

**МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ**

**СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ**

**А.И. Гулидов  
В.М. Татарников  
Т.А. Лисейкина**

## **КВАНТОВАЯ ОПТИКА**

**Методические указания  
к лабораторному практикуму  
по физике**

**Новосибирск  
2020 г.**

**МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ**

**СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ**

---

**А.И. Гулидов  
В.М. Татарников  
Т.А. Лисейкина**

## **КВАНТОВАЯ ОПТИКА**

**Методические указания  
к лабораторному практикуму  
по физике**

**Новосибирск  
2020 г.**

Гулидов А.И., Татарников В.М., Лисейкина Т.А. Квантовая оптика. Методические указания к лабораторному практикуму по физике /СибГУТИ. – Новосибирск. – 2020. – 60 с.

Методические указания к лабораторному практикуму предназначены для оказания помощи студентам Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики при подготовке к выполнению лабораторных работ по разделу «Квантовая оптика».

Кафедра физики.

Ил.– 17, таблиц – 5, список лит. – 6 наименований

Рецензент: к.т.н. Тырышкин И.С.

© Сибирский государственный  
университет телекоммуникаций  
и информатики, 2020 г.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
<b>МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПОДГОТОВКЕ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТ.....</b>	<b>5</b>
Лабораторная работа № 6.1 ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА.....	7
Лабораторная работа № 6.2 ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ .....	18
Лабораторная работа № 6.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ИОНИЗАЦИИ АРГОНА .....	27
Лабораторная работа № 6.4 ИЗУЧЕНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИЭЛЕКТРИКЕ .....	33
Лабораторная работа № 6.5. ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА.....	43
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Физические величины.....	52
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Образец оформления титульного листа.....	55
Приложение 3 Правила построения графиков .....	56
ЛИТЕРАТУРА .....	58

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум в данном методическом пособии охватывает материал квантовой оптики и атомной физики. Изучению этих разделов отведено пять лабораторных работ.

При подготовке к каждому лабораторному занятию рекомендуется проделать следующую работу.

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПОДГОТОВКЕ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТ

1. **Прочитать теоретический материал** по рекомендованным учебникам

**Составить отчет**, содержащий следующие разделы:

- а) титульный лист (смотрите Приложение 2)
- б) цель работы
- в) краткая теория: основные определения и изучаемые законы; использование законов для вывода расчетной формулы, вывод расчетной формулы
- г) рисунок или схема установки с расшифровкой названий основных элементов
- д) заготовить таблицы для занесения в них измеряемых и расчетных величин с указанием размерности этих величин.

**Получить допуск к работе.** Для этого нужно знать и уметь объяснить:

- а) какое явление изучается и как
- б) основные элементы установки. Нужно уметь идентифицировать элементы установки, приведенные на схеме, с элементами лабораторного стенда.
- в) что измеряется, и что рассчитывается по экспериментальным данным
- г) какие зависимости и законы исследуются, и какие графики надо построить в данной работе.

2. **Проделать измерения, выключить установку, и рассчитать результаты одного измерения полностью** (расчеты привести после таблицы с обязательным переводом всех величин в СИ).

3. **Обязательно подписать выполненную работу у преподавателя**, проводившего занятие. Без подписи преподавателя работа считается невыполненной.

## ЗАЩИТА ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Результаты измерений должны быть полностью обработаны и занесены в таблицу.
2. Должны быть построены графики с указанием физических величин и размерностей. Если требуется сравнение с экспериментальных данных с теоретическими, то соответствующий график теоретической зависимости строится на том же графическом поле. Графики должны быть построены на миллиметровой бумаге карандашом с использованием чертежных инструментов, размер графика не может быть меньше 12 см х 12 см. Допускается построение графика на бумаге в клеточку. Правила построения графиков указаны в Приложении 3.
3. Должны быть рассчитаны погрешности полученных величин, используя формулы, приведенные в разделе «ЗАДАНИЕ».
4. В конце отчета должен быть **записан вывод** (краткое резюме по экспериментальным результатам, графическим зависимостям и результатам расчетов, полученным в данной работе).
5. **После вывода** должны быть письменно выполнены ответы на контрольные вопросы.
6. Должны быть решены задачи, указанные преподавателем. Как правило, номера задач соответствуют номеру бригады, выполнявшей работу.
7. Непосредственно защита у преподавателя результатов проделанной работы.
8. **Обязательно подписать зачтенную работу у преподавателя**, проводившего занятие. Без подписи преподавателя работа считается незащищенной.

## Лабораторная работа № 6.1

### ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить закон Стефана-Больцмана.
2. Определить постоянную Стефана-Больцмана.
3. Познакомиться с принципом действия оптического пирометра и научиться пользоваться им.

#### ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Излучением тел называется испускание телами в окружающее пространство электромагнитных волн. Излучение может возникать по разным причинам. Излучение, возникающее за счет внутренней энергии тел, т.е. вследствие теплового движения атомов и молекул, входящих в состав излучающего тела, называется тепловым или температурным. Тепловое излучение имеет место при любых температурах тел.

Совокупность частот, входящих в состав излучения, называется спектром излучения. Тепловое излучение твердых и жидких тел содержит все частоты от  $\omega = 0$  до  $\omega \rightarrow \infty$ . Поэтому спектр теплового излучения твердых и жидких тел называется сплошным. В данной работе рассматривается излучение твердых тел.

Для описания теплового излучения используется несколько характеристик. Среди них большое значение имеют понятия излучательной способности  $r_\omega$ , и энергетической светимости  $R$ .

Излучательной способностью  $r_\omega$  называют количество энергии, которое излучается с единицы площади поверхности тела по всем направлениям за одну секунду в единичном спектральном интервале на частоте  $\omega$ . Если интервал излучаемых частот равен  $d\omega$  в окрестности частоты  $\omega$ , элемент поверхности, с которого происходит излучение, равен  $dS$ , время, в течение которого осуществляется излучение равно  $dt$ , и при этих условиях по всем направлениям в окружающее пространство излучается энергия  $dW$ , то:

$$r_\omega = \frac{dW}{dS \cdot dt \cdot d\omega} \quad (1)$$

Так как

$$\frac{dW}{dt} = P \quad (2)$$

есть мощность, излучаемая телом, то формулу (1) можно истолковать по-другому. Можно сказать, что излучательной способностью тела называется мощность, излучаемая телом на частоте  $\omega$  в единичном спектральном интервале с единицы поверхности по всем направлениям:

$$r_{\omega} = \frac{dP}{dS \cdot d\omega}. \quad (3)$$

Излучательная способность тел при заданной температуре зависит от частоты излучения. Эту зависимость называют распределением энергии в спектре излучения тела.

Чтобы объяснить наблюдающееся на опыте распределение энергии в спектре излучения черного тела, Макс Планк предположил, что энергия при тепловом излучении излучается порциями, которые он назвал квантами энергии. При этом энергия одного кванта равна

$$\varepsilon = \hbar \omega. \quad (4)$$

Здесь:  $\hbar = 1,05458 \cdot 10^{-34}$  Дж·с - так называемая постоянная Планка, а  $\omega$  - циклическая частота, на которой осуществляется излучение.

Благодаря указанной гипотезе, Планку удалось получить формулу, описывающую распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела. Эта формула получила название формулы Планка и имеет вид:

$$r_{\omega} = \frac{\hbar \cdot \omega^3}{4\pi^2 c^2} \cdot \frac{1}{\exp(\hbar \omega / kT) - 1}. \quad (5)$$

Энергетической светимостью  $R$  называется количество энергии, излучаемое с единицы площади тела по всем направлениям за одну секунду во всем диапазоне излучаемых частот:

$$R = \frac{dW}{dS \cdot dt}. \quad (6)$$

Учитывая (2), можно также сказать, что энергетической светимостью называется мощность, излучаемая с единицы поверхности тела по всем направлениям во всем диапазоне излучаемых частот.

$$R = \frac{dP}{dS}. \quad (7)$$

Из определения энергетической светимости вытекает, что:

$$R = \int_0^{\infty} r_{\omega} d\omega. \quad (8)$$

Если подставить (5) в формулу (8) и взять интеграл, то получим:

$$R = \frac{\pi^2 k^4}{60 \hbar^3 c^2} \cdot T^4. \quad (9)$$

Дробь, стоящая перед  $T$ , состоит из одних только констант и потому является константой. Обозначим ее через  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{\pi^2 k^4}{60 \hbar^3 c^2}. \quad (10)$$

Величину  $\sigma$  называют постоянной Стефана или постоянной Стефана-Больцмана. Ее вычисление по (10) дает значение  $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{ К}^{-4}$ . С учетом (10), получаем:

$$R = \sigma \cdot T^4. \quad (11)$$



Таким образом, энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры. Формула (11) получила название закона Стефана-Больцмана.

Реальные тела не являются абсолютно черными и, строго говоря, формула (11) к ним неприменима. Однако, во многих случаях энергетическая светимость  $R^*$  реальных тел с достаточной степенью точности пропорциональна четвертой степени температуры, и, если ввести зависящий от материала нагретого тела поправочный множитель  $\gamma$ , то можно считать что

$$R^* = \gamma \cdot \sigma \cdot T^4. \quad (12)$$

Коэффициент  $\gamma$  часто называют коэффициентом черноты материала, из которого состоит излучающее тело. Этот коэффициент зависит от материала, температуры, состояния поверхности и других факторов. В нашей работе коэффициент черноты материала принят равным 0.17.

Если площадь поверхности пластины  $S$ , то излучаемая пластиной мощность  $P$  будет:

$$P = \gamma \cdot S \cdot \sigma \cdot T^4. \quad (13)$$

Целью нашей работы является проверка пропорциональности излучаемой мощности четвертой степени температуры и определение постоянной Стефана-Больцмана. Для достижения поставленной цели, воспользуемся следующим методом.

Возьмем источник излучений в виде металлической пластины, запаянной в стеклянную колбу, из которой откачан воздух, и имеющей металлические выводы для включения пластины в электрическую цепь. Эта пластина будет рабочим телом. Назовем такое устройство лампой. Включим лампу в электрическую цепь. При прохождении электрического тока, в пластине будет выделяться энергия. Выделяемая электрическая мощность  $P_{эл}$  равна:

$$P_{эл} = I \cdot U \quad (14)$$

где  $I$  - сила тока в пластине, а  $U$  - напряжение на выводах пластины из лампы. Мощность  $P_{эл}$  частично теряется на нагревание окружающей среды путем теплопроводности и конвекции, а частично преобразуется в излучение. Отношение излучаемой мощности к мощности, выделяемой в пластине электрическим током, называют излучательным коэффициентом полезного действия (к.п.д.) лампы (пластины). В пределах данной работы мы будем считать, что коэффициентом полезного действия  $\eta$  равен 0.21, поэтому:

$$P_{изл} = \eta \cdot P_{эл} \quad (15)$$

Поскольку лампа находится в среде с температурой  $T_0$ , её пластина одновременно с излучением поглощает энергию из окружающего пространства в виде излучений. Поглощаемая из окружающего пространства мощность  $P'$ , в соответствии с (13) равна:

$$P' = \gamma \cdot S \cdot \sigma \cdot T_0^4. \quad (16)$$

Следовательно, теряемая пластиной за счет излучения мощность  $P_{изл}$  равна

$$P_{изл} = P - P' \quad (17)$$

или

$$P_{изл} = \gamma \cdot S \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4) \quad (18)$$

Учитывая (15), можно записать:

$$\eta \cdot P_{эл} = \gamma \cdot S \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4) \quad (19)$$

В нашей работе рабочее тело (пластина) имеет температуру  $T \approx 1000 \text{ K}$ , а температура окружающей среды (комнатная)  $T_0 \approx 300 \text{ K}$ . Отсюда следует, что  $T^4 \gg T_0^4$  и, пренебрегая вторым слагаемым, (19) можно представить в виде:

$$\eta \cdot P_{эл} = \gamma \cdot S \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (20)$$

Таким образом, подводимая к лампе электрическая мощность, должна быть пропорциональна четвертой степени температуры пластины в лампе.

Чтобы проверить справедливость формулы (20) и, следовательно, закона Стефана-Больцмана, необходимо независимо измерить подводимую к пластине электрическую мощность  $P_{эл}$  и температуру  $T$  пластины, а затем построить график зависимости  $P_{эл}$  от  $(T^4)$ . В случае справедливости закона Стефана-Больцмана эта зависимость должна быть линейной.

Теперь, учитывая (15), выразим из (20)  $\sigma$  и получим рабочую формулу для вычисления постоянной Стефана-Больцмана:

$$\sigma = \frac{\eta \cdot I \cdot U}{\gamma \cdot S \cdot T^4} \quad (21)$$

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема установки показана на рис.1.1. Установка состоит из тумблера (1), регулируемого трансформатора (2), амперметра (3), вольтметра (4), источника электромагнитных излучений (лампы) (5) и оптического пирометра (6). Рабочим телом является вольфрамовая пластина, установленная в лампе (5).

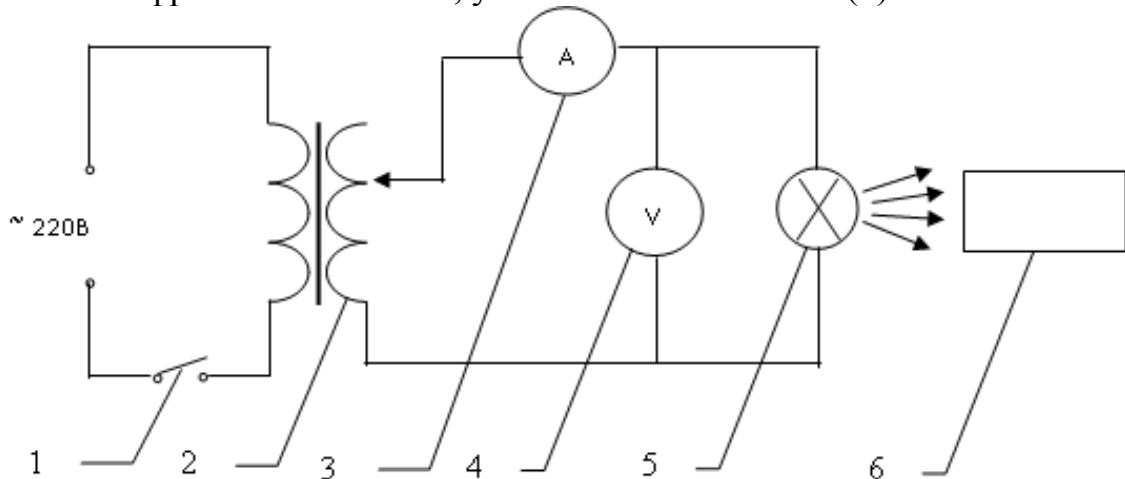


Рисунок 1.1 - Схема лабораторной установки

При помощи трансформатора подводится электрическая энергия к рабочему телу. Амперметр позволяет измерять силу тока лампы, а вольтметром измеряется

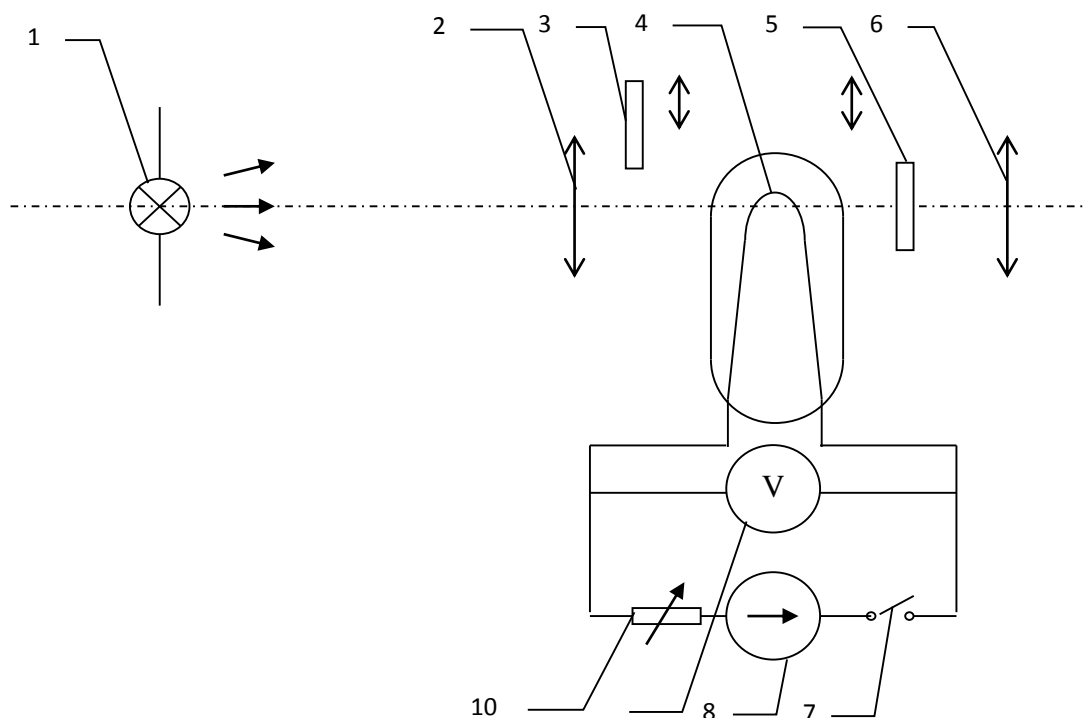


Рисунок 1.2 Принципиальная схема пирометра

напряжение на зажимах лампы (рабочего тела). Пирометр предназначен для дистанционного измерения температуры рабочего тела.

Принципиальная схема пирометра приведена на рис.1.2. Внешний вид пиро-

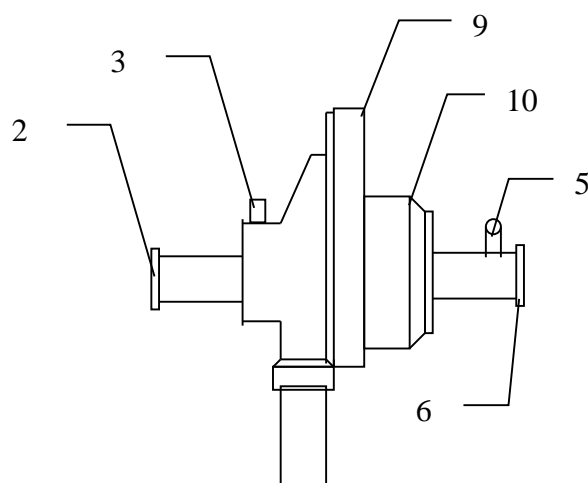


Рисунок 1.3 Внешний вид пирометра

метра представлен на рис.1.3.

Здесь: 1 – рабочее тело; 2 – объектив пирометра; 3 – нейтральный ослабляющий светофильтр; 4 – измерительная лампа накаливания с нитью; 5 – красный светофильтр; 6 – окуляр пирометра; 7 – ключ для запитывания электрической цепи пирометра; 8 – источник питания пирометра; 9 – вольтметр, шкала которого проградуирована в единицах температуры по шкале Цельсия; 10 – реостат, для регулировки тока в цепи нити накала лампы.

Электромагнитные волны, излучаемые нагретым рабочим телом (1), (рис.1.2) попадают в объектив (2) пирометра. В фокусе объектива находится измерительная

лампа накаливания с нитью (4), изогнутой в форме дуги. Окуляр (6) позволяет одновременно видеть нить измерительной лампы и изображение накаливаемого тела, через красный светофильтр (5). Светофильтр вырезает участок спектра излучения в окрестности длины волны 660 нм.

Измерение температуры с помощью пирометра основано на сравнении яркостей светящегося рабочего тела и нити измерительной лампы пирометра. В соответствии с формулой Планка (8), излучение нагретого рабочего тела в каком-либо спектральном интервале, в нашем случае на длине волны 660 нм, зависит от температуры рабочего тела. С увеличением температуры тела растет и его излучательная способность.

В пирометре при помощи реостата (10) (рис.1.2 и 1.3) регулируется ток в цепи нити накала лампы так, чтобы яркость свечения нити (4) накала измерительной лампы сравнялась с яркостью изображения светящегося тела. При этом изображение нити исчезает на фоне изображения светящегося тела. Поэтому данный пирометр часто называют пирометром с исчезающей нитью.

При равных яркостях светящегося тела (1) и нити (4) пирометра, их температуры связаны однозначной зависимостью. Поэтому шкалу вольтметра (9), рис.1.2 и 1.3, можно проградуировать в единицах температуры светящегося тела. Такая градуировка производится при изготовлении пирометра по излучению черного тела на длине волны 660 нм. Пирометры, используемые в наших лабораторных установках, проградуированы в шкале Цельсия. Следовательно, полученные при измерениях значения температур необходимо преобразовать в шкалу Кельвина.

Температура, измеренная при помощи пирометра с исчезающей нитью, называется яркостной температурой ( $T_j$ ). Для абсолютно черных тел яркостная температура является истинной температурой тела. Излучение обычных тел отличается от излучения абсолютно черного тела, поэтому для обычных тел яркостная температура отличается от реальной температуры  $T$  тела. Для получения истинной температуры рабочего тела необходимо ввести поправку по формуле:

$$T = \frac{T_j}{1 + T_j \cdot (k\lambda / 2\pi\hbar c) \cdot \ln \alpha} \quad (22)$$

где  $\lambda = 660$  нм – длина волны, на которой выполняется измерение;  $k$  – постоянная Больцмана;  $\alpha = 0,46$  – коэффициент, зависящий от материала нагретого тела;  $T_j$  – яркостная температура по шкале Кельвина, которая связана с температурой  $t^0$ , измеренной по шкале Цельсия соотношением  $T_j = t^0 + 273, K$ ;  $\hbar$  – постоянная Планка (редуцированная);  $c$  – скорость света в вакууме.

Оптический пирометр имеет два предела измерений. При использовании шкалы высоких температур перед нитью вводится нейтральный ослабляющий светофильтр (3), рис.1.2 и 1.3.

## **ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

Работу рекомендуется выполнять в следующем порядке.

**Подготовить таблицу 1 и 2 для измеренных экспериментальных данных**

**Таблица 1**

$n$	$U, В$	$I, А$	$t^0, С$	$T_я, К$	$T, К$	$P, Вт$	$T^4, К^4$
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

**Таблица 2**

$n$	$\sigma_i, Вт/м^2 \cdot К^4$	$\sigma_{ср}, Вт/м^2 \cdot К^4$	$\sigma_i - \sigma_{ср}$	$(\sigma_i - \sigma_{ср})^2$	$\Delta\sigma, Вт/м^2 \cdot К^4$	$\delta\sigma, \%$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

**Включить установку и снять экспериментальные данные**

1. Перед включением установки повернуть ручку регулирующего трансформатора до отказа против часовой стрелки. Повернуть кольцо (10) реостата против часовой стрелки до упора.

2. Включить установку тумблером (1) "сеть", рис.1.1.

3. Поворотом обоймы (5) у окуляра пирометра ввести красный светофильтр, рис.1.2 и рис. 1.3.

4. Плавно поворачивая ручку регулирующего трансформатора, подать на рабочее тело напряжение ( $\sim 1,5 В$ ), достаточное для поддержания красного каления пластины в лампе (5), рис.1.1. Записать показания вольтметра и амперметра в таблицу 1.

5. Произвести настройку пирометра. Для этого:

а) Глядя в окуляр (6), рис.1.2 и 1.3, и перемещая окуляр вдоль оси пирометра, добиться четкого изображения нити пирометра.

б) Глядя в окуляр, перемещать объектив (2), рис.1.2 и 1.3, вдоль оси пирометра так, чтобы получилось четкое изображение светящейся пластины.

6. Измерить при помощи пирометра яркостную температуру рабочего тела лампы. Для этого, глядя в окуляр, поворотом кольца (10) реостата медленно изменять яркость нити пирометра до тех пор, пока яркости пластины и нити окажутся

одинаковыми. При этом участок нити пирометра, пересекающий изображение пластины, исчезнет на фоне светящейся поверхности пластины. Добившись указанного состояния, записываем в таблицу 1: температуру рабочего тела со шкалы пирометра по шкале Цельсия в таблицу 1.

7. Диапазон допустимых значений напряжений 1,5 В – 3,4 В разбить на 8–10 равных интервалов и для каждого напряжения произвести измерения по пунктам 5 и 6. Записать результаты всех измерений в таблицу 1.

### Правило выключения установки

1. Повернуть ручку регулирующего трансформатора до отказа влево, при этом напряжение на рабочем теле станет равным нулю.
2. Вывести ток в ноль в цепи измерительной лампы пирометра, для этого повернуть кольцо (10) реостата против часовой стрелки до упора.
3. Выключить установку тумблером (1) "сеть", рис.1.1.

### Обработка экспериментальных данных

1. Рассчитать и внести в таблицу 1 следующие величины: 1) яркостную температуру  $T_{\text{я}}$  рабочего тела по формуле  $T_{\text{я}} = t^0 + 273, \text{ K}$ ; 2) истинную температуру рабочего тела  $T$  по формуле (22); 2) электрическую мощность  $P_{\text{эл}}$  по формуле (14); 3) температуру рабочего тела в четвёртой степени  $T^4$ .
2. Построить график зависимости излучаемой мощности от четвертой степени температуры пластины  $P_{\text{эл}}(T^4)$ . Проверить, является ли эта зависимость линейной.
3. Рассчитать и внести в таблицу 2 постоянную Стефана-Больцмана по формуле (21).
4. Вычислить и внести в таблицу 2 среднее значение  $\sigma_{\text{ср}}$  постоянной Стефана-Больцмана по формуле:

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_n}{n} \quad (23)$$

где  $n$  – количество проведённых измерений;  $\sum_{i=1}^n \sigma_i$  – сумма по всем рассчитанным значениям  $\sigma_i$

5. Рассчитать значения  $(\sigma_i - \sigma_{\text{ср}})$  и  $(\sigma_i - \sigma_{\text{ср}})^2$  для каждого значения  $\sigma_i$  и внести в таблицу 2
6. Вычислить среднеквадратическую погрешность  $\Delta\sigma_{\text{ср}}$  по формуле (24) и внести в таблицу 2:

$$\Delta\sigma_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma_{\text{ср}})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_{\text{ср}})^2 + (\sigma_2 - \sigma_{\text{ср}})^2 + \dots + (\sigma_n - \sigma_{\text{ср}})^2}{n-1}} \quad (24)$$

7. Вычислить относительную погрешность  $\delta\sigma_{\text{ср}}$  полученного результата и внести в таблицу 2:

$$\delta\sigma_{\text{ср}} = \frac{\Delta\sigma_{\text{ср}}}{\sigma_{\text{ср}}} \cdot 100\% . \quad (25)$$

8. Записать результат в виде:

$$\sigma = \sigma_{cp} \pm \Delta\sigma_{cp}, \quad \delta\sigma_{cp} = \quad , \quad n =$$

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое излучение называется тепловым или температурным?
2. Что называется энергетической светимостью тела?
3. Что называется излучательной способностью тела? Поясните физический смысл этого термина и его связь с энергетической светимостью.
4. Какие тела называют абсолютно черными?
5. Дайте пояснения к формуле Планка для распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела.
6. Сделайте вывод закона Стефана-Больцмана из формулы Планка.
7. Сформулируйте гипотезу Планка.
8. Сделайте вывод расчетной формулы для определения постоянной Стефана-Больцмана.
9. Поясните принцип действия оптического пирометра и порядок работы с ним.
10. Поясните, в чем состоит проверка правильности закона Стефана-Больцмана.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 3. -М.: Наука, 1979, §§ 1,2,4,7.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: Учебное пособие для вузов., Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: Высш. шк., 1999, 718 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики., 6-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 1999, 542с.
4. Трофимова Т.И., Павлова З.Г. Сборник задач по курсу физики с решениями, М.: Высшая школа, 1999, 591 с.

## ЗАДАЧИ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

**1.1.** Раскаленная металлическая поверхность площадью  $10 \text{ см}^2$  излучает в 1 мин  $10^5$  Дж. Температура поверхности 2500 К. Найдите: 1) Излучение этой поверхности, если бы она была абсолютно черной. 2) Отношение энергетической светимости этой поверхности и абсолютно черного тела при данной температуре.

**1.2.** При нагревании абсолютно черного тела длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, изменилась от 690 нм до 500 нм. Во сколько раз увеличилась при этом энергетическая светимость тела?

**1.3.** Какую мощность надо подводить к зачерненному шарiku радиусом 1 см, чтобы поддерживать его температуру на 27 градусов выше температуры окружающей среды? Температура окружающей среды равна  $20^\circ\text{C}$ .

**1.4.** Найдите, насколько уменьшится масса Солнца за год вследствие излучения. Температуру поверхности Солнца принять равной 5800 К и считать Солнце абсолютно черным телом.

**1.5.** Определите температуру и энергетическую светимость абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения приходится на длину волны 400 нм.

**2.1.** Из смотрового окошечка печи излучается световой поток 2000 Дж/мин. Определите температуру печи, если площадь отверстия 5 см.

**2.2.** Мощность излучения абсолютно черного тела равна 10 кВт. Найдите площадь излучающей поверхности тела, если известно, что длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности его энергетической светимости, равна 700 нм.

**2.3.** Температура абсолютно черного тела изменилась при нагревании от 100 К до 3000 К. 1) Во сколько раз увеличилась при этом энергетическая светимость? 2) На сколько изменилась длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости?

**2.4** Поверхность нагрета до температуры 1000 К. Затем одна половина этой поверхности нагревается на 100 К, а другая охлаждается на 100 К. Во сколько раз изменится энергетическая светимость данного тела?

**2.5** Какое количество энергии излучает Солнце за 1 с? Температуру поверхности Солнца принять равной 5800К. Насколько изменяется масса Солнца за 1 с вследствие излучения?

**3.1** Абсолютно черное тело имеет температуру 400 К. Какова будет температура тела, если в результате нагревания поток излучения увеличится в 10 раз?

**3.2** По пластинке длиной 3см и шириной 1см проходит электрический ток напряжением 2 В. После установления теплового равновесия температура пластинки стала равной 1000 К. Определите силу тока, текущего по пластинке, если коэффициент поглощения пластинки равен 0,8.

**3.3.** Температура абсолютно черного тела увеличилась в 2 раза, в результате чего максимальная длина волны излучения уменьшилась на 600 нм. Определите начальную и конечную температуру тела.

**3.4.** Какую температуру должно иметь тело, чтобы оно при температуре окружающей среды 27°C излучало в 100 раз больше энергии, чем поглощало?

**3.5.** На какую длину волны приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, имеющего температуру, равную температуре человеческого тела?

**4.1.** Приняв температуру Солнца равной 6000 К, определите:

1) Мощность, излучаемую с 1 м<sup>2</sup>. 2) Длину волны, соответствующую максимуму излучательной способности. 3) Максимальную излучательную способность Солнца.

**4.2.** Абсолютно черное тело находится при температуре 2900 К. В результате остывания тела длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, изменилась на 9 мкм. До какой температуры охладилось тело?

**4.3.** По пластинке длиной 2 см и шириной 1 см проходит электрический ток силой 10 А. После установления теплового равновесия температура пластинки оказалась равной 1000 К. Определите напряжение на пластинке, если коэффициент поглощения равен 0,5.



**4.4.** Поток излучения абсолютно черного тела 10 кВт, максимум энергии излучения приходится на длину волны 1,5 мкм. Определите площадь излучаемой поверхности.

**4.5.** Принимая температуру Солнца равной 5800 К, и, считая Солнце абсолютно черным, вычислите уменьшение массы Солнца вследствие излучения за 1 мин? За сколько лет масса Солнца уменьшится на 0,0001%?

**5.1.** Стальной шар радиусом 5 см нагрет до температуры 1300 К. Шар остывает в открытом пространстве. За какое время температура шара понизится до 1200 К? Считать шар серым телом с поглощательной способностью равной 0,3. Плотность стали  $7.7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , удельная теплоемкость стали  $C_p = 460 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ .

**5.2.** При нагревании тела длина волны, на которую приходится максимум излучательной способности, изменилась от 1,45 мкм до 1,16 мкм. Насколько изменилась максимальная спектральная плотность энергетической светимости тела?

**5.3.** Стальная болванка при температуре  $927^\circ \text{C}$  излучает за 1 с 8,2 Дж с  $1 \text{ см}^2$  площади. Определите поглощательную способность этой болванки.

**5.4.** Диаметр вольфрамовой спирали в электрической лампочке 0,35 мм, длина спирали 5 см. При включении лампочки в сеть с напряжением 127 В через лампочку течет ток силой 0,31 А. Найдите температуру лампочки. Отношение энергетических светимостей вольфрама и абсолютно черного тела равно 0,31.

**5.5.** Во сколько раз увеличится мощность излучения абсолютно черного тела, если максимум излучательной способности переместится от красной границы видимого света (760 нм) к его фиолетовой границе (380 нм)?

**6.1.** Площадь поверхности накала нити 60-ватной вольфрамовой лампы  $0,5 \text{ см}^2$ . Интегральная поглощательная способность 0,6. Определите температуру нити накала.

**6.2.** Принимая температуру поверхности Солнца равной 5800 К, определите количество солнечной энергии, падающей в 1 с на площадку в  $1 \text{ м}^2$  вблизи поверхности Земли. Поглощением энергии пренебречь. Солнце считать абсолютно черным телом.

**6.3.** Температура голубой звезды 30000 К. Определите: 1) Энергетическую светимость. 2) Длину волны, соответствующую максимуму излучательной способности. 3) Максимальную излучательную способность.

**6.4.** По пластинке проходит электрический ток, в результате чего в пластинке устанавливается равновесная температура 1400 К. После этого мощность электрического тока уменьшают в два раза. Определите новую равновесную температуру.

**6.5.** Какую долю энергии, ежесекундно получаемой от Солнца, излучал бы земной шар, если бы температура поверхности Земли везде равнялась  $0^\circ \text{C}$ , а коэффициент поглощения равнялся единице? Солнечная постоянная, то есть энергия, падающая на  $1 \text{ м}^2$  за 1 с, равна  $1395 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{с}$ .

**6.6.** Солнечные лучи в течение года приносят на Землю  $5,4 \cdot 10^{24} \text{ Дж}$  энергии. Насколько изменилась бы масса Земли за 100 лет, если бы она не излучала энергию в пространство?

## Лабораторная работа № 6.2

### ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить спектр испускания атомов ртути.
2. Выполнить градуировку спектро스코па.
3. Определить интервалы длин волн соответствующих разным цветам сплошного спектра лампы накаливания.

#### ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Оптические свойства атомов определяются состоянием валентных электронов. Согласно современным представлениям, электроны в атомах могут находиться лишь в некоторых состояниях, которым соответствуют строго определенные дискретные значения энергии, называемые энергетическими уровнями.

В простейшем случае, в атоме водорода имеется один единственный электрон, который является валентным электроном. Значения энергии для электрона в атоме водорода определяются формулой:

$$W_n = -\frac{me^4}{32\pi^2\epsilon_o^2\hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}. \quad (1)$$

Здесь первая дробь представляет собой набор констант, а  $n$  - главное квантовое число. Обозначим:

$$W_1 = -\frac{me^4}{32\pi^2\epsilon_o^2\hbar^2}. \quad (2)$$

Тогда

$$W_n = W_1 \cdot \frac{1}{n^2}. \quad (3)$$

Здесь  $W_1$  - энергия основного состояния электрона в атоме водорода. Полезно запомнить, что  $W_1 = -13,6$  эВ. Поэтому формулу (3) часто пишут в виде:

$$W_n = -13,6 \cdot \frac{1}{n^2} \text{ эВ}. \quad (4)$$

Энергетическая диаграмма атома водорода приведена на рис.2.1.

В случае внешних воздействий атом, т.е. фактически его электрон, может получить дополнительную энергию и перейти в одно из возбужденных состояний, энергия которых больше, чем энергия основного состояния. Такие переходы называют переходами на более высокие энергетические уровни. Из возбужденных состояний атом спонтанно, т.е. самопроизвольно, переходит в основное состояние или на один из более низких энергетических уровней, рис 2.2. При этом атом излучает в окружающее пространство энергию:

$$\Delta W_{kn} = W_k - W_n. \quad (5)$$

Здесь  $W_k$  - энергия атома в исходном состоянии, а  $W_n$  - энергия атома в конечном состоянии. Энергия  $W_{kn}$  излучается в виде кванта электромагнитного излучения  $\hbar\omega_{kn}$ , так что

$$\hbar\omega_{kn} = W_k - W_n \quad (6)$$

Соотношение (6) часто называют правилом частот.

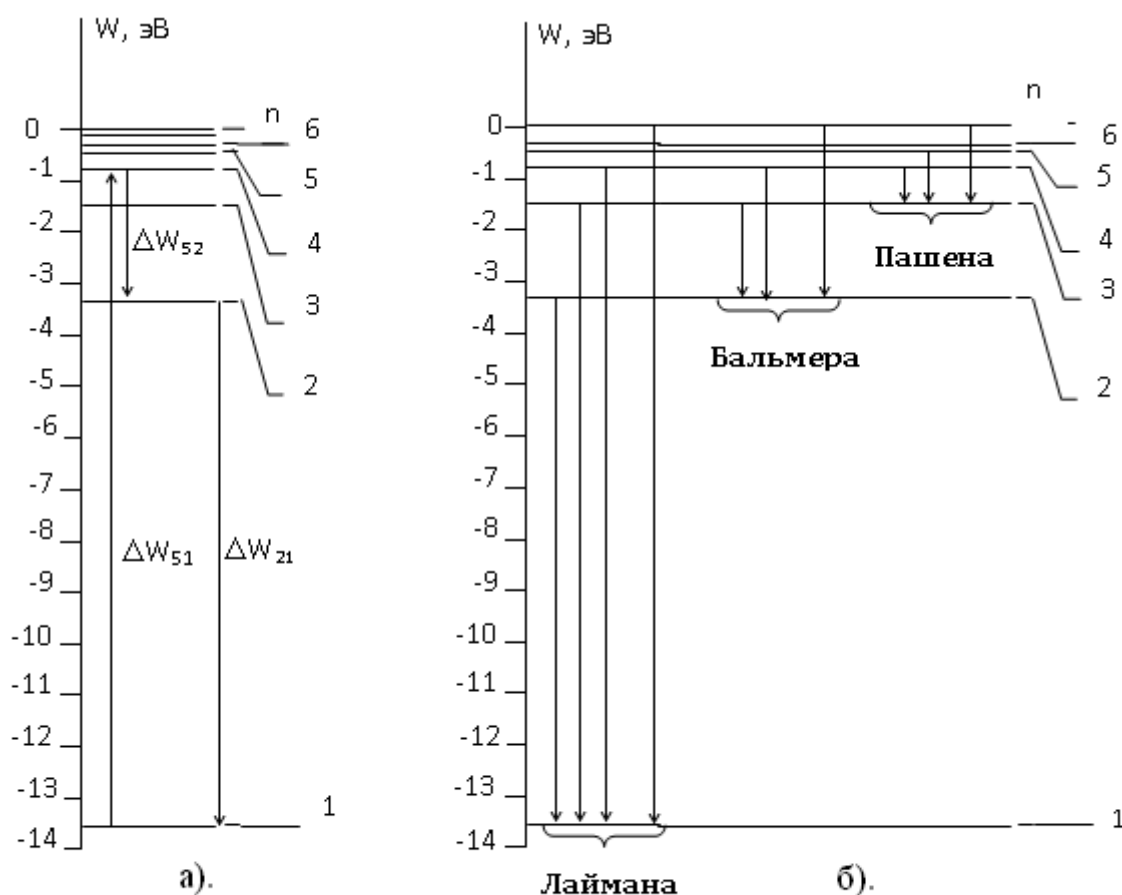


Рис. 2.1. а). Энергетическая диаграмма атома водорода.

б). Образование серий в спектре атома водорода.

Из соотношений (1) и (6) следует, что частота излучения равна:

$$\omega_{kn} = \frac{me^4}{32\pi^2\epsilon_o^2\hbar^3} \cdot \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right). \quad (7)$$

Выразив циклическую частоту  $\omega$  через длину волны  $\lambda$ , можно записать, что

$$\frac{1}{\lambda_{kn}} = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right). \quad (8)$$

Здесь величина  $R = 1,0967758 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  называется постоянной Ридберга.

$$R = \frac{me^4}{64\pi^2\epsilon_o^2\hbar^3c}. \quad (9)$$

Совокупность длин волн (или частот), излучаемых телом, называют спектром излучения этого тела. Как мы видим, вследствие квантования энергетических уровней электронов в атомах, атомарные спектры излучения состоят из дискретного набора длин волн (частот). Такие спектры называются линейчатыми.

Совокупность спектральных линий, т.е. длин волн или частот, соответствующих переходам на один и тот же энергетический уровень образует серию линий.

Так, например, совокупность переходов в основное состояние ( $n = 1$ ) образует серию Лаймана, совокупность переходов в состояние с  $n = 2$ , образует серию Бальмера, переходы в состояние с  $n = 3$ , образуют серию Пашена и так далее (Рис. 2.1). Видимый участок в спектре водорода целиком сосредоточен в серии Бальмера и представлен четырьмя первыми линиями в этой серии. Частоты и длины волн этих линий могут быть рассчитаны по формулам (7) - (9).

В атоме водорода энергия валентного электрона определяется значением главного квантового числа и не зависит от значений других квантовых чисел. В более сложных атомах снимается вырождение энергии по другим квантовым числам. Это значит, что энергия электронов в атоме зависит не только от значений главного квантового числа, но также зависит от значений орбитального, магнитного и спинового квантовых чисел. Поэтому энергетические диаграммы всех атомов становятся более сложными по сравнению с диаграммой атома водорода. Как правило, влияние магнитного и спинового квантовых чисел на энергию электрона в атоме незначительно, поэтому часто на энергетических диаграммах не отражается. Влияние орбитального квантового числа является существенным.

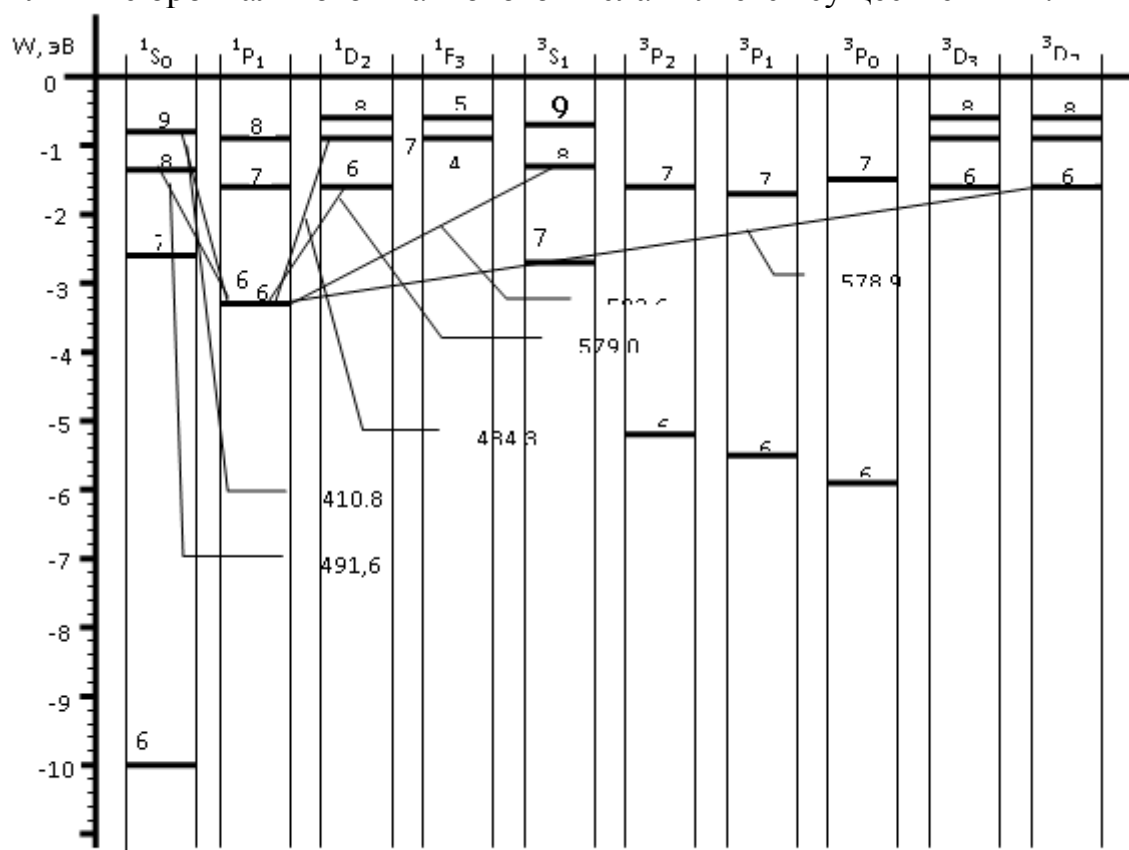


Рис.2.2. Энергетическая диаграмма атома ртути.

На рис. 2.2. приведена часть энергетических уровней атома ртути с учетом спин-орбитального взаимодействия и некоторые переходы, соответствующие видимой области спектра излучения. Значения главных квантовых чисел проставлены над энергетическими уровнями. Другие квантовые числа зашифрованы при помощи букв  $S, P, D, F$ , обозначающих различные электронные состояния. Из диаграммы видно, что при одном и том же значении главного квантового числа,

например  $n = 6$ , может существовать несколько электронных состояний с различными значениями других квантовых чисел. Этим состояниям соответствуют разные энергетические уровни.

Так же, как и в атоме водорода, при переходе электронов из состояний с большей энергией в состояние с меньшей энергией, излучается квант света, длина волны которого может быть вычислена при помощи правила частот (6).

Спектр излучения ртути хорошо изучен, и потому часто используется для градуировки спектральных приборов. На рис. 2.3 приведены основные линии спектра излучения ртути, а в таблице даны соответствующие им длины волн.

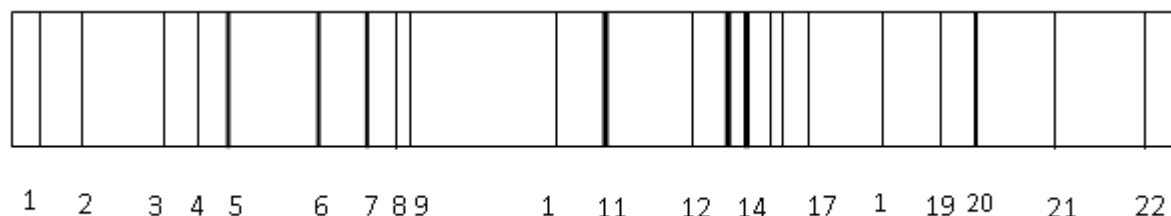


Рис. 2.3. Спектр излучения атомов ртути.

**Таблица1. Характеристики линий в спектре излучения атомов ртути.**

№ линии	1	3	4	5	6	8
$\lambda$ , нм	404,7	433,9	434,7	435,8	491,6	502,6
цвет	фиолетовый	синий	синий	синий	бирюзовый	бирюзовый
№ линии	11	13	15	18	20	
$\lambda$ , нм	546,1	577,0	580,4	607,3	623,4	
цвет	Зеленый	желтый	желтый	красный.	красный.	

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема лабораторной установки показана на рис. 2.4.

1 – пусковое устройство; 2 – штатив для лампы; 3 - источник света (ртутная лампа или лампа накаливания); 4 – спектроскоп; 5 – окуляр спектроскопа; 6 – микровинт, совмещённый со шкалой спектроскопа.

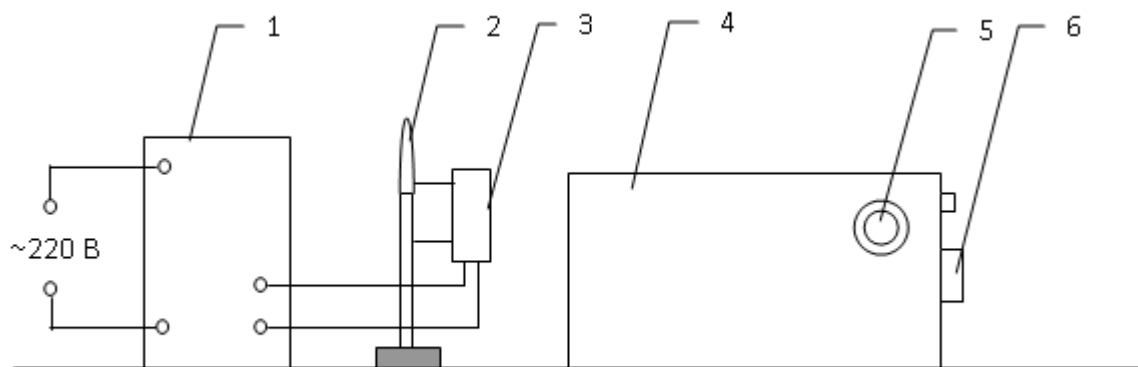


Рис. 2.4. Схема лабораторной установки.

Спектроскоп - устройство, позволяющее разлагать электромагнитное излучение в спектр, т.е. выделять кванты с одной длиной волны и фиксировать их визуально. Оптическая схема прибора приведена на рис.2.5.

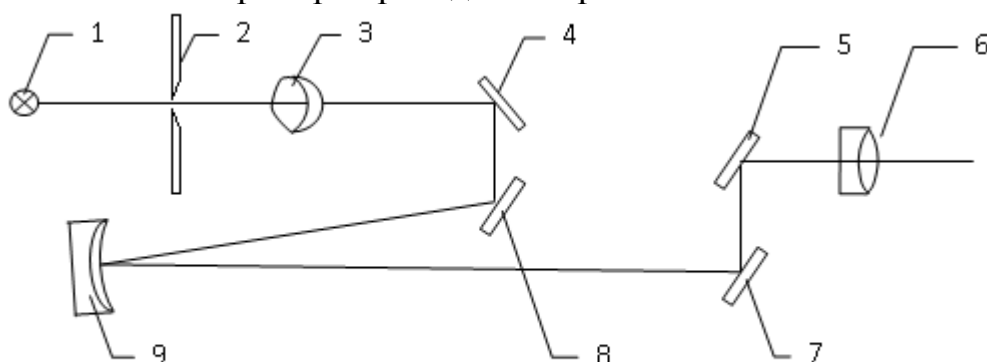


Рис. 2.5. Оптическая схема спектрографа.

Свет от источника (1) проходит через щель (2) и с помощью системы линз (3) и зеркал (4) и (8) проецируется на вогнутую дифракционную решетку (9), равномерно заполняя её. Дифракционная решетка разлагает падающее на неё электромагнитное излучение на отдельные спектральные линии, которые визуально наблюдаются в окуляр (6)

Спектр испускания атомов ртути имеет вид узких цветных линий на темном фоне (Рис. 2.3).

### ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Подготовьте Табл. 2 для внесения экспериментальных данных.

Табл. 2

№ ли- нии	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda$ , нм	404,7		433,9	434,7	435,8	491,6		502,6		
цвет										
$n$										

№ ли- нии	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\lambda$ , нм	546,1		577,0		580,4			607,3		623,4
цвет										
$n$										

№ линии – номер спектральной линии, всего измеряется 20 линий.

$\lambda$  – длина волны (нм), известные длины волн необходимо перенести из Табл. 1, неизвестные длины волн определяются из градуировочного графика спектро-скопа.

Цвет – вносится студентом самостоятельно по субъективным ощущениям глаза.

$n$  – показания шкалы спектроскопа.

**ВНИМАНИЕ!** В работе применяется ртутная лампа, являющаяся мощ-ным источником ультрафиолетового излучения. Запрещается смотреть непосредственно на ртутную лампу, т.к. при прямом попадании света в глаза возможен ожег глаз.

Градуировкой измерительного прибора называется операция, при помощи кото-рой шкала измерительного прибора приводится в соответствие с измеряемой величиной. Результаты градуировки представляются в виде: Табл. 2 и градуиро-вочного графика спектроскопа.

В нашей работе необходимо установить соответствие между показаниями шкалы спектроскопа (6) Рис. 2.4 и длинами волн линий, совмещаемых с визиром спектроскопа. Результаты градуировки должны быть оформлены в виде градуи-ровочного графика  $\lambda(n)$ .

Градуировка спектроскопа выполняется по спектру ртутной лампы, пред-ставленному на рис.2.3 и в таблице 1.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

**Задание 1.** Установить выходное окно ртутной лампы против входного окна спектроскопа.

Включить пусковое устройство (1), рис. 2.4. Нажать кнопку "пуск" на пуско-вом устройстве и удерживать ее в нажатом состоянии до зажигания ртутной лампы, примерно 5-10 с. После этого кнопку "пуск" следует отпустить. Прогреть лампу в течение 5 мин.

Наблюдать спектр в окуляр (5) и перемещением ртутной лампы (3) устано-вить максимальную яркость линий.

Наблюдая в окуляр (5), рис.2.4, и, вращая микровинт (6), просмотреть весь спектр и сопоставить его со спектром, приведенным на рис.2.3.

Заполните в Табл.2 строки «Цвет» и « $n$ » – показания шкалы спектроскопа. Для этого отыскать в спектре все линии, начиная с первой спектральной линии, из

Табл.2, поочередно совместить их с визиром спектроскопа в окуляре (5) и зафиксировать соответствующие им «Цвет» и показания шкалы спектроскопа (6) в Табл.2 в строке  $n$ .

После снятия всех экспериментальных данных выключите ртутную лампу и, взявшись за нижнее холодное основание, осторожно отодвиньте ее в сторону.

**Будьте внимательны! Кожух ртутной лампы во время работы сильно нагревается.**

Построить график зависимости  $\lambda$  от  $n$ . График должен представлять монотонную линию. По графику  $\lambda(n)$  определить длину волны для всех пропущенных длин волн в Табл.2.

**Задание 2.** Изучение сплошного спектра лампы накаливания

Подготовьте Табл. 3 для внесения экспериментальных данных.

Табл. 3

цвет	крас- ный	оран- жевый	жёлтый	зелё- ный	голу- бой	си- ний	фиолето- вый
Границы диапазона (в ед. шкалы спектро- скопа)							
Границы диапазона, нм							

Во втором задании мы познакомимся со сплошным спектром лампы накаливания. Работу выполняйте в описанном ниже порядке.

Установите выходное окно лампы накаливания напротив входного окна спектроскопа и включите лампу накаливания.

Перемещая лампу накаливания, добейтесь максимальной яркости спектра.

Просмотрите весь спектр и выделите в нем различные цвета - красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий и фиолетовый. Внесите в Табл. 3 границы диапазона (в ед. шкалы спектроскопа) для всех указанных цветов.

После снятия всех экспериментальных данных в Задании 2 выключите лампу накаливания и, взявшись за нижнее холодное основание, осторожно отодвиньте ее в сторону. После этого выключите пусковое устройство (1).

Используя градуировочный график  $\lambda(n)$  из Задания 1, определите граничные длины волн всех указанных цветов и внесите их в Табл. 3.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните строение атома водорода.
2. Поясните энергетическую диаграмму атома водорода.
3. Как объяснить эффект излучения электромагнитных волн атомами вещества?
4. Почему атомарные спектры веществ являются линейчатыми?



5. Как объясняется существование спектральных серий?
6. Что такое квантовые числа? Какова их роль?
7. Поясните принцип работы спектроскопа.
8. В чем состоит градуировка спектроскопа? Для чего она проводится?

### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 3. М., "Наука", 1979, §§ 12, 15, 16, 17, 28, 29.
2. Яворский Б.М. и Детлаф А.А. Курс физики. Том 3. М., "Высшая школа", 1972, §§ 13.2, 13.3, 13.4, 13.5, 14.1, 14.2.

### **ЗАДАЧИ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

**1.1.** Определите энергию фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с третьего энергетического уровня на основной.

**1.2.** Невозбужденный атом водорода поглощает квант излучения с длиной волны 102,6 нм. Вычислите, пользуясь теорией Бора, радиус электронной орбиты возбужденного атома водорода.

**1.3.** Найдите наименьшую и наибольшую длину волны в ультрафиолетовой серии водорода (серия Лаймана).

**1.4.** Электрон, имеющий вдали от покоящегося протона скорость  $1,875 \cdot 10^6$  м/с, захватывается последним, в результате чего образуется возбужденный атом водорода. Определите длину волны фотона, который образуется при переходе атома в нормальное состояние.

**2.1.** Атомарный кислород, возбужденный некоторым монохроматическим источником света, испускает только три спектральные линии. Определите квантовое число энергетического уровня, на который переходят возбужденные атомы, а также длины волн испускаемых линий.

**2.2.** Возбужденный атом водорода при переходе в основное состояние испустил два кванта, последовательно, с длинами волн  $40510 \text{ \AA}$  и  $972.5 \text{ \AA}$ . Определите энергию первоначального состояния данного атома и соответствующее ему квантовое число.

**2.3.** Длина волны головной линии серии Лаймана и границы серии Бальмера в спектре атомарного водорода равны  $1215 \text{ \AA}$  и  $3650 \text{ \AA}$ . Известны, кроме того, значение скорости света и постоянной Планка. Вычислите на основании этих данных энергию ионизации атома водорода.

**2.4.** Квант света с энергией 15 эВ выбивает фотоэлектрон из атома водорода, находящегося в нормальном состоянии. С какой скоростью будет двигаться электрон вдали от ядра?

**3.1.** Определите энергию, массу и импульс фотонов, соответствующих красной ( $\lambda_1 = 0,76 \text{ мкм}$ ) и фиолетовой ( $\lambda_2 = 0,38 \text{ мкм}$ ) границам волнового спектра.

**3.2.** Атом водорода в основном состоянии поглотил квант света с длиной волны  $1215 \text{ \AA}$ . Определите радиус электронной орбиты возбужденного атома водорода.

**3.3.** Определите наибольшее и наименьшее значение энергии фотона в ультрафиолетовой серии спектра водорода (серии Лаймана).

**3.4.** Найдите квантовое число, соответствующее возбужденному состоянию однозарядного иона гелия, если при переходе в основное состояние этот ион испустил последовательно два фотона с длинами волн 108,5 нм и 30,4 нм.

**4.1.** Вычислите длину волны, которую испускает ион гелия ( $He^+$ ) при переходе со второго энергетического уровня на первый.

**4.2.** Вычислите частоты обращения электронов в атоме водорода на второй орбите. Сравните с частотой излучения при переходе электрона с третьей орбиты на вторую.

**4.3.** В каких пределах должны лежать длины волн монохроматического света, чтобы при возбуждении атома водорода квантами этого света наблюдались три спектральные линии?

**4.4.** Найдите скорость фотоэлектронов, вырываемых электромагнитным излучением с длиной волны 18 нм из однозарядных ионов гелия, которые находятся в основном состоянии и покоятся.

**5.1.** Насколько изменилась кинетическая энергия в атоме водорода при излучении атомом фотона с длиной волны 486 нм?

**5.2.** Определить длину волн монохроматического света, чтобы при возбуждении атома водорода квантами этого света радиус орбиты электрона увеличился в 9 раз?

**5.3.** Электрон, пройдя разности потенциалов 4,9 В, сталкивается с атомом ртути и переводит его в возбужденное состояние. Какую длину волны имеет фотон, соответствующий переходу атома ртути в нормальное состояние?

**5.4.** Энергия связи электрона в основном состоянии атома гелия равна 24,6 эВ. Найдите энергию, необходимую для удаления обоих электронов из этого атома.

**6.1.** Электрон в невозбужденном атоме водорода получил энергию 12,1 эВ. На какой энергетический уровень он перешёл? Сколько линий спектра могут излучиться при переходе электрона на более низкие энергетические уровни?

**6.2.** В покоящемся атоме водорода электрон перешёл с пятого энергетического уровня в основное состояние. Какую скорость приобрёл атом за счет испускания фотона? Определите энергию отдачи.

**6.3.** Исходя из теории Бора, найдите скорость электрона на произвольном энергетическом уровне. Сравните скорость электрона на основном энергетическом уровне со скоростью света.

**6.4.** Чему равна разность энергии в электрон-вольтах между двумя линиями 0,5896 мкм и 0,589 мкм?

## Лабораторная работа № 6.3

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ИОНИЗАЦИИ АРГОНА

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определить потенциал ионизации атомов аргона.

#### ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Согласно современным теоретическим представлениям атомные системы могут находиться только в некоторых определенных состояниях, называемых стационарными. Каждому стационарному состоянию соответствует свое фиксированное значение энергии. Спектр допустимых значений энергий атомов является дискретным. Состояние с наименьшим допустимым значением энергии атома называется основным состоянием. Часто при взаимодействиях атома с внешними системами изменяется состояние только валентного (внешнего) электрона. Поэтому в данной работе мы будем считать, что энергия атома эквивалентна энергии валентного электрона, а состояние атома и состояние валентного электрона будем считать синонимами. Значения энергии разрешенного состояния называют энергетическими уровнями. На энергетических диаграммах энергетические уровни обозначают черточками. Если атом находится в основном состоянии, то все энергетические уровни, расположенные ниже энергетического уровня валентного электрона, заняты электронами, а все вышележащие уровни – свободны, смотри рисунок 3.1(а).

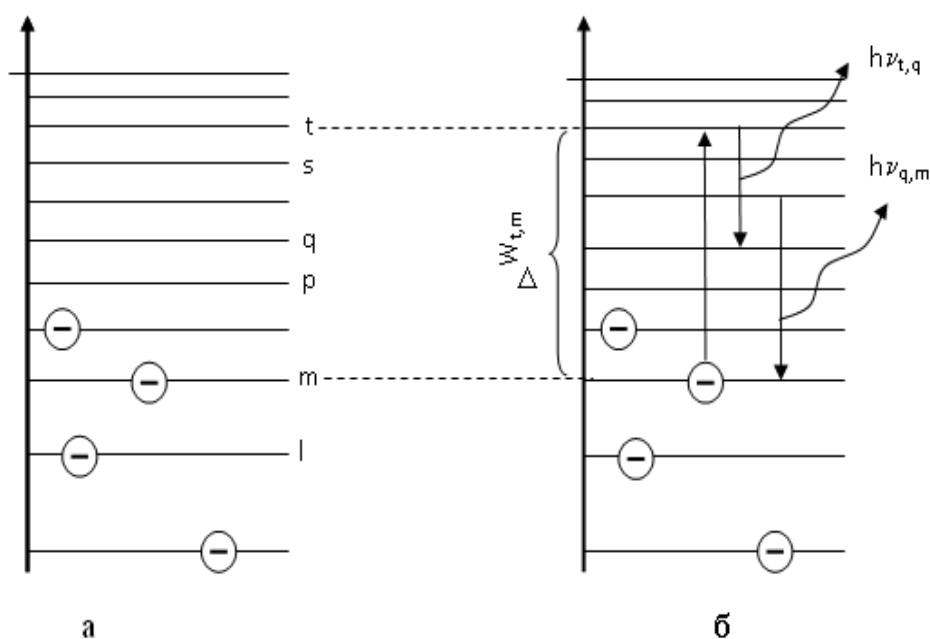


Рисунок 3.1 - Энергетическая диаграмма атома и некоторые возможные переходы

В случае внешних воздействий атом, т.е., как правило, один из его валентных электронов может получить дополнительную энергию  $\Delta W$  и перейти в какое-либо из разрешенных состояний с большей энергией, рис. 3.1(б). Такое состояние атома называется возбужденным. В возбужденном состоянии атом долго находиться не может. Очень быстро он спонтанно (самопроизвольно) возвращается непосредственно в основное состояние или переходит в одно из возбужденных состояний с меньшей энергией, например с уровня  $t$  на уровень  $m$  на рисунке 3.1(б).

Переход атомной системы из состояния с большей энергией  $W_k$  в состояние с меньшей энергией  $W_n$  сопровождается выделением энергии

$$\Delta W = W_k - W_n, \quad (1)$$

которая излучается в виде кванта электромагнитного излучения  $h\nu$ , так что:

$$h\nu = W_k - W_n \quad (2).$$

Соотношение а называется правилом частот.

Энергию возбуждения часто характеризуют потенциалом возбуждения. При этом под потенциалом возбуждения понимают ту разность потенциалов, которую должен пройти электрон, чтобы приобрести энергию, равную данной энергии возбуждения.

Если подведенная извне энергия превысит модуль энергии основного состояния валентного электрона, то валентный электрон, получив эту энергию, выйдет за пределы атома и станет свободным. Такой процесс называется ионизацией атома. В результате ионизации, нейтральный атом превращается в положительно заряженный ион и, кроме того, появляется свободный электрон.

Минимальная энергия, при которой возникает ионизация атомов, называется энергией ионизации  $W_i$ . Энергия ионизации атомов зависит от структуры атомов и характеризуется потенциалом ионизации. Потенциал ионизации равен той разности потенциалов, которую должен пройти электрон, чтобы приобрести энергию, равную энергии ионизации атома.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

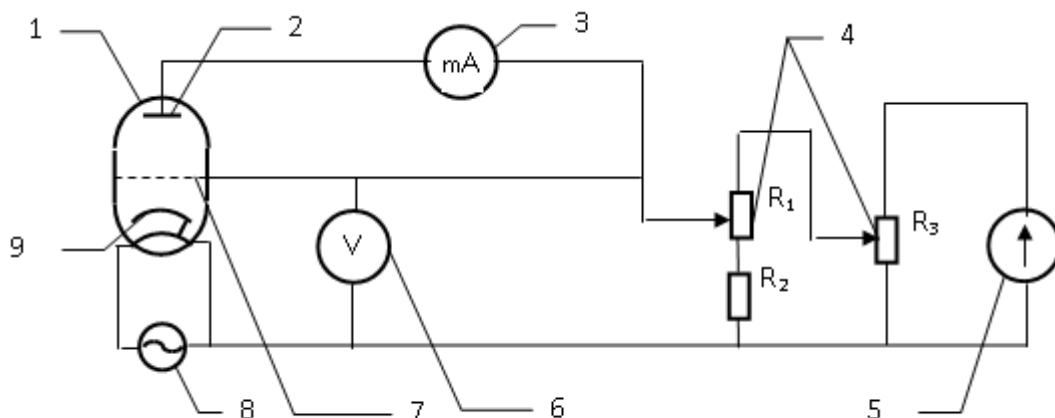


Рисунок 3.2 - Принципиальная схема установки

Установка, рис. 3.2, состоит из тиратрона (1), гальванометра (3), включенного в анодную цепь тиратрона, источника напряжения анодной цепи (5), вольтметра (6), измеряющего ускоряющее напряжение, источника питания (8) накала катода тиратрона. Потенциометры (4) служат для регулировки ускоряющего напряжения анодной цепи тиратрона.

Тиратрон представляет собой стеклянный баллон (1), заполненный аргоном с малым давлением. В баллон помещены три электрода: катод (9) подогревного типа, сетка (7) и анод (2).

Под действием напряжения накала нить накала и катод разогреваются. Возникает явление термоэлектронной эмиссии. Вследствие термоэлектронной эмиссии, вокруг разогретого катода образуется электронное облако. К катоду и сетке подведено ускоряющее напряжение. Под действием ускоряющего поля электроны, эмитируемые катодом, ускоряются, проходят сквозь ячейки сетки, далее попадают на анод (2) и регистрируются гальванометром (3) в виде анодного тока, рис.3.3.

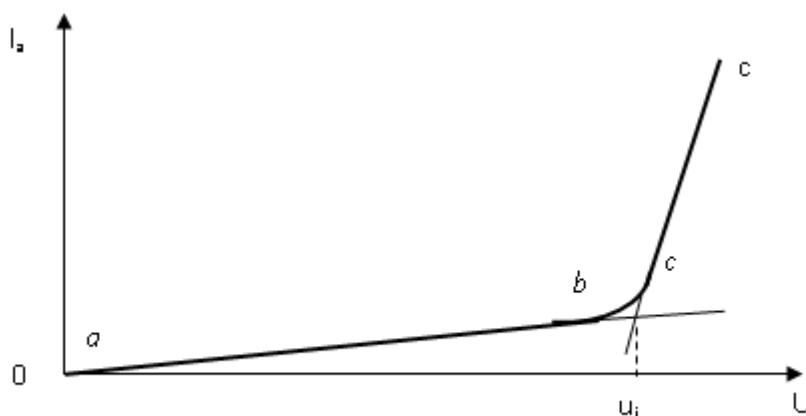


Рисунок 3.3 - Общий вид вольтамперной характеристики тиратрона

Увеличение ускоряющего напряжения сопровождается возрастанием анодного тока, участок  $a - b$  на рис.3.3. На участке  $a - b$  явления ионизации не происходит, поэтому рост силы тока достаточно слаб.

При прохождении участка катод-сетка, электроны приобретают:

$$W = eU \quad (3)$$

Если окажется, что энергия электронов больше, чем энергия ионизации:

$$W > W_i, \quad (4)$$

то катодные электроны, сталкиваясь с атомами аргона в области за сеткой, ионизируют атомы аргона. Ионизация атомов аргона сопровождается увеличением концентрации свободных электронов, создающих анодный ток, и, кроме того, образующиеся из атомов аргона положительные ионы, двигаясь к катоду, вносят дополнительный вклад в рост силы анодного тока. Вследствие этого, крутизна возрастания анодного тока резко увеличивается, участок  $b - c$  на рис. 3.3. Напряжение излома вольтамперной характеристики тиратрона, рис. 3.3, позволяет нам определить потенциал ионизации атомов аргона.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Работу рекомендуется выполнять в следующем порядке:

Собрать схему установки по рис. 3.1. Создать таблицу для занесения экспериментальных данных.

Табл. 1

U, В	2	4	...	12	14	14,2	14,4	...	18
I, мА									

Увеличивая напряжение при помощи потенциометров  $R_3$  и  $R_1$ , измерить напряжения вольтметром (6) и соответствующие этим напряжениям силы тока при помощи миллиамперметра (3). В начале рекомендуется проводить измерения достаточно «грубо» с шагом по напряжению  $\Delta U = 2$  В (участок  $a - b$  на рис.3.3) от 2 В до 12 В. Начиная с 14 В до 18 В менять напряжение с шагом  $\Delta U = 0,2$  В. Это необходимо, чтобы более точно отобразить область ионизации атомов аргона (участок  $b - c$  на рис.3.3).

Потенциометр  $R_3$  предназначен для грубой, а потенциометр  $R_1$  для точной установки напряжения. Результаты измерений занести в Табл. 1.

Построить график зависимости  $I(U)$ . На графике проведите две асимптоты, одна асимптота является продолжением участка  $a - b$ , другая участка  $b - c$  (рис.3.3). Из точки пересечения асимптот опустите перпендикуляр на ось U, данная точка даст потенциал ионизации аргона  $U_i$ . Запишите ответ в виде

$$U_i = \dots, \text{В}$$

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните в общих чертах строение атомов.
2. Какие состояния называются стационарными?
3. Что называют возбуждением атомов и ионизацией атомов?
4. Что называют потенциалом ионизации атомов?
5. Что понимают под энергетическими уровнями атомов.

6. Поясните схему и принцип действия лабораторной установки.
7. Почему крутизна вольтамперной характеристики резко увеличивается, когда ускоряющее напряжение превышает потенциал ионизации атомов?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 3. М.: Наука. 1979. §§ 12, 15, 16, 17, 28, 29.
2. Яворский Б.М. и Детлаф А.А. Курс физики. Том 3. М.: Высшая школа. 1972. §§ 13.2, 13.3, 13.4, 13.5, 14.1, 14.2.

## ЗАДАЧИ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

**1.1.** При каком значении потенциала между катодом и анодом будет наблюдаться резкое увеличение анодного тока, если трубку заполнить атомарным водородом?

**1.2.** Докажите, что минимальная кинетическая энергия, которой должен обладать электрон для ионизации одноатомного газа, равна:

$$\left( \frac{m v^2}{2} \right)_{\min} = A \left( 1 + \frac{m}{M} \right),$$

где:

$A$  - работа ионизации;

$m$  - масса электрона;

$M$  - масса атома.

**1.3.** Какую скорость должны иметь ионы водорода (протоны), чтобы вызвать ионизацию азота? Потенциал ионизации азота 14,5 В.

**2.1.** Определите первый потенциал возбуждения и энергию ионизации однозарядного иона гелия, находящегося в основном состоянии.

**2.2.** Докажите, что в  $S$  - состоянии могут находиться не больше двух электронов, а в  $p$  - состоянии - не более шести электронов.

**2.3.** Основываясь на том, что первый потенциал возбуждения атома водорода 10,2 эВ, определите в электрон-вольтах энергию фотона, соответствующую второй линии серии Бальмера.

**3.1.** Какой наименьшей скоростью должен обладать электрон, чтобы ионизировать атом гелия? Энергия ионизации атома гелия равна 24,5 эВ. Какую разность потенциалов должен пройти этот электрон?

**3.2.** Электрон, ускоренный электрическим полем, приобрел скорость, при которой его масса стала равной удвоенной массе покоя. Чему равна разность потенциалов, пройденная электроном?

**3.3.** Сколько  $s, p, d$  электронов находится в атоме на первом, втором и третьем энергетических уровнях?

**4.1.** Определите потенциал ионизации и потенциал (первый) возбуждения атома водорода.

**4.2.** В атоме  $K, L, M$  - оболочки заполнены полностью. Определите общее число электронов в атоме.

**4.3.** Электрон, прошедший разность потенциалов, равную 15 В, сталкивается с атомом водорода и ионизирует его. Определите, с какой скоростью движется электрон после столкновения.

**5.1.** Какую скорость должен иметь электрон, чтобы ионизировать атом аргона? Используйте для расчёта  $U_i$ , полученную вами в лабораторной работе.

**5.2.** В атоме  $K, L$  оболочки заполнены полностью. Определите:

общее число электронов в атоме,

- число  $s, p, d$  электронов,

- сколько  $p$  электронов имеют квантовое число  $m = 0$ ?

**5.3.** Какую скорость должны иметь ионы водорода (протоны), чтобы вызвать ионизацию гелия? Потенциал ионизации гелия равен 24,5 В.

**6.1.** Напишите электронные конфигурации, соответствующие атомам:

а) бора; б) углерода; в) натрия.

**6.2.** Электрон, прошедший разность потенциалов равную 17,6 В, сталкивается с атомом аргона и ионизирует его. Определите, какую разность потенциалов должен пройти этот электрон, чтобы при следующем столкновении с нейтральным атомом аргона вызвать ионизацию?

**6.3.** Докажите, что если электрон обладает энергией:

$$\left( \frac{mU^2}{2} \right)_{\min} = A \cdot \left( 1 + \frac{m}{M} \right),$$

где:

$A$  - работа ионизации,

$m$  - масса электрона,

$M$  - масса атома, с которым сталкивается электрон,

то электрон может вызвать ионизацию атома.



## Лабораторная работа № 6.4

### ИЗУЧЕНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИЭЛЕКТРИКЕ

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Провести экспериментальное исследование поглощения электромагнитного излучения оптического диапазона частот в диэлектрике.
2. Убедиться в справедливости закона Бугера.
3. Определить линейный коэффициент поглощения света  $\mu$  в диэлектрике для заданной длины волны. Исследовать частотную зависимость линейного коэффициента поглощения света  $\mu$  в диэлектрике в зависимости от длины волны.

#### ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Электромагнитные волны при прохождении через вещество всегда им поглощаются. Рассмотрим процессы, которые приводят к поглощению электромагнитного излучения.

1. Прохождение света через вещество ведёт к возникновению колебаний электронов среды под действием электромагнитного поля волны. Электроны среды, колеблющиеся с определённой частотой, переизлучают падающую электромагнитную энергию, вследствие чего возникает вторичное излучение, рассеянное по различным направлениям. Эта причина поглощения была впервые указана немецким физиком Планком и называется *затуханием вследствие излучения*. Она не вызывает превращения лучистой энергии первичной волны в другие формы энергии, а лишь обуславливает рассеяние этой лучистой энергии во все стороны. Таким образом, энергия электромагнитного потока, распространяющегося по первоначальному направлению, убывает, что и приводит к ослаблению светового потока.

2. Другая причина, приводящая к поглощению света веществом, возникает вследствие перехода лучистой энергии в *тепловую форму энергии*. Рассмотрим механизм этого перехода. Предположим, что атом среды поглощает фотон из падающего светового потока, этот атом может столкнуться с невозбуждённым атомом и передать невозбуждённому атому свою энергию от поглощённого фотона в виде энергии поступательного движения. Таким образом, световая энергия переходит в кинетическую энергию атома и, следовательно, в тепловую энергию среды.

3. Следующая причина, связанная с поглощением света, обусловлена многофотонным поглощением. В рамках квантовых представлений атом может поглотить фотон, если частота фотона соответствует частоте перехода между атомными уровнями  $E_m$  и  $E_n$ :

$$\omega_{mn} = \frac{E_m - E_n}{\hbar}$$

Оказывается, линии поглощения с частотой  $\omega$  может соответствовать переход атома из состояния  $n$  в состояние  $m$  не только в процессе поглощения одного фотона, но и с одновременным поглощением двух фотонов, если выполняется условие:

$$E_m - E_n = \hbar\omega_{mn} = 2\hbar\omega \quad (1)$$

Эту формулу можно обобщить на процесс, в котором поглощается три фотона или больше. Такое явление получило название в физике *многофотонного поглощения*. Многофотонное поглощение было теоретически предсказано М. Гепперт-Майер в 1931г., но экспериментально было обнаружено лишь в 1962г. при облучении кристалла  $\text{CaF}_2$ , активированного европием, светом рубинового лазера. Многофотонное поглощение может проявляться разнообразным образом. Если, например, вещество облучать светом, в составе которого есть спектральные компоненты с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , то может произойти поглощение двух фотонов  $\hbar\omega_1$  и  $\hbar\omega_2$ , при условии, что  $\omega_1 + \omega_2 = \omega_{MN}$ .

4. Многофотонное поглощение может привести к другой причине поглощения света. Если атом поглотил несколько фотонов, то может возникнуть ситуация, когда внешний (оптический) электрон может оторваться от атома и стать свободным, возникает так называемая *многофотонная ионизация*. Этот процесс как правило происходит в оптическом диапазоне, когда энергия фотона меньше энергии ионизация атома.

Перечисленные выше четыре причины поглощения характерны для видимого света, когда энергия фотонов падающего излучения не превосходит энергии ионизация атомов среды и реализуются при изучении закон ослабления интенсивности электромагнитного излучения в оптическом диапазоне.

**Зависимость интенсивности электромагнитного (ЭМ) излучения от расстояния, пройденного ЭМ волной описывается законом Бугера.**

Получим этот закон. Пусть коэффициент поглощения среды не зависит от интенсивности падающего потока излучения, что справедливо для слабой интенсивности потока.

Как следует из опыта, изменение интенсивности  $dI$  световой волны на элементарном пути  $dl$  прямо пропорционально величине этого пути и величине самой интенсивности  $I$ :

$$dI = -\mu I dl, \quad (2)$$

где  $\mu$  – постоянная, зависящая от свойств поглощающего вещества, и называемая линейным коэффициентом поглощения среды. Знак минус означает, что интенсивность световой волны убывает по мере прохождения волны в веществе.

Пусть на входе в поглощающий слой интенсивность световой волны равна  $I_0$ , найдём интенсивность световой волны  $I$ , прошедшей слой вещества толщины  $x$ . Для этого разделим переменные в уравнении (2) и затем проинтегрируем его:

$$\begin{aligned} \frac{dI}{I} &= -\mu dl \\ \int_{I_0}^I \frac{dI}{I} &= -\mu \int_0^x dl \end{aligned} \quad (3)$$

Проинтегрировав уравнение (3), мы получаем:

$$\ln I - \ln I_0 = -\mu x$$

Откуда следует окончательная формула:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (4)$$

где:

$I_0$  - интенсивность световой волны до входа в вещество,  $X=0$ .

$I$  - интенсивность световой волны после прохождения поглощающего слоя толщиной  $x$ ,

$\mu$  - линейный коэффициент поглощения.

Формула (4) называется законом Бугера. Согласно этому закону интенсивность световой волны убывает в поглощающем веществе экспоненциально.

При  $x = \frac{1}{\mu}$  интенсивность  $I$  оказывается в  $e$  раз меньше, чем  $I_0$ . Таким образом, линейный коэффициент поглощения  $\mu$  есть величина обратная толщине слоя, при прохождении которого интенсивность световой волны убывает в  $e$  раз. Далее под термином коэффициент поглощения будем понимать линейный коэффициент поглощения.

Ослабление интенсивности излучения зависит от плотности  $\rho$  поглощающего вещества, поэтому наряду с линейным коэффициентом  $\mu$ , вводят массовый коэффициент поглощения:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}. \quad (5)$$

**Определение коэффициента поглощения.** Для графического представления закона ослабления прологарифмируем выражение (4):

$$\ln I = \ln I_0 - \mu x \quad (6)$$

Логарифм интенсивности световой волны на выходе из поглощающего слоя линейно зависит от толщины  $x$  поглощающего слоя. Зависимость (6) легко может быть проверена экспериментально построением соответствующего графика, Рис. 4.1

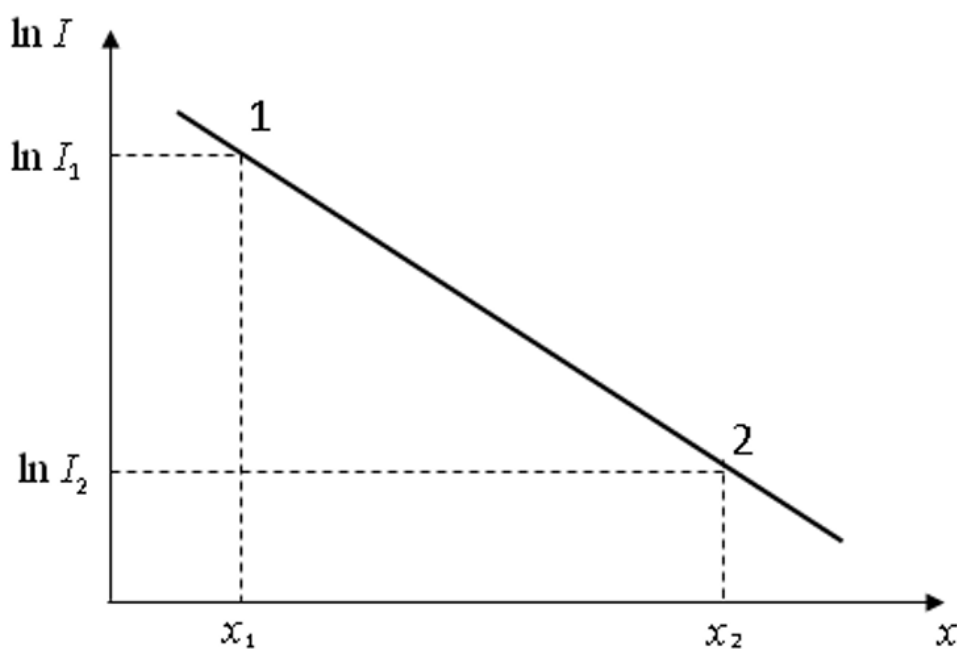


Рис. 4.1 График зависимости логарифма интенсивности ослабленного пучка от толщины поглощающего слоя.

Построив график (рис. 4.1), возьмем на нем две любые точки 1 и 2. В точке 1 имеем  $\ln I = \ln I_1$  и  $x = x_1$ , а в точке 2 соответственно  $\ln I = \ln I_2$  и  $x = x_2$ . Подставив эти данные в (6), получим два уравнения:

$$\ln I_1 = \ln I_0 - \mu x_1 \quad (7)$$

$$\ln I_2 = \ln I_0 - \mu x_2 \quad (7a)$$

Решая эти уравнения относительно  $\mu$ , мы получаем расчетную формулу для линейного коэффициента поглощения:

$$\mu = \frac{\ln I_1 - \ln I_2}{x_2 - x_1} \quad (8)$$

Формула (8) позволяет вычислить коэффициент поглощения электромагнитного излучения для исследуемого вещества.

### **Поглощение излучения при прохождении через ряд слоев вещества.**

При прохождении излучения через несколько слоев вещества закон Бугера применяется последовательно к каждому слою при этом интенсивность света на входе  $i$  – го слоя равна интенсивности на выходе  $(i - 1)$  – го слоя. В результате закон Бугера запишется в виде:

$$I = I_0 \exp(\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 + \mu_3 x_3 + \dots) = I_0 \exp(\sum_{i=1}^n \mu_i x_i), \quad (9)$$

где  $\mu_i$  и  $x_i$  – коэффициент поглощения и толщина  $i$  – го слоя.

## **Эксперимент**

В эксперименте будет исследоваться прохождение света с заданной длиной волны через ряд стеклянных пластин с одинаковым коэффициентом поглощения. При этом, поглощением света в воздушном зазоре между пластинами будем пренебрегать ввиду его малости и слабого поглощения света в воздухе. При расчете коэффициента поглощения зависимость интенсивности света от коэффициента отражения не будет учитываться ввиду того, что она является более слабой, чем экспоненциальная зависимость в законе Бугера.

Интенсивность света измеряется с помощью полупроводникового фотоприемника. В этом случае фототок  $i_\Phi$ , выдаваемый фотоприемником, пропорционален падающему световому потоку  $\Phi$  и интенсивности световой волны  $I$  на входе фотоприемника

$$i_\Phi \sim \Phi \sim I$$

Фототок поступает в цифровой вольтметр, напряжение на выходе которого, пропорционально фототоку

$$U \sim i_\Phi \sim I$$

Таким образом, мы видим, что сигнал, снимаемый с цифрового вольтметра  $U$  прямо пропорционален интенсивности световой волны на входе фотоприемника. Это может быть записано в виде формулы

$$U = kI \quad (10)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности между напряжением и интенсивность световой волны на входе фотоприемника.

Схема лабораторной установки для первого задания приведена на Рис. 4.2 Установка размещается на оптической скамье (1). Она состоит из источника питания (6), полупроводникового светодиода (5), который используется в качестве источника монохроматического излучения и излучает свет в трёх диапазонах:

красном, зелёном и синем. Световая волна от источника проходит через поглощающее вещество – набор стеклянных пластинок (4), и попадает в фотоприёмник (3). Фотоприёмник преобразует энергию световой волны в фотоЭДС, которая фиксируется милливольтметром (2). Таким образом, интенсивность электромагнитного излучения мы определяем по показаниям милливольтметра (2), который фиксирует напряжение  $U$ , создаваемое фотоприемником.

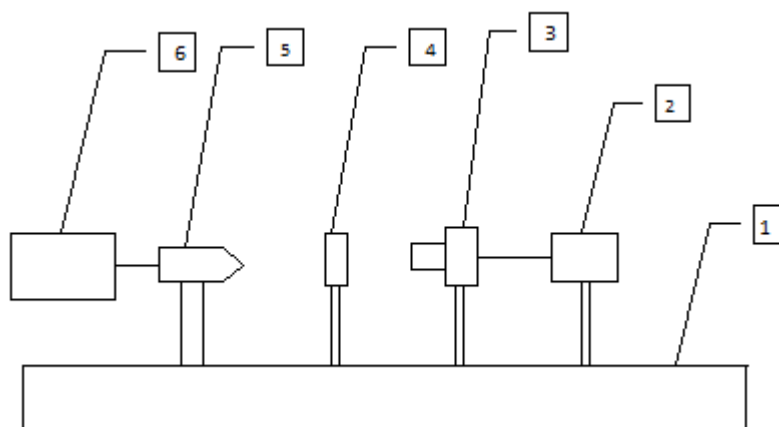


Рис. 4.2 Структурная схема лабораторной установки для исследования поглощения электромагнитных волн в оптическом диапазоне. 1 – оптическая скамья; 2 – милливольтметр; 3 – фотоприёмник; 4 – пластинки с поглощающим веществом; 5 – полупроводниковый светодиод; 6 – источник питания светодиода.

На Рис. 4.3 изображена фотография установки. Основные узлы установки показаны выносными линиями и подписаны. Слева на столе показаны стеклянные пластинки (светофильтры), которые используются в качестве поглощающего вещества.

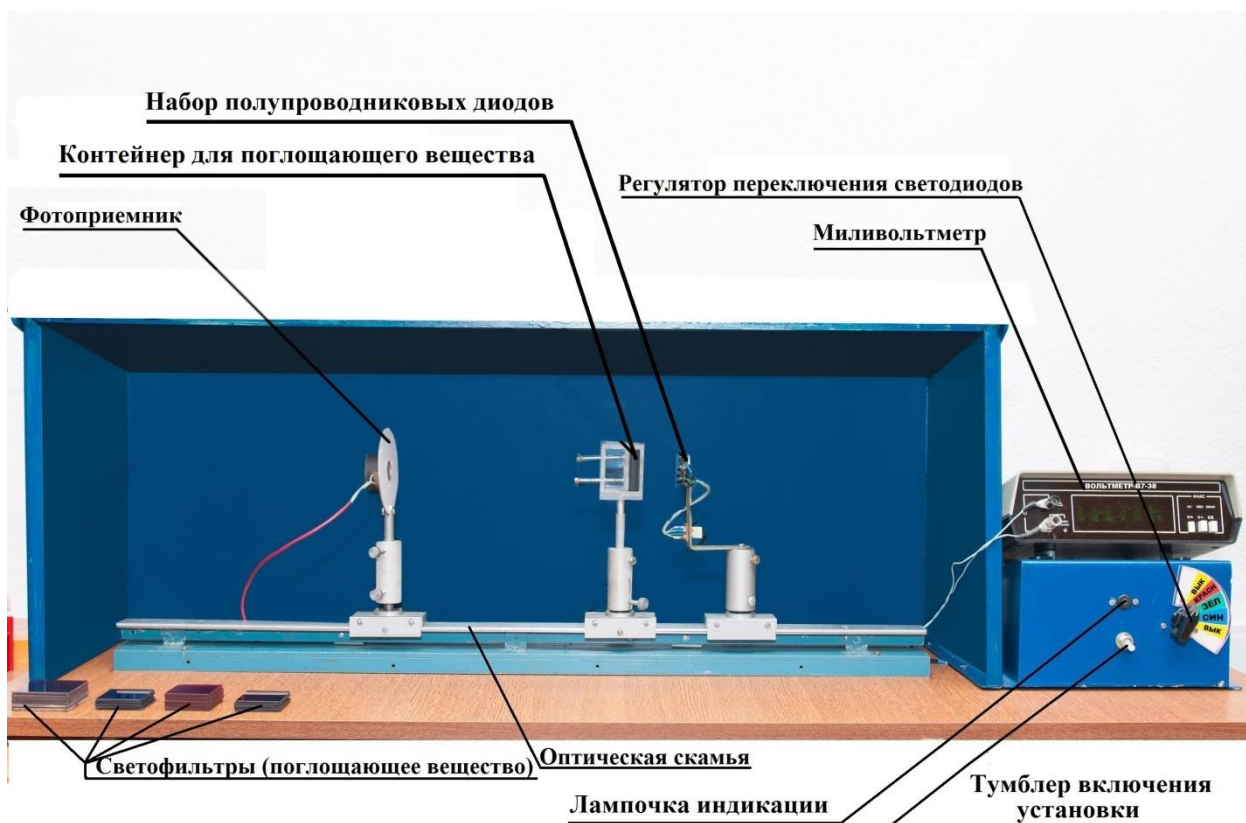


Рис. 4.3 Фотография установки.

**Задание 1.** Экспериментальное исследование поглощения электромагнитного излучения оптического диапазона частот в диэлектрике (стеклянных пластинках). Проверка закона Бугера.

### Порядок выполнения задания

Измерения проводятся:

- в красном диапазоне –  $\lambda = 630$  нм;
- в зелёном диапазоне –  $\lambda = 520$  нм;
- в синем диапазоне –  $\lambda = 440$  нм;

#### Часть 1.

1. Переведите регулятор переключения светодиодов в положение, соответствующее красной длине волны.

2. Установите стеклянные пластинки в установку из набора №1 или №2 (по заданию преподавателя). Все пластинки в наборе одинаковы, и имеют одну и ту же толщину, которая указана на наборе или задается преподавателем. Пластинки устанавливаются последовательно одна за другой. Чем больше толщина поглощающего слоя, тем меньшая интенсивность световой волны, попадающей в фотоприёмник. В Табл. 1 последовательно фиксируются  $N$  – количество пластинок, помещённых в установку;  $x = Nl$  – толщина поглощающего слоя;  $U$  – напряжение милливольтметра.

$\lambda = 630$  нм , красный диапазон, толщина пластины стекла  $l = \dots$

Табл. 1.

$N$	1	2	3	4	5	6
$x = N \cdot l$ , мм						
$U$ , мВ						
$\ln U$						
$\mu_{\text{кр}}$ , М <sup>-1</sup>						

### Определение коэффициента поглощения $\mu$

По экспериментальным данным из таблицы 1 строится график функции  $\ln U = f(x)$ , т.е. по оси абсцисс откладываем толщину поглощающего слоя  $x$ , а по оси ординат  $\ln U$ . В соответствии с (6) мы получаем линейную зависимость. Следовательно, данный график следует аппроксимировать линейной зависимостью, т.е. провести прямую линию через экспериментальные точки максимально близко. Для более точного определения коэффициента поглощения  $\mu$  при построении график  $\ln U = f(x)$ , рекомендуется воспользоваться пакетом Excel, где аппроксимация линейной зависимости проводится по методу наименьших квадратов.

На полученном графике выбираем две произвольные точки. При этом желательно брать первую точку в начале, а вторую в конце экспериментальной прямой (Рис. 4.1). Нельзя брать экспериментальные точки слишком близко, т.к. при этом сильно возрастает погрешность расчёта коэффициента поглощения  $\mu$ . Полученные величины подставляем в формулу для расчёта  $\mu$ .

$$\mu = \frac{\ln U_1 - \ln U_2}{x_2 - x_1} \quad (11)$$

#### Часть 2.

Во второй части задания 1 мы проводим аналогичные измерения, как и в первой части задания 1 для зелёной длины волны для заданного набора стеклянных пластинок. Соответственно заполняем Табл. 2, строим по ней график и определяем коэффициент поглощения  $\mu_{\text{зел}}$  для данного сорта стекла и заносим его в Табл. 2.

$\lambda = 520$  нм , зелёный диапазон, толщина пластины стекла  $l = \dots$

Табл. 2.

$N$	1	2	3	4	5	6
$x = N \cdot l$ , мм						
$U$ , мВ						
$\ln U$						
$\mu_{\text{зел}}$ , М <sup>-1</sup>						

#### Часть 3.

В третьей части задания 1 мы проводим аналогичные измерения, как и в первой части задания 1 для синей длины волны для заданного набора стеклянных

ных пластинок. Соответственно заполняем Табл. 3, строим по ней график и определяем коэффициент поглощения  $\mu_{\text{син}}$  для данного сорта стекла и заносим его в Табл. 3.

$\lambda = 440$  нм, синий диапазон, толщина пластины стекла  $l = \dots$

Табл. 3.

$N$	1	2	3	4	5	6
$x = N \cdot l, \text{ мм}$						
$U, \text{ mV}$						
$\ln U$						
$\mu_{\text{син}}, \text{ М}^{-1}$						

## Задание 2.

Исследование частотной зависимости линейного коэффициента поглощения света,  $\mu$ , в диэлектрике и его зависимость от длины волны. Задание выполняется для одного из наборов стекол, который задается преподавателем. По результатам, приведенным в таблицах 1 – 3, заполнить Табл. 4 и построить графики зависимостей  $\mu = f(\lambda)$  и  $\mu = f(\nu)$ .

Табл. 4 Частотная зависимость линейного коэффициента поглощения света в стекле и его зависимость от длины волны

$l = \dots$  (Набор стёкол задаётся преподавателем).

$\lambda, \text{ нм}$	440 Синий диапазон	520 Зеленый диапазон	630 Красный диапа- зон
$\nu \cdot 10^{15} \text{ Гц}$			
$\mu, \text{ М}^{-1}$			

## Выводы по лабораторной работе

В этом разделе студент сравнивает полученные результаты с теорией и обосновывает полученные данные.

В данной лабораторной работе желательно все графики выполнять на миллиметровой бумаге или распечатывать пакетом Excel с соответствующей сеткой.

## Контрольные вопросы

1. Объясните процесс перехода световой энергии в веществе в тепловую форму энергии.
2. Объясните процесс многофотонного поглощения света в веществе. Запишите формулу для энергии атома в случае поглощения  $n$  фотонов.
3. Объясните процесс многофотонной ионизации в веществе. Выведите формулу для энергии выбитого электрона  $E_e$  в данном процессе.



4. Выведите закон изменения интенсивности электромагнитного излучения в веществе в зависимости от толщины поглощающего слоя.
5. Дайте определение линейного коэффициента поглощения  $\mu$ .
6. Дайте определение массового коэффициента поглощения.
7. Почему зависимость  $I(x)$  лучше всего исследовать в полулогарифмическом масштабе?

### Задачи к лабораторной работе

**1.1** При прохождении света в стекле пути  $l$  интенсивность световой волны уменьшилась в 4 раза. Определить во сколько раз уменьшится интенсивность световой волны при прохождении пути  $2l$ . ( $\frac{I_0}{I} = 16$ )

**1.2** Вычислите толщину половинного ослабления при условии, что узкий пучок лазерного излучения уменьшает свою интенсивность в 5 раз при толщине поглощающего слоя глицерина 10 см. ( $l = 4,3$  см)

**2.1** Определите, во сколько раз изменится интенсивность светового пучка при прохождении через два слоя вещества, состоящего из стекла толщиной 10 см и слюды - толщиной 5 см. Коэффициент линейного ослабления для стекла  $8 \text{ м}^{-1}$ , для слюды -  $16 \text{ м}^{-1}$ . ( $\frac{I_0}{I} = 4,95$ )

**2.2** Найти отношение интенсивностей пучков электромагнитного излучения  $\lambda_1 = 694 \text{ нм}$  и  $\lambda_2 = 564 \text{ нм}$  при прохождении их через слой ацетона толщиной 10 см, если массовый коэффициент поглощения для данных длин волн составляет, соответственно,  $\mu_{1m} = 0,054 \frac{\text{м}^2}{\text{кг}}$  и  $\mu_{2m} = 0,02 \frac{\text{м}^2}{\text{кг}}$ , а начальная интенсивность в обоих пучках одинакова? ( $\frac{I_2}{I_1} = 14,23$ )

**3.1** Определите интенсивность узкого пучка электромагнитного излучения в месте входа в слой глицерина толщиной 10 см, если интенсивность пучка в месте выхода равна  $19 \text{ Вт/м}^2$ , а массовый коэффициент поглощения составляет  $\mu_m = 0,01 \frac{\text{м}^2}{\text{кг}}$  ( $I_0 = 67 \text{ Вт/м}^2$ )

**3.2** При прохождении через один и тот же слой керосина поток электромагнитного излучения с длиной волны  $\lambda_1$  ослабляется в  $N_1$  раз, а поток электромагнитного излучения с длиной волны  $\lambda_2$  ослабляется в  $N_2$  раз. Определите линейный коэффициент поглощения для электромагнитного излучения с длиной волны  $\lambda_2$ , если линейный коэффициент поглощения для  $\lambda_1$  равен  $k_1$ . ( $\mu_2 = k_1 \frac{\ln N_2}{\ln N_1}$ )

**4.1** Интенсивность света двух различных волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  измеряются в жидкости непосредственно у поверхности и на глубине  $d$ . Оказалось, что  $I_{01} = I_{02}$ , а на глубине  $d$ :  $I_1 = 2I_2$ . Определите, на какой глубине интенсивность света с длиной волны  $\lambda_1$  превысит интенсивность света с длиной волны  $\lambda_2$  в 10 раз. ( $l = d \frac{\ln 10}{\ln 2}$ )

**4.2** Коэффициент поглощения стеклянной пластины для монохроматического света составил  $\mu = 0,1 \text{ см}^{-1}$ . Определить толщину слоя стекла, которая необходима для ослабления световой волны в 2 раза. ( $l = 6,93$  см)

**5.1** Сколько слоев половинного ослабления в пластинке, которая уменьшает интенсивность лазерного пучка в 50 раз? ( $N = 5,64$ )

**5.2** Найдите для этилового эфира толщину слоя половинного ослабления узкого пучка монохроматического электромагнитного излучения, если соответствующий массовый показатель ослабления  $\frac{\mu}{\rho} = 0,032 \text{ см}^2/\text{Г}$ , где  $\mu$  - линейный коэффициент ослабления,  $\rho$  - плотность вещества. ( $l = 30,5 \text{ см}$ )

**6.1** Узкий пучок лазерного излучения проходит через слой ацетона толщиной 12 см, при этом массовый коэффициент поглощения  $\mu_{1m} = 0,036 \frac{\text{м}^2}{\text{кг}}$ . Какой толщины надо взять слой керосина с массовым коэффициентом поглощения  $\mu_{2m} = 0,051 \frac{\text{м}^2}{\text{кг}}$ , чтобы он ослабил данный пучок в такой же степени? ( $l = 8,27 \text{ см}$ )

**6.2** Плоская монохроматическая волна распространяется в прозрачной среде. Коэффициент поглощения среды для данной частоты составил  $\mu = 1,2 \text{ м}^{-1}$ . Определить на сколько процентов уменьшится интенсивность световой волны при прохождении пути 1 м. (70%)

## Литература

1. Трофимова Т.И. Краткий курс физики. –М.: Высш. шк., 2006. – 352 с.
2. Трофимова Т.И., Фирсов А.В. Курс физики. Задачи и решения М.: Высш. шк., 2011. – 592 с.

## Дополнительная литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 3-М.: Наука, 1979, § 9.

## Лабораторная работа № 6.5.

### ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить зависимость фототока от приложенного напряжения.
2. Изучить зависимость задерживающего потенциала от частоты падающего света.
3. Определить постоянную Планка.

#### ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Внешним фотоэлектрическим эффектом называется явление испускания (эмиссии) электронов телами под действием света. В данной работе изучается фотоэффект с поверхности металлов.

Фотоэффект с поверхности металлов объясняется взаимодействием фотонов с валентными электронами металла. Валентные электроны в металлах являются "свободными", в том смысле, что они не связаны с отдельными атомами, хотя они остаются связанными с кристаллической решеткой в целом. Благодаря этому валентные электроны в металлах могут легко перемещаться по всему объему металла. Для того чтобы "свободный" электрон мог покинуть металл и выйти в окружающее пространство, ему необходимо сообщить энергию, равную энергии связи электрона с кристаллической решеткой. Эту энергию называют работой выхода  $A$ . Работа выхода зависит от материала, состояния его поверхности и многих других факторов.

При взаимодействии фотона со "свободным" электроном металла фотон отдает свою энергию  $h\nu$  "свободному" электрону металла и прекращает свое существование.

Если

$$h\nu \geq A \quad (1)$$

то возможен выход электрона за пределы металла, и, в этом случае, наблюдается фотоэффект. В формуле (1)  $h$  – постоянная Планка, а  $\nu$  – частота света. Выбитые электроны называются фотоэлектронами. Таким образом, фотоэффект возможен только в том случае, когда частота падающего света превышает некоторое критическое значение:

$$\nu_0 = \frac{A}{h} \quad (2)$$

называемое красной границей фотоэффекта.

В соответствии с законом сохранения энергии при фотоэффекте часть  $A$  энергии  $h\nu$ , полученной от фотона, фотоэлектрон затратит на выход из металла, а остаток  $h\nu - A$  сохранит в виде кинетической энергии. При выходе фотоэлектронов из металла возможны, помимо затрат на работу выхода, и другие побочные энергетические потери, например, на нагревание металла. Поэтому разные фотоэлектроны обладают различной кинетической энергией. Наибольшей кинетической энергией обладают электроны, не испытавшие побочных потерь энергии. Для таких фотоэлектронов уравнение сохранения энергии принимает вид:

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2} \quad (3)$$

Уравнение (3) называется уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.

Явление фотоэффекта изучается обычно при помощи схемы, представленной на рис.5.1.

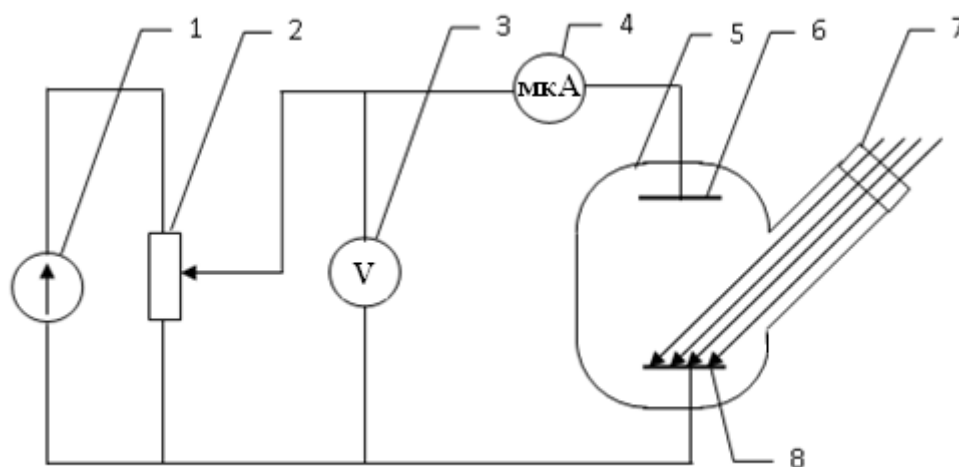


Рисунок 5.1 – Принципиальная схема для исследования законов фотоэффекта

Главный элемент данной схемы – это фотоэлемент, который состоит из стеклянного или металлического баллона (5), фотокатода (8), анода (6). Внутри баллона создан вакуум. Исследуемый металл наносят на фотокатод. Фотоэлемент имеет кварцевое окно (7) для света. Фотоэлемент через гальванометр (4) при помощи потенциометра (2) подключаются к источнику питания (1). Напряжение между катодом и анодом фотоэлемента измеряется вольтметром (3), а силу тока в фотоэлементе – гальванометром (4). Потенциометр в данной схеме служит для изменения напряжения на фотоэлементе.

При помощи данного устройства можно построить зависимость тока, протекающего через фотоэлемент от приложенного к нему (фотоэлементу) напряжения,

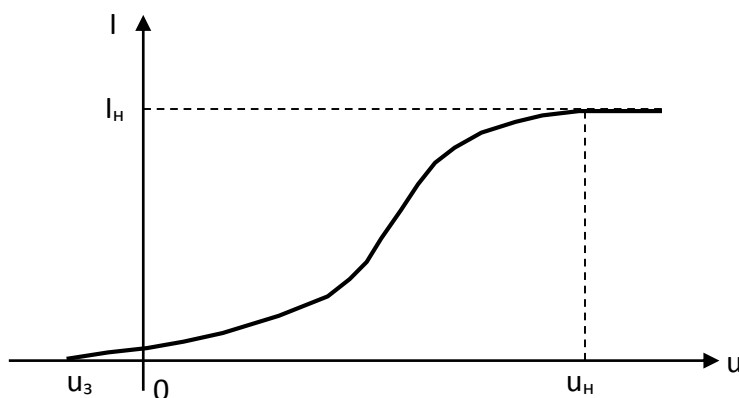


Рисунок 5.2 – Общий вид вольтамперной характеристики фотоэлемента которую мы будем называть вольтамперной характеристикой (ВАХ) фотоэлемента. На рис.5.2 показан общий вид ВАХ фотоэлемента.

При напряжениях анода  $U \geq U_n$  ток через гальванометр не зависит от приложенного напряжения. Этот ток называется током насыщения. Явление насыщения обусловлено тем, что в режиме, при котором  $U \geq U_n$ , в окрестности катода не существует электронного облака, все электроны, выбиваемые светом из катода,

сразу же отводятся на анод. В режиме насыщения фототок прямо пропорционален интенсивности эмиссии фотоэлектронов под действием света. Поэтому, изучая зависимость фототока насыщения от падающего светового потока, мы тем самым исследуем зависимость интенсивности фотоэмиссии от падающего светового потока. Согласно закону Столетова ток насыщения фотоэлемента прямо пропорционален падающему на катод световому потоку.

Вольтамперная характеристика позволяет также определить величину наибольшей кинетической энергии фотоэлектронов. Действительно, если на анод подать отрицательный потенциал, то электроны, выбиваемые светом из катода, оказываются в тормозящем электрическом поле. Их движение в направлении анода в этом случае, возможно благодаря запасу кинетической энергии в момент вылета фотоэлектронов из катода.

Будем увеличивать величину тормозящего потенциала. Как только работа против сил тормозящего поля:

$$A_{\text{торм}} = e \cdot U_{\text{торм}} \quad (4)$$

сравнивается с наибольшей кинетической энергией выбиваемых светом фотоэлектронов:

$$W_k = \frac{m \cdot v_{\text{max}}^2}{2} \quad (5)$$

фототок, регистрируемый гальванометром, прекратится. Потенциал анода, при котором фототок становится равным нулю, называется задерживающим -  $U_3$ .

Таким образом,

$$e \cdot U_3 = \frac{m \cdot v_{\text{max}}^2}{2} \quad (6)$$

и задерживающий потенциал однозначно характеризует наибольшую кинетическую энергию выбитых электронов. Подставляя (6) в уравнение Эйнштейна, получим:

$$U_3 = \frac{h}{e} \nu - \frac{A}{e} \quad (7)$$

т.е. задерживающий потенциал прямо пропорционален частоте падающего света и не зависит от величины падающего светового потока.

Освещая фотокатод монохроматическим светом различных частот, и, измеряя соответствующие значения задерживающего потенциала, можно экспериментально изучить зависимость  $U_3$  от  $\nu$  и убедиться в справедливости уравнения (7). Построенная прямая (7) позволяет определить постоянную Планка. Для этого возьмем на прямой две произвольные точки 1 и 2 и запишем уравнение (7) для этих точек:

$$U_{31} = \frac{h}{e} \nu_1 - \frac{A}{e} \quad (8a)$$

$$U_{32} = \frac{h}{e} \nu_2 - \frac{A}{e}. \quad (8б)$$

Мы получили систему из двух уравнений с двумя неизвестными  $h$  и  $A$ . Решив ее относительно  $h$ , получим:

$$h = \frac{U_{32} - U_{31}}{\nu_2 - \nu_1} \cdot e. \quad (9)$$

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема установки показана на рис. 5.3. Установка состоит из точечного источника света (1), светофильтров (2), вакуумного фотоэлемента (3), гальванометра (4), вольтметра (5), переключателя (6) источников ускоряющего (8) и тормозящего (10) напряжений, потенциометров (7) и (9) для регулирования напряжений.

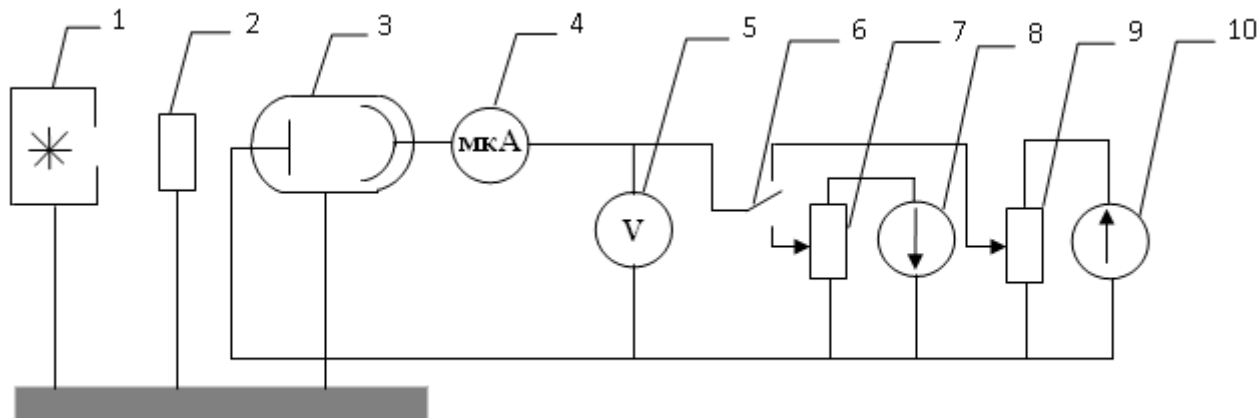


Рисунок 5.3 – Схема установки

Точечный источник света, расположенный на расстоянии  $r$  от фотоэлемента, создает на катоде фотоэлемента освещенность:

$$E = \frac{I \cdot \cos \alpha}{r^2}. \quad (10)$$

Здесь  $I$  - сила света источника,  $\alpha$  - угол падения света на катод. В нашей установке  $\alpha = 0$ . Если площадь катода равна  $S$ , то световой поток  $\Phi$ , падающий на катод, равен:

$$\Phi = \frac{I \cdot S}{r^2}. \quad (11)$$

Зная силу света  $I$  и площадь  $S$  и, изменяя  $r$ , мы можем задавать световой поток  $\Phi$ , падающий на фотоэлемент. Для каждого  $r$  можно построить ВАХ при ускоряющем потенциале на аноде и определить ток насыщения  $i_n$ . По совокупности  $\Phi$  и соответствующих им  $i_n$  можно построить график зависимости  $i_n$  от  $\Phi$  и проверить закон Столетова.

Устанавливая между источником света (1) и фотоэлементом (3) различные светофильтры (2), мы можем облучать катод фотоэлемента примерно монохроматическим светом различных частот. Включив в цепь фотоэлемента при помощи переключателя (6) источник (10) тормозящего поля, мы можем для каждой частоты  $\nu$  измерить задерживающий потенциал  $U_z$  и, тем самым, проверить зависимость (7).

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Задание 1. Построение ВАХ для внешнего фотоэффекта и проверка закона Столетова.

Подготовить Табл.1 и Табл.2 для снятия экспериментальных данных.

Табл.1

г, см	70		65		...		30		25	
	$i$ , мкА	U, В	$i$ , мкА	U, В	$i$ , мкА	U, В	$i$ , мкА	U, В	$i$ , мкА	U, В
		0		0		0		0		0
		5		5		5		5		5
		10		10		10		10		10
		...		...		...		...		...
		45		45		45		45		45
		50		50		50		50		50

В Табл.1 первая строчка показывает расстояние от источника света до фотоэлемента. Его рекомендуется изменять на 5 см. Многоточие в строке г, (см Табл.1) показывает, что вы сами должны вставить пропущенные расстояния с шагом 5 см от 70 см до 25 см включительно. Столбцы U, В показывают напряжение на фотоэлементе. Все столбцы U, В заполняются однотипным образом от 0 В до 50 В с шагом 5 В. Многоточие в столбцах U, В показывает, что вы сами должны вставить пропущенные напряжения с шагом 5 В от 0 В до 50 В включительно.

Табл.2

г, см	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$\Phi$ , лм										
$i_n$ , мкА										

#### Ход выполнения задания.

1. Отодвинуть фотоэлемент на расстояние 70 см от источника света.
2. Осветить фотоэлемент белым светом и переключателем (6) ввести в схему источник ускоряющего напряжения.
3. Увеличивая напряжение  $U$  на аноде фотоэлемента от 0 до 50 В с шагом 5 В, измерить фототоки  $i$  и внести их в Табл.1.
4. Уменьшая расстояние  $r$  между источником света и фотоэлементом с шагом 5 см, выполнить измерения по пункту 3 вдоль всей скамьи для каждого расстояния. Внести данные в Табл.1.

По полученным результатам измерений построить ВАХ фотоэлемента, определить по графику ток насыщения  $i_n$  для каждого расстояния и внести в Табл.2. Вычислить по формуле (11) световые потоки  $\Phi$  для каждой точки измерений и внести в Табл.2. По данным Табл.2 построить график зависимости  $i_n(\Phi)$ . При построении графика  $i_n(\Phi)$  учитывайте, что теоретическая зависимость  $i_n(\Phi)$  является линейной. Поэтому аппроксимируйте данный график прямой, которая максимально близко лежит к вашим экспериментальным точкам.

Задание 2. Изучение зависимости задерживающего напряжения от частоты света.

Подготовить Табл.3 для снятия экспериментальных данных.

Табл.3

$\lambda$ , нм	610	550	500
$\nu$ , Гц			
$U_z$ , В			

Ход выполнения задания.

1. Подключить к схеме переключателем (6) источник тормозящего напряжения и установить тормозящее напряжение равным нулю.
2. Между источником света и фотоэлементом ввести красный светофильтр (610 нм).
3. Установить фотоэлемент на расстоянии 25 см от источника света.
4. Увеличивая тормозящее напряжение, найти такое его значение, при котором фототок равен нулю. Это и есть задерживающее напряжение  $U_z$ . Внести его в Табл.3.
5. Выполнить измерения по пункту 4 для каждого светофильтра.

Зная длины волн  $\lambda$  пропускаемые светофильтром и учитывая связь между длиной волны  $\lambda$  и частотой  $\nu$

$$\lambda\nu = c,$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме, вычислить соответствующие им частоты и внести их в Табл.3. Построить график зависимости  $U_z(\nu)$ . При построении учитывайте тот факт, что теоретическая зависимость  $U_z(\nu)$  является линейной. Поэтому аппроксимируйте данный график прямой, которая максимально близко лежит к вашим экспериментальным точкам.

Задание 3. Определение постоянной Планка.

На графике, построенном по результатам задания 2, выбрать две произвольные точки и по формуле (9) вычислить постоянную Планка  $h$ .

**Контрольные вопросы**

1. Что называется внешним фотоэффектом?
2. Объясните механизм возникновения фотоэффекта.
3. Поясните смысл уравнения Эйнштейна.
4. Сформулируйте основные закономерности фотоэффекта.
5. Поясните, как используется ВАХ фотоэлемента для изучения законов фотоэффекта.
6. Поясните схему для проверки закона Столетова.
7. Поясните схему для определения постоянной Планка.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 3. -М.: Наука, 1979, § 9.
2. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Курс физики. Том 3. - М.: "Высшая школа", 1972, §11.1



## ЗАДАЧИ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

**1.1.** Фотоэлектрон выбивается из цезия с кинетической энергией 2 эВ. Определите максимальную длину волны и энергию фотона, который может выбить этот электрон.

**1.2.** Железный шарик, отдаленный от других тел, облучают монохроматическим излучением длиной волны 2000 Å. До какого максимального потенциала зарядится шарик, теряя фотоэлектроны? Работа выхода электрона из железа равна 4,36 эВ.

**1.3.** Определите постоянную Планка, если известно, что фотоэлектроны, вырывающиеся с поверхности металла излучением с частотой  $2,2 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ , полностью задерживаются обратным потенциалом 6,6 В, а вырывающиеся излучением с частотой  $4,6 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$  - потенциалом 16,5 В.

**1.4.** Монохроматическое излучение с длиной волны 6000 Å падает на фоточувствительную поверхность, чувствительность которой равна 9 мА/Вт, освобождая при этом 920 фотоэлектронов. Определите число квантов, попавших на поверхность.

**1.5.** Определить максимальную скорость фотоэлектронов, вырывающихся с поверхности цинка (работа выхода  $A = 4 \text{ эВ}$ ) при облучении гамма – квантами с длиной волны 2.47 пм.

Указание: при решении воспользоваться формулой для кинетической энергии в релятивистской механике: 
$$W_k = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

**2.1.** Найдите задерживающий потенциал для фотоэлектронов, испускаемых при освещении калия светом с длиной волны 330 нм.

**2.2.** Кванты света с энергией 4,9 эВ выбивают фотоэлектроны из металла с работой выхода 4,5 эВ. Найдите максимальный импульс, передаваемый поверхности металла при вылете каждого электрона. Определите кинетическую энергию и скорость вылетевших электронов.

**2.3.** До какого потенциала можно зарядить удаленный от других тел цинковый шарик, облучая его ультрафиолетовым излучением с длиной волны 200 нм?

**2.4.** Определите энергию и импульс фотона, если соответствующая ему длина волны равна 1,6 нм.

**2.5.** Какую энергию должен иметь фотон, чтобы его масса была равна массе покоя электрона?

**3.1.** При фотоэффекте с платиновой поверхности задерживающий потенциал оказался равным 0,8 В. Найдите:

а) длину волны и частоту падающих фотонов;

б) максимальную длину волны, при которой возможен фотоэффект.

**3.2.** На поверхность металла падают монохроматические лучи с длиной волны 0,1 мкм. Красная граница фотоэффекта 0,3 мкм. Какая доля энергии фотона расходуется на сообщение электрону кинетической энергии?

**3.3.** Фотон с энергией 10 эВ падает на серебряную пластинку и вызывает фотоэффект. Определите импульс, полученный пластинкой, если принять, что направление движения фотона и фотоэлектрона лежат на одной прямой, перпендикулярной поверхности пластины.

**3.4.** Какова должна быть длина волны, падающих на платиновую пластинку, фотонов, чтобы максимальная скорость фотоэлектронов была 3 Мм/с?

**3.5.** Определите красную границу фотоэффекта для цинка и максимальную скорость фотоэлектронов, вырываемых с его поверхности электромагнитным излучением с длиной волны 250 нм.

**4.1.** При очередном освещении поверхности некоторого металла светом с длинами волн 0,35 мкм и 0,54 мкм обнаружили, что соответствующие максимальные скорости фотоэлектронов отличаются в два раза. Найдите работу выхода с поверхности этого металла.

**4.2.** До какого максимального потенциала зарядится удаленный от других тел медный шарик при облучении его электромагнитным излучением с длиной волны 140 нм?

**4.3.** На пластинку падает монохроматический свет с длиной волны 0,45 мкм, освобождая при этом 900 фотоэлектронов. Фоточувствительность поверхности 9 мА/Вт. Определите число квантов, падающих на поверхность.

**4.4.** Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов 0,95 В. Определите работу выхода электронов с поверхности пластинки и максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов. Начальная энергия фотона 10 эВ.

**4.5.** Определите энергию, импульс и массу фотона с длиной волны 1,24 нм.

**5.1.** На металл падают рентгеновские лучи с длиной волны 1 нм. Пренебрегая работой выхода, определите максимальную скорость фотоэлектронов.

**5.2.** Определите постоянную Планка, если известно, что фотоэлектроны, вырывающиеся с поверхности катода излучением с длиной волны 240 нм, задерживаются при потенциале 0,2 В, а при облучении этого катода излучением с длиной волны 254 нм фототок прекращается при задерживающем потенциале 0,485 В.

**5.3.** Красная граница фотоэффекта для цинка 310 нм. Определите максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов, если на пластинку из цинка падают лучи с длиной волны 200 нм.

**5.4.** Электромагнитное излучение с длиной волны 0,3 мкм падает на фотоэлемент, находящийся в режиме насыщения. Спектральная чувствительность фотоэлемента 4,8 мА/Вт. Найдите выход фотоэлектронов, т.е. число фотоэлектронов на каждый падающий фотон.

**5.5.** При облучении рентгеновским монохроматическим излучением шарика электроскопа его листочки перестают расходиться при разности потенциалов между шариком и землей в  $U = 8$  кВ. Найдите длину волны  $\lambda$  рентгеновского излучения.

**6.1.** С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы импульс его был равен импульсу фотона с длиной волны 500 нм?

**6.2.** Импульс, переносимый монохроматическим пучком фотонов через площадку  $2 \text{ см}^2$  за время 10 с равен  $2 \cdot 10^{-6}$  (кг м/с). Найдите энергию, падающую на единицу площади в единицу времени, и количество фотонов, падающих на единицу площади в единицу времени, если длина волны падающего излучения 500 нм.

**6.3.** Красная граница фотоэффекта для некоторого металла равна 500 нм. Найдите: 1) работу выхода электрона из металла; 2) максимальную скорость электронов, вырывающихся из металла светом с длиной волны 300 нм; 3) максимальную

кинетическую энергию фотоэлектронов; 4) задерживающую разность потенциалов.

**6.4.** Железный шарик, отдаленный от других тел при облучении его монохроматическим светом заряжается до максимально возможного потенциала 2 В. Работа выхода из железа 4,36 эВ. Определите длину волны монохроматического излучения.

**6.5.** Если катод освещать излучением с длиной волны 200 нм, то задерживающий потенциал равен 0,3 В. Определите задерживающий потенциал, если катод освещается монохроматическим светом с длиной волны 300 нм. Определите работу выхода.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Физические величины

Таблица 1 - Фундаментальные физические величины

№ п п	Величина	Обо- значение.	Значение
1.	Магнитная постоянная	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
2.	Электрическая постоянная	$\varepsilon_0$	$8,85418782 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
3.	Скорость света в вакууме	c	299792458 м/с
4.	Элементарный заряд	e	$1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл
5.	Постоянная Планка	h	$6,626176 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
	Постоянная Планка (редуцированная)	$\hbar$	$1,0545887 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
6.	Число Авогадро	N <sub>A</sub>	$6,0220943 \cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>
7.	Атомная единица массы	а.е.м.	$1,6605655 \cdot 10^{-27}$ кг
8.	Энергетический эквивалент одной а.е.м.		931,5016 МэВ
9	Масса покоя:  электрона	$m_e$	$9,109534 \cdot 10^{-31}$ кг
			$5,4858026 \cdot 10^{-4}$ а.е.м.
10	мюона	$m_\mu$	$1,883566 \cdot 10^{-28}$ кг
			0,11342920 а.е.м.
11	протона	$m_p$	$1,6726485 \cdot 10^{-27}$ кг
			1,007276470 а.е.м.
12	нейтрона	$m_n$	$1,6749543 \cdot 10^{-27}$ кг
			1,008665012 а.е.м.
13.	Удельный заряд электрона	$e/m_e$	$1,7588047 \cdot 10^{11}$ Кл·кг
14.	Число Фарадея	F	$9,648456 \cdot 10^4$ ККл/моль
15.	Постоянная Ридберга	R	$1,097373142 \cdot 10^7$ м <sup>-1</sup>
16.	Боровский радиус	a <sub>0</sub>	$5,2917706 \cdot 10^{-11}$ м
17	Комптоновская длина волны: элек- трона	$\lambda_{ce}$	$2,4263089 \cdot 10^{-12}$ м
18	протона	$\lambda_{cp}$	$1,3214099 \cdot 10^{-15}$ м
19.	Магнетон Бора	$\mu_B$	$9,274078 \cdot 10^{-24}$ Дж/Т
20.	Ядерный магнетон	$\mu_{яд}$	$5,050824 \cdot 10^{-27}$ Дж/Т
21	Магнитный момент:                 элек- трона	$\mu_e$	$9,284832 \cdot 10^{-24}$ Дж/Т
22	протона	$\mu_p$	$1,4106171 \cdot 10^{-26}$ Дж/Т
23.	Газовая постоянная	R	8,31441 Дж/(моль · K)
24.	Объем 1 моля идеального газа	V <sub>0</sub>	$2,241383 \cdot 10^{-2}$ м <sup>3</sup> /моль
25.	Постоянная Больцмана	k	$1,380662 \cdot 10^{-23}$ Дж/K
26.	Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma$	$5,67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м <sup>2</sup> · K <sup>4</sup> )
27.	Гравитационная постоянная	G	$6,6720 \cdot 10^{-11}$ Н · м <sup>2</sup> /кг <sup>2</sup>
28.	Квант магнитного потока	$\Phi_0$	$2,0678506 \cdot 10^{-15}$ Вб
29.	Квант циркуляции		$3,6369455 \cdot 10^{-4}$ Дж/(Гц · кг)

Таблица 2 - Работа выхода из металлов

Металл	$A, \text{эВ}$	Металл	$A, \text{эВ}$	Металл	$A, \text{эВ}$
Алюминий	3,74	Калий	2,15	Никель	4,84
Барий	2,29	Кобальт	4,25	Платина	5,29
Висмут	4,62	Литий	2,39	Серебро	4,28
Вольфрам	4,50	Медь	4,47	Титан	3,92
Железо	4,36	Молибден	4,27	Цезий	1,89
Золото	4,58	Натрий	2,27	Цинк	3,74

Таблица 3- Некоторые свойства металлов

	Атомный вес	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Температурный коэффициент, $\alpha$ , град <sup>-1</sup>
Алюминий, Al	27,0	2,7	0,004
Вольфрам, W	184,0	19,3	0,005
Константан, (Cu-60%, Ni-40%)			$2 \cdot 10^{-5}$
Латунь, (Cu-60%, Zn-40%)			0,001
Манганин, (Cu-85%, Mn-12%, Ni-3%)			$3 \cdot 10^{-5}$
Медь, Cu	64,0	8,9	0,004
Никелин, (Cu-65%, Ni-34%, Mn-1%)			$10^{-4}$
Нихром, (Ni-65%, Cr-16%, Fe-17%, Mn-1%)			$10^{-4}$
Платина, Pt	195,0	21,5	0,004
Никель, Ni	59,0	8,6	-
Ртуть, Hg	201,0	13,6	$9 \cdot 10^{-4}$
Серебро, Ag	108,0	10,5	0,004
Свинец, Pb	207,0	11,3	0,004
Цинк, Zn	65,0	7,8	0,004
Хром, Cr	52,0	7,1	-
Железо, Fe	56,0	7,8	0,006
Марганец, Mn	55,0	7,3	-

Таблица 4 - Плотность некоторых веществ

<b>Вещество</b>	<b>Плотность вещества, <math>\rho</math>, кг/м<sup>3</sup></b>
Эфир этиловый	710
глицерин	1260
керосин	800
ацетон	781
оргстекло	1180

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Образец оформления титульного листа**

**Федеральное агентство связи**

**ФГБОУ ВО «СибГУТИ»**

**Кафедра физики**

**Лабораторная работа 1.1**

### **ПРОВЕРКА ОСНОВНОГО ЗАКОНА ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬ- НОГО ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА**

Выполнил студент группы:

Проверил преподаватель:

Измерения сняты \_\_\_\_\_

Дата, подпись преподавателя

Отчет принят \_\_\_\_\_

Дата, подпись преподавателя

Работа зачтена \_\_\_\_\_

Оценка, дата, подпись преподавателя

НОВОСИБИРСК 2020

### Приложение 3 Правила построения графиков

(Электронный ресурс: <https://studfiles.net/preview/1828566/page:4/>)

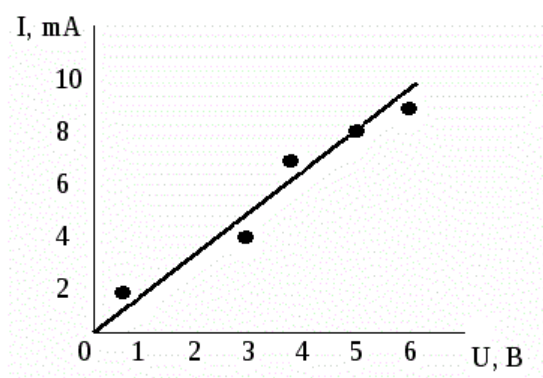
1. Графики строят на миллиметровой бумаге. Допускается построение графиков на тетрадном листе в клеточку. Размер графика – не менее чем  $12 \times 12$  см. Графики строят в прямоугольной системе координат, где по горизонтальной оси (оси абсцисс) откладывают аргумент, независимую физическую величину, а по вертикальной оси (оси ординат) – функцию, зависимую физическую величину.
2. Обычно график строят на основании таблицы экспериментальных данных, откуда легко установить интервалы, в которых изменяются аргумент и функция. Их наименьшее и наибольшее значения задают значения масштабов, откладываемых вдоль осей. Не следует стремиться поместить на осях точку  $(0,0)$ , используемую как начало отсчета на математических графиках. Для экспериментальных графиков масштабы по обеим осям выбирают независимо друг от друга и, как правило, соотносят с погрешностью измерения аргумента и функции: желательно, чтобы цена наименьшего деления каждой шкалы примерно равнялась соответствующей погрешности.
3. Масштабная шкала должна легко читаться, а для этого необходимо выбрать удобную для восприятия цену деления шкалы: одной клетке должно соответствовать кратное 10 количество единиц откладываемой физической величины:  $10^n$ ,  $2 \cdot 10^n$  или  $5 \cdot 10^n$ , где  $n$  – любое целое число, положительное или отрицательное. Так, числа 2; 0,5; 100; 0,02 – подходят, а числа 3; 7; 0,15 – не подходят для этой цели.
4. При необходимости масштаб по одной и той же оси для положительных и отрицательных значений откладываемой величины может быть выбран разным, но только в том случае, если эти значения отличаются не менее чем на порядок, т.е. в 10 раз и более. Примером может служить вольтамперная характеристика диода, когда прямой и обратный токи отличаются не менее чем в тысячу раз: прямой ток составляет миллиамперы, обратный – микроамперы.
5. Против каждой оси указывают название или символ откладываемой по оси величины, а через запятую – единицы ее измерения, причем все единицы измерения приводят в русском написании в системе СИ. Числовой масштаб выбирают в виде равноотстоящих по значению «круглых чисел», например: 2; 4; 6; 8 ... или 1,82; 1,84; 1,86 .... Масштабные риски проставляют по осям на одинаковом расстоянии друг от друга, чтобы они выходили на поле графика. По оси абсцисс цифры числового масштаба пишут под рисками, по оси ординат – слева от рисок.
6. Экспериментальные точки аккуратно наносят на поле графика карандашом. Их всегда проставляют так, чтобы они были отчетливо различимы. Если в одних осях строят различные зависимости, полученные, например, при измененных условиях эксперимента или на разных этапах работы, то точки таких зависимостей должны отличаться друг от друга. Их следует отмечать разными значками (квадратами, кружками, крестиками и т.п.) или наносить карандашами разного цвета.
7. Через экспериментальные точки с помощью карандаша проводят плавную кривую так, чтобы точки в среднем были одинаково расположены по обе стороны от



проведенной кривой. Если известно математическое описание наблюдаемой зависимости, то теоретическая кривая проводится точно так же. Нет смысла стремиться провести кривую через каждую экспериментальную точку, это будет являться грубой ошибкой. На Рис. 6.1 показан пример построения графика для вольт-амперной характеристики резистора. Эта зависимость линейная, поэтому проводим прямую через экспериментальные точки, так чтобы прямая лежала наиболее близко к экспериментальным значениям.

8. Правильно построенная кривая должна заполнять все поле графика, что будет свидетельством правильного выбора масштабов по каждой из осей. Если же значительная часть поля оказывается незаполненной, то необходимо заново выбрать масштабы и перестроить зависимость. Пример графика приведен на рисунке 6.1

Рис. 6.1 Пример графика ВАХ резистора



## ЛИТЕРАТУРА

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: Учебное пособие для вузов., Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: Высш. шк., 1999, 718 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Учебное пособие для втузов., Т. 1, 2, 3., М.: Наука, 1988 (или любое издание др. года).
3. Трофимова Т.И. Курс физики., 6-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 1999, 542 с.
4. Трофимова Т.И., Павлова З.Г. Сборник задач по курсу физики с решениями, М.: Высшая школа, 1999, 591 с.
5. Иродов И.В. Сборник задач по атомной и ядерной физике. Учебное пособие для вузов. М.: Атомиздат, 1971.
6. Шпольский Э.В. Атомная физика, т. 1: Введение в атомную физику. Учебное пособие – 7-е изд. испр. – М.: Наука, 1984, 552 с.

Гулидов А.И., Татарников В.М., Лисейкина Т.А.

# **КВАНТОВАЯ ОПТИКА**

## **Методические указания к лабораторному практикуму по физике**

Редактор: А.И. Гулидов  
Корректор: О.С. Шкитина

---

Лицензия РЛ №020475

Подписано в печать . Формат бумаги 62х84/16

Бумага писчая №1. Уч. Изд. Л. . Тираж 300

Типография СибГУТИ, Кирова, 86.