

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ  
им. проф. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»

---

*А.Д. Андреев, А.А. Костин,  
С.А. Князев, В.Б. Федюшин,  
Л.М. Черных*

## **КВАНТОВАЯ ФИЗИКА**

**Методическое пособие  
по выполнению лабораторных работ**

СПбГУТ )))

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2010**

УДК 530.145 (076.5)  
ББК В31я73  
К 32

Рецензент  
доцент физического факультета СПбГУ  
*В.И. Яковлева*

*Рекомендовано к печати  
редакционно-издательским советом  
СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича*

**Андреев, А.Д.**  
К 32 Квантовая физика: методическое пособие по выполнению лабораторных работ / *А.Д. Андреев, А.А. Костин, С.А. Князев, В.Б. Федюшин, Л.М. Черных.* – СПб. : Изд-во «Теледом» ГОУВПО СПбГУТ, 2010. – 40 с.

Написано в соответствии с программой курса общей физики по разделу «Квантовая физика». Методические указания к каждой лабораторной работе содержат теоретическое введение, описание лабораторной установки и метода измерений, задания к работе и контрольные вопросы.

Предназначено для студентов второго курса всех технических специальностей.

УДК 530.145 (076.5)  
ББК В31я73

© Андреев А.Д., Костин А.А., Князев С.А.,  
Федюшин В.Б., Черных Л.М., 2010

© Государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», 2010

## Лабораторная работа 6.2

### ИЗМЕРЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА

#### Цель работы

Ознакомление с работой спектрометра и определение с его помощью постоянной Планка.

#### Введение

Постоянная Планка  $h$  – одна из универсальных числовых констант природы, входит во многие формулы и физические законы, описывающие поведение материи и энергии в масштабах микромира. Эта константа была введена М. Планком в 1900 г. при объяснении законов излучения нагретых тел. Согласно гипотезе Планка, излучение происходит порциями – квантами. Квант электромагнитного излучения – фотон – обладает энергией ( $E$ ), пропорциональной частоте излучения ( $\nu$ ):

$$E = h\nu. \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности и есть постоянная Планка.

Так как частота излучения связана с длиной волны ( $\lambda$ ) и скоростью света ( $c$ ):

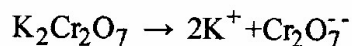
$$\nu = \frac{c}{\lambda},$$

энергию фотона можно выразить и через длину волны излучения:

$$E = \frac{hc}{\lambda}. \quad (2)$$

Величина постоянной Планка составляет  $h \approx 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

Для экспериментального определения постоянной Планка, как следует из (2), надо независимо определить  $E$  и  $\lambda$ . В лабораторной работе используется фотохимическая реакция разложения двуххромовокислого калия  $K_2Cr_2O_7$  на ионы:



Энергия диссоциации этой реакции составляет  $E_d = 3,67 \cdot 10^{-19}$  Дж. При облучении водного раствора  $K_2Cr_2O_7$  фотоны с энергией, меньшей  $E_d$ , пройдут через раствор, поскольку их энергии недостаточно для возникновения диссоциации. Фотоны с энергией, превышающей  $E_d$ , вызывают диссо-

циацию и поглощаются раствором. Если удастся экспериментально определить граничную длину волны

$$\lambda_{\text{Д}} = \frac{hc}{E_{\text{Д}}},$$

такую, что фотоны с  $\lambda > \lambda_{\text{Д}}$  проходят через раствор, а с  $\lambda < \lambda_{\text{Д}}$  – поглощаются раствором, то можно определить величину постоянной Планка

$$h = \frac{E_{\text{Д}} \lambda_{\text{Д}}}{c}. \quad (3)$$

### Описание лабораторной установки

Экспериментальная установка состоит из призмного спектрометра, прозрачной кюветы с раствором  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , источника света с непрерывным и линейчатым спектрами излучения. Роль источника света играет ртутная лампа «дневного света». В результате газового разряда пары ртути, заполняющие лампу, дают излучение, имеющее линейчатый спектр в видимой и ультрафиолетовой областях. Набор характерных для ртути спектральных линий в видимой области спектра используется при градуировке спектрометра. Излучение ультрафиолетовой области спектра вызывает вторичное излучение люминофора, которым покрыта внутренняя поверхность ртутной лампы. Состав вторичного излучения за счет подбора материала люминофора близок составу белого света. Таким образом, ультрафиолетовый участок линейчатого спектра атомов ртути преобразуется в белый свет, разлагаемый спектрометром в непрерывный спектр, на фоне которого присутствуют дискретные линии видимого участка спектра.

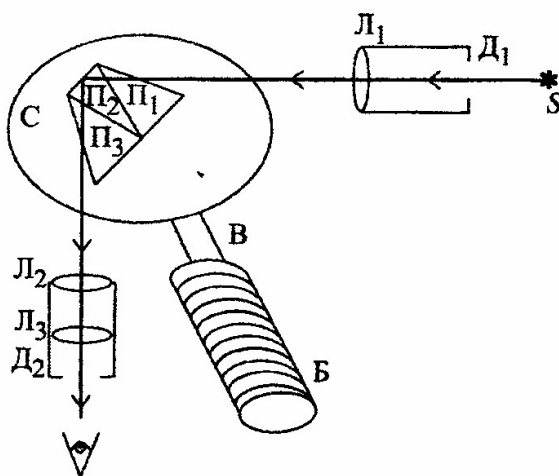


Рис. 1

Основная деталь спектрометра – составная призма (П), установленная на поворотном столике (С). Столик способен вращаться при повороте микрометрического винта (В) с отсчетным барабаном (Б).

На барабан нанесена винтовая линия с градусными делениями и отсчетным (нулевым) указателем. Свет от источника света (ртутной лампы S) через

диафрагму (Д), регулирующую ширину светового пучка и помещенную в фо-

кусе линзы ( $L_1$ ), падает параллельным пучком на составную призму, состоящую из трех склеенных призм ( $P_1, P_2, P_3$ ). Крайние призмы  $P_1$  и  $P_3$  из стекла с большой дисперсией расположены так, что их дисперсии складываются. Центральная призма  $P_2$  из стекла с малым показателем преломления поворачивает диспергированный световой пучок на  $90^\circ$  за счет полного отражения и посылает его в призму  $P_3$ . Отдельные участки полученного спектра вращением столика (С) фокусируются линзой  $L_2$  и наблюдаются в окуляр  $L_3$ .

### Порядок выполнения работы

Выполнение лабораторной работы состоит из двух частей. Первая часть – градуирование спектрометра, вторая – измерение границы спектра поглощения раствора.

#### 1. Градуирование спектрометра

Включите источник света, осветив входную щель. Изменяя размер диафрагмы, получите резкое изображение спектральных линий на фоне сплошного спектра.

Вращением барабана совместите визирную стрелку с первой спектральной линией ртути длины волны  $\lambda_1$  и запишите отсчет № 1 по винтовой линии барабана напротив отсчетного указателя. Цвета линий и соответствующие длины волн указаны на рабочем месте. Произведите эти измерения для каждой из видимых спектральных линий  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ , занося результаты в табл. 1. Серию измерений повторите 5 раз, последовательно перемещаясь от  $\lambda_1$  к  $\lambda_m$  и обратно.

Таблица 1

$\lambda$	$N$					$N_{\text{ср}}$
	1	2	3	4	5	

#### 2. Измерение границы спектра поглощения $\lambda_d$

Вращением барабана выставьте в поле зрения окуляра сине-зеленый участок сплошного спектра. Перед входной диафрагмой спектрометра установите кювету с раствором  $K_2Cr_2O_7$  и убедитесь, что сине-фиолетовый участок спектра, соответствующий коротким волнам, пропадает и вновь появляется, если кювету убрать. Закрепите кювету перед диафрагмой. Вращением барабана совместите границу обрыва спектра с визирной стрелкой и запиши-

те показания барабана  $N_{\Gamma}$ . Повторите эти измерения 5 раз, последовательно сбивая настройку и вновь устанавливая границу спектра на визир. Результаты измерений внесите в табл. 2.

Таблица 2

№ измерения	1	2	3	4	5	$N_{\Gamma}$ среднее
$N_{\Gamma}$						

#### Задания к работе.

Сначала усредните результаты измерений величины  $N$  для каждой спектральной линии по серии из 5 опытов:

$$N_{\text{ср}} = \frac{(N_1 + N_2 + \dots + N_5)}{5}.$$

Вычислите абсолютную случайную погрешность для каждой величины  $N_{\text{ср}}$ . Усредните результаты измерений  $N_{\Gamma}$  по серии из 5 опытов и рассчитайте абсолютную случайную погрешность  $\Delta N_{\Gamma}$ . Средние значения  $N$  и  $N_{\Gamma}$  запишите в табл. 1 и 2.

Определение граничной длины волны  $\lambda_{\Gamma}$ , а следовательно, и постоянной Планка, можно произвести двумя способами.

#### *I способ – по градуировочной кривой*

1. По данным табл. 1 на миллиметровой бумаге постройте градуировочную кривую – зависимость  $\lambda(N)$ , отложив по горизонтальной оси показания  $N_{\text{ср}}$ , а по вертикальной – соответствующие длины волн спектральных линий. При построении графика учтите погрешности величин  $N_{\text{ср}}$ .

2. По значению  $N_{\Gamma}$  и ее погрешности  $\Delta N_{\Gamma}$  из графика определите значение длины волны  $\lambda_{\Gamma}$  и ее погрешность  $\Delta \lambda_{\Gamma}$ .

3. По формуле (3) рассчитайте постоянную Планка.

4. Используя погрешность  $\Delta \lambda_{\Gamma}$ , рассчитайте погрешность постоянной Планка  $\Delta h$ .

5. Сравните полученное значение  $h \pm \Delta h$  со справочными данными.

#### *II способ – методом линейной интерполяции*

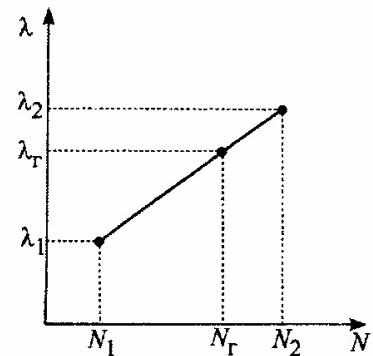
Метод линейной интерполяции заключается в том, что на участке между двумя точками  $(N_1, \lambda_1)$  и  $(N_2, \lambda_2)$ , содержащем искомую точку  $(N_{\Gamma}, \lambda_{\Gamma})$ ,

зависимость  $\lambda(N)$  заменяется линейной зависимостью, т. е. график  $\lambda(N)$  заменяется прямой. Уравнение прямой, проходящей через две точки, имеет вид

$$\lambda_{\text{лин}}(N) = \lambda_1 + \frac{(N - N_1)(\lambda_2 - \lambda_1)}{(N_2 - N_1)}.$$

Заменив  $N$  на  $N_{\Gamma}$ , получим приближенное значение  $\lambda_{\Gamma}$ :

$$\lambda_{\Gamma} = \lambda_1 + \frac{(N_{\Gamma} - N_1)(\lambda_2 - \lambda_1)}{(N_2 - N_1)}. \quad (4)$$



1. Комбинируя различные пары точек  $(N_i, \lambda_i)$  и  $(N_k, \lambda_k)$ , по формуле (4) получите несколько значений  $\lambda_{\Gamma}$ .
2. Вычислите среднее для полученной серии значений.
3. Считая отклонения от среднего случайными погрешностями, рассчитайте абсолютную случайную погрешность  $\Delta\lambda_{\Gamma}$ .
4. По формуле (3) рассчитайте постоянную Планка.
5. Используя погрешность  $\Delta\lambda_{\Gamma}$  рассчитайте погрешность постоянной Планка.
6. Сравните полученное значение  $h \pm \Delta h$  со справочными данными.

### Контрольные вопросы

1. В чем состоит принцип измерения постоянной Планка в данной лабораторной работе?
2. Каков принцип работы призмного спектрометра?
3. Зачем кроме непрерывного спектра излучения используется линейчатый спектр, даваемый парами ртути?
4. Что такое «градуировочная кривая»?
5. Можно ли в качестве диссоциируемого водного раствора использовать не раствор  $K_2Cr_2O_7$ , а какой-либо другой?
6. В чем состоит метод линейной интерполяции?
7. Как по градуировочной кривой оценить погрешность измерения длины волны, соответствующей границе спектра поглощения  $\lambda_{\Gamma}$ ?

### Лабораторная работа 6.3

## ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА ИНТЕГРАЛЬНОЙ СВЕТИМОСТИ НАГРЕТОГО ТЕЛА

### Цель работы

Изучение закона интегральной светимости – одного из основных законов теплового излучения.

### Введение

*Тепловое излучение* – это излучение электромагнитной энергии, обусловленное нагреванием тела.

Для описания этого явления вводятся следующие величины. Интегральная светимость

$$E(T) = \frac{d\Phi}{dS}, \quad (1)$$

где  $d\Phi$  – поток энергии, излучаемый площадкой  $dS$  тела при заданной температуре  $T$  во всем диапазоне длин волн от нуля до бесконечности.

Излучательная способность

$$e(\lambda, T) = \frac{d\Phi_\lambda}{d\lambda dS} = \frac{dE_\lambda}{d\lambda}, \quad (2)$$

где  $d\Phi_\lambda$  – поток энергии, излучаемый площадкой  $dS$  тела при заданной температуре  $T$  в диапазоне длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ ;  $dE_\lambda$  – доля интегральной светимости, приходящаяся на указанный диапазон длин волн при данной температуре  $T$ . Из последнего соотношения следует, что

$$E(\lambda, T) = \int_0^{\infty} e(\lambda, T) d\lambda. \quad (3)$$

С тепловым излучением связано поглощение телом электромагнитной энергии. Для характеристики этого явления вводится поглощательная способность

$$a(\lambda, T) = \frac{d\Phi'_\lambda}{d\Phi_\lambda}, \quad (4)$$

где  $d\Phi_\lambda$  – поток электромагнитной энергии, падающий на площадку  $dS$  в диапазоне длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ ;  $d\Phi'_\lambda$  – поглощенная доля этого потока. Очевидно, что

$$0 \leq a(\lambda, T) \leq 1. \quad (5)$$



Тело, для которого  $a$  не зависит от длины волны  $\lambda$ , называется *серым*. Тело, для которого  $a = 1$ , называется *абсолютно черным*.

Тепловое излучение – единственный вид излучения, которое может находиться в равновесии с излучающими телами. Такое равновесное излучение можно реализовать, если, например, излучающие тела поместить внутрь идеально отражающей замкнутой полости. Тогда температура всех тел выровняется, поток энергии, излучаемый каждым телом, станет равным потоку, поглощаемому этим телом, а плотность потока излучения будет одинакова во всех точках полости между телами.

Явления теплового излучения и поглощения связаны законом Кирхгофа:

$$\frac{e(\lambda, T)}{a(\lambda, T)} = r(\lambda, T). \quad (6)$$

Согласно этому закону, отношение излучательной способности тела к его поглощательной способности не зависит от природы тела, а является функцией длины волны и температуры, одинаковой для всех тел. Очевидно, что вышеуказанная функция  $r(\lambda, T)$  является излучательной способностью абсолютно черного тела.

Знание функции  $r(\lambda, T)$  позволяет получить наиболее важные законы излучения абсолютно черного тела. Согласно закону Стефана–Больцмана интегральная светимость  $R(T)$  абсолютно черного тела пропорциональна температуре в четвертой степени:

$$R(T) = \sigma T^4. \quad (7)$$

Коэффициент пропорциональности  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{К}^4)$  называется постоянной Стефана–Больцмана. Согласно закону смещения Вина,

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \quad (8)$$

где  $\lambda_m$  – длина волны, соответствующая максимуму излучательной способности  $r(\lambda, T)$  абсолютно черного тела при данной температуре  $T$ ;  $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  – постоянная Вина.

Для нечерного тела закон интегральной светимости может быть записан в виде

$$E(T) = A(T)R(T) = A(T)\sigma T^4, \quad (9)$$

где величина  $A(T)$  называется *степенью черноты тела* (интегральной лучепоглощательной способностью). Она характеризует отличие рассматриваемого тела от абсолютно черного. Используя формулу (3) и равенство (6), по-

лучаем

$$A(T) = \frac{E(T)}{R(T)} = \frac{\int_0^{\infty} e(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} r(\lambda, T) d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} a(\lambda, T) r(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} r(\lambda, T) d\lambda}. \quad (10)$$

Из неравенства (5) и равенства (10) следует, что  $0 \leq A(T) \leq 1$ , причем  $A(T) = 1$  только для абсолютно черного тела. Отсюда следует, что при заданной температуре абсолютно черное тело излучает с единицы поверхности бóльшую мощность, чем любое другое тело.

Первое из равенств (10) раскрывает физический смысл  $A(T)$ : эта величина равна отношению потока энергии, излученного единицей поверхности данного тела при некоторой температуре, к потоку энергии, излученному единицей поверхности абсолютно черного тела при той же температуре.

Одновременно величине  $A(T)$  можно приписать также следующий физический смысл: она равна отношению потока энергии, поглощаемого единицей поверхности тела при данной температуре, к потоку, падающему на единицу его поверхности при тепловом равновесии при этой же температуре. Действительно, величина  $E(T)$ , стоящая в числителе равенства (10), равна поглощаемому единицей поверхности тела потоку, так как в состоянии теплового равновесия излучаемый поток равен поглощаемому потоку. Величина  $R(T)$ , стоящая в знаменателе равенства (10), равна падающему на единицу поверхности тела потоку, так как поток  $R(T)$ , излучаемый единицей поверхности абсолютно черного тела равен потоку, падающему на единицу поверхности этого тела, а последний в состоянии теплового равновесия одинаков для всех тел.

### Описание лабораторной установки. Метод измерений

На рис. 1 показана схема установки, которая состоит из двух цепей. В первую цепь включено исследуемое тело (1), источник тока ИП1, амперметр А и вольтметр V, служащие для измерения соответственно тока  $I$  в цепи и напряжения  $U$  на исследуемом теле. Источник тока ИП1 позволяет регулировать ток  $I$  и напряжение  $U$  и тем самым менять идущую на нагрев тела мощность  $P = IU$  и, следовательно, его температуру  $T$ . Если площадь излучающей поверхности тела равна  $S$ , то его энергетическая светимость

$$E(T) = \frac{IU}{S}.$$

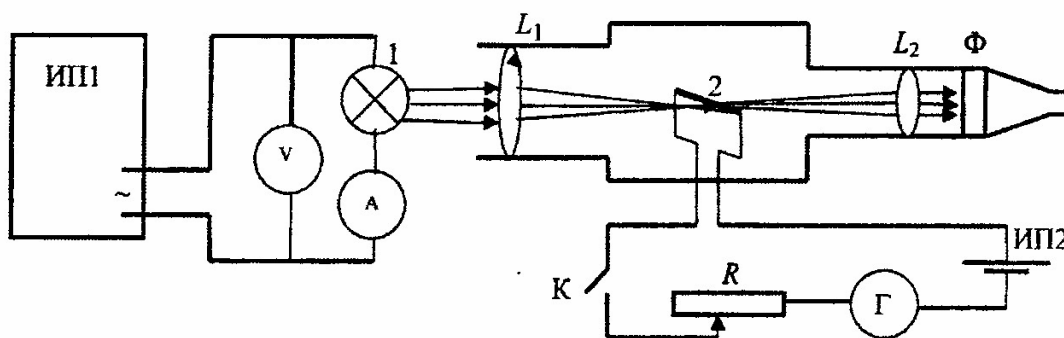


Рис. 1

Подставляя это выражение и выражение (7) в формулу (10), получаем

$$A(T) = \frac{IU}{\sigma T^4 S}. \quad (11)$$

Учитывая значение постоянной  $\sigma$ , последнее выражение можно переписать в более удобном для вычислений виде

$$A(T) = \frac{IU}{5,67S(T/100)^4}. \quad (12)$$

Вторая цепь – это цепь пирометра. Пирометр – прибор для измерения температуры нагретых тел. В данной работе применяется оптический пирометр с исчезающей нитью. Нить пирометра (2) нагревается током от источника ИП2, встроенного в пирометр, или внешнего источника. Силу этого тока и соответственно яркость свечения нити можно регулировать реостатом  $R$ , встроенным в пирометр. Изображение исследуемого тела (в данной работе – вольфрамовой спирали лампы накаливания) получается в фокальной плоскости объектива  $L_1$  пирометра. В этой же плоскости находится и нить пирометра (2). Через окуляр  $L_2$  проводится наблюдение светящейся нити пирометра на фоне светящегося изображения исследуемого тела. В пирометре использован принцип выравнивания яркости изображения объекта с яркостью пирометрической нити. Равенство яркостей воспринимается наблюдателем как исчезновение нити пирометра на фоне изображения объекта. Наблюдение ведется через красный светофильтр  $\Phi$ , пропускающий узкий участок спектра в области длины волны  $\lambda = 6600 \text{ \AA}$ . На пирометре имеется шкала температур (шкала Цельсия). Проградуирован пирометр по абсолютно черному телу. Это значит, если указатель на шкале пирометра (прибор  $\Gamma$  на рис. 1) установлен на некоторую температуру  $t$ , то нить пирометра имеет такую же яркость, как

абсолютно черное тело при этой температуре  $t$  при наблюдении на длине волны  $6600 \text{ \AA}$ . Если изображение исследуемого тела имеет такую же яркость, как и нить пирометра (нить исчезла на фоне изображения тела), то температура  $t_{\text{я}}$ , отсчитанная по шкале пирометра, называется яркостной температурой этого тела.

Истинная температура тела  $t$  больше его яркостной температуры  $t_{\text{я}}$ . Зная материал, из которого изготовлено исследуемое тело, и длину волны, на которой ведется наблюдение, можно рассчитать истинную температуру  $t$ . Как показывает расчет, для вольфрама при наблюдении на длине волны  $\lambda = 6600 \text{ \AA}$  переход от яркостной температуры к истинной осуществляется по формуле

$$t = t_{\text{я}}(1 + 5,75 \cdot 10^{-5} t_{\text{я}}). \quad (13)$$

Переход к шкале Кельвина осуществляется по известной формуле

$$T = t + 273. \quad (14)$$

### Порядок выполнения работы

1. Запишите в таблицу измерительных приборов их характеристики. Запишите численное значение площади спирали  $S$ , указанное на рабочем месте.

2. Включите источник внешнего питания пирометра ИП2 (рис. 1). Убедитесь, что переключатель, находящийся на верхней части пирометра, поставлен в среднее положение. Этому положению соответствует шкала температур пирометра от  $1200$  до  $2000^\circ\text{C}$ . Установите температуру  $1200^\circ\text{C}$ , вращая ручку на правой стенке пирометра. Нажмите кнопку, находящуюся на нижней ручке пирометра, и в окуляр рассмотрите нить пирометра. Вращая окуляр  $L_2$ , добейтесь наиболее резкого изображения нити пирометра 2.

3. Включите источник тока ИП1. Подайте напряжение на лампу накаливания 1, чтобы она стала светиться. Значение тока, которое при этом рекомендуется пропускать через лампу 1, указано на рабочем месте. Вращая объектив  $L_1$ , получите резкое изображение спирали лампы, рассматривая его в окуляр  $L_2$ .

4. Наведите нить пирометра на изображение спирали исследуемой лампы. Обратите внимание, что разные части спирали имеют разную яркость (центральные части спирали темнее боковых участков, т. е. имеют меньшую яркость). Меняя силу тока через исследуемую спираль, добейтесь совпадения

яркостей нити и выбранного участка спирали (исчезновения нити на фоне этого участка спирали). Учтите, что существует инерционность процесса нагрева спирали. По этой причине, выравнивая яркости, силу тока через спираль надо изменять медленно. Повысьте температуру нити пирометра и потренируйтесь в выравнении яркостей при новой температуре. Затем переходите к систематическим измерениям. При этом яркости сравнивайте все время для одного и того же участка спирали.

5. Установите значение температуры нити пирометра равным  $1200^{\circ}\text{C}$ . Проведите выравнение яркостей нити пирометра и исследуемой спирали. Запишите в табл. 1 значения силы тока  $I$  через спираль и напряжения  $U$  на спирали.

6. Повторите измерения п. 5 для других значений яркостной температуры  $t_{\text{я}}$  нити пирометра в интервале температур от  $1200$  до  $2000^{\circ}\text{C}$ . Температуру меняйте с шагом  $\Delta t_{\text{я}} = 50^{\circ}\text{C}$ . Результаты измерений записывайте в табл. 1

Таблица 1

№ п/п	$t_{\text{я}}, ^{\circ}\text{C}$	$I, \text{A}$	$U, \text{B}$
1	1200		
2	1250		
3	1300		
.	.		
.	.		
.	.		
16	1950		
17	2000		

Таблица 2

№ п/п	$t_{\text{я}}, ^{\circ}\text{C}$					
	1200		1600		2000	
	$I, \text{A}$	$U, \text{B}$	$I, \text{A}$	$U, \text{B}$	$I, \text{A}$	$U, \text{B}$
1						
2						
3						
4						
5						

7. Для оценки случайной погрешности измерений проведите по четыре дополнительных измерения при трех значениях температуры в начале, середине и конце взятого интервала температур. Результаты запишите в табл. 2, добавив к ним измерения  $I$  и  $U$  при этих же температурах из табл. 1.

8. Подпишите результаты измерений у преподавателя.

9. Уменьшите силу тока  $I$  и напряжения  $U$  до нуля. Выключите источник тока ИП1 и источник внешнего питания ИП2 пирометра.

### Обработка результатов измерений

При составлении отчета заполните табл. 3 согласно следующим указаниям.

Таблица 3

№ п/п	$t_{я}, ^\circ\text{C}$	$T, \text{K}$	$I, \text{A}$	$U, \text{B}$	$A$
1	1200				
2	1250				
3	1300				
.	.				
.	.				
.	.				
16	1950				
17	2000				

1. По (13) и (14) подсчитайте истинную температуру  $T$  спирали.
2. По (12) вычислите степень черноты исследуемой спирали.
3. Для трех температур из табл. 2 вычислите погрешности прямых измерений силы тока  $I$  и напряжения  $U$ . Исходя из (12), выведите формулу погрешности косвенного измерения величины  $A$ . Подсчитайте погрешность величины  $A$  по полученной формуле. Так как в (13) слагаемое  $5,75 \cdot 10^{-5} t_{я} \ll 1$ , примите  $\Delta T = \Delta t = \Delta t_{я}$ .

4. Постройте график зависимости  $A(T)$ .

#### Контрольные вопросы

1. Что такое тепловое излучение?
2. Назовите основные характеристики, служащие для описания теплового излучения и дайте их определения.
3. Что такое поглощательная способность?
4. Какое тело называется абсолютно черным?
5. Сформулируйте закон излучения Кирхгофа и основные законы излучения абсолютно черного тела.
6. В чем состоит физический смысл интегральной лучепоглощательной способности?
7. Из каких частей состоит измерительная установка? Покажите на ней исследуемое тело, и эталонное тело, которое имитирует абсолютно черное тело. Как изменить температуру исследуемого тела и температуру эталонного тела?
8. Для чего служит пирометр? В чем состоит принцип его действия?
9. Каким образом установить равенство температур исследуемого тела и тела, имитирующего абсолютно черное?
10. Какая зависимость исследуется в данной работе?

## Лабораторная работа 6.4

# ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ МЕТАЛЛА

### Цель работы

Целью работы является изучение явления термоэлектронной эмиссии и определение работы выхода электронов из металла.

### Введение

*Термоэлектронная эмиссия* – это явление испускания электронов нагретыми телами.

### Понятие о работе выхода

Концентрация свободных электронов в металле составляет очень большую величину:  $\sim 10^{28} \text{ м}^{-3}$ . Поэтому на границе металл–вакуум она не может резко оборваться до нуля – часть электронного облака «выпирает» наружу. Обеднение приповерхностной области металла электронами приводит к образованию двойного электрического слоя на границе металл–вакуум. С другой стороны, свободный электрон, находящийся уже в вакууме, вызывает появление индукционных зарядов на поверхности металла, вследствие чего возникает притяжение свободного электрона к металлу – явление, описываемое на языке сил зеркального изображения. В классической физике (раздел «Электрический ток») работа выхода электронов из металла складывается из работы, совершаемой электроном по преодолению двойного электрического слоя (рис. 1), и работы, совершаемой против сил зеркального изображения (рис. 2).

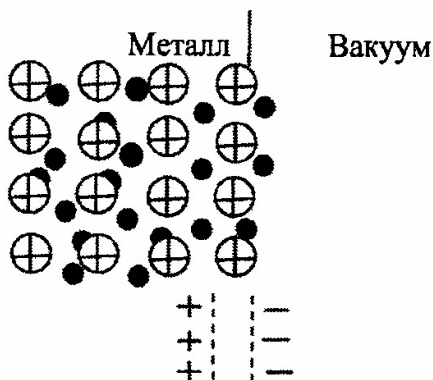


Рис. 1

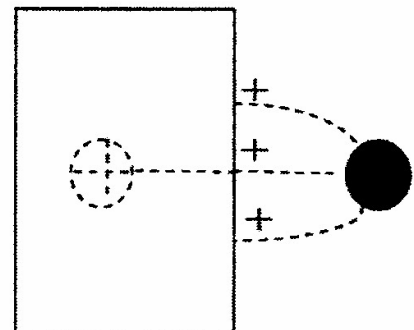


Рис. 2

В квантовой механике простейшая модель твердого тела представляет собой прямоугольный потенциальный ящик, заполненный электронами, энергетическое положение которых подчиняется статистике Ферми–Дирака.

Согласно этой статистике на каждом энергетическом уровне может находиться не более двух электронов. При температуре абсолютного нуля функция распределения электронов в металле  $dN/dE$  имеет вид: энергетические состояния вплоть до уровня Ферми  $E_F$  заполнены полностью, а выше лежащие состояния пусты (рис. 3). С повышением температуры происходит перераспределение электронов по энергии вблизи уровня Ферми – вероятность заполнения энергетических состояний, лежащих ниже  $E_F$ , становится меньше 1, зато появляется вероятность заполнения состояний, лежащих выше уровня Ферми (рис. 4). Это перераспределение электронов по энергии весьма мало, однако в силу большой концентрации свободных носителей тока при повышенных температурах появляется достаточное количество электронов с энергией выше уровня вакуума  $E_0$ , которые и обуславливают возникновение термоэлектронной эмиссии.  $E_0$  – это уровень вакуума или энергия электрона, покинувшего металл, с нулевой кинетической энергией. Работа выхода в данном случае равна разности энергии электрона, находящегося на уровне вакуума, и электрона, находящегося на уровне Ферми. Другими словами, работа энергии равна минимальной энергии, которую необходимо сообщить электрону, находящемуся на уровне Ферми с тем, чтобы он эмитировал в вакуум:

$$A_{\text{вых}} = E_0 - E_F.$$

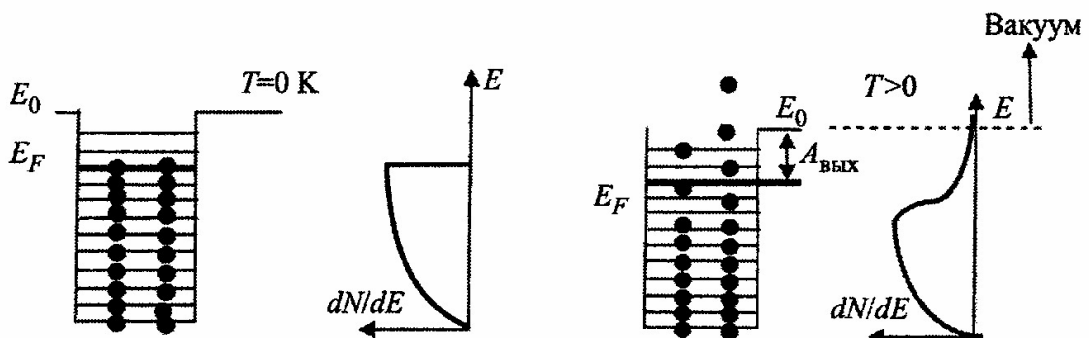


Рис. 3

Рис. 4



«Классическим» прибором, работа которого основана на явлении термоэлектронной эмиссии, является вакуумный диод, который состоит из накаливаемого катода и анода (рис. 5).

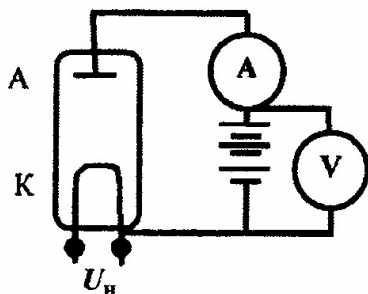


Рис. 5

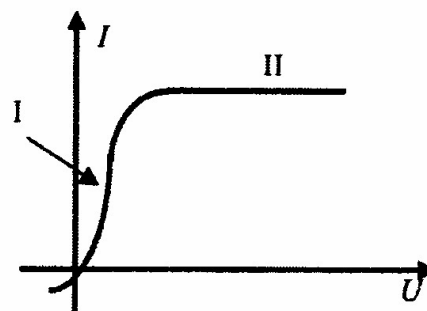


Рис. 6

Электроны, эмитируемые катодом К, который нагревается током от источника напряжения  $U_n$ , «подхватываются» электрическим полем и движутся в сторону анода А. Регулируемое напряжение между катодом и анодом измеряется вольтметром  $V$ , сила тока в анодной цепи – амперметром А. На рис. 6 представлена типичная вольт-амперная характеристика (ВАХ) вакуумного диода. Эта характеристика имеет два основных участка: область пространственного заряда I и область тока насыщения II. При сравнительно небольшом напряжении между катодом и анодом число электронов, вылетающих с поверхности катода в единицу времени, существенно превышает число электронов, удаляемых в это же время из прикатодного пространства за счет электрического поля между анодом и катодом. Вокруг катода образуется облако отрицательно заряженных электронов, которое препятствует дальнейшему вылету электронов с поверхности катода. К аноду движутся электроны из периферийной области этого облака, ближней к аноду. По мере увеличения разности потенциалов между катодом и анодом скорость, с которой электрическое поле удаляет электроны из прикатодного пространства, увеличивается, размеры пространственного заряда уменьшаются, анодный ток возрастает. При дальнейшем увеличении напряжения между катодом и анодом пространственное облако «рассасывается» и все электроны, вылетающие из катода, долетают до анода. Это режим тока насыщения.

Влияние облака пространственного заряда на движение электронов от катода к аноду показано на рис. 7.

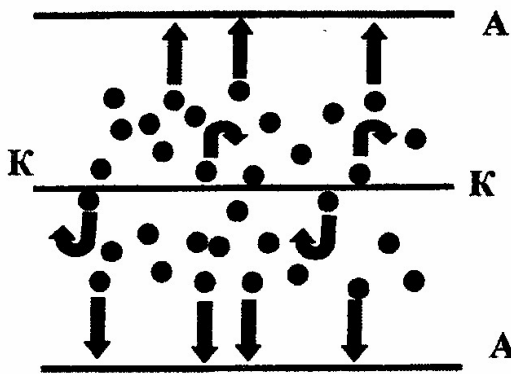


Рис. 7

Как показали теоретические расчеты, зависимость тока от напряжения на I участке ВАХ (рис. 6) определяется формулой Богуславского–Ленгмюра (закон трех вторых):

$$I \sim U^{3/2}.$$

А плотность тока на II участке ВАХ (рис. 6) определяется формулой Ричардсона–Дешмана:

$$j = AT^2 e^{-A_{\text{вых}}/kT},$$

где  $A=1,2 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2\text{K}^2$  – величина, одинаковая для всех металлов;  $T$  – абсолютная температура;  $A_{\text{вых}}$  – работа выхода,  $k$  – постоянная Больцмана.

### Описание лабораторной установки

Вакуумный прибор (рис. 8), предназначенный для изучения явления термоэлектронной эмиссии, состоит из катода К, анода А, охранных цилиндров ОЦ и сетки С. Нагрев катода осуществляется пропусканием тока от источника напряжения Ист1. Напряжение на катоде контролируется при помощи вольтметра  $V_k$ , сила тока – амперметром  $A_k$ . Анод имеет форму цилиндра, коаксиального катоду. На анод подается напряжение от источника Ист2, разность потенциалов между катодом и анодом контролируется вольтметром  $V_a$ .

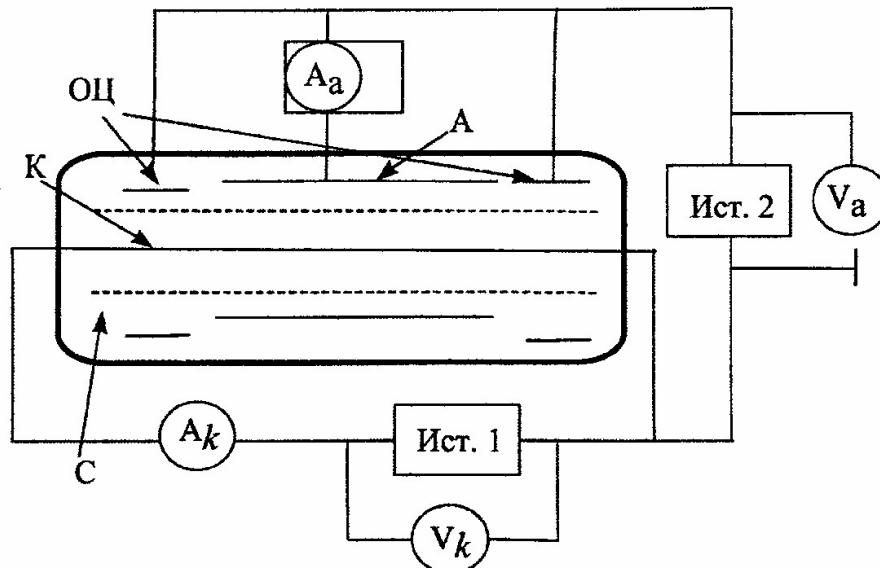


Рис. 8

ток в анодной цепи – миллиамперметром  $A_a$ . Охранные цилиндры повторяют форму анода и предназначены для уменьшения краевых эффектов – искажения электрического поля по краям анода. На сетку можно подавать регулируемое напряжение для изучения распределения по энергии электронов, вылетающих с поверхности катода. Сетка имеет потенциал, равный потенциалу анода и охранных цилиндров.

### Методика выполнения лабораторной работы и обработки результатов измерений

Данная работа состоит из двух частей.

#### 1. Экспериментальная проверка справедливости формул Богуславского–Ленгмюра и Ричардсона–Дешмана

Для проверки закона трех вторых необходимо измерить зависимость анодного тока  $i_a$  от анодного напряжения  $V_a$  при фиксированном значении напряжения  $U_k$  и силы тока  $I_k$  в цепи катода. Анодный ток измеряется при положительных значениях анодного напряжения, соответствующего области I ВАХ. При этом необходимо определить величину тока насыщения, которое будет использовано во второй части лабораторной работы для определения работы выхода. Все эти измерения повторяются для новых значений напряжения и силы тока в цепи катода.

В области пространственного заряда сила тока в анодной цепи, согласно теоретическим представлениям, изменяется по закону  $I_a \sim U^{3/2}$ . Поэтому график зависимости  $I_a = f(U)$  в двойном логарифмическом масштабе должен представлять собой прямую линию, угловой коэффициент которой равен 3/2:

$$\ln I_a = 3/2 \ln U_a.$$

Экспериментальное значение углового коэффициента  $\alpha$  зависимости  $\ln I_a$  от  $\ln U_a$  определяется из соотношения:

$$\alpha = (\ln I_{a1} - \ln I_{a2}) / (\ln U_{a1} - \ln U_{a2}).$$

#### 2. Определение работы выхода по II области ВАХ

Прологарифмируем выражение для силы тока насыщения, используя формулу Ричардсона–Дешмана и связь между силой и плотностью тока:

$$\ln I_{\text{нас}} = \ln A + 2 \ln T - A_{\text{вых}} / kT + \ln S,$$

где  $S$  – площадь эмитирующей поверхности.

Изменение силы тока насыщения от температуры определяется в основном показательной функцией, поэтому график зависимости  $\ln I_{\text{нас}}$  от  $1/T$  должен представлять собой прямую линию, угловым коэффициентом которой равен  $A_{\text{вых}}/k$ , тогда экспериментальное значение работы выхода определяется из соотношения

$$A_{\text{вых}} = k(\ln I_{\text{нас}2} - \ln I_{\text{нас}1}) / (1/T_2 - 1/T_1).$$

Температуру катода можно определить двумя способами – на основании зависимости сопротивления металлов от температуры и исходя из связи мощности, рассеиваемой на катоде, с его температурой. В первом случае сопротивление катода определяется из показаний амперметра и вольтметра в цепи катода:  $R = U_k / I_k$ . Это сопротивление линейным образом связано с температурой катода  $T$ :

$$R = R_0(1 + \beta(T - T_0)),$$

где  $R_0$  – сопротивление катода при комнатной температуре  $T_0$ , а  $\beta$  – термический коэффициент сопротивления материала катода (вольфрама) от температуры. Отсюда следует, что

$$T = [(U_k / I_k) - R_0(1 - \beta T_0)] / \beta R_0.$$

Во втором случае мощность  $P$ , рассеиваемая на катоде, определяется также из показаний амперметра и вольтметра в цепи катода:  $P = U_k I_k$ . Она сравнивается с табличными данными, представленными на рабочем месте, которые связывают величину  $P$  с температурой катода  $T$ .

### Порядок выполнения работы

1. При фиксированном значении напряжения, подаваемого на катод  $U_k$ , измеряются:

- а) сила тока в цепи катода;
- б) зависимость силы анодного тока от напряжения между катодом и анодом в области нарастания тока;
- в) величина тока насыщения.

Все эти измерения повторяются 5 раз при различных значениях напряжения, подаваемого на катод. Полученные данные заносятся в табл. 1. (Значения катодного напряжения  $U_k$ , при которых производятся эти измерения, указаны на рабочем месте или даются преподавателем).

Таблица 1

1-е измерение		$U_k = \dots$	$I_k = \dots$	$T_k = \dots$	$I_{нас} = \dots$	
№ п/п	$U_a$	$I_a$	$\ln U_a$	$\ln I_a$	$\Delta U_a / U_a$	$\Delta I_a / I_a$
1						
2						
3						
4						
5						

2-е измерение		$U_k = \dots$	$I_k = \dots$	$T_k = \dots$	$I_{нас} = \dots$	
№ п/п	$U_a$	$I_a$	$\ln U_a$	$\ln I_a$	$\Delta U_a / U_a$	$\Delta I_a / I_a$
1						
2						
3						
4						
5						

.....

5-е измерение		$U_k = \dots$	$I_k = \dots$	$T_k = \dots$	$I_{нас} = \dots$	
№ п/п	$U_a$	$I_a$	$\ln U_a$	$\ln I_a$	$\Delta U_a / U_a$	$\Delta I_a / I_a$
1						
2						
3						
4						
5						

2. Для одного из значений тока в цепи катода измеряется общая зависимость анодного тока от напряжения  $U_a$ . Полученные данные заносятся в табл. 2.

Таблица 2

	$U_k = \dots$	$I_k = \dots$	$T_k = \dots$
$U_a$			
$I_a$			

### Обработка результатов измерений

1. Для каждого из значений напряжения на катоде ( $U_k$ ) рассчитать величины  $\ln U_a$ ,  $\ln I_a$ , абсолютные погрешности  $\Delta U_a / U_a$ ,  $\Delta I_a / I_a$  и заполнить табл. 1.

2. На основании расчетных данных построить графики зависимости  $\ln I_a$  от  $\ln U_a$  для каждого из значений напряжения на катоде, аппроксимировать эти графики прямой линией, определить угловой коэффициент как  $(\ln I_{a1} - \ln I_{a2}) / (\ln U_{a1} - \ln U_{a2})$  и оценить погрешность его измерения из графика.

3. Определить среднее значение углового коэффициента, величину погрешности, сравнить полученный результат с теоретически ожидаемым ( $\alpha = 3/2$ ).

4. На основании данных о напряжении и силе тока в цепи катода определить его температуру и занести полученные данные в табл. 1 (вариант метода определения температуры катода указывается преподавателем).

5. Построить график зависимости  $\ln I_{\text{нас}}$  от  $1/T$  и определить величину работы выхода электронов из катода графически на основании соотношения

$$A_{\text{вых}} = k \frac{\ln I_{\text{нас}2} - I_{\text{нас}1}}{1/T_2 - 1/T_1}.$$

6. Построить график вольт-амперной характеристики по данным табл. 2.

В данной лабораторной работе предлагается использовать графический метод определения искомой величины и ее погрешности. Графический метод обработки результатов измерений является менее строгим по сравнению с методом наименьших квадратов, но он проще, обладает наглядностью и в ряде случаев более адекватно отражает результаты измерений.

### Графическое определение углового коэффициента

Линия графика проводится таким образом, чтобы экспериментальные точки равномерно располагались по обе стороны от усредненной прямой (рис. 9, а). Точки 1 и 2 (рис. 9, а) не ложатся на прямую, так как относятся к переходу между областями I и II (рис. 6), поэтому при обработке результатов они не учитываются.

Погрешность определения углового коэффициента (рис. 9, б) определяется пунктирными линиями, которые проводятся параллельно усредненной прямой так, чтобы половина экспериментальных точек располагалась между этими линиями. По упрощенной схеме относительная погрешность  $\delta\alpha$  находится из соотношения:

$$\delta\alpha = \left| \Delta \ln U / (\ln U_1 - \ln U_2) \right| + \left| \Delta \ln I / (\ln I_1 - \ln I_2) \right|,$$

где величины  $\Delta \ln U$  и  $\Delta \ln I$  определяются пунктирными линиями, как это показано на рис. 9, б.

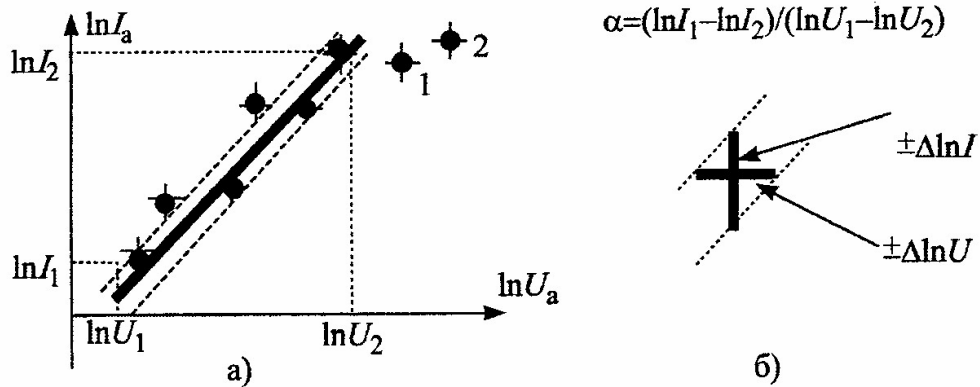


Рис. 9

Аналогичным образом находятся величины остальных угловых коэффициентов и их погрешности.

Среднее значение углового коэффициента – это среднее арифметическое из серии экспериментов:

$$\langle \alpha \rangle = \Sigma(\alpha_1) / 5.$$

Абсолютная погрешность находится из соотношения

$$\Delta \alpha = \Delta \alpha_{\text{сист}} + \Delta \alpha_{\text{случ}},$$

где  $\Delta \alpha_{\text{сист}}$  определяется погрешностью одного измерения, а  $\Delta \alpha_{\text{случ}}$  – как  $\Sigma|\alpha_1 - \langle \alpha \rangle| / 5$ .

### Графический метод определения работы выхода

Построение графика зависимости  $\ln I_{\text{нас}}$  от  $1/T$  производится таким же образом, как и предыдущего графика  $\ln I_a = f(\ln U_a)$ . По наклону усредненной прямой на зависимости величины тока насыщения от обратной температуры катода определяется величина работы выхода. Погрешность найденного значения  $A_{\text{вых}}$  находится аналогично предыдущему случаю.

### Контрольные вопросы

1. Что такое термоэлектронная эмиссия?
2. Почему на участке I анодный ток нарастает с увеличением анодного напряжения?
3. Что препятствует электронам вылетать из металла в вакуум с точки зрения классической физики?

4. Является ли понятие «работа выхода» статистическим, или каждому электрону, находящемуся в металле, необходима одинаковая по величине энергия, чтобы он был удален в вакуум?

5. Для чего используются различные методы снижения работы выхода в электровакуумных приборах?

### Лабораторная работа 6.6

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО КОЭФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПРОВОДНИКА И ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКА

### Цель работы

Изучение зависимости сопротивления металлического проводника и полупроводника от температуры и определение ширины запрещенной зоны полупроводника.

### Введение

Удельное сопротивление вещества определяется законом Ома в дифференциальной форме

$$\vec{E} = \rho \vec{j}, \quad (1)$$

где  $\vec{E}$  и  $\vec{j}$ , соответственно напряженность электрического поля и плотность тока.

В металлах в широком диапазоне температур зависимость  $\rho(T)$  описывается линейной функцией

$$\rho = \rho_0(1 + \beta t), \quad (2)$$

где  $t$  – температура, °С;  $\beta = \text{const}$  – температурный коэффициент сопротивления;  $\rho_0$  – значение сопротивления при  $t = 0^\circ\text{C}$ . У хороших проводников величина  $\rho_0 \approx 10^{-8}$  Ом·м.

Сопротивление проводника при заданной температуре зависит от его размеров и формы. Например, сопротивление проводника цилиндрической формы прямо пропорционально его длине  $l$  и обратно пропорционально площади поперечного сечения  $S$ :  $R = \rho \frac{l}{S}$ , где  $\rho$  – удельное сопротивление.



Независимо от формы проводника его сопротивление прямо пропорционально  $\rho$ , поэтому

$$R = R_0(1 + \beta t), \quad (3)$$

где  $R_0$  – значение сопротивления при  $t = 0^\circ\text{C}$ .

Удельные сопротивления полупроводников при комнатной температуре имеют значения в пределах  $10^{-5} \leq \rho \leq 10^4$  Ом·м в зависимости от вида полупроводника.

Зависимость удельного сопротивления полупроводников от температуры в сильной степени зависит от содержащихся в них примесей. Для собственных полупроводников (имеющих малое количество примесей) эта зависимость определяется следующим выражением:

$$R = R_0 \exp(Q/2kT), \quad (4)$$

где  $T$  – абсолютная температура;  $Q$  – ширина запрещенной зоны;  $R_0$  – постоянная, имеющая размерность сопротивления;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана. Логарифмируя (2), получаем

$$\ln R = \ln R_0 + Q/2kT. \quad (5)$$

Связь между плотностью тока  $\vec{j}$  и скоростью упорядоченного движения  $\vec{u}$  носителей заряда определяется выражением

$$\vec{j} = qn\vec{u}. \quad (6)$$

Здесь  $q$  – заряд носителя,  $n$  – концентрация носителей. Удобно ввести понятие подвижности  $\mu$ , по определению это коэффициент пропорциональности между  $\vec{u}$  и напряженностью электрического поля  $\vec{E}$ :  $\vec{u} = \mu\vec{E}$ .

Используя (6), получаем

$$\vec{j} = qn\mu\vec{E} = \sigma\vec{E}. \quad (7)$$

Величина  $\sigma = qn\mu = 1/\rho$  называется удельной электрической проводимостью. Зависимость проводимости от температуры определяется зависимостями  $n(T)$  и  $\mu(T)$ , и объясняется зонной теорией твердых тел.

Будем рассматривать самый простой случай: твердое тело состоит из атомов одного сорта, образующих идеальную кристаллическую решетку.

Электроны в изолированном атоме имеют вполне определенный дискретный набор значений энергии (энергетических уровней). Если атомы расположены достаточно далеко друг от друга (например, в газообразном со-

стоянии вещества), допустимые значения энергии электронов совпадают со значениями энергии электронов в изолированном атоме. В твердых телах расстояния между соседними атомами сравнимы по величине с размерами атомов и это приводит к расщеплению уровней: каждый атомный уровень расщепляется на совокупность близко расположенных уровней, образующих зону разрешенных состояний. Число уровней в зоне равно  $N$  – числу атомов в кристалле (рис. 1), шириной зоны называют разность между максимальной и

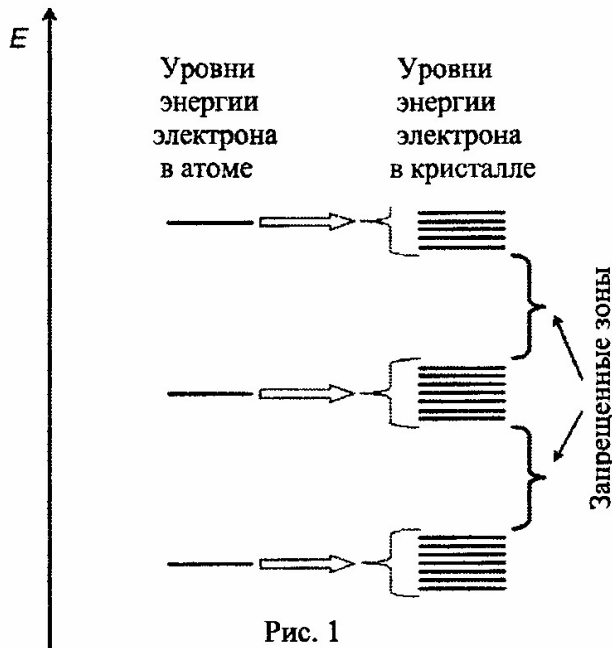


Рис. 1

минимальной энергией уровней зоны. Наиболее сильно расщепляются уровни слабо связанных с атомом валентных электронов, именно эти электроны и имеют определяющее значение при рассмотрении электрофизических свойств твердых тел. Ширина разрешенной зоны  $\Delta E$  порядка единиц эВ, а расстояние между соседними уровнями определяется  $N$ . Например, если  $N = 10^{23}$ ,  $\Delta E \approx 10^{-23}$  эВ.

Разрешенные зоны отделены друг от друга запрещенными, электроны не могут обладать значениями энергии, лежащими в пределах запрещенных зон.

Распределение электронов по уровням подчиняется принципу Паули, согласно которому на каждом уровне может находиться не более двух электронов с противоположно направленными спинами.

При  $T \rightarrow 0$  уровни заполнены так, что полная энергия системы электронов минимальна.

Особенно важное значение имеет частично или полностью заполненная зона с наибольшим значением энергии. Возможные варианты заполнения при  $T \rightarrow 0$  приведены на рис. 2, 3. Кружками со стрелками изображены электроны.

Рис. 2 иллюстрирует распределение электронов в металлах: над полностью заполненной валентной зоной расположена частично заполненная зона проводимости. Занятый электроном уровень с наибольшей энергией называется уровнем Ферми.

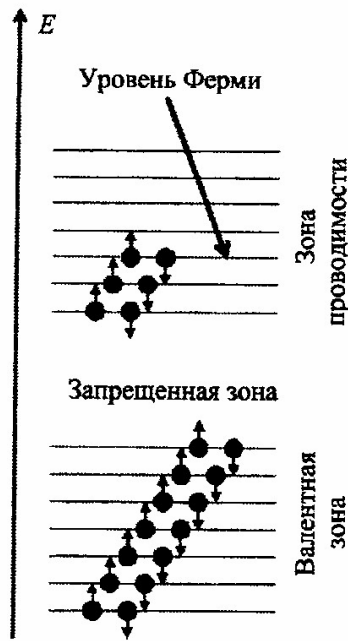


Рис. 2



Рис. 3

На рис.3 изображено распределение электронов, типичное для полупроводников и изоляторов, валентная зона полностью заполнена, а в зоне проводимости электронов нет. Разность  $E_c - E_v \equiv Q$  – ширина запрещенной зоны. При увеличении температуры  $T$  распределение электронов по уровням изменяется за счет теплового движения и в полупроводниках имеет вид, схематически изображенный на рис. 4.

Электроны, находящиеся в полностью заполненных зонах, не могут ускоряться электрическим полем: ускорение приводит к увеличению энергии электронов, а на языке зонной теории это означает переход на уровень с большей энергией, что противоречит принципу Паули. Если же в зоне имеются свободные состояния, электроны могут ускоряться под действием электрического поля, и в веществе возникает электрический ток. В проводниках (рис. 2) это условие выполняется всегда.

К полупроводникам относятся вещества с шириной запрещенной зоны  $Q$  от нескольких десятых до  $\approx 2$  эВ. Вещества с большими значениями  $Q$  являются изоляторами.

При достаточно больших температурах

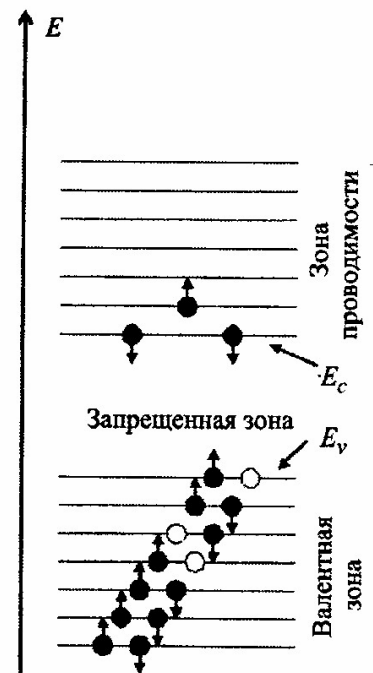


Рис. 4

тепловое движение приводит к переходу электронов в зону проводимости и полупроводник способен проводить электрический ток. Заметим, что в валентной зоне тоже появляются свободные состояния и находящиеся там электроны также принимают участие в создании тока. В зонной теории показывается, что движение электронов в валентной зоне происходит так, будто перенос заряда осуществляется положительно заряженными частицами, дырками, заряд которых равен абсолютной величине заряда электронов (на рис. 4 дырки изображены кружками), концентрации электронов и дырок в собственных полупроводниках, очевидно, совпадают. Заметим, что дырки – это не частицы в обычном смысле этого слова, они не могут существовать вне вещества. А электрону в веществе следует приписать так называемую эффективную массу, отличную от массы свободного электрона.

В зонной теории показывается, что в металлах концентрация электронов в зоне проводимости очень слабо зависит от температуры, а подвижность  $\mu \sim 1/T$ . Такая зависимость объясняется рассеянием электронов на колебаниях атомов кристаллической решетки. Поскольку  $\rho = 1/\mu$ ,  $\rho = \alpha T$ , где  $\alpha = \text{const}$ , или, переходя к шкале Цельсия,  $\rho = \alpha(273 + t) = \rho_0(1 + \beta t)$ , где  $\rho_0$  – удельное сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ , а термический коэффициент сопротивления  $\beta \approx 1/273$ .

У собственных полупроводников концентрация носителей заряда (электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне) сильно зависит от температуры:

$$n \approx C(T)e^{-Q/2kT}, \quad (8)$$

где  $C(T)$  – степенная функция температуры. Зависимость подвижности  $\mu$  и  $u$  электронов и  $u$  дырок также весьма слабая по сравнению с экспоненциальной. Поэтому  $\rho = 1/\mu \approx e^{-Q/2kT}$  и сопротивление образца полупроводника с хорошей точностью определяется соотношением (4).

### Описание лабораторной установки

Образцы из полупроводника и металла помещены в термостат, выводы от образцов подключены к клеммам на панели термостата. Температура в термостате регулируется нагревателем и измеряется термометром. Сопротивление полупроводника измеряется электронным омметром, металлического образца – мостом постоянного тока. Инструкция по обращению с измерительными приборами – в паспорте лабораторной работы.

## Методика прямых измерений

1. Ознакомиться с установкой, занести в приборную табл. 1 протокола характеристики измерительных устройств. Записать константы косвенных измерений.

Таблица 1

№ п/п	Название	Предел измерения	Цена деления	Абсолютная приборная погрешность
1	Термометр			
2	Омметр			
3	Измерительный мост			

2. Освоить измерительные процедуры при комнатной температуре. Измерить сопротивления металлического ( $R_{\text{пр}}$ ) и полупроводникового ( $R_{\text{пп}}$ ) образцов и записать в табл. 2 значения температуры  $t, ^\circ\text{C}$ , и сопротивлений.

3. Включить нагреватель термостата. Снять зависимости сопротивлений образцов от температуры. Измерения проводятся не менее чем в десяти точках при неизменном приращении температуры.

Таблица 2

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t, ^\circ\text{C}$										
$R_{\text{пр}}, \text{Ом}$										
$R_{\text{пп}}, \text{Ом}$										

### Обработка результатов измерений

#### *Определение термического коэффициента сопротивления проводника*

Занести в отчет по работе табл. 3.

Таблица 3

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t, ^\circ\text{C}$										
$R_{\text{пр}}, \text{Ом}$										

**Задание А.** Проверка справедливости уравнения (3).

По табл. 3 построить график зависимости  $R = f(T)$  для металлического образца. Убедиться, что в пределах погрешности измерений экспериментальные точки ложатся на прямую линию. По наклону прямой, вычисляя отношения приращений вдоль осей абсцисс и ординат, произвести точечную оценку коэффициента  $\beta$ .

**Задание В.** Определение доверительных интервалов  $\bar{\beta} \pm \Delta\beta$  методом парных точек.

Согласно (3) уравнение измерения коэффициента  $\beta$  методом парных точек имеет вид

$$\beta = \frac{R_m - R_l}{R_l t_m - R_m t_l}. \quad (9)$$

Используя табл. 3, составить парные комбинации значений  $(t_m, R_l)$ , затем по формуле (4) вычислить варианты  $\beta_k$ , получить выборку  $\{\beta_k\}$  объемом  $n \geq 5$  и определить доверительный интервал  $\bar{\beta} \pm \Delta\beta$  методом малой выборки:

$$\bar{\beta} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \beta_k, \quad \Delta\beta = t_{\alpha, n} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (\Delta\beta_k)^2}{n(n-1)}},$$

где  $t_{\alpha, n}$  – коэффициент Стьюдента.

Для удобства вычислений данные занести в табл. 4

Таблица 4

№ п/п	Пары точек	$\beta_k$	$\Delta\beta_k = \beta_k - \bar{\beta}$	$(\Delta\beta_k)^2$
1	1–5			
2	2–6			
3	3–7			
...	...			

**Задание С.** Вычисление доверительного интервала  $\bar{\beta} \pm \Delta\beta$  методом наименьших квадратов.

Запишем (3) в виде  $R = R_0 + R_0\beta t$  и введем обозначения  $y = R$ ,  $R_0 = a$ ,  $R_0\beta = b$ ,  $x = t$ , тогда зависимость примет вид  $y = bx + a$ . В результате измерений образуется набор пар  $x_k, y_k$ . В методе наименьших квадратов коэффициенты  $b$  и  $a$  определяются из условия минимума выражения

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - bx_i - a)^2.$$

Простые вычисления показывают, что значения  $b$  и  $a$

определяются так:

$$a = \langle y \rangle - bx, \quad b = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2},$$

где  $\langle xy \rangle = \sum_{i=1}^n x_i y_i$ ,  $\langle x^2 \rangle = \sum_{i=1}^n x_i^2$ ,  $\langle x \rangle = \sum_{i=1}^n x_i$ ,  $\langle y \rangle = \sum_{i=1}^n y_i$ .

Приведем формулы для определения погрешностей величин  $a$  и  $b$ :

$$\Delta b = \sigma_{\langle y \rangle} \sqrt{\frac{1}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}}, \quad \Delta a = \sigma_{\langle xy \rangle} \sqrt{\frac{\langle x^2 \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}},$$

где  $\sigma_{\langle y \rangle} = \sqrt{\frac{1}{n(n-2)} \sum_{i=1}^n (y_i - bx_i - a)^2}$ .

Погрешность температурного коэффициента сопротивления определяется формулой

$$\Delta \beta = \frac{\Delta b}{a}.$$

Варианты выполнения заданий задаются преподавателем.

### *Определение ширины запрещенной зоны полупроводника*

**Задание А.** Проверка справедливости уравнения (4).

Перенести данные измерений в табл. 5, дополнив их значениями  $T$  и  $\ln(R)$  ( $R$  – сопротивление полупроводника).

Таблица 5

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t, ^\circ\text{C}$										
$R_{\text{пр}}, \text{Ом}$										
$T, \text{К}$										
$\ln R$										

По табл. 5 построить график зависимости  $\ln(R) = f(1/T)$  и произвести точечную оценку  $\Delta E$  по наклону полученной прямой.

**Задание В.** Определение доверительных интервалов  $\bar{Q} \pm \Delta Q$  методом парных точек.

Уравнение измерения ширины запретной зоны методом парных точек имеет вид

$$Q = \frac{2k(\ln R_l - \ln R_m)}{1/T_l - 1/T_m} = \frac{T_l T_m \ln(R_l / R_m)}{C(T_m - T_l)}, \quad (10)$$

где  $C = 1/2k = 5,797 \cdot 10^3 \text{ К/эВ}$ .

По табл. 5 выбираются парные комбинации значений  $(T_l, R_l)$ ,  $(T_m, R_m)$  (соседние точки брать не следует), вычисляются варианты выборки  $\{Q_k\}$  объемом  $n \geq 5$ . Методом малой выборки определяются  $\bar{Q} \pm \Delta Q$ :

$$\bar{Q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Q_k, \quad \Delta Q = t_{\alpha, n} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (\Delta Q_k)^2}{n(n-1)}},$$

где  $t_{\alpha, n}$  – коэффициент Стьюдента.

Таблица 6

№ п/п	Пары точек	$Q_k$	$\Delta Q_k = Q_k - \bar{Q}$	$(\Delta Q_k)^2$
1	1–5			
2	2–6			
3	3–7			
...	...			

**Задание С.** Вычисление доверительного интервала  $\bar{Q} \pm \Delta Q$  методом наименьших квадратов.

Запишем (3) в виде  $y = bx + a$ ,  $y = \ln R$ ,  $a = \ln R_0$ ,  $b = \frac{Q}{2k}$ ,  $x = \frac{1}{T}$ . По результатам измерений образуется набор пар  $x_k, y_k$ . Формулы для определения коэффициентов  $b$  и  $a$  методом наименьших квадратов приведены выше (см. задание С, с. 30).

Варианты выполнения заданий задаются преподавателем.

### Контрольные вопросы

1. Изложите основные положения зонной теории.
2. Что называется разрешенной зоной, запрещенной зоной, валентной зоной, зоной проводимости?
3. Как зонная теория объясняет качественное различие зависимостей  $\sigma(T)$  в металлах и полупроводниках?
4. Какие частицы являются свободными носителями заряда в металлах и полупроводниках?
5. Как графически проверить справедливость уравнения теоретической модели?



## Лабораторная работа 6.12

### ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

#### Цель работы

Целью настоящей работы является исследование вольт-амперной характеристики фотоэлектрического эффекта, определение красной границы фотоэффекта, работы выхода материала катода и постоянной Планка.

#### Введение

При подготовке к выполнению настоящей работы рекомендуем использовать учебники по физике, в которых фотоэффект, как правило, излагается достаточно подробно.

Физическое явление испускания электронов веществом под действием электромагнитного излучения в вакуум получило название внешнего фотоэлектрического эффекта. Фотоэффект относится к числу физических явлений, в которых проявляются корпускулярные свойства света. Закон сохранения энергии для рассматриваемого процесса выражается уравнением Эйнштейна:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}, \quad (1)$$

где  $h\nu$  – световой квант энергии, переданный электрону;  $A$  – работа выхода электрона из вещества (фотокатода);  $\frac{mv^2}{2}$  – максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона.

Уравнение (1) дает теоретическое обоснование закономерностей фотоэффекта:

- 1) фототок насыщения пропорционален световому потоку (закон Столетова);
- 2) максимальная скорость фотоэлектронов определяется частотой света и не зависит от его интенсивности;
- 3) в зависимости от материала катода существует минимальное значение частоты света, при которой еще возможен внешний фотоэффект (красная граница фотоэффекта):

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

При  $\nu < \nu_0$  фотоэффект отсутствует.

### Теоретическое обоснование методики

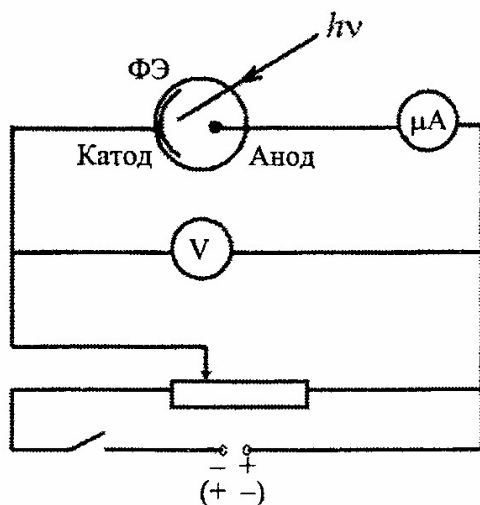


Рис. 1

Для исследования внешнего фотоэффекта обычно используют вакуумные фотоэлементы типа СЦВ или ФЭ, спектральная чувствительность которых находится в видимой части спектра. Электрическая схема включения фотоэлемента приведена на рис. 1.

Фотоэлемент ФЭ состоит из стеклянной колбы, на поверхность которой нанесен тонкий слой металла (фотокатод), и собирающего электрода (анод).

Фотокатод освещается монохроматическим светом. Если на анод подать «плюс», а на катод «минус», то с ростом величины ускоряющей разности потенциалов  $U_a$  наблюдается рост величины фототока  $I$  до достижения им постоянного значения, тока насыщения  $I_H$ .

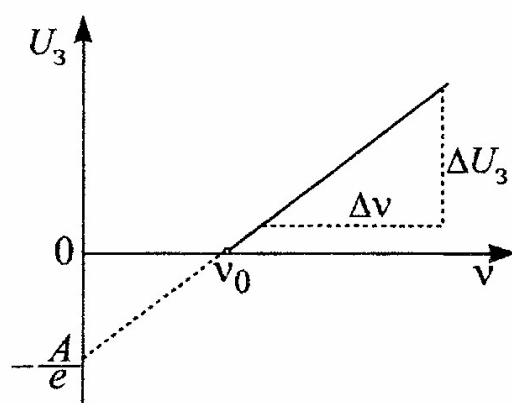


Рис. 2

зависимость фототока фотоэлемента от приложенного к его электродам напряжения (вольт-амперная характеристика).

Число высвобождаемых вследствие фотоэффекта электронов должно быть пропорционально числу падающих на поверхность фотокатода квантов света. Световой поток  $\Phi$  определяется количеством квантов света, падающих на поверхность в единицу времени. В соответствии с этим ток насыщения  $I_H$  должен быть пропорционален падающему световому потоку (закон Столетова).

Исследованию этой закономерности фотоэффекта посвящена первая часть лабораторной работы.

Особый интерес представляет величина задерживающей разности потенциалов  $U_3$ , когда фототок становится равным нулю (на аноде «минус», на

катоде «плюс»). Величина  $U_3$  определяет максимальное значение кинетической энергии фотоэлектронов:

$$\frac{mv_m^2}{2} = eU_3, \quad (3)$$

где  $e$  – абсолютная величина заряда электрона. С учетом (3) уравнение Эйнштейна (1) можно переписать в виде

$$U_3 = \frac{h}{e} \nu - \frac{A}{e}. \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что величина задерживающей разности потенциалов  $U_3$  прямо пропорциональна частоте света, падающего на катод (рис. 3).

Постоянную Планка  $h$  можно определить из углового коэффициента линейной зависимости:

$$\frac{h}{e} = \frac{\Delta U_3}{\Delta \nu}.$$

Следовательно,

$$h = \frac{\Delta U_3}{\Delta \nu} e. \quad (5)$$

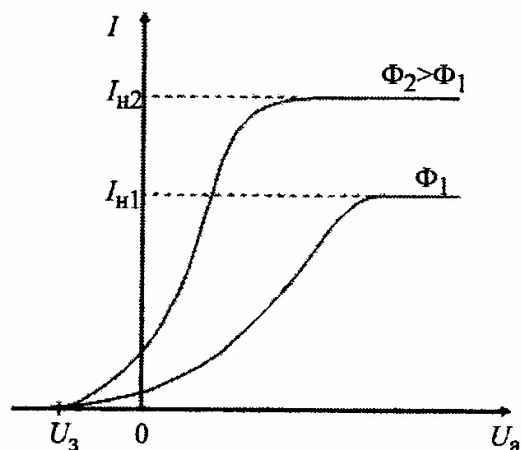


Рис. 3

Экстраполяция линейной зави-

симости до пересечения с осями дает способ определения величин  $\nu_0$  и  $\frac{A}{e}$ .

Определению  $h$ ,  $A$ ,  $\nu_0$  посвящена вторая часть лабораторной работы.

## Порядок выполнения работы

### Часть I

#### Вольт-амперная характеристика внешнего фотоэффекта

В экспериментальной установке используются: источник питания со встроенным вольтметром для измерения ускоряющего напряжения  $U_a$ , подаваемого на фотозлемент; микроамперметр  $A$  для измерения фототока; оптическая система освещения фотозлемента монохроматическим светом.

1. Включить источник питания, предварительно выставив выходное напряжение постоянного тока на «ноль».

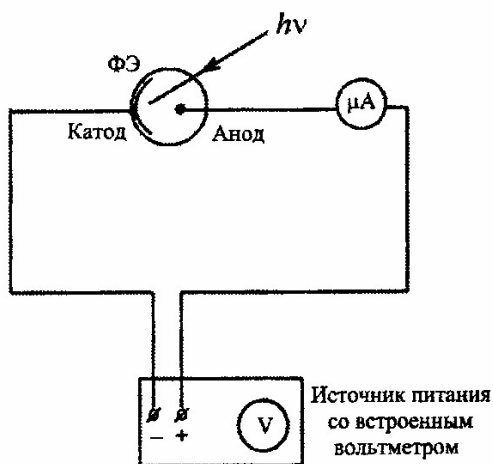


Рис. 4

Определить величину тока насыщения, по крайней мере для трех значений  $U_a$ . Результаты измерений записать в табл. 1 (1-й и 2-й столбцы).

Таблица 1

$U_a$ , В	$I_1$ , мкА	$I_2$ , мкА с нейтр. фильтром

Результаты измерений фототока записать в табл. 1 (3-й столбец).

Запишите указанный на рабочем месте коэффициент ослабления светового потока нейтральным фильтром.

6. Выключить приборы, разобрать схему, убрать нейтральный фильтр.

Примечание. Для сохранности микроамперметра не включайте источник света, если цветной фильтр отсутствует в держателе.

2. Поместить синий фильтр в держатель, находящийся непосредственно перед окном камеры с вакуумным фотоэлементом.

3. Включить источник света при помощи тумблера, расположенного на передней панели камеры осветителя.

4. Снять зависимость фототока от величины напряжения на аноде, изменяя величину  $U_a$  от 0 до значений, соответствующих току насыщения.

5. В держатель, закрепленный на оптической скамье, установить нейтральный светофильтр для ослабления светового потока. Повторить измерения вольт-амперной характеристики фотоэлемента при тех же значениях анодного напряжения  $U_a$ .

## Часть II

### Исследование зависимости величины задерживающей разности потенциалов от частоты света

1. Собрать схему, приведенную на рис. 5.

В установке используются источник питания с встроенным микроамперметром  $A$  и вольтметр  $V$  для измерения задерживающей разности потенциалов  $U_3$ . На анод фотоэлемента подается «минус», а на катод – «плюс».

Разность потенциалов между катодом и анодом изменяется при помощи потенциометра  $R$ .

2. Выведя ручку потенциометра  $R$  в крайнее положение (против часовой стрелки), включить источник питания.

3. Поместить один из фильтров в держатель и включить освещение.

4. Вращая ручку потенциометра, подать на фотоэлемент задерживающую разность потенциалов, при которой ток в цепи фотоэлемента, измеряемый микроамперметром  $A_2$ , станет равным нулю. При этом показание вольтметра будет равно величине задерживающей разности потенциалов. Сделать измерения три раза.

5. Повторить указанные в п. 3 и 4 измерения для всех имеющихся четырех фильтров, не забывая, что смена фильтра допустима только при выключенном источнике света. Результаты измерений  $U_3$  и значения длин волн  $\lambda$ , указанные на рабочем месте, записать в табл. 2.

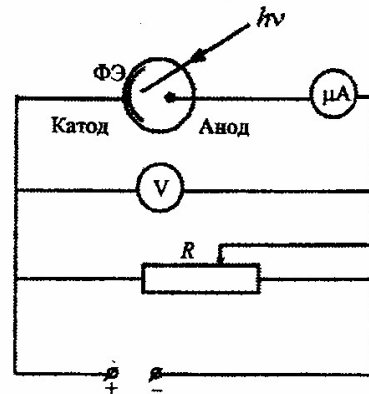


Рис. 5

Таблица 2

Фильтр	$\lambda, \text{Å}$	$U_3, \text{В.}$			$\langle U_3 \rangle$
		1	2	3	
Синий					
Зеленый					
Оранжевый					
Красный					

6. По трем измерениям определить среднее значение  $\langle U_3 \rangle$  для всех фильтров.

7. Выключить установку. Разобрать схему и вынуть фильтр из держателя.

### Обработка результатов измерений

1. По результатам измерений первой части лабораторной работы (табл. 1) постройте вольт-амперные характеристики фотоэлемента при его освещении монохроматическим светом с нейтральным фильтром и без него.

2. Результаты измерений второй части лабораторной работы представьте в виде табл. 3, в которой буква  $i$  – индекс фильтра с длиной волны  $\lambda_i$  и частотой  $\nu_i$  ( $\nu_i = c/\lambda_i$ );  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с;  $U_i = \langle U_3 \rangle$ .

Таблица 3

Фильтр	$i$	$\lambda_i, \text{Å}$	$\nu_i, \text{с}^{-1}$	$U_i, \text{В}$
Синий	1			
Зеленый	2			
...	...			

3. Постройте график зависимости  $U_i$  от  $\nu_i$ .

4. Экстраполяцией графика (прямая линия) до пересечения с осями (рис. 3) определите значения  $\nu_0$ ,  $A/e$  и  $A$ .

(Экстраполяция – определение по ряду данных значений функции других ее значений, находящихся вне этого ряда.)

5. Рассчитайте величину постоянной Планка и работу выхода материала фотокатода методом наименьших квадратов.

Согласно методу наименьших квадратов линейная зависимость  $U_i(\nu_i)$  в виде прямой линии проводится так, чтобы сумма квадратов отклонений экспериментальных точек от этой прямой  $S$  была минимальной:

$$S = \sum_{i=1}^n \left[ U_i - \left( \frac{h}{e} \nu_i - \frac{A}{e} \right) \right]^2,$$

где  $n$  – число экспериментальных точек. Решение математической задачи на вычисление экстремальных значений  $S$ , когда

$$\partial S / \partial A = 0 \text{ и } \partial S / \partial h = 0,$$

приводит к определению величин  $h$  и  $A$ :

$$h = e \frac{\sum_{i=1}^n (\nu_i - \bar{\nu})(U_i - \bar{U})}{\sum_{i=1}^n (\nu_i - \bar{\nu})^2},$$

$$\text{где } \bar{\nu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \nu_i, \quad \bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i;$$

$$A = h\bar{\nu} - e\bar{U}.$$

6. Абсолютные погрешности  $\Delta h$  и  $\Delta A$  вычислите по формулам:

$$\Delta h = 1,9 \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n (eU_i - hv_i + A)^2}{(n-2) \left[ n \sum_{i=1}^n v_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n v_i \right)^2 \right]}}; \Delta A = 1,9 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n (eU_i - hv_i + A)^2}{(n-2) \left[ n \sum_{i=1}^n v_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n v_i \right)^2 \right]}}$$

### Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление внешнего фотоэффекта?
2. Нарисуйте вольт-амперную характеристику фотоэлемента.
3. Сформулируйте закон Столетова.
4. От чего зависит величина задерживающей разности потенциалов?
5. В чем заключается «экстраполяция графика»?

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Савельев, И.В.* Курс общей физики: книга 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц: учеб. пос. для втузов / И.В. Савельев. – М. : Наука, 1998.

2. *Трофимова, Т.И.* Курс физики: учеб. пос. для вузов / Т.И. Трофимова. – М. : Изд. центр «Академия», 2006.

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа 6.2.	
Измерение постоянной Планка .....	3
Лабораторная работа 6.3.	
Изучение закона интегральной светимости нагретого тела .....	8
Лабораторная работа 6.4.	
Изучение явления термоэлектронной эмиссии и определение работы выхода электронов из металла.....	15
Лабораторная работа 6.6.	
Определение термического коэффициента сопротивления металлического проводника и ширины запрещенной зоны полупроводника .....	24
Лабораторная работа 6.12.	
Изучение внешнего фотоэффекта .....	33
Литература.....	40



*Андреев Александр Давидович  
Костин Анатолий Алексеевич  
Князев Сергей Александрович  
Федюшин Владимир Борисович  
Черных Леонид Михайлович*

**КВАНТОВАЯ ФИЗИКА**  
**МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**  
**ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Редактор *И.И. Щенсяк*  
Компьютерная верстка *М.Ю. Кусовой*

План 2010 г., п. 91

---

Подписано к печати 22.12.2010  
Объем 2,5 усл. печ. л. Тираж 440 экз. Зак. 95

---

Издательство «Теледом» ГОУВПО СПбГУТ. 191186 СПб, наб. р. Мойки, 61  
Отпечатано в СПбГУТ