям водорода

Номер опыта	Цвет спектральных линий	Отсчет по барабану, град	Длина волны по графику, нм	Постоянная Ридберга $R_i, \text{м}^{-1}$
1	Красный			
2	Зелено-голубой			
3	Синий			
4	Фиолетовый			

5) Вычислить значение постоянной Ридберга по формуле (6.1) для остальных линий и провести математическую обработку результатов.

6) Сравнить полученное значение постоянной Ридберга с табличным и сделать вывод.

Лабораторная работа 7

ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО СВОЙСТВА

Ц е л ь р а б о т ы: ознакомиться с принципом действия, конструкцией и основными свойствами излучения газового лазера.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: гелий-неоновый лазер, монохроматор УМ-2, ртутная лампа, источник питания ртутной лампы, оптическая скамья, собирающая линза, дифракционная решетка, экраны, поляроид, люксметр.

7.1. Сведения из теории

Квантовые генераторы представляют собой устройства, в которых электромагнитная волна, проходящая через вещество, увеличивает свою энергию за счет внутренней энергии атомов и молекул этого вещества. Квантовые генераторы, работающие в видимой области спектра, – оптические квантовые генераторы (ОКГ), получили название *лазеров*.

При поглощении электромагнитной энергии атомы вещества переходят из основного энергетического состояния в возбужденное W_m . В возбужденном состоя-

нии атом может находиться очень короткий промежуток времени ($\sim 10^{-8} \div 10^{-9}$ с), по истечении которого самопроизвольно переходит на более низкий энергетический уровень W_n , излучая при этом квант энергии $h\nu = W_m - W_n$. Такое излучение называют *спонтанным* (самопроизвольным).

При спонтанном переходе различные атомы излучают энергию одновременно и независимо друг от друга, поэтому фазы излучаемых ими фотонов не связаны между собой, и направление распространения излучаемого фотона носит случайный характер. Частота излучения различных атомов изменяется в некоторых пределах, допускаемых соотношением неопределенности. Таким образом, спонтанное излучение (излучение обычных источников света – ламп накаливания, дуговых ламп и т. п.) не является строго направленным, монохроматичным, когерентным и поляризованным.

Во внешнем электромагнитном поле переход атомов с верхнего энергетического уровня на нижний происходит значительно быстрее, чем при отсутствии поля, т. е. электромагнитное поле способствует увеличению вероятности излучения атомом кванта энергии. Это дополнительное излучение под действием электромагнитного поля называется *индуцированным* (вынужденным).

Обычно для среды, находящейся в состоянии термодинамического равновесия, наиболее населенным атомами оказывается нижний (основной) уровень, в результате чего при прохождении электромагнитной волны через слой такого вещества толщиной « x » имеет место обычное поглощение энергии и убывание интенсивности волны I (рис. 7.1) по закону:

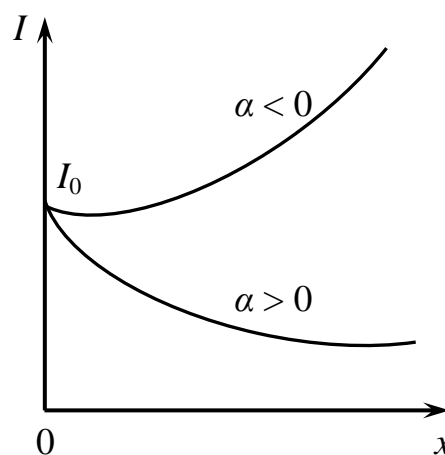


Рис. 7.1. Изменение интенсивности волны при прохождении через вещество

$$I = I_0 e^{-\alpha x}. \quad (7-1)$$

Здесь I_0 – интенсивность падающей волны; α – коэффициент поглощения, зависящий от населенности энергетических уровней. Для таких сред $\alpha > 0$.

Существуют среды, в которых верхний уровень оказывается более населен атомами, чем нижний. Такое состояние является неравновесным, а населенность уровней называется *инверсной* (преимущественной).

В этом случае вынужденные переходы атомов преобладают и поставляют в излучение больше энергии, чем ее теряется в результате актов обычного пог-

лощения. Вследствие этого интенсивность электромагнитной волны при прохождении ее через вещество будет увеличиваться (см. рис. 7.1). Явление протекает так, как если бы коэффициент поглощения α стал отрицательным ($\alpha < 0$).

Вещества, в которых создается инверсная населенность уровней, называются *активными средами*, а процесс создания активной среды называется *накачкой*.

Имеется ряд способов накачки. С этой целью стремятся либо создать избыток атомов на более высоком уровне энергии по отношению к некоторому более низкому, либо искусственно понизить населенность нижнего уровня по отношению к более высокому.

Однако создать значительную инверсию населенностей возбужденного уровня очень трудно из-за малого времени жизни атомов ($\sim 10^{-8} \div 10^{-9}$ с) в таком состоянии.

Советскими физиками Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым было предсказано существование энергетических состояний, время жизни атомов в которых, оказывается, значительно больше ($\sim 10^{-3}$ с), чем в возбужденном состоянии. Такие состояния были названы *метастабильными* (почти стабильными). Существование этих уровней позволяет получить инверсию населенности атомов на них, т. е. создать активную среду.

7.2. Описание установки

Рассмотрим процесс создания активной среды на примере гелий-неонового лазера. Основным элементом гелий-неонового лазера является стеклянная газоразрядная трубка 1 (рис. 7.2), заполненная смесью двух газов: примесного (гелия) и рабочего (неона). Возбуждение газового разряда производится постоянным током от специального генератора накачки 2.

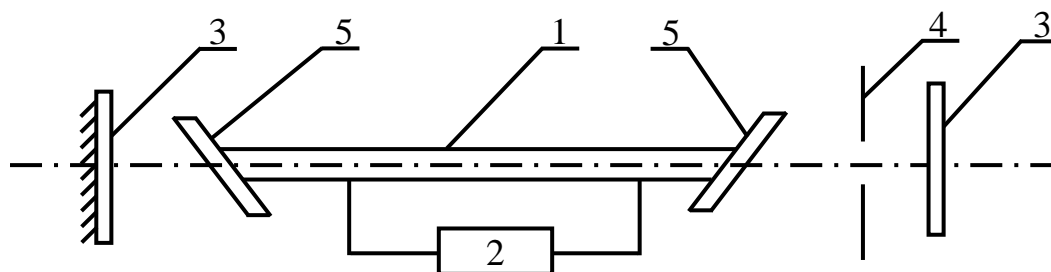


Рис. 7.2. Конструкция *He – Ne* лазера

Создание активной среды происходит следующим образом. Атомы *He* в процессе электрического разряда при столкновении с электронами возбужда-

ются и совершают переход из основного состояния 1 в возбужденное 2, являющееся метастабильным (рис. 7.3). Возбужденные атомы *He*, неупруго сталкиваясь с невозбужденными атомами *Ne*, передают им свою энергию.

Причем передача энергии осуществляется особенно эффективно при совпадении энергетических уровней у атомов разного сорта (2 у *He* и 3 у *Ne*). Такая резонансная передача энергии возбуждения с уровня 2 *He* на уровень 3 *Ne* приводит к их селективному заселению. При этом, чтобы

процесс резонансного заселения уровня 3 *Ne* был более эффективным, число атомов примесного газа *He* в смеси делают значительно больше, чем у рабочего *Ne* (оптимальное соотношение парциальных давлений *Ne* и *He* в гелий-неоновом лазере находится в пределах от 1:5 до 1:15).

Снижение же населенности более низкого уровня 2 *Ne* (его «опустошение») осуществляется в основном за счет передачи энергии атомами *Ne* стенкам газоразрядной трубки при столкновении с ней (диффузия). Для более эффективного «опустошения» уровня 2 *Ne* диаметр трубки подбирают таким образом, чтобы атомы *Ne*, находящиеся на уровне 2, успевали бы добраться до стенок трубки и передать ей свою энергию (для газоразрядной трубки длиной 1 м оптимальный диаметр составляет $7 \div 9$ мм).

В этом случае вынужденные переходы атомов *Ne* с верхнего возбужденного уровня 3 с инверсной населенностью на «опустошенный» уровень 2 сопровождаются испусканием излучения в видимом диапазоне длин волн.

Возникшая при этом световая волна, проходя через активную среду, будет усиливаться (см. рис. 7.1, $\alpha < 0$), причем доля индуцированного излучения в ней возрастает. И чем длиннее путь, проходимый светом, тем большее число атомов участвует в переходе с верхнего уровня 3 на нижний 2 (происходит процесс самовозбуждения).

Значительного увеличения длины светового пути можно добиться, поместив газоразрядную трубку с активной средой (см. рис. 7.2) между двумя плоскопараллельными зеркалами 3. При этом используется эффект многократного прохождения излучения через среду за счет отражения от зеркальных поверхностей, образующих открытый резонатор. Расстояние между зеркалами L выбирают таким образом, чтобы на нем укладывалось целое число длин полувольт $\lambda/2$: $L = n \cdot \lambda/2$, $n=1, 2, \dots$ (условие резонанса). В этом случае имеет место резо-

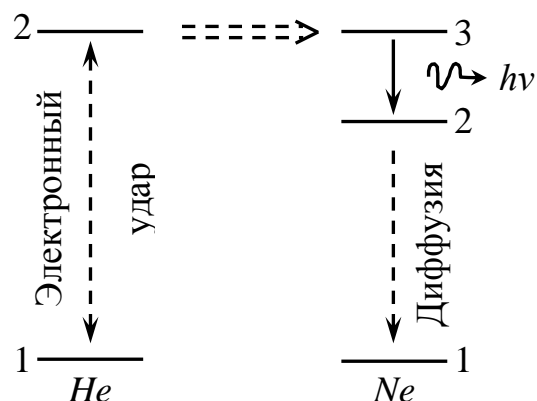


Рис.7.3. Создание активной среды

нансное усиление электромагнитной энергии. Если одна из пластин резонатора полупрозрачна, то через нее излучается плоская волна.

Выходное излучение лазера получается узконаправленным, так как испускаются лишь волны, многократно отраженные от зеркальных стенок резонатора и не испытавшие сколько-нибудь существенного отклонения от его оптической оси. Фотоны же, направление движения которых не параллельно оси трубки, покидают ее через боковые стенки трубки. Ширина луча определяется по формуле:

$$\Theta = 1,22\lambda / D_0, \quad (7.2)$$

где Θ – угловой раcтвор луча, рад;

λ – длина волны излучения энергии, м;

D_0 – диаметр источника излучения, м.

Лазерное излучение является монохроматичным, так как оно сосредоточено в узкой полосе частот, или на «одной длине волны», что объясняется резонансным процессом усиления излучения.

Кроме того, такое излучение имеет высокую степень когерентности. При этом наблюдается как пространственная когерентность, так и когерентность во времени.

Излучение лазера обладает значительной выходной мощностью, так как в индуцированном излучении может участвовать одновременно очень большое количество возбужденных атомов.

И, наконец, выходное излучение газового лазера характеризуется линейной поляризованностью, хотя сами атомы излучают фотоны произвольной поляризации. Поляризация лазерного излучения достигается тем, что газоразрядная трубка (см. рис. 7.2) замкнута с торцов плоскопараллельными пластинками 5 (окнами) из фтористого лития (LiF), которые расположены под углом Брюстера к оси трубки.

7.3. Задание

Изучить конструкцию гелий-неонового лазера и исследовать свойства лазерного излучения.

7.4. Порядок выполнения работы

Включение лазера осуществляется автоматически, достаточно лишь включить тумблер «Сеть» на панели блока питания. При этом должна загореться сигнальная лампочка.

При работе с лазером необходимо строго соблюдать меры предосторожности, вытекающие из использования в системе его питания источника высоко-

го постоянного напряжения. Необходимо помнить о том, что всякое перемещение лазера как во включенном, так и в выключенном состоянии категорически запрещается.

Попадание в глаза прямого излучения лазера опасно для зрения, поэтому при работе свет от лазера разрешается наблюдать исключительно после отражения на экране с рассеивающей поверхностью.

Упражнение 1. Измерение угла расходимости лазерного луча.

Для измерения расходимости луча в данной работе используется метод сечения пучка как наиболее простой. Схема измерения представлена на рис. 7.4.

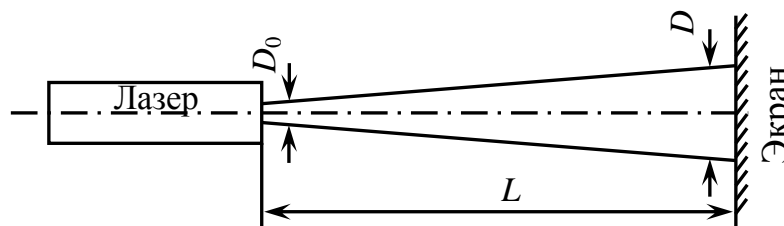


Рис. 7.4. Схема измерения угла расходимости излучения лазера

Упражнение выполняется в следующей последовательности.

1) Установить экран перпендикулярно оси пучка на расстоянии L от выходного отверстия лазера.

2) Измерить диаметр поперечного сечения луча на выходе из лазера D_0 и на расстоянии L от выходного отверстия лазера D . Диаметры луча измеряются визуально любым измерительным прибором. Если след луча на экране имеет не круглое сечение, то следует измерять размеры пятна в вертикальном (D_1) и горизонтальном (D_2) направлениях. Тогда

$$\langle D \rangle = \frac{D_1 + D_2}{2}. \quad (7.3)$$

3) Рассчитать угол расходимости по выражению

$$\Theta = \arctg \frac{\langle D \rangle - D_0}{2L} \quad (7.4)$$

и полученные результаты подписать у преподавателя.

4) Измерения провести многократно, изменяя расстояние L от выходного отверстия лазера до экрана. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Экспериментальные результаты измерения
угловой расходимости луча лазера

№ п/п	L м	D_0 м	D_1 , м	D_2 , м	$\langle D \rangle$, м	Θ_l , рад

5) Провести математическую обработку результатов измерения.

6) Рассчитать теоретический угол расходимости луча лазера по формуле (7.2) и сравнить его с полученным из опыта.

7) Сделать соответствующие выводы.

Упражнение 2. Изучение спектра лазерного излучения и измерение длины волны.

Изучение спектров излучения (наблюдение спектральных линий) и измерение длины волн выполняется с помощью монохроматора типа УМ-2, который выделяет участки спектра в диапазоне длин волн от 380 до 1000 нм. Подробное описание монохроматора УМ-2 приведено в лабораторной работе 6.

Упражнение выполняется в следующей последовательности:

1) Провести градуировку монохроматора (см. описание в лабораторной работе 6). Данные занести в табл. 7.2 и построить градуировочный график.

Таблица 7.2

Экспериментальные результаты по изучению
спектра излучения лазера

Номер опыта	Цвет спектральных линий	Длина волны λ , нм	Отсчет по барабану, град
1	Красный	690	
2	Красный	612	
3	Желтый	579	
4	Желтый	577	
5	Зеленый	546	
6	Голубой	492	
7	Фиолетовый	436	
8	Фиолетовый	405	
9	Излучение лазера		

2) С помощью микрометрического винта 9 (см. рис. 6.1) на объективе монохроматора установить минимальную ширину входной щели монохроматора так, чтобы интенсивность самых ярких желтых линий была минимальной.

3) С помощью линзы сфокусировать луч лазера на щель монохроматора. В окуляр монохроматора наблюдать спектр лазерного излучения. Вращая барабан в обе стороны, убедиться в монохроматичности лазерного излучения (видна одна красная линия).

4) Совместив линию излучения лазера с острием указателя, произвести отсчет по барабану. Данные занести в табл. 7.2.

5) По градуировочному графику определить длину волны лазерного излучения.

6) Сравнить полученный результат с табличным значением ($\lambda = 633$ нм) и сделать вывод.

Упражнение 3. Исследование пространственной когерентности лазерного излучения.

1) Изменяя расстояние между дифракционной решеткой и лазером или экраном, убедиться в том, что в случае газового лазера наблюдается четкая дифракционная картина на экране даже в том случае, если дифракционную решетку поместить непосредственно вблизи выходного зеркала лазера.

2) Установив на оптической скамье дифракционную решетку и экран на расстоянии L друг от друга, измерить расстояние между левым и правым максимумами x_m наибольшего хорошо видимого порядка m (обычно $m = 3$). Данные занести в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Экспериментальные результаты исследования
пространственной когерентности лазерного излучения

№ п/п	Порядок спектра, m	x_m , мм (измер.)	λ , мм	$\sin \varphi_m$	$\operatorname{tg} \varphi_m$	L , мм	x_m , мм (расчет)

3) Для измеренного в упражнении 2 значения длины волны λ лазерного излучения рассчитать угол дифракции φ_m соответствующего спектра ($m = 3$) по формуле:

$$d \sin \varphi_m = \pm m\lambda, \quad (7.5)$$

где d – постоянная решетки (в нашем случае $d = 10^{-5}$ м).

4) Для выбранного расстояния L между плоскостью экрана и плоскостью дифракционной решетки рассчитать расстояние между левым и правым максимумами x_m соответствующего порядка m по формуле:

$$x_m = 2L \operatorname{tg} \varphi_m. \quad (7.6)$$

5) Сравнить полученные значения x_m с измеренными и сделать соответствующие выводы.

Упражнение 4. Исследование степени поляризации лазерного излучения.

1) Собрать схему экспериментальной установки (рис. 7.5).

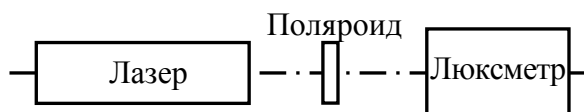


Рис. 7.5. Схема экспериментальной установки

2) Прикрыть рукой световое излучение. Оценить паразитную засветку фотоприемника, и если засветка больше одного деления шкалы, ее следует вычитать из дальнейших результатов измерений освещенности.

3) Поворачивая поляроид в оправе, найти максимальное I_{\max} и минимальное I_{\min} значения отклонения стрелки микроамперметра.

4) Определить степень поляризации лазерного луча по формуле:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \cdot 100 \%. \quad (7.7)$$

5) Сделать вывод.

Библиографический список

1. Крохин С. Н. Измерения и расчет погрешностей в лабораторном практикуме по физике / С. Н. Крохин, Л. А. Литневский, С. А. Минабудинова / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2011. 29 с.

2. Литневский Л. А. Метод наименьших квадратов в лабораторном практикуме по физике / Л. А. Литневский, С. А. Минабудинова / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2004. 32 с.

3. Трофимова Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. М.: Академия, 2006. 560 с.

4. Детлаф А. А. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. М.: Академия, 2008. 720 с.
5. Оселедчик Ю. С. Физика. Модульный курс для технических вузов / Ю. С. Оселедчик, П. И. Самойленко, Т. Н. Точилина. М.; Юрайт, 2012. 525 с.
6. Физика. Большой энциклопедический словарь / Под ред. А. М. Прохорова. М.: Большая Российская энциклопедия, 2003. 944 с.
7. Физические величины / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

Учебное издание

ВОЗНЮК Сергей Викторович, ГЕЛЬВЕР Сергей Александрович,
КОНДРИКОВ Евгений Михайлович, КРОХИН Сергей Николаевич,
КУРМАНОВ Рамиль Султангареевич, СМЕРДИН Сергей Николаевич

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ВОЛНОВОЙ ОПТИКЕ,
КВАНТОВОЙ И АТОМНОЙ ФИЗИКЕ

Редактор Н. А. Майорова
Корректор И. А. Сенеджук

* * *

Подписано в печать .06.2014. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$.
Офсетная печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,5. Уч.- изд. л. 2,6.
Тираж 1000 экз. Заказ .

* *

Редакционно-издательский отдел ОмГУПСа
Типография ОмГУПСа

*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ВОЛНОВОЙ ОПТИКЕ,
КВАНТОВОЙ И АТОМНОЙ ФИЗИКЕ**

ОМСК 2014

РЕЦЕНЗИЯ

на методические указания

к выполнению лабораторных работ по физике

С. В. Вознюка, С. А. Гельвера, Е. М. Кондрикова, С. Н. Крохина,

Р. С. Курманова, С. Н. Смердина

«Лабораторный практикум по волновой оптике,
квантовой и атомной физике»

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ студентами при изучении разделов «Волновая оптика» и «Квантовая и атомная физика» дисциплины «Физика» для технических специальностей и направлений бакалавриата.

В указаниях приведены описания 7 лабораторных работ, а также дополнительные задания. Наличие этих заданий дает возможность сделать занятия интересными для студентов, успевающих выше среднего уровня.

В каждой лабораторной работе приведены краткие сведения из теории, описание установки, сформулировано задание и расписан подробный порядок выполнения работы. Практически в каждой работе приведены табличные значения измеряемой величины, что облегчает студентам задачу написания вывода по работе.

Методические указания написаны доступным студентам языком. Считаю, что данная работа полезна для студентов и должна быть опубликована.

Зав.кафедрой общей физики ОмГУ,
к.ф.-м.н., доцент

В. Н. Сергеев