

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
**СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра физики

ФИЗИКА

“Квантовая физика”

Методические указания к выполнению лабораторных работ

Факультеты: все

Направление подготовки дипломированного специалиста

650000 – техника и технологии

Направление подготовки бакалавра

550000 – технические науки

Санкт-Петербург

2004

Утверждено редакционно-издательским советом университета

УДК 53 (07)

Физика. Квантовая физика: Методические указания к выполнению лабораторных работ. – СПб.: СЗТУ, 2004. – 74 с.

Методические указания разработаны в соответствии с требованиями государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования по направлению подготовки дипломированного специалиста 650000 – «Техника и технологии» и отнесенных к нему специальностей СЗТУ и направлению подготовки бакалавра 550000 – «Технические науки».

Сборник содержит методические указания к выполнению лабораторных работ по квантовой физике: квантовой природе света, физике твёрдого тела, строению атома и атомного ядра.

Рассмотрено и утверждено на заседании кафедры физики 4 марта 2004 г.; одобрено методической комиссией факультета системного анализа и естественных наук 15 июня 2004 г.

Рецензенты: кафедра физики Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна (зав. кафедрой К.Г.Иванов, д-р физ.-мат. наук, проф.); В.М.Грабов, д-р физ.-мат. наук, проф. РГПУ им. А.И.Герцена.

Под общей редакцией А.Б.Федорцова, д-р физ.-мат. наук, проф.

Науч. редактор К.Ф.Комаровских, д-р физ.-мат. наук, проф.

Составители: К.Ф.Комаровских, д-р физ.-мат. наук, проф.;

И.А.Линийчук, д-р физ.-мат. наук, проф.; И.А.Торчинский, д-р физ.-мат. наук, проф.; Н.А.Тупицкая, канд. физ.-мат. наук, доц.

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

В описании каждой работы теоретические положения метода измерений рассмотрены кратко, для более глубокого ознакомления с физическими основами изучаемых явлений рекомендуется литература [1,3,5,6]. Темы представленных работ непосредственно связаны с основными вопросами теоретического курса. Число и наименования работ для каждого студента могут различаться в зависимости от специальностей. Описания работ знакомят с содержанием и методикой их выполнения. Примерная схема записи результатов измерений и их обработки (формы таблиц, отчёта, некоторые параметры измеряемого образца) приведены на рабочих местах. Вопросы к зачёту в конце каждого описания позволяют студенту сосредоточиться на главном. Требования к оформлению отчёта изложены ниже.

Охрана труда и техника безопасности при проведении лабораторных работ

Соблюдение техники безопасности при выполнении лабораторных работ по курсу физики производится в соответствии с «Правилами устройства электроустановок». (7-е изд. – М.: Электросервис, 2002).

К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, изучившие методические указания к выполнению лабораторных работ, прошедшие инструктаж по технике безопасности и обученные безопасным методам работы. О прохождении инструктажа делается запись в журнале учета прохождения инструктажа по технике безопасности, которая подтверждается собственноручными подписями студентов, прошедших инструктаж, и преподавателя или дежурного лаборанта, проводившего его.

Перед проведением лабораторной работы необходимо проверить надежность заземления электроизмерительных приборов и установок. Перед включением оборудования необходимо убедиться в отсутствии посторонних предметов в рабочей зоне и предупредить товарищей о начале лабораторной работы; до начала работы приборы должны быть выключены.

В случае обнаружения неисправностей, связанных с токопроводящими проводниками, изоляцией, греющимися токонесущими частями, необходимо немедленно прекратить работу и обратиться к преподавателю или дежурному лаборанту.

После окончания лабораторной работы необходимо выключить электроизмерительные приборы.

Запрещается:

- находиться в помещении в верхней одежде;
- оставлять без надзора включенную лабораторную установку;
- выполнять работу в отсутствие преподавателя или дежурного лаборанта;
- класть сумки и другие личные вещи на столы и лабораторную технику.

Студенты, не соблюдающие правила техники безопасности, отстраняются от проведения лабораторных работ.

Требования к оформлению отчетов

По каждой лабораторной работе оформляется отчет, который должен содержать:

- 1) номер и название работы;
- 2) формулировку цели работы;
- 3) физическое обоснование цели работы и метода измерения;
- 4) рабочую формулу с расшифровкой всех буквенных обозначений;
- 5) результаты прямых измерений и вычислений;
- 6) там, где это предусмотрено работой, график;
- 7) вычисление искомой величины по рабочей формуле;
- 8) вывод формулы относительной погрешности (неопределенности) косвенного измерения и результат расчета по этой формуле;
- 9) оценку погрешности (неопределенности) измерения искомой величины. При оценке неопределенностей прямых и косвенных измерений студент

должен руководствоваться правилами обработки результатов измерений, приведенными в данных указаниях на с. 6...12;

10) подпись студента и дату выполнения данной лабораторной работы.

Библиографический список

Основной:

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. школа, 2001 и др. гг. издания.

2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Высш. школа, 1989 и др. гг. издания.

Дополнительный:

3. Трофимова Т.И. Физика: 500 основных законов и формул: Справочник. – М.: Высш. школа, 2000.

4. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся в вузов. – М.: Наука, 1980.

5. Савельев И. В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1989 и др. гг. издания.

6. Епифанов Т.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника. – М.: Высш. школа, 1986.

7. Михайлова С.В. Элементы теории неопределённостей при физических измерениях. – СПб.: СЗТУ, 2004.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Любое измерение неизбежно связано с некоторой ошибкой. Это приводит к неопределенности результата измерений. Неопределенности (погрешности) результатов измерений имеют три вида составляющих: случайные, систематические и промахи. В каждой конкретной лабораторной работе необходимо оценить, какой вклад вносит каждая составляющая неопределенности в результат измерения данной величины.

ПРАВИЛА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Прямыми называют измерения, при которых результат получается непосредственно по отсчетному устройству прибора.

1. Учет случайных составляющих неопределенности (погрешности)

Случайные составляющие погрешности (неопределенности) измерений вызываются рядом мелких, неконтролируемых обстоятельств. Они подчиняются законам математической статистики.

При оценке таких неопределенностей, предполагают, что они являются случайными величинами, малыми по сравнению с самой измеряемой величиной и распределены по нормальному (гауссову) закону. Для оценки неопределенности измерений, которую вносят случайные составляющие, необходимо выполнить следующее:

1. Провести n измерений величины x . Результаты измерений $x_1, x_2 \dots x_n$ занести в таблицу по форме 1. Измерения должны быть многократными (число измерений n указывается преподавателем).

2. На основе полученных значений $x_1, x_2 \dots x_n$ вычислить среднее арифметическое значение x по формуле:

$$x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (1)$$

3. Вычислить отклонения результатов отдельных измерений (x_i) от среднего арифметического значения ($x_{cp} - x_i$), а затем рассчитать квадратичное отклонение $(x_{cp} - x_i)^2$. Полученные данные занести в таблицу по форме 1.

Форма 1

N опыта	x_i	$(x_{cp} - x_i)$	$(x_{cp} - x_i)^2$
1			
2			
3			
\vdots			

4. По данным последней колонки формы 1 определить среднее квадратичное отклонение (СКО) результата серии из n измерений от среднего арифметического значения x_{cp} по формуле:

$$S(x_{cp}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{cp} - x_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (2)$$

Замечание: В международных документах, основанных на «Руководстве по выражению неопределенности измерений» среднее квадратичное отклонение (СКО) обозначается термином **стандартная неопределенность** (U_c).

5. Оценить доверительный интервал, т.е. интервал, в котором с требуемой доверительной вероятностью p находится измеряемая величина x . Значение p задается преподавателем, исходя из требований конкретного эксперимента.

Границы доверительного интервала для измеряемой величины x определяются по формуле:

$$x_{cp} \pm \Delta x, \text{ где } \Delta x = t(p, n)S(x_{cp}). \quad (3)$$

Здесь $t(p, n)$ – коэффициент Стьюдента, зависящий от p и n .

Определить коэффициент Стьюдента при выбранной доверительной вероятности p и данном числе измерений n можно из таблицы 1.

6. Записать результат прямого измерения в виде:

$$(x_{cp} - \Delta x) \dots (x_{cp} + \Delta x).$$

Такая запись означает, что измеренная величина x с доверительной вероятностью p находится в интервале от $(x_{cp} - \Delta x)$ до $(x_{cp} + \Delta x)$.

Например, если при измерении диаметра d шарика микрометром среднее арифметическое значение $d_{cp} = 5,29$ мм, расчетное значение границы доверительного интервала составляет $\Delta d = 0,01$ мм, то ответ имеет вид: $d = (5,28...5,30)$ мм.

Следует заметить, что для всех измеряемых в данной лабораторной работе величин задается одно и то же значение доверительной вероятности p .

Таблица 1

$n \backslash p$	0.7	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	0.999
2	1.3	1.9	6.31	12.71	31.82	63.66	636.62
3	1.3	1.6	2.92	4.30	6.69	9.92	31.60
4	1.2	1.5	2.35	3.18	4.54	5.84	12.94
5	1.2	1.5	2.13	2.78	3.75	4.60	8.61
6	1.1	1.4	2.02	2.57	3.36	4.03	6.86
7	1.1	1.4	1.94	2.45	3.14	3.71	5.96
8	1.1	1.4	1.90	2.36	3.00	3.50	5.40
9	1.1	1.4	1.86	2.31	2.90	3.36	5.04
10	1.1	1.3	1.83	2.26	2.82	3.25	4.78
50	1.1	1.3	1.7	2.0		2.7	
100	1.0	1.3	1.7	2.0		2.6	
∞	1.0		1.6	2.0		2.6	

2. Учет неопределенностей, обусловленных систематическими ошибками

Такие неопределенности (систематические погрешности) связаны с методом или средством измерений. Оценка таких погрешностей (неопределенностей) обычно проводится разработчиком или изготовителем прибора. Существует несколько способов оценки таких неопределенностей при использовании прибора в лаборатории при рекомендованных условиях его работы.

1. Используя информацию, приведенную в паспорте прибора.

В паспорте прибора указывается предел допустимой неопределенности (погрешности) δ или приводится расчетная формула для ее вычисления.

2. На основании класса точности прибора.

Многие приборы (амперметры, вольтметры, ваттметры и др.) нормируются по приведенной погрешности, выражаемой в процентах от верхнего предела измерений. Максимальная погрешность (неопределенность) измерений прибором в этом случае вычисляется по формуле:

$$\delta = \frac{k \cdot x_m}{100}, \quad (4)$$

где k – класс точности прибора; x_m – верхний предел измерений прибора.

3. По цене деления прибора.

Если класс точности прибора не указан, то за погрешность (неопределенность) δ прибора принимают половину цены наименьшего деления шкалы прибора. В случае прибора, стрелка которого перемещается неравномерно, погрешность прибора считают равной цене деления прибора. (Это, например, имеет место у механического секундомера, стрелка которого перемещается скачками).

Граница доверительного интервала, определяемая систематическими ошибками, определяется по формуле:

$$\Delta x_B = t_\infty \cdot \frac{\delta}{3}. \quad (5)$$

Здесь t_∞ – коэффициент Стьюдента при $n = \infty$; δ – доверительная граница систематической погрешности.

3. Промахи

Грубые ошибки (промахи) – это ошибки измерения, возникающие в результате погрешности оператора, неверного отсчета по прибору, неправильного включения прибора или недостатка внимания экспериментатора. Внешним признаком промаха является его резкое отличие по величине от ре-

зультатов остальных измерений. Получив такой результат, его следует исключить из дальнейших расчетов.

4. Доверительный интервал в общем случае

В общем случае необходимо учитывать как случайные, так и систематические неопределенности (погрешности) измерений. Тогда границы доверительного интервала для суммарной неопределенности можно вычислить по формуле:

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_A)^2 + (\Delta x_B)^2}. \quad (6)$$

Здесь $\Delta x_A = t(p, n)S(x_{cp})$ – граница доверительного интервала, обусловленного случайными ошибками измерений; $\Delta x_B = t_\infty \cdot \frac{\delta}{3}$ – граница доверительного интервала, вызванная систематическими ошибками измерений.

При определении границ доверительного интервала неопределенности (погрешности) измерений, обусловленных вкладом как случайных, так и систематических ошибок, вычисление Δx_A и Δx_B следует проводить при одном и том же значении доверительной вероятности p .

В практике учебных лабораторных работ обычно принято брать значение доверительной вероятности $p = 0,68$, тогда коэффициент Стьюдента при $n = 10$ составляет $t = 1,1$, а при $n = \infty$ $t_\infty = 1,0$. Вероятность $p = 0,68$ означает, что результат измерения величины x с вероятностью 68 % попадает в интервал $(x_{cp} - \Delta x; x_{cp} + \Delta x)$, т.е. примерно каждое третье измерение дает результат за пределами данного интервала.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Косвенными являются измерения, при которых искомую физическую величину Z определяют путем вычислений по результатам прямых измерений других величин. Поэтому после проведения прямых измерений и оценки их неопределенностей (погрешностей) необходимо вычислить среднее значение ис-

комой величины (Z_{cp}) по рабочей формуле, в которую подставляют средние значения величин, полученных из прямых измерений.

2. Для оценки неопределенностей (погрешностей) косвенных измерений величины Z необходимо вывести формулу для ее относительной погрешности γ . Пусть искомая величина Z является функцией нескольких переменных: $Z = f(Y_1, Y_2 \dots Y_m)$.

Тогда

$$\gamma = \frac{\Delta Z}{Z} = \sqrt{\left(\frac{f'_{Y_1} \Delta Y_1}{Z}\right)^2 + \left(\frac{f'_{Y_2} \Delta Y_2}{Z}\right)^2 + \dots + \left(\frac{f'_{Y_m} \Delta Y_m}{Z}\right)^2}, \quad (7)$$

где $f'_{Y_m} = \frac{\partial Z}{\partial Y_m}$ – частные производные, которые вычисляются при средних значениях результатов прямых измерений Y_m ;

ΔY_m – граница доверительного интервала для прямого измерения Y_m .

Формула для расчета относительной неопределенности косвенных измерений в некоторых простейших случаях представлена в таблице 2, где символы ΔY обозначают границы доверительного интервала для измеряемых величин Y .

Таблица 2

Вид функциональной зависимости	Относительная стандартная неопределенность $\gamma = \frac{\Delta Z_{cp}}{Z_{cp}}$
$Z = Y_1 \pm Y_2$	$\sqrt{(\Delta Y_1)^2 + (\Delta Y_2)^2} / (Y_1 \pm Y_2)$
$Z = Y_1 Y_2$	$\sqrt{\left(\frac{\Delta Y_1}{Y_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Y_2}{Y_2}\right)^2}$
$Z = Y_1 / Y_2$	$\sqrt{\left(\frac{\Delta Y_1}{Y_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Y_2}{Y_2}\right)^2}$
$Z = Y_1^\alpha, Y_2^\beta \dots Y_m^\gamma$	$\sqrt{\alpha^2 \left(\frac{\Delta Y_1}{Y_1}\right)^2 + \beta^2 \left(\frac{\Delta Y_2}{Y_2}\right)^2 + \dots + \gamma^2 \left(\frac{\Delta Y_m}{Y_m}\right)^2}$

3. После вывода формулы относительной погрешности необходимо по ней вычислить значение γ , а затем определить доверительный интервал ΔZ искомой величины:

$$\Delta Z = Z_{cp} \cdot \gamma.$$

Окончательный результат следует представить в стандартной форме:

$$(Z_{cp} - \Delta Z) \dots (Z_{cp} + \Delta Z).$$

РАБОТА 81. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ СТЕФАНА – БОЛЬЦМАНА И ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА

1. Цель работы

Целью работы является ознакомление с законами теплового излучения и оптическим методом измерения температуры накаливаемых тел.

При выполнении работы требуется: 1) определить постоянную σ закона Стефана – Больцмана по излучению нечерного тела (серого); 2) определить постоянную Планка h из зависимости лучеиспускательной способности тела от температуры.

2. Краткая теория исследуемого явления

Температурным или тепловым излучением называется излучение нагретых тел. При этом энергия теплового движения частиц тела непрерывно переходит в энергию испускаемого электромагнитного излучения.

Основной количественной характеристикой *теплового* излучения является его интегральная энергетическая светимость (излучательность) R , т. е. энергия излучения, испускаемая единицей поверхности тела в единицу времени. Она зависит от температуры и природы тела. Эта энергия уносится электромагнитным излучением, имеющим сплошной спектр ($0 < \lambda < \infty$), причем интенсивность излучения различна в разных участках спектра.

Энергия излучения с длиной волны от λ до $\lambda + d\lambda$, испускаемого единицей поверхности излучающего тела за единицу времени, пропорциональна величине выделенного интервала длин волн

$$Dr = r_{\lambda,T} d\lambda. \quad (1)$$

Здесь $r_{\lambda,T}$ – спектральная плотность энергетической светимости тела, т.е. энергия, излучаемая единицей поверхности в единицу времени и приходящаяся на единичный интервал длин волн; $r_{\lambda,T}$ зависит от длины волны λ и температуры тела T .

Если тело частично поглощает падающее на его поверхность излучение, то отношение поглощенной телом энергии к падающей называется его коэффициентом поглощения $a_{\lambda,T}$.

Тело, которое полностью поглощает падающее на него излучение, называется абсолютно черным. Для абсолютно черного тела $a_{\lambda,T,S} = 1$ для всех длин волн. Для всех реально существующих тел $a_{\lambda,T,S} < 1$, т.е. абсолютно черных тел в природе нет, а абсолютно чёрное тело – научная абстракция. Однако, моделью абсолютно черного тела может служить поверхность малого отверстия, ведущего в замкнутую полость, диаметр которого порядка 0,1 поперечника полости. Излучение, проникающее через отверстие, падает на стенки полости, частично ими поглощается, рассеивается или отражается, вновь падает на стенки и т.д. Повторные поглощения на стенках приводят к тому, что практически весь свет любой частоты поглощается такой полостью. Если нагревать такую модель, то излучение, возникающее внутри полости и выходящее через отверстие, можно принять за излучение абсолютно черного тела.

Согласно установленному Киргофом закону отношение спектральной плотности энергетической светимости любого температурного источника при произвольной длине волны λ и температуре T к его коэффициенту поглощения (при тех же значениях λ и T) не зависит от свойств излучающего материала. Оно для всех одинаково и равно спектральной плотности равновесного излучения абсолютно черного тела $r_{\lambda,T,S}$:

$$\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = r_{\lambda,T,S} . \quad (2)$$

Вид функции $r_{\lambda,T,S}$ был установлен Максом Планком в 1900 году, исходя из предположения, что излучение испускается телами не непрерывно, а отдельными порциями – квантами. Энергия кванта по гипотезе Планка $\varepsilon = h\nu$, где ν – частота колебаний; h – постоянная, получившая название постоянной Планка.

Формула, полученная Планком, имеет вид:

$$r_{\lambda,T,S} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}. \quad (3)$$

Здесь c – скорость света; T – абсолютная температура излучающего абсолютно черного тела; k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

При определении величины $r_{\lambda,T,S}$ для температур порядка 1000 К и длин волн видимого света формула Планка несколько упрощается, так как в знаменателе можно пренебречь единицей по сравнению с $e^{\frac{hc}{\lambda kT}}$, и формулу (3) можно записать в виде

$$r_{\lambda,T,S} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{hc}{\lambda kT}}. \quad (4)$$

На рис.1 приведены кривые зависимости $r_{\lambda,T,S}$ от длины волны при различных температурах.

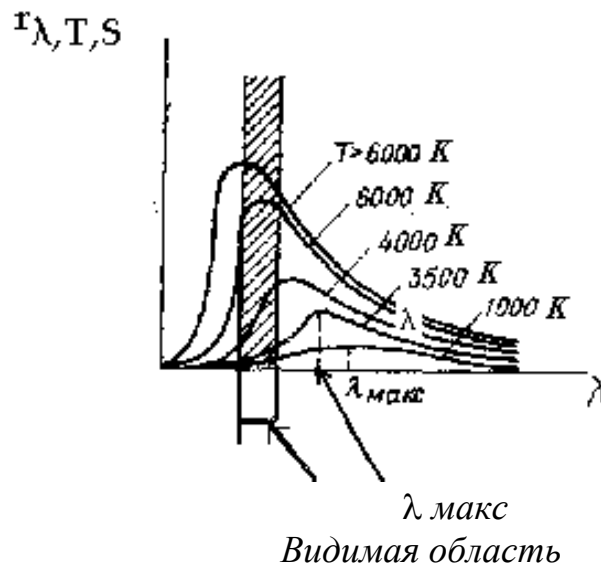


Рис. 1

Из формулы Планка можно получить следующие законы теплового излучения абсолютно черного тела.

1. Закон Стефана – Больцмана: полная энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры:

$$R_S = \sigma \cdot T^4, \quad (5)$$

где коэффициент пропорциональности σ – постоянная величина.

Излучение нечерных тел подчиняется такой же закономерности, однако их излучение для каждой длины волны в $a_{\lambda,T}$ раз меньше, чем для абсолютно черного тела

$$R = a_{\lambda,T} \sigma T^4. \quad (6)$$

2. Закон смещения Вина: положение максимума излучательной способности абсолютно черного тела при повышении температуры смещается в сторону коротких длин волн. Длина волны, на которую приходится максимум $r_{\lambda,T,S}$, обратно пропорциональна абсолютной температуре тела:

$$\lambda_{r_{\text{макс}}} = \frac{C'}{T}. \quad (7)$$

Здесь $C' = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная первого закона Вина.

3. Второй закон Вина: максимальное значение энергетической светимости абсолютно черного тела ($r_{\text{макс}}$) прямо пропорционально пятой степени его термодинамической температуры:

$$r_{\text{макс}} = C'' T^5. \quad (8)$$

Здесь $C'' = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{К}^{-5} \cdot \text{м}^{-5})$ – постоянная второго закона Вина.

3. Измеряемый объект

В качестве излучающего тела в работе используется нить лампы накаливания.

4. Принцип метода измерений и рабочая формула

Определение постоянной Стефана –Больцмана

Так как энергия, потребляемая лампой, почти целиком расходуется на излучение, то на основании формулы (6) можно написать

$$\frac{W}{S} = a_{\lambda,T} \sigma T^4. \quad (9)$$

Здесь W – мощность тока, текущего через нить; S – полная поверхность нити; $a_{\lambda,T}$ – коэффициент поглощения поверхности нити; T – температура нити.

Из формулы (9) получим формулу для расчета σ по измеренным значениям W , $a_{\lambda,T}$, T^4 и S .

$$\sigma = \frac{W}{a_{\lambda,T} S T^4}. \quad (10)$$

Изучение зависимости спектральной плотности энергетической светимости тела и определение постоянной Планка

При снятии зависимости $r_{\lambda,T} = f(T)$ используется люксметр. Он состоит из фотоэлемента с запирающим слоем и гальванометра. Фотоэлемент закрыт красным фильтром, пропускающим лучи с длиной волны $\lambda = 660$ нм. Фотоэлемент помещен внутри кожуха лампы. При падении света на фотоэлемент в нем возникают ЭДС и фототок, пропорциональный освещенности. Фототок измеряется гальванометром. Так как освещенность пропорциональна лучеиспускательной способности нити, то можно записать

$$I = b r_{\lambda,T} = b a_{\lambda,T} r_{\lambda,T,S}, \quad (11)$$

где I – показатель люксметра; b – коэффициент, зависящий от взаимного расположения фотоэлемента и нити и от величины поверхности последней. Положение фотоэлемента во время опыта не меняется, и в последующем коэффициент b можно считать постоянной величиной, числовое значение которого для нас несущественно. Качественную зависимость $r_{\lambda,T}(T)$ можно получить, построив $I = f(T)$.

Для нахождения постоянной Планка подставим в формулу (11) значение $r_{\lambda,T,S}$ из соотношения (4) и, прологарифмировав полученное выражение, найдем

$$\ln I = \ln \left(b a_{\lambda,T} \frac{2\pi h c^3}{\lambda^5} \right) - \frac{ch}{\lambda k T}. \quad (12)$$

Из (12) видно, что при слабо изменяющемся значении $a_{\lambda,T}$ (это справедливо для не слишком больших интервалов температуры) $\ln I$ связан с $1/T$ линейной зависимостью. Построив график зависимости $\ln I = f(1/T)$, выбирают на нем две произвольные точки, достаточно далеко расположенные друг от друга. Если

формулу (9) написать для двух точек на графике, отметив значения I и T для одной точки индексом 1, а для другой – индексом 2, то, вычитая одно выражение из другого и производя преобразования, получим расчетную формулу для определения h по измеренным значениям тока I_1 и I_2 при двух значениях температур T_1 и T_2 :

$$h = \frac{\ln I_1 - \ln I_2}{\frac{c}{\lambda k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} = \frac{\ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right)}{\frac{c}{\lambda k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)}. \quad (13)$$

5. Экспериментальная установка

Электрическая схема дана на рис. 2. Она состоит из излучающего тела – ленточной лампы накаливания и схемы её питания.

Во время работы реостатом R меняют накал нити. Ваттметром или вольтметром и амперметром измеряют мощность W , потребляемую лампой.

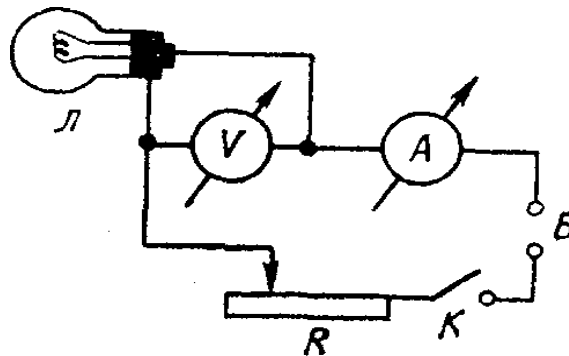


Рис. 2

Температура излучающего тела измеряется при помощи оптического пирометра с “исчезающей нитью”. Определение температуры сводится к сравнению яркости исследуемого тела с яркостью проградуированного эталона – нити лампы пирометра. Схема пирометра (а) и его внешний вид (б) изображены на рис. 3, на котором показана лампа с волоском в виде полукруга: буквой O обозначена выпуклая линза, являющаяся объективом; $Л$ – линза, служащая оку-

ляром; Φ_1 – красный фильтр, Φ_2 – дымчатый фильтр; R – реостат; G – гальванометр. Красный фильтр пропускает световые волны длиной 660 мк.

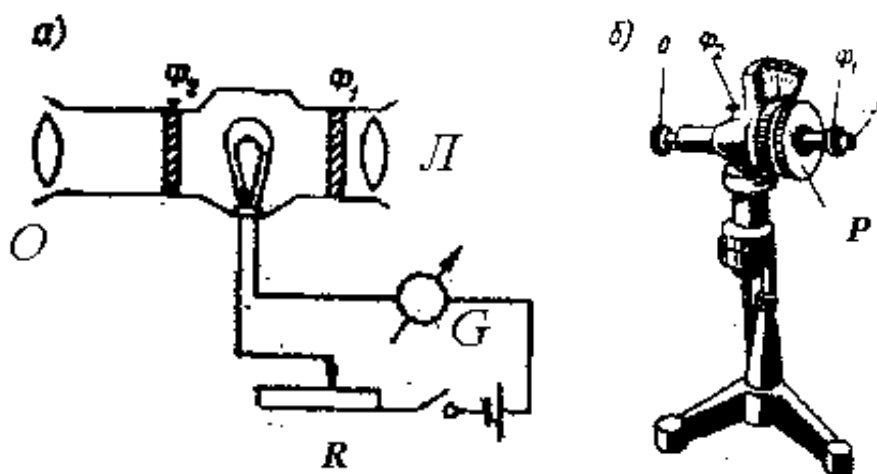


Рис. 3

Начиная измерения, устанавливают окуляр L так, чтобы нить лампы пирометра была четко видна. Затем наводят пирометр на исследуемый объект и перемещением объектива O добиваются резкого изображения исследуемого предмета. Верхнюю часть нити пирометра совмещают с изображением той части объекта, температуру которого надо измерить. Далее, изменяя с помощью реостата R ток через нить пирометра, добиваются того, чтобы яркость нити сравнялась с яркостью излучающего тела. При этом нить пирометра “исчезает” на фоне поверхности тела. При недостаточном накале нить будет темнее предмета, при повышенном – ярче его.

Пирометр предварительно градуируется по абсолютно черному телу. Значения температуры на шкале пирометра даны в градусах Цельсия.

Если излучающее тело не является черным, то пирометр показывает температуру такого черного тела, яркость которого одинакова с яркостью данного тела. Такая температура называется яркостной. Так как $r_{\lambda,T} < r_{\lambda,T,S}$, то яркостная температура всегда ниже истинной, термодинамической. Яркостная и истинная температуры различаются тем больше, чем меньше поглощательная

способность тела $a_{\lambda,T}$ (её значение можно определить по графику, который находится на столе установки).

Перейти от яркостной температуры к истинной можно, если известны значения $a_{\lambda,T}$. В работе измеряют яркостную температуру по пирометру, а истинную определяют по графику зависимости истинной температуры от яркостной для данного тела накала. График находится на столе установки.

6. Порядок выполнения работы

1. Включают исследуемую лампу и пирометр и устанавливают пирометр, как это было описано выше.

2. Задав желаемую температуру по пирометру, изменяют мощность, потребляемую, исследуемой лампой, так, чтобы сравнялись яркости нити пирометра и лампы. Выравнивание яркостей производят при включенном красном фильтре ($\lambda = 660$ нм).

3. Измеряют мощность W , потребляемую лампой, и показания люксметра I . Такие измерения производят при пяти заданных значениях температуры в интервале 900 – 1400 °С. При температурах выше 1200 °С дополнительно к красному светофильтру вводят дымчатый фильтр. (На столе установки указано, какой шкалой пирометра следует пользоваться при работе с дымчатым фильтром и без него.)

4. Все данные заносятся в таблицу по указанной форме.

№ измер.	U_n , В	I_n , А	W , Вт	I , лк	$T_{яр.}$, К	$T_{ист.}$, К	σ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$

5. Используя график (он имеется на столе установки), переходят от яркостной температуры к истинной.

6. Вычислить по формуле (10) значение σ для каждого значения температуры. Используя правила обработки результатов измерений (см. с. 6), вычис-

лить границу доверительного интервала для $\Delta\sigma$. Результат записать в виде $\sigma = \sigma_{cp} \pm \Delta\sigma_{cp}$.

7. Строят график зависимости $I = f(T)$. Он качественно воспроизводит зависимость $r_{\lambda,T} = f(T)$.

8. Строят график зависимости $\ln I = f(1/T)$ и по формуле (13) вычисляют h .

7. Контрольные вопросы

1. Как изменяются при возрастании температуры в 2 раза:

- а) мощность излучения;
- б) максимум излучательной способности;
- в) длина волны, на которую приходится максимум излучательной способности?

2. Чему равно отношение излучательной способности к поглощательной способности тела для заданной длины волны и температуры?

3. В опыте было установлено, что при некоторой температуре мощность монохроматического излучения тела в 1,5 раза меньше, чем у абсолютно черного тела. Какова поглощательная способность тела?

4. Абсолютно черное тело нагрели от -3° до $+267^\circ\text{C}$. Как при этом изменились:

- а) длина волны, на которую приходится максимум излучения;
- б) максимальное значение излучательной способности;
- в) поглощательная способность?

Литература: [2], § 35.1–35.3; [5], §1–4.

РАБОТА 82. ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

I. Цель работы

Ознакомление с внешним фотоэлектрическим эффектом. Задача состоит в получении вольт-амперной и световой характеристик фотоэлемента и определении его чувствительности.

2. Краткая теория исследуемого явления

Внешний фотоэффект, или фотоэлектронная эмиссия, заключается в испускании электронов веществом под действием света. Наименьшая энергия, которую необходимо сообщить электрону, чтобы удалить его из вещества в вакуум, называется работой выхода A .

Если $h\nu$ – энергия кванта – больше работы выхода электрона из металла ($h\nu > A$), то часть ее превращается в кинетическую энергию электрона

$$h\nu = A + \frac{mV_{\text{макс}}^2}{2}. \quad (1)$$

Соотношение (1), называемое уравнением Эйнштейна, является основным законом фотоэффекта, выражающим закон сохранения энергии.

Очевидно, что при энергии фотона $h\nu < A$ фотоэффект наблюдаться не будет. Частота света, при которой прекращается фотоэффект, называется красной границей фотоэффекта ($h\nu_{\text{кр}} = A$ или $\frac{hc}{\lambda_{\text{кр}}} = A$).

Для наблюдения фотоэффекта пластина из материала, в котором исследуется фотоэффект, располагается в прозрачном сосуде, из которого откачан воздух. В этот же сосуд помещается второй электрод, выполняющий роль анода. Если при освещении исследуемой пластины – фотокатода между нею и анодом подать напряжение, то испущенные фотокатодом электроны будут притягиваться положительно заряженным анодом. Возникший фототок зависит не только от освещенности катода, но и от напряжения между катодом и анодом. Такая зависимость фототока $i_{\text{ф}}$ от напряжения U при постоянном лучистом потоке Φ называется вольт-амперной характеристикой фотоэлемента. При неко-

тором напряжении все вырываемые светом электроны (фотоэлектроны) достигают анода. При этом ток в цепи будет максимальным, его называют током насыщения: $i_{нас} = ne$, где n – число фотоэлектронов, вырываемых из катода в единицу времени, e – заряд электрона. При фотоэффекте каждый квант взаимодействует с одним электроном, отдает ему свою энергию и перестает существовать. Следовательно, число электронов n , выбиваемых из металла в единицу времени, пропорционально числу квантов N , падающих на металл. А так как световой поток $\Phi = Nh\nu$, то

$$i_{нас} = C\Phi, \quad (2)$$

где C – коэффициент пропорциональности.

Зависимость тока насыщения $i_{нас}$ от величины лучистого потока Φ , падающего на фотоэлемент, называется световой характеристикой фотоэлемента. Соотношение (2), согласно которому ток насыщения пропорционален световому потоку, называют законом Столетова.

3. Принцип метода измерения и рабочие формулы

В работе измеряются напряжение, подаваемое на фотоэлемент, и фототок, протекающий в цепи фотоэлемента. Затем строится вольт-амперная характеристика.

Для получения световой характеристики необходимо менять величину лучистого потока, падающего на фотоэлемент. Это достигается изменением расстояния от фотоэлемента до источника света. По определению $\Phi = ES$, где E – освещенность фотоэлемента, а S – его площадь. Если с некоторым приближением считать источник света, используемый в работе, точечным, то

$$E = \frac{I}{r^2}. \quad (3)$$

Здесь I – сила света источника, а r – его расстояние от фотоэлемента.

Если сила света выражена в свечах, а r – в метрах, освещенность выразится в люксах. Таким образом, поток можно рассчитать по формуле:

$$\Phi = \frac{I}{r^2} S. \quad (4)$$

Лучистый поток будет измеряться в люменах, если E измерена в люксах, а S – в квадратных метрах. Сила света I и площадь фотоэлемента S указаны на установке. Интегральной чувствительностью вакуумного фотоэлемента называют величину, равную отношению силы фототока насыщения к падающему на фотоэлемент лучистому потоку:

$$\gamma = \frac{i_{нас}}{\Phi}, \quad (5)$$

где $i_{нас}$ – сила фототока насыщения, мкА; Φ – лучистый поток, лм.

4. Измеряемый объект

Объектом исследования является вакуумный фотоэлемент СЦВ-51, схематически изображенный на рис.1. Он представляет собой стеклянный баллон, из которого откачан воздух. На внутреннюю поверхность колбы нанесен тонкий слой металла K , который играет роль катода и соединяется с отрицательным полюсом источника напряжения. Анодом служит проволочное кольцо A .

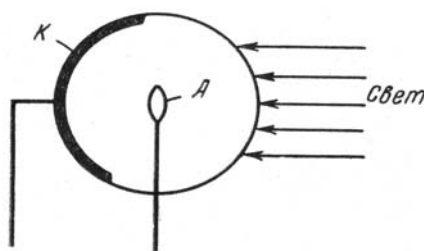


Рис. 1

5. Экспериментальная установка в статике и динамике

Для изучения фотоэффекта используется экспериментальная установка, схема которой изображена на рис.2. Она состоит из источника света – лампы накаливания Л, которая установлена на одной оптической оси с фотоэлементом Ф. Источником напряжения на фотоэлемент служит блок питания Б. Напряжение измеряется с помощью вольтметра V , фототок – микроамперметром A . При освещении фотоэлемента светом и при подаче на него напряжения возникает фототок. Напряжение на фотоэлементе регулируется потенциометром R . Расстояние между фотоэлементом и лампой меняется путем перемещения лампы по оптической скамье и измеряется с помощью линейки.

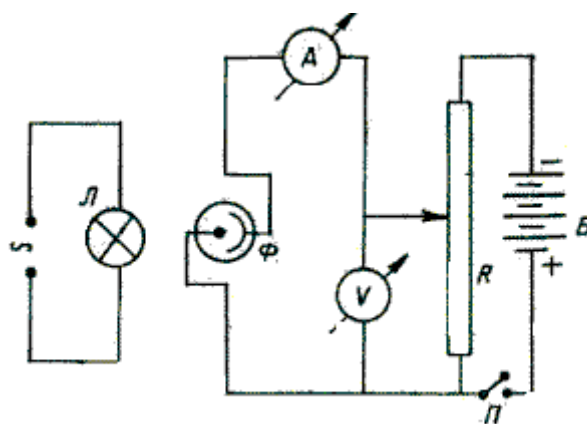


Рис. 2

6. Порядок выполнения работы

I. Снятие вольт-амперной характеристики.

1. Перед снятием вольт-амперной характеристики необходимо установить предел измерений напряжения. Для этого надо поместить фотоэлемент на расстояние 20-25 см от лампы и, увеличивая напряжение пока не установится ток насыщения. Это будет верхним пределом измерения. Отвести напряжение до «0».

2. Установить минимальное напряжение в цепи, при котором можно измерять значение фототока, и определить значение фототока.

3. Плавно увеличивая напряжение, повторить измерения для 7-8 значений напряжения, пока не установится ток насыщения $i_{нас}$.

4. Значения напряжения и соответствующие им значения фототока заносятся в таблицу по форме 1.

II. Снятие световой характеристики.

1. Расположить фотоэлемент на расстоянии 30-35 см от лампы. Измерить это расстояние, данные занести в таблицу по форме 2.

2. Установить минимальное анодное напряжение и включить источник света.

3. Постепенно увеличивая напряжение, определить ток насыщения при данном расстоянии фотоэлемента от лампы.

4. Удаляя фотоэлемент от источника, повторить измерение тока насыщения при 6-7 значениях расстояния фотоэлемента от лампы. Данные занести в таблицу по форме 2.

7. Вычисления и обработка результатов измерения

1. Используя данные таблицы 1, построить вольтамперную характеристику фотоэлемента.

2. Используя формулу (4) и значения параметров табл. 1, рассчитать значение светового потока при различных расстояниях фотоэлемента от лампы. Построить графики зависимости тока насыщения от светового потока.

3. Найти интегральную чувствительность фотоэлемента по формуле (5). Результаты занести в таблицу по форме 2. Вычислить среднее значение γ_{cp} и занести в табл. по форме 2.

4. Вычислить по формуле (5) значение γ . Используя правила обработки результатов измерений (см. с. 6), вычислить границу доверительного интервала для $\Delta\gamma$. Результат записать в виде $\gamma = \gamma_{cp} \pm \Delta\gamma_{cp}$.

Форма 1

Напряжение U , В									
Сила фототока i_{ϕ} , мкА									

Форма 2

Расстояние, м									
Ток насыщения $i_{нас}$, мкА									
Освещенность E , лк									
Лучистый поток Φ , лм									

8. Таблица необходимых констант и параметров

Таблица 1

Площадь фотозлемента S , м ²	Сила света источника I , Вт
$8 \cdot 10^{-4}$	100

9. Контрольные вопросы

1. В чем состоит явление внешнего фотоэффекта? Запишите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
2. В чем заключаются основные законы внешнего фотоэффекта?
3. Чем объясняется внешний фотоэффект?
4. Что такое фотон, чему равна его энергия?
5. Что такое вольт-амперная характеристика фотозлемента?
6. Объясните ход световой характеристики фотозлемента?
7. Что такое сила света, и в каких единицах она измеряется?
8. Что такое лучистый поток, и в каких единицах он измеряется?

Литература: [1], § 202, 203; [5], § 9.

РАБОТА 83. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В МЕТАЛЛАХ И ПОЛУПРОВОДНИКАХ

1. Цель работы

Изучение механизма эффекта Холла и его закономерностей. Экспериментальное определение электрофизических характеристик твердого тела: постоянной Холла, концентрации свободных электронов и их подвижности, измеренных в режиме постоянного тока.

2. Краткая теория исследуемого явления

Если проводник (или полупроводник), по которому течет ток, поместить в однородное магнитное поле, направленное под углом к силовым линиям электрического поля, вызывающего протекание тока, то в нем возникает разность потенциалов, направленная перпендикулярно плоскости, содержащей векторы плотности тока и напряженности магнитного поля. Этот эффект, названный в честь Холла, открывшего его в 1879 году, стал одним из самых действенных методов исследования свойств носителей заряда в полупроводниках.

Почему же происходит возникновение поперечной разности потенциалов? Рассмотрим образец полупроводника с электронной проводимостью, вдоль которого протекает электрический ток I (рис. 1), помещенный в однородное магнитное поле с индукцией B .

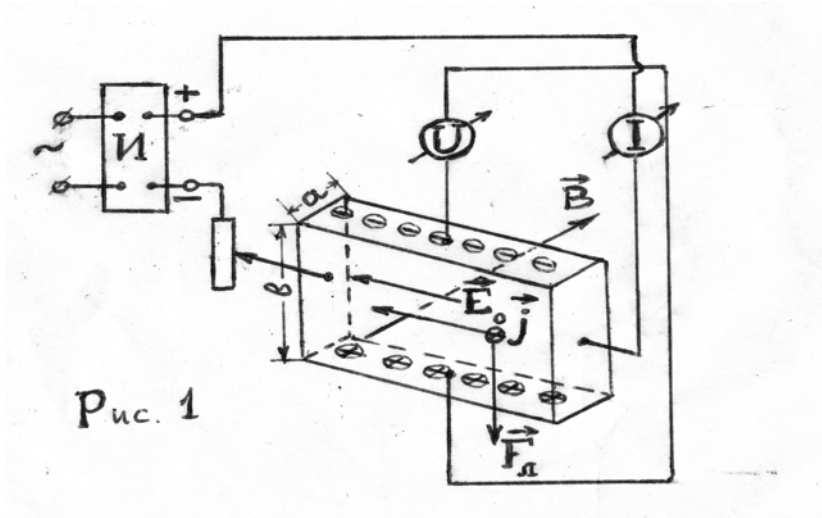


Рис. 1

В этом случае на электроны, движущиеся под действием сил электрического поля, вызывающего протекание электрического тока I , со стороны магнитного поля действует сила Лоренца $\vec{F}_L = evB \sin[\vec{B}, \vec{v}]$ или в векторной форме $\vec{F}_L = e[\vec{v}, \vec{B}]$. Здесь e – заряд электрона; \vec{v} – дрейфовая скорость движения электронов под действием продольного электрического поля \vec{E}_0 ; \vec{B} – величина вектора магнитной индукции.

Под действием силы Лоренца электроны отклоняются к верхней грани образца, и на этой грани накапливается отрицательный заряд, а на противоположной грани остается нескомпенсированный положительный заряд. Вследствие этого возникает поперечное электрическое поле \vec{E}_x и поперечная (холловская) разность потенциалов U_x .

Поперечное электрическое поле \vec{E}_x действует на электроны с силой, направленной противоположно силе Лоренца и равной $\vec{F} = e\vec{E}_x$.

Процесс накопления заряда продолжается до тех пор, пока действие поперечного электрического поля не уравновесит силу Лоренца. После этого электроны будут двигаться вдоль образца, накопление заряда прекратится и установится стационарное состояние.

Если вектор магнитной индукции \vec{B} перпендикулярен вектору напряженности продольного электрического поля \vec{E}_0 (этот случай и реализован в экспериментальной установке данной работы), то сила Лоренца равна $F_L = evB$ и для стационарного состояния получаем $evB = eE_x$. Отсюда можно вычислить напряженность поперечного электрического поля

$$E_x = vB.$$

Это поле \vec{E}_x складывается с полем \vec{E}_0 в результирующее поле \vec{E} , при этом угол θ между направлением тока и результирующим электрическим полем (угол Холла) можно найти по формуле $\operatorname{tg} \theta = \frac{E_x}{E_0}$.

3. Принцип метода измерений и рабочая формула

Для определения Холловской разности потенциалов U_X воспользуемся связью разности потенциалов и напряженности электрического поля – $U_X = E_X b$, плотности тока

$$j = env \quad (1)$$

и силы тока $I = jS = jba$, где $S = ba$ – площадь поперечного сечения образца; n – концентрация свободных электронов.

Используя эти формулы, получим

$$U_X = E_X b = vBb = \frac{j}{ne} Bb = \frac{I}{en} \frac{Bb}{ba} = \frac{IB}{ena} = R_x \frac{IB}{a},$$

где $R_X = 1/en$ – постоянная Холла.

Таким образом, измерив U_X , B , I и a , можно определить постоянную Холла

$$R_X = \frac{U_X}{I} \frac{a}{B} \quad (2)$$

и концентрацию свободных электронов в полупроводнике

$$n = \frac{1}{eR_X}. \quad (3)$$

Зная проводимость образца σ и постоянную Холла R_X , можно определить такой важный параметр полупроводника, как подвижность носителей тока u . Подвижность носителей тока определяется как дрейфовая скорость, приобретенная носителем в поле напряженностью в 1 В/м, т. е.

$$u = v / E_0. \quad (4)$$

По закону Ома в дифференциальной форме $j = \sigma E_0$. (5)

Из выражений (1), (4) и (5) следует: $\sigma = enu = \frac{I}{R_X} u$.

Таким образом,

$$u = R_X \sigma. \quad (6)$$

Эффект Холла имеет еще одно важное приложение. Определив знак U_X , можно определить знак носителей тока. Направление силы Лоренца изменяется на противоположное как при изменении направления движения заряда, так и при изменении его знака. Следовательно, при одинаковом направлении тока и

поля, сила Лоренца, действующая и на электроны, и на дырки, имеет одинаковое направление. Поэтому в случае дырок потенциал верхней грани выше, чем нижней, а в случае электронов – ниже. Таким образом, по знаку холловской разности потенциалов можно установить знак носителей тока. Датчики Холла широко используются в технике измерения магнитных полей.

4. Измеряемый образец. Лабораторная установка

Лабораторная установка включает в себя тонкоплёночный образец толщиной 0,01 мм и с удельной электропроводимостью $G = 2,6 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{Ом} \times \text{м}}$. Образец размещён внутри устройства, содержащего источник магнитного поля (линии магнитной индукции \vec{B} перпендикулярны плоскости образца) и потенциометр с ручкой регулировки на лицевой панели. Постоянный ток через образец подаётся от источника постоянного тока I и регулируется с помощью упомянутой ручки потенциометра. Сила тока фиксируется миллиамперметром, а разность потенциалов U_X – ламповым вольтметром.

5. Порядок выполнения работы и обработка результатов

1. Измерить величину поперечной разности потенциалов U_X для различных значений тока I .

2. Вычислить постоянную Холла для средней из всех измерений величины U_X/I , используя зависимость (2), согласно которой расчетная формула имеет вид

$$R_X = \frac{a}{B} \left(\frac{U_X}{I} \right)_{cp}.$$

3. Согласно равенству (3), определить концентрацию носителей тока

$$n \approx \frac{I}{Re},$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; n – концентрация носителей тока, м^{-3} .

4. На основании (6) рассчитать подвижность носителей тока

$$u = R_X \sigma,$$

где u – подвижность носителей тока, $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

5. Вычислить среднее значение и границу доверительного интервала $\Delta(U_X/I)$ (см. раздел «Обработка результатов измерений» и [7]). Данные записать в таблицу по указанной форме.

Сила тока в полупроводнике I , мА										
Холловская разность потенциалов U_X , мВ										
U_X/I , Ом										
$\Delta(U_X/I)$										

6. Контрольные вопросы

1. Дайте определение векторов \vec{E} и \vec{B} .
2. Сформулируйте закон Ома в дифференциальной форме.
3. Напишите и поясните выражение для силы Лоренца.
4. В чем сущность эффекта Холла и как связана величина R_X с U_X ?
5. Что такое дрейфовая скорость v ? Напишите выражение, связывающее плотность тока с дрейфовой скоростью движения носителей.
6. Что такое подвижность носителей тока и как она связана со скоростью их движения v ?
7. Чему будет равна холловская разность потенциалов, если направления векторов \vec{E}_0 и \vec{B} совпадают?
8. Напишите выражение для удельной проводимости σ .
9. Напишите выражение для силы, с которой электрическое поле действует на заряд.
10. Объясните, как по знаку холловской разности потенциалов определить знак носителей тока.

Литература: [1], § 202, 203; [2].

РАБОТА 84. ТЕРМОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

1. Цель работы

Целью данной работы является практическое ознакомление с физическим явлением – термоэлектронной эмиссией, наблюдаемой в электронных лампах, получение вольт-амперной характеристики двухэлектродной лампы (диода) и вычисление работы выхода электронов из катода лампы.

2. Краткая теория исследуемого явления

А. О работе выхода электронов из твёрдого тела

Известно, что в металлах много свободных электронов. Эти электроны обуславливают высокую проводимость металла. Совокупность этих электронов, участвующих в тепловом движении, называется электронным газом. Электроны проводимости удерживаются внутри металла за счёт сил, действующих на электроны и направленных внутрь металла. Чтобы электрон мог выйти из металла за его пределы, должна быть совершена определённая работа A против этих сил, которая получила название *работы выхода* электрона из металла. Эта работа различна для разных металлов.

Так как электрон является заряженной частицей, то существование работы выхода показывает, что в поверхностном слое металла существует *электрическое поле*, а, следовательно, электрический потенциал при переходе через этот поверхностный слой изменяется на некоторую величину φ , которая так же, как и работа выхода, является характеристикой металла. Эта поверхностная разность потенциала связана с работой выхода соотношением

$$A = e\varphi, \quad (1)$$

где e – заряд электрона.

Работа выхода электронов из металлов обусловлена двумя причинами.

Одна из них заключается в индукционном действии удаляемого электрона на металл. Такой электрон вызывает на поверхности металла положительный индукционный заряд, отчего между электроном и металлом возникает

сила притяжения, препятствующая удалению электрона. Эту силу можно считать по методу зеркальных изображений и работа против этой силы представляет собой часть работы выхода электрона.

Вторая причина заключается в том, что часть электронов металла при своём тепловом движении способна пересекать поверхность металла и удаляться от неё на малые расстояния. Поэтому над поверхностью металла существует электронная атмосфера, плотность которой очень быстро убывает по мере удаления от поверхности металла. В результате, у поверхности металла образуется как бы заряженный конденсатор (двойной электрический слой), отрицательной обкладкой которого является электронная атмосфера, а положительной – слой ионов металла. Прохождение электрона через этот двойной слой сопровождается совершением определённой работы, и полная работа выхода электрона состоит из двух частей, обусловленная этими двумя причинами.

Электронам можно различными способами сообщить дополнительную энергию, чтобы часть из них получила возможность покинуть металл и можно было наблюдать явление испускания электронов, или электронной эмиссии.

В зависимости от способа сообщения электронам энергии различаются разные типы электронной эмиссии. Если электроны получают энергию за счёт тепловой энергии тела при повышении его температуры, то это *термоэлектронная эмиссия*; при подведении энергии светом – это явление *фотоэмиссии*, или *фотоэлектрический эффект*; если энергия сообщается электронам при бомбардировке извне какими-либо другими частицами (электронами, ионами), наблюдается *вторичная электронная эмиссия*.

Б. О термоэлектронной эмиссии

Для наблюдения термоэлектронной эмиссии может служить вакуумная лампа, содержащая два электрода: один, в виде проволоки из тугоплавкого материала (вольфрам, молибден и др.), раскаляемый током (катод), и другой, холодный электрод, собирающий термоэлектроны (анод). Подобные лампы ши-

роко применяются в радиотехнике для выпрямления переменных токов (так называемые *вакуумные диоды*).

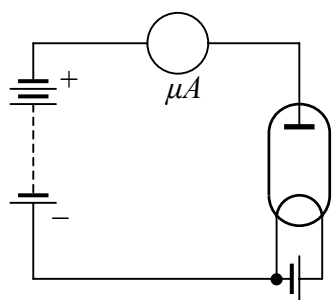


Рис. 1

Если составить электрическую цепь, содержащую вакуумный диод, источник напряжения и миллиамперметр (рис. 1), то при холодном катоде ток в цепи не возникнет, так как сильно разреженный газ внутри диода (вакуум) не содержит заряженных частиц, и поэтому электропроводимость диода практически равна нулю. Если же раскалить катод диода при помощи дополнительного источника тока до высокой температуры, то миллиамперметр обнаруживает появление тока.

Сила термоэлектронного тока в диоде зависит от величины потенциала анода относительно катода. Эта зависимость носит название закона Богуславского – Лэнгмюра или "закона 3/2" и имеет вид:

$$I = cU^{\frac{3}{2}}, \quad (2)$$

где c – зависит от формы и размеров электродов.

Кривая, изображающая зависимость силы тока от анодного напряжения (вольт-амперная характеристика), изображена на рис. 2 (кривая 1-2-3). Видно, что вольт-амперная характеристика электронной лампы нелинейная. Это обусловлено тем, что при наличии термоэлектронной эмиссии в пространстве между катодом и анодом в любой момент времени находятся электроны, движущиеся от катода к аноду, которые образуют облако отрицательного заряда (пространственный заряд). Этот заряд изменяет распреде-

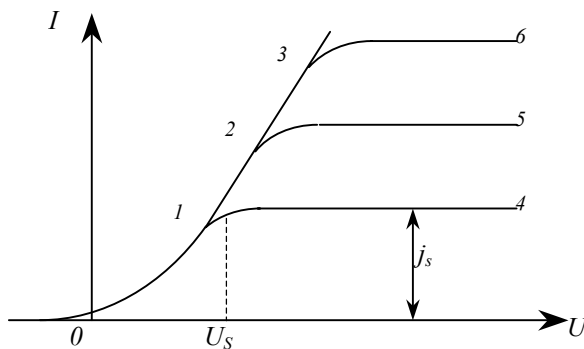


Рис. 2

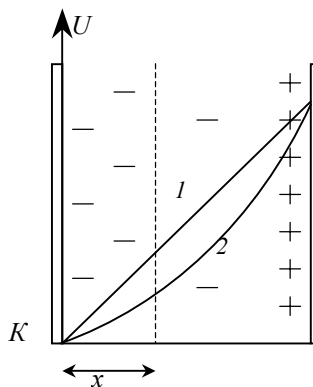


Рис. 3

ление потенциала в диоде. Вместо линейного распределения (линия 1, рис. 3) оно становится нелинейным (кривая 2, рис. 3), и скорости электронов уменьшаются.

Однако с увеличением анодного напряжения концентрация электронов в облаке пространственного заряда уменьшается. Поэтому и тормозящее действие пространственного заряда делается меньше и анодный ток увеличивается.

Когда потенциал анода становится настолько большим, что все электроны, испускаемые катодом за каждую единицу времени, попадают на анод, ток достигает своего максимального значения и перестаёт зависеть от анодного напряжения. Плотность тока насыщения j_s , т.е. сила тока насыщения на каждую единицу поверхности катода, характеризует *эмиссионную способность* катода, которая зависит от природы катода и его температуры.

В. О температурной зависимости тока насыщения

Поскольку эмиссионная способность катода зависит от температуры, то вольт-амперная характеристика диода будет также изменяться с изменением температуры катода. На вольт-амперной характеристике кроме начального участка 0-1-2-3, описываемого выражением (2), будут появляться участки, соответствующие разным токам насыщения (1-4, 2-5, 3-6). С ростом температуры будут возрастать токи насыщения j_s , а также будут увеличиваться значения анодного напряжения U_s , при котором устанавливается ток насыщения.

3. Принцип метода измерений и рабочая формула

Зависимость плотности тока эмиссии от температуры поверхности металла описывается формулой Ричардсона - Дэшмана:

$$j_s = BT^2 e^{\frac{e\varphi}{kT}}, \quad (3)$$

где B – универсальная постоянная, равная $B = 12,5 \cdot 10^5$ А/м²К² для всех материалов.

Она получена из предположения, что электроны в кристалле подчиняются квантовой статистике.

Из этого выражения видно, что из измерений двух разных известных токов насыщения j_1 и j_2 , полученных при двух известных температурах T_1 и T_2 катода, можно вычислить работу выхода электронов из катода $e\varphi$. Для этого значения j_1 и j_2 , выраженные согласно формуле (3), поделим друг на друга, произведём небольшие преобразования и получим промежуточное выражение:

$$\frac{j_1 T_2^2}{j_2 T_1^2} = e^{-\frac{e\varphi}{k} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right)}. \quad (4)$$

После логарифмирования этого выражения и небольших упрощений рабочая формула будет иметь следующий вид:

$$A = e\varphi = k \frac{T_1 T_2}{(T_2 - T_1)} \ln \left(\frac{T_1^2}{T_2^2} \cdot \frac{j_2}{j_1} \right), \quad (5)$$

где j_1 и j_2 – полученные из опыта токи насыщения, соответствующие абсолютным температурам T_1 и T_2 нити накала, т.е. катода.

Температура катода определяется косвенным методом по температурной зависимости электрического сопротивления вольфрама. Для этого пользуются графиком $R = f(T)$, который прилагается к лабораторной установке, или табл. 1, где R_0 – сопротивление при 20 °С задается как постоянная катода. Сопротивление нити накала R вычисляется по закону Ома для участка цепи:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (6)$$

Таблица 1

$T, ^\circ K$	$\frac{R}{R_0}$	$T, ^\circ K$	$\frac{R}{R_0}$	$T, ^\circ K$	$\frac{R}{R_0}$
293	1,000	1400	6,780	2500	13,47
300	1,030	1500	7,360	2600	14,12
400	1,467	1600	7,930	2700	14,76
500	1,924	1700	8,520	2800	15,43
700	2,930	1800	9,120	2900	16,10
800	3,460	1900	9,720	3000	16,77
900	4,000	2000	10,33	3100	17,46
1000	4,540	2100	10,93	3200	18,15
1100	5,080	2200	11,54	3300	18,83
1200	5,650	2300	12,19	3400	19,53
1300	6,220	2400	12,83	3663	Температура плавления

4. Измеряемый объект

Измеряется работа выхода из катода электронной лампы, подогреваемого током от отдельного источника питания.

5. Экспериментальная установка

Для производства необходимых измерений используется схема, показанная на рис. 4, где AK – двухэлектродная лампа. Температура её нити накала регулируется реостатом R_n путём изменения силы тока, источником которого служит аккумулятор E_n . Сила тока накала измеряется амперметром A_k , а напряжение на концах нити накала – вольтметром V_k . Потенциометр присоединяется к общей лабораторной сети 24 В постоянного тока. Анодный ток измеряется микроамперметром μA .

6. Порядок выполнения работы

1. Схема лабораторной установки представлена на рис. 4.
2. Убедиться в правильности собранной схемы, ввести сопротивление реостата накала R_n и с разрешения преподавателя (или лаборанта) включить цепь накала ключом K и анодную цепь подключить к лабораторной сети постоянного тока.
3. Движком потенциометра установить максимальное анодное напряжение. Реостатом R_n установить накал нити так, чтобы анодный ток был замечен.

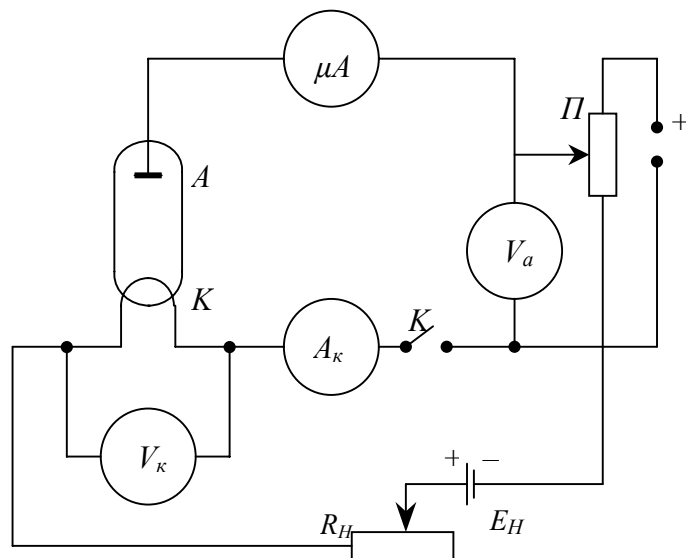


Рис. 4

4. При данном токе накала нити I_{K1} и напряжении накала U_{K1} , меняя анодное напряжение от нуля до максимума, снять вольт-амперную характеристику диода, т.е. зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения U_a . Показания прекратить снимать тогда, ко-

гда при значительном изменении анодного напряжения анодный ток или совсем не изменяется или же медленно нарастает: это говорит о том, что достигнута область насыщения.

5. Снять три вольт-амперные характеристики при разных токах накала I_{κ} .

Данные занести в таблицу по указанной форме.

$I_{k1} = \dots \text{ A}$		$I_{k2} = \dots \text{ A}$		$I_{k3} = \dots \text{ A}$	
$U_{k1} = \dots \text{ В}$		$U_{k2} = \dots \text{ В}$		$U_{k3} = \dots \text{ В}$	
$R_{k1} = \dots \text{ Ом}$		$R_{k2} = \dots \text{ Ом}$		$R_{k3} = \dots \text{ Ом}$	
$T_1, \text{ К} = \dots$		$T_2, \text{ К} = \dots$		$T_3, \text{ К} = \dots$	
$U_{a1}, \text{ В}$	$I_{a1}, \text{ мкА}$	$U_{a2}, \text{ В}$	$I_{a2}, \text{ мкА}$	$U_{a3}, \text{ В}$	$I_{a3}, \text{ мкА}$
$j_{s1} = \dots \text{ мкА}$		$j_{s2} = \dots \text{ мкА}$		$j_{s3} = \dots \text{ мкА}$	

6. Подсчитать по формуле закона Ома (6) сопротивление нити накала для каждого из трёх проведённых опытов. Определить соответствующие значения температуры катода, пользуясь для этого графиком $R = f(T)$ или данными табл. 1. Сопротивление R_0 указано на графике $R = f(T)$, прилагаемом к лабораторной установке.

7. Построить вольт-амперные характеристики диода при трёх разных температурах накала T . По оси абсцисс принято откладывать анодное напряжение U_a , а по оси ординат – анодный ток I_a . Все три кривые следует строить на общих осях.

8. Подсчитать работу выхода для металла катода лампы. Расчётная формула (5) справедлива для любых двух токов насыщения: (j_{s1}, j_{s3}) и (j_{s2}, j_{s3}) при температурах (T_1, T_3) и (T_2, T_3) . Необходимо получить работу выхода A для трех пар значений токов насыщения, взять среднее и выразить результат в электрон-вольтах (эВ). При вычислении нужно учесть, что $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$; $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

7. Контрольные вопросы

1. Что такое «электронная эмиссия»?
2. Какие бывают типы электронной эмиссии?
3. Что такое «работа выхода электрона из вещества»?
4. Какие силы препятствуют выходу электронов из вещества?
5. Почему достигается режим насыщения тока на вольт-амперной характеристике вакуумного диода?
6. Какая часть вольт-амперной характеристики диода объясняется формулой Ричардсона - Дэшмана?

Литература: [1]; [2].

РАБОТА 85. ИЗУЧЕНИЕ ВЫПРЯМЛЯЮЩИХ СВОЙСТВ p - n ПЕРЕХОДА

1. Цель работы

Данная работа знакомит с выпрямляющими свойствами (униполярной проводимостью) p - n перехода, представляющего собой основной элемент полупроводниковых диодов и транзисторов.

2. Основные теоретические положения

На границе раздела полупроводников с разным типом проводимости (электронной n и дырочной p) образуется p - n переход: двойной слой (область объемного заряда ООЗ), характеризующийся высоким сопротивлением (рис. 1,а). Положительный заряд расположен в n -области и возникает при диффузии электронов в p -область, а отрицательный – в p -области (в результате диффузии дырок в n -область). Этот переходный слой, состоящий из неподвижных ионизованных атомов кристалла, обладает высоким сопротивлением и способен расширяться или сужаться в зависимости от полярности и величины приложенного к p - n переходу напряжения, при этом сопротивление перехода соответственно возрастает или уменьшается.

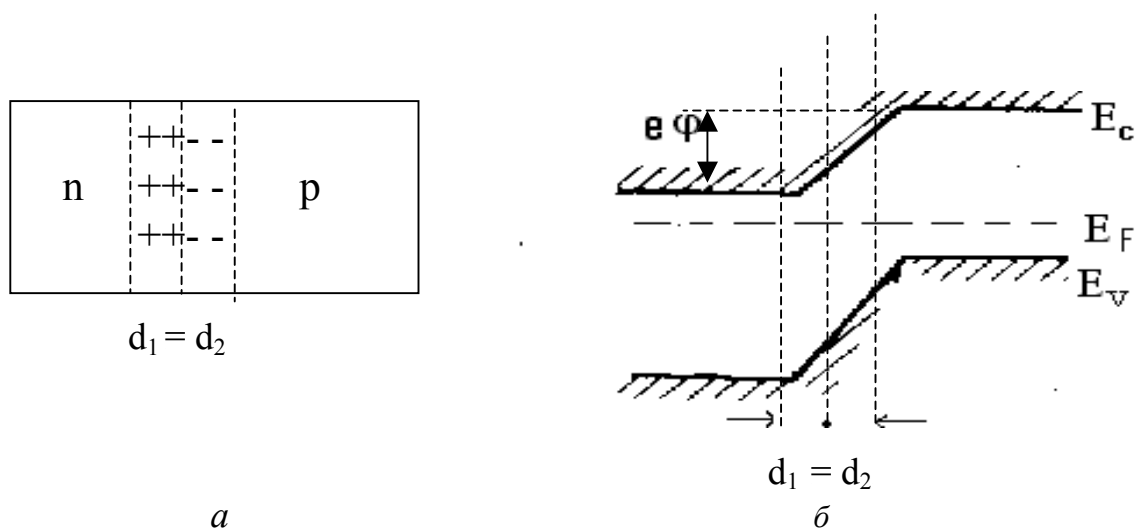


Рис. 1

На зонной энергетической диаграмме показано, что в области двойного слоя вблизи p - n перехода (рис.1,б) образуется потенциальный барьер, высота которого ($e\phi$) равна контактной разности потенциалов между p - и n -областями. Это связано с тем, что уровень Ферми E_F в n -области находится ближе к дну зоны проводимости E_C , а в p -области – к потолку валентной зоны E_V . Вследствие выравнивания уровня Ферми и изгиба энергетических зон при образовании контакта p -области с n -областью (отсчет энергии в кристалле ведется относительно этого уровня) и образуется указанный барьер.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) перехода описывается формулой

$$I = I_s \exp\left(\frac{eU}{kT} - 1\right), \quad (1)$$

где I_s – ток насыщения, e – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, U – напряжение на переходе, I – сила тока.

Если к p - n переходу приложить напряжение в прямом (пропускном) направлении (положительный потенциал к p -области, отрицательный – к n -области), то высота барьера понижается, ширина ООЗ и сопротивление перехода уменьшаются (рис. 2,а) и ток через барьер возрастает экспоненциально. При этом говорят, что диод открыт.

При противоположной полярности в обратном направлении (запертое состояние) высота барьера повышается, а значит ширина ООЗ и сопротивление растут (рис. 2,б), ток через переход становится ничтожно малым. При этом говорят, что диод заперт.

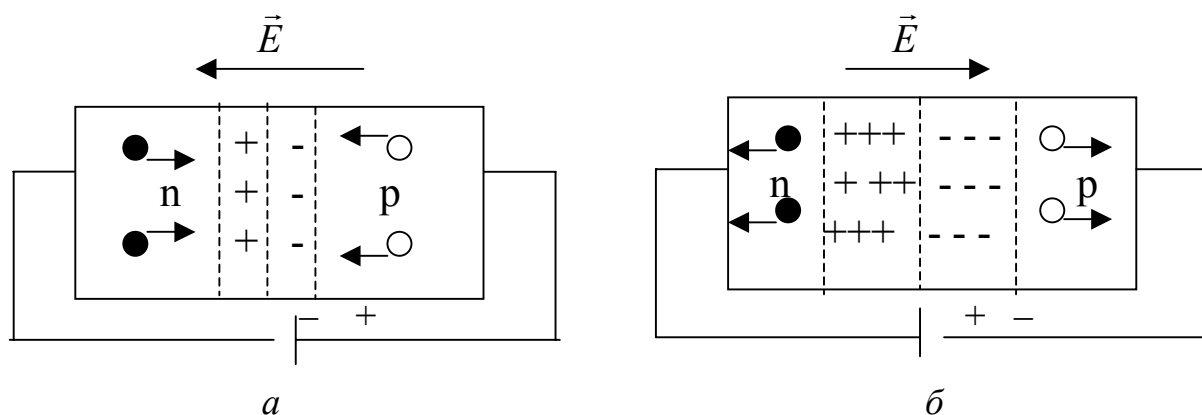


Рис. 2

3. Принцип метода измерений и рабочая формула

Вольт-амперная характеристика, построенная по формуле (1), показана на рис. 3 и имеет несколько характерных участков: 1 – ветвь пропускного направления, 2 – начальный участок запирающего направления (быстрый рост обратного тока); 3 – прямолинейный участок насыщения, 4 – участок резкого увеличения обратного тока, предшествующий электрическому пробое.

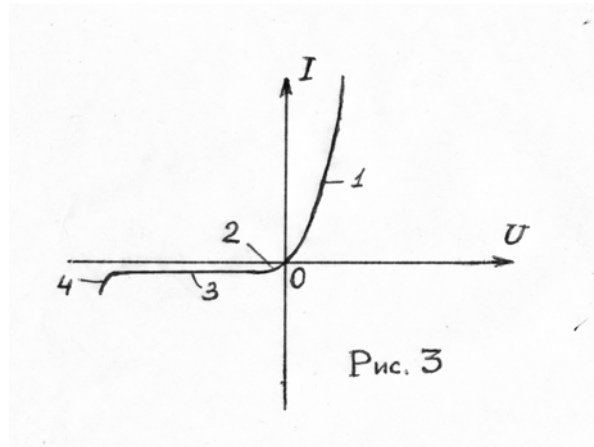


Рис. 3

Поскольку сила обратного тока очень мала, масштабы тока на графике выбраны разными: для пропускного направления (сверху $I_{np} > 0$) сила тока в мА, для запирающего (снизу $I_{обр} < 0$) в мкА.

Выпрямляющие свойства диода характеризуются коэффициентом выпрямления – отношением силы тока прямого направления к силе тока запирающего направления, взятых при одинаковом напряжении:

$$\kappa = \frac{I_{np}}{I_{обр}} .$$

Из-за сильной нелинейности ВАХ коэффициент выпрямления при очень малых U очень мал ($\kappa \cong 1$), а с ростом U увеличивается. Если на диод подать переменное напряжение, то он пропустит ток только в прямом направлении, превратив его в ток одного направления.

Следует отметить, что p - n переход обладает определенной ёмкостью, величина которой варьируется изменением напряжения смещения. Если p - n переход сделать большой площади и расположить вблизи поверхности кристалла,

то можно при освещении светом использовать его как источник ЭДС – преобразователь света в электричество. Наконец, диод выполненный из высокоомного кремния с достаточно широкой базой обладает высокой магниточувствительностью, что нашло применение в датчиках магнитного поля. Изучение этих свойств p - n перехода выходит за рамки данной работы.

4. Измеряемый образец и лабораторная установка

Схема установки показана на рис. 4.

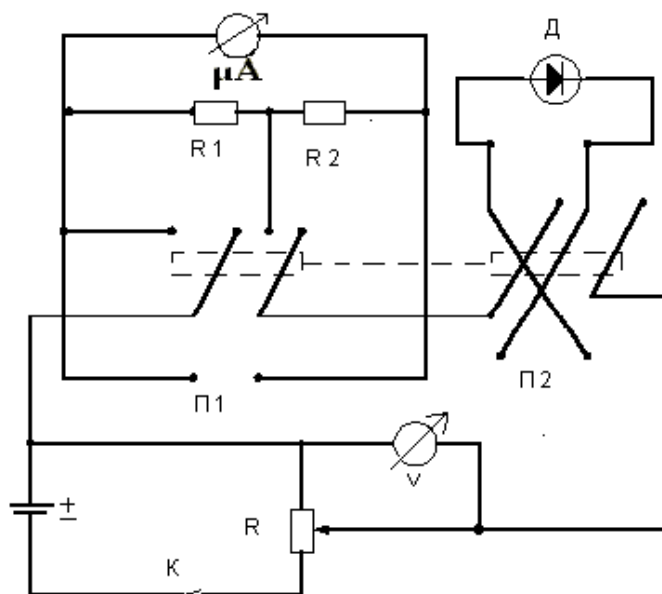


Рис. 4

Здесь напряжение на кристаллический диод подаётся с делителя напряжения R . Так как сила прямого и обратного токов отличается на несколько порядков, то при смене полярности диода надо изменять пределы измерений. Сдвоенный переключатель $\Pi_1\Pi_2$ позволяет одновременно с изменением направления тока через диод изменить коэффициент шунтирования. Двухпределный шунт к микроамперметру μA образован сопротивлениями R_1 и R_2 .

Изучаемый диод установлен на изолирующей подставке. Клеммы её помечены знаками “+” (анод) и “-” (катод), а условный знак диода показывает пропускное направление тока (по стрелке).

5. Порядок выполнения работы

1. Подготовить установку для измерений в соответствии со схемой (см. инструкцию на столе). Источник тока подключить только после проверки схемы преподавателем.

2. Снять точки ВАХ диода для пропускного направления. Результаты измерений силы тока I_{np} и напряжения U занести в таблицу по указанной форме.

U	В					
I_{np}	мА					
$I_{обр}$	мкА					
R_{np}	Ом					
$R_{обр}$	кОм					
K	—					

Напряжение изменять через 0,1 В до тех пор, пока ток I_{np} не достигнет 10 мА. Измерения I_{np} производятся до 8-10 значений U .

3. Изменить полярность напряжения на диоде, переключив переключатель $\Pi_1\Pi_2$.

4. Снять обратную ветвь ВАХ (напряжение измерять через 1 В).

5. Вычислить сопротивление диода на прямом и обратном токах по формулам: $R_{np} = \frac{U}{I_{np}}$; $R_{обр} = \frac{U}{I_{обр}}$, а также коэффициент выпрямления

$$k = \frac{I_{np}}{I_{обр}}, \text{ при } U = \text{const для каждого значения } U.$$

По результатам измерений построить графики $I = f(U)$, $R_{np} = f_1(U)$, $R_{обр} = f_2(U)$, которые можно нанести на общих осях. Масштабы токов и напряжений выбрать разными для прямого и обратного направлений. График зависимости коэффициента выпрямления от U строится на отдельных осях.

6. Контрольные вопросы

1. Что такое p - n переход?
2. Чем определяется высота потенциального барьера ($e\phi$) на p - n переходе?
3. Объяснить выпрямляющие свойства p - n перехода?
4. Объяснить формулу, описывающую вольт-амперную характеристику.
5. Как вычислить коэффициент выпрямления p - n перехода?

Литература: [1], § 249,250; [2]; [6].

РАБОТА 86. ИЗУЧЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ФОТОЭФФЕКТА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

1. Цель работы

Ознакомление с внутренним фотоэффектом в полупроводнике, оценка чувствительности фотосопротивления к свету.

2. Основные теоретические положения

Удельная электропроводность полупроводника определяется соотношением:

$$\sigma = enu_n + e p u_p, \quad (1)$$

где n, p – концентрация свободных электронов и дырок соответственно; u_p, u_n – их подвижность; e – заряд электрона.

Подвижность носителей тока сравнительно слабо зависит от температуры, а их концентрация сильно меняется с температурой и определяется функцией распределения носителей заряда Ферми- Дирака [1].

$$f = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{(E - \mu)}{kT}\right]}, \quad (2)$$

где μ – положение уровня Ферми (химического потенциала) в энергетической зоне.

Внутренний фотоэффект – процесс образования добавочных свободных носителей тока, а значит и увеличения электропроводности проводника под действием света. Добавочную проводимость, обусловленную внутренним фотоэффектом, называют *фотопроводимостью*.

Существует три пути увеличения концентрации носителей под действием света:

1) в собственном проводнике кванты света вырывают электроны из валентной (заполненной) зоны и забрасывают их в зону проводимости, при этом одновременно образуется равное число дырок в валентной зоне (рис. 1, а);

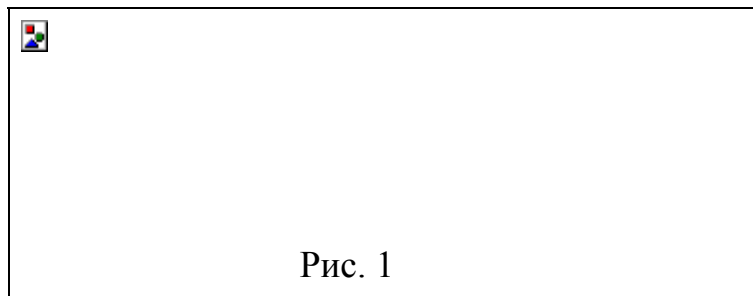


Рис. 1

2) в примесном полупроводнике *n*-типа (электронном) электроны забрасываются с донорных уровней в зону проводимости, и увеличивается электронная проводимость (рис. 1, б);

3) в полупроводнике *p*-типа (дырочном) электроны вырываются из валентной зоны и забрасываются на акцепторные уровни, при этом возрастает дырочная проводимость (рис. 1, в).

При освещении находящегося под напряжением полупроводника в нем течет световой ток I .

3. Принцип метода измерений и рабочая формула

Разность между световым и темновым током I_T дает значение фототока, протекающего в сопротивлении:

$$I_\phi = I - I_T. \quad (3)$$

Величина фотопроводимости определяется как

$$G = I_\phi / U, \quad (4)$$

где U – приложенное напряжение.

Вольт-амперной характеристикой фотосопротивления называют зависимость фототока I_ϕ от приложенного к полупроводнику напряжения U при неизменном лучистом потоке Φ .

Световая характеристика фотосопротивления представляет собой зависимость фототока I_ϕ от светового потока Φ при неизменном напряжении.

Удельной чувствительностью γ_0 фотосопротивления называют величину, равную отношению фотопроводимости к величине светового потока:

$$\gamma_0 = \frac{G}{\Phi} = \frac{I_\phi}{U_\phi}, \quad (5)$$

где γ_0 – удельная чувствительность, мкА/(лм · В).

Интегральная фоточувствительность равна:

$$\gamma = \frac{I_{\phi}}{\Phi} \left(\frac{\text{мкА}}{\text{лм}} \right), \quad (6)$$

где γ - интегральная фоточувствительность.

При выполнении работы требуется снять и построить вольтамперную характеристику и световую характеристику, а также определить фотопроводимость и удельную чувствительность фотосопротивления.

4. Измеряемый образец и описание лабораторной установки

Фотосопротивление ФСК-1 состоит из светочувствительного слоя полупроводника Π площадью $S = 0.27 \times 10^{-4} \text{ м}^2$ и толщиной порядка 1 мкм (рис. 2). Слой нанесен на стеклянную пластинку C . На поверхности полупроводника находятся токонесущие электроды \mathcal{E} .

Фотосопротивление помещено в корпус, имеющий окошко. Электроды соединены со штырьками, позволяющими вставить фотосопротивление в специальную панель.

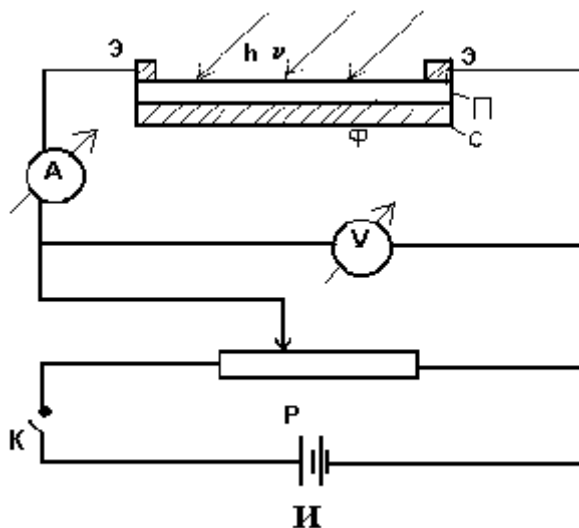


Рис. 2

Фотосопротивление включается в цепь, схема которой приведена на рис. 2. Здесь: \mathcal{I} – источник тока; P – реостат; V – вольтметр; Φ – фотосопротивление; A – микроамперметр; K – ключ.

Фотосопротивление и электролампа находятся на оптической скамье.

5. Порядок выполнения работы

1. Включают схему (рис. 2) и, не зажигая источника света и закрыв фотосопротивление от постороннего света, измеряют темновой ток при 7...8 значениях напряжения в заданном интервале. Результаты измерений заносят в таблицу, прилагаемую к работе.

2. Включают лампу, снимают значения фототока при тех же значениях напряжения, при которых измеряли темновой ток.

Для получения световой характеристики определяют фототок при неизменном напряжении и различных световых потоках Φ . Изменение Φ достигается изменением расстояния до источника света от фотосопротивления. Измерения начинаются при $r = 20$ см, а затем их производят при 6...7 различных расстояниях.

6. Обработка результатов

1. По формуле (3) вычисляют фототок и строят вольт-амперную характеристику полупроводника.

2. Вычислив величины фототока и световых потоков, строят график $I_{\phi}(\Phi)$ (см. форму 1).

3. Освещенность E и лучистый поток Φ вычисляют так же, как в работе «Изучение внешнего фотоэффекта».

4. Рассчитать удельную и интегральную чувствительности по формулам (5), (6) и, используя данные из формы 2.

5. Определить среднее значение интегральной и удельной чувствительностей и границу доверительного интервала γ и γ_0 (см. раздел «Обработка результатов измерений» и [7]).

7. Таблица измерений

Вольт-амперная характеристика (снимается при расстоянии r между ΦC и лампой) $r = \dots$ см.

1	U , В					
2	Темновой ток i_m , мкА					
3	Световой ток i , мкА					
4	Фототок $i_\phi = i - i_m$, мкА					
5	Фотопроводимость σ , Ом ⁻¹					

$$\sigma = \frac{I_\phi}{U}.$$

Световая характеристика (снимается при постоянном напряжении).

$$U = \dots \text{В}$$

1	Расстояние r , м	
2	Световой ток I , мкА	
3	Темновой ток I_m , мкА	
4	Фототок $I_\phi = I - I_m$, мкА	
5	Облученность E , лк	
6	Лучистый поток Φ , лм	
7	Интегральная чувствительность γ , $\frac{\text{мкА}}{\text{лм}}$	
8	Удельная чувствительность γ_0 , $\frac{\text{мкА}}{\text{лм} \cdot \text{В}}$	

Площадь ΦC : $S = 0,27 \cdot 10^{-4} \text{ (м}^2\text{)}.$

Сила света источника $I = 60 \text{ (кд)}.$

$E = I/r^2$, лк (не путать « I » с током ΦC): $\Phi = ES$, лм

$$\gamma = \frac{I_\phi}{\Phi}, \frac{\text{мкА}}{\text{лм}}; \gamma_0 = \frac{I_\phi}{\Phi U} = \frac{\gamma}{U}, \frac{\text{мкА}}{\text{лм} \cdot \text{В}}.$$

8. Контрольные вопросы

1. Чем отличается внутренний фотоэффект от внешнего?
2. В каких единицах измеряется сила света и лучистый поток?
3. Начертите зонные схемы собственного и примесного полупроводников. Укажите положение уровня Ферми.
4. Возможен ли внутренний фотоэффект под действием монохроматического света с частотой ν_0 : в *электронном* полупроводнике, если:

а) $h\nu_0 > \Delta E_0$, б) $\Delta E_0 > h\nu_0 > \Delta E_D$, в) $h\nu_0 > \Delta E_D$; в *дырочном* полупроводнике, если: а) $h\nu_0 > \Delta E_0$, б) $\Delta E_0 > h\nu_0 > \Delta E_A$, в) $h\nu_0 > \Delta E_A$?

5. Собственный полупроводник (германий) имеет при некоторой температуре удельное сопротивление $\rho = 0,48 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Определите концентрацию носителей тока, если подвижность электронов $u_n = 0,36 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, подвижность дырок $u_p = 0,16 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Литература: [1]; [2]; [6].

РАБОТА 87. ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

1. Цель работы

1. Изучение процесса излучательной рекомбинации в полупроводниках.
2. Определение зависимости внешнего квантового выхода и мощности излучения полупроводникового источника излучения от тока.

2. Краткая теория исследуемого явления

В полупроводнике одновременно с процессом генерации – образованием электронно-дырочных пар – происходит обратный процесс – воссоединение электрона и дырки. Такой процесс называется рекомбинацией. Энергия выделяется в виде тепловой (безызлучательная рекомбинация) или в виде кванта светового излучения $h\nu_{изл}$ или в виде той и другой.

В зависимости от способа возбуждения электронов различают следующие виды излучения кристаллов:

- 1) фотолюминесценция – излучение, возникающее в результате возбуждения электронов квантами света с энергией $h\nu > h\nu_{изл}$;
- 2) катодолюминесценция – излучение, возникающее в результате возбуждения электронов потоком электронов с энергией $E > h\nu_{изл}$;
- 3) электролюминесценция. Для её осуществления из p - и n -полупроводников образуют p - n структуру (такая структура называется диодом, а диоды, которые излучают свет – светодиодами) и, прикладывая напряжение к диодам, переводят электроны из n -полупроводника в p -полупроводник. Этот процесс называется инжекцией. В p -полупроводнике электроны рекомбинируют с дырками, в результате чего излучаются фотоны с энергией $h\nu_{изл}$ (рис. 1, а) (переход с излучением фотона указан волнистой стрелкой).

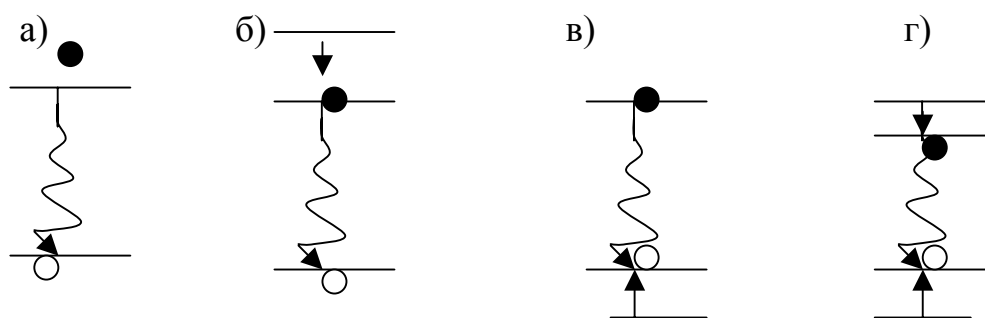


Рис. 1

Однако такая излучательная рекомбинация имеет место только в очень чистых и совершенных по кристаллической структуре полупроводниках и поэтому почти не наблюдается.

В примесных полупроводниках (в качестве примеси могут выступать не только вводимые примеси, но и разного рода дефекты кристаллической решетки – дислокации, вакансии и т.д.) важную роль для излучения играют локализованные центры рекомбинации, энергетические уровни которых попадают в запрещенную зону полупроводника. На рис. 1, б, в, г приведены энергетические диаграммы для трех моделей: б) энергетический уровень центра рекомбинации расположен близко к зоне проводимости; в) энергетический уровень центра рекомбинации расположен близко к валентной зоне; г) имеют место два уровня примеси: основной уровень, расположенный вблизи валентной зоны, имеет большую вероятность захвата дырки и возбужденный уровень, расположенный вблизи зоны проводимости, имеет большую вероятность захвата электрона. После того, как произошли оба захвата (рис. 1, б, в, г), происходит переход электрона с возбужденного уровня на основной, сопровождающийся излучением света. Переходы, показанные на рис. 1, б, в, г прямыми стрелками, являются безызлучательными, а выделившаяся при таком переходе энергия идет на нагревание кристаллической решетки.

Явления генерации рекомбинационного излучения при инжекции неравновесных носителей в p - n переходе служат для создания широко используемых в технике инжекционных источников инфракрасного (ИК) и видимого излуче-

ния. Общность принципов работы оправдывает распространение термина “светодиоды” на оба типа излучателей.

Основная область применения для видимых источников излучения – системы индикации, а для источников ИК-излучения – системы обработки и передачи информации.

Зонная диаграмма полупроводникового излучателя при пропускании через него электрического тока представлена на рис. 2.

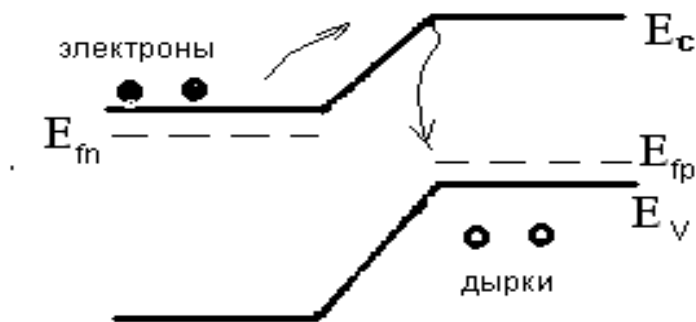


Рис. 2.

E_c – дно зоны проводимости; E_v – потолок валентной зоны;

E_{fn} , E_{fp} – уровень Ферми для электронов и дырок соответственно.

Эффективность излучения светодиода определяется величиной внешнего квантового выхода η .

$$\eta = \frac{N_{изл}}{N_0} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Внешний квантовый выход излучения равен отношению числа электронно-дырочных пар, прорекомбинировавших излучательно ($N_{изл}$), к общему числу электронов и дырок, инжектированных в область p - n перехода (N_0) в единицу времени.

3. Принцип метода измерения и рабочие формулы

Метод измерения состоит в регистрации электролюминесценции светодиода с помощью кремниевого фотодиода, имеющего наибольшую чувстви-

тельность области максимума интенсивности излучения светодиода. Величина N_0 из формулы (1) определяется из соотношения:

$$N_0 = \frac{I_{св}}{e}, \quad (2)$$

где $I_{св}$ – ток, протекающий через светодиод; e – заряд электрона.

Количество фотонов, испускаемых светодиодом, равно

$$N_{изл} = \frac{I_{\phi}}{e \cdot S_{кв}}, \quad (3)$$

где I_{ϕ} – фототок – ток, протекающий в цепи фотодиода; $S_{кв}$ – “квантовая” чувствительность ФД.

“Квантовая” чувствительность $S_{кв}$ показывает, какая доля фотонов, падающих на поверхность фотоприемника, преобразуется в электроны, образующие фототок.

Таким образом
$$\eta = \frac{1}{S_{кв}} \cdot \frac{I_{\phi}}{I_{св}} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Мощность излучения светодиода равна

$$P = \frac{I_{\phi}}{S}, \quad (5)$$

где S – чувствительность фотодиода, равная отношению фототока к мощности излучения источника, А/Вт.

На рис. 3 представлена теоретическая зависимость мощности и внешнего квантового выхода излучения от тока через светодиод.

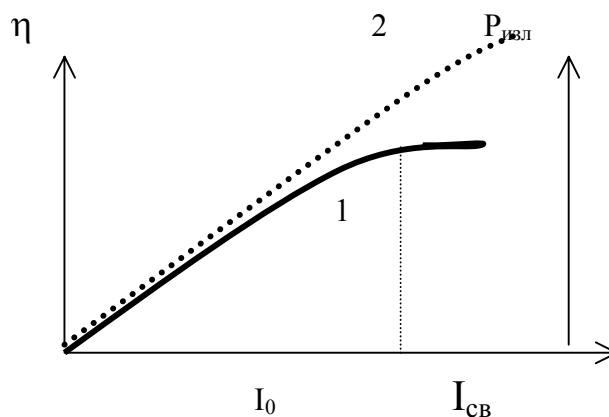


Рис. 3

Рост внешнего квантового выхода с током при малых значениях тока обусловлен конкуренцией двух процессов рекомбинации – излучательной и безызлучательной (см. рис. 1).

Часть носителей тока, инжектированных в область p - n перехода, идет на насыщение центров безызлучательной рекомбинации.

При $I_{св} > I_0$ (см. рис. 3) все центры безызлучательной рекомбинации насыщены (нейтрализованы) и все процессы рекомбинации идут с излучением фотонов. Мощность излучения увеличивается с ростом тока (кривая 2, рис. 3), так как число излучаемых фотонов растет пропорционально числу инжектированных носителей тока.

4. Измеряемый объект

В данной работе в качестве источника используется полупроводниковый излучатель на основе арсенида галлия (GaAs), имеющего ширину запрещенной зоны 1,43 эВ. Максимальная длина волны GaAs-светодиода равна 0,87 мкм, что соответствует ближней инфракрасной области спектра электромагнитного излучения.

5. Экспериментальная установка в статике и динамике

На рис. 4 представлено схематическое изображение установки для изучения зависимости внешнего квантового выхода и мощности излучения светодиода от тока.

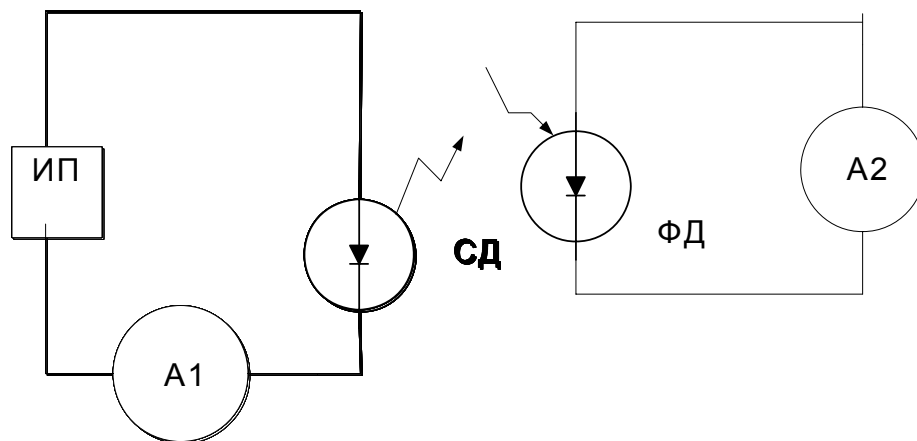


Рис. 4

Светодиод СД питается от стабилизированного источника питания ИП. Ток через светодиод измеряется с помощью цифрового ампервольтметра A_1 . Излучение светодиода регистрируется кремниевым фотодиодом ФД. Измерение тока фотодиода ФД производится цифровым ампервольтметром A_2 .

6. Порядок выполнения работы

1. Включить источник питания.
2. С помощью ручек “грубо”, а затем “плавно” установить первое значение тока через светодиод, взятое из таблицы 1. Снять соответствующее показание фототока.

Внимание! Устанавливать ток через светодиод и снимать показания фототока следует при нажатой кнопке на панели источника питания.

Данные занести в таблицу по форме 1.

3. Произвести измерения фототока при всех указанных в таблице значениях тока через светодиод. Данные занести в таблицу по форме 1.

4. Выключить источник питания.

5. Произвести расчет внешнего квантового выхода и мощности излучения светодиода по формулам (4) и (5).

Для расчетов принять: $S_{кв} = 0,5$; $S = 0,73$ мА/мВт

6. Построить графики зависимостей внешнего квантового выхода и мощности излучения от тока через светодиод.

Форма 1

№ опыта	$I_{св}$, мА	$I_{ф}$, мА	η , %	$P_{изл}$, мВт
1	10			
2	20			
3	40			
4	60			
5	80			
6	100			
7	120			
8	140			

7. Вычисления и обработка результатов измерений

Произвести расчет внешнего квантового выхода η и мощности излучения P по формулам (4) и (5). Значения S и S взять из таблицы 2.

Определить среднее значение и границу доверительного интервала η и P (см. раздел «Обработка результатов измерений» и [7]).

Таблица 1

Наименование физической величины	Обозначение	Значение
Скорость света в вакууме	c	$3 \cdot 10^8$ м/с
Постоянная Планка	h	$6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Чувствительность фотодиода	S	0,73 мА/мВт
«Квантовая» чувствительность	$S_{кв}$	0,5

8. Контрольные вопросы

1. Как энергия фотона зависит от частоты и длины волны излучения?
2. Каким образом осуществляется рекомбинационное излучение в полупроводниках?
3. Что такое электролюминесценция?
4. Нарисуйте зонную диаграмму светодиода. Что такое внешний квантовый выход излучения светодиода?
5. Объясните зависимость мощности излучения и внешнего квантового выхода излучения от тока через светодиод.

Литература: [1], § 245.

РАБОТА 88. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ РИДБЕРГА И ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ИОНИЗАЦИИ АТОМА ВОДОРОДА

1. Цель и содержание работы

Цель настоящей работы заключается в экспериментальном определении постоянной Ридберга, вычислении энергии ионизации невозбужденного атома водорода и энергии квантов видимой части водородного спектра.

2. Краткая теория исследуемого явления

Атом водорода согласно теории Резерфорда – Бора состоит из ядра – протона и электрона, вращающегося вокруг ядра. Заряды протона и электрона равны по величине и противоположны по знаку. Теория Бора основывается на следующих трех постулатах:

1. Электрон может вращаться вокруг ядра только по таким орбитам, на которых его момент импульса равен целому кратному от величины $h/2\pi$. Такие орбиты называются стационарными. Таким образом, для стационарных орбит должно быть справедливо соотношение

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

где m и v – масса и скорость электрона; r – радиус орбиты; h – постоянная Планка; n – целое число (1,2,3 и т.д.), которое называют главным квантовым числом и которое можно принять за номер орбиты.

2. При движении электрона по стационарной орбите атом не излучает и не поглощает энергии.

3. Излучение происходит при переходе электрона с какой-либо дальней стационарной орбиты на орбиту, расположенную ближе к ядру. При этом испускается квант света, энергия которого равна $h\nu$. Отсюда следует, что

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

Здесь W_n и W_k – энергии атома, когда электрон находится на орбитах с номерами n и k ($n > k$), а ν – частота колебаний света, испускаемого при переходе электрона с орбиты n на орбиту k .

Формула (2) позволяет вычислить частоты колебаний света и энергию излученных квантов, если известны энергии различных стационарных состояний атома.

Полная энергия атома W равна сумме кинетической энергии обращающегося вокруг ядра электрона и потенциальной энергии взаимодействия электрона с ядром

$$W = W_{кин} + W_{пот}.$$

Кулоновская сила взаимодействия ядра (протона) и электрона является центростремительной силой, выражение для которой имеет вид:

$$\frac{mv^2}{r} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{e^2}{r^2}, \quad (3)$$

а полная энергия W с учетом (3) получается в виде:

$$\frac{mv^2}{2} + \left(-\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{e^2}{r} = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{e^2}{r}. \quad (4)$$

Исходя из (1), (3) и (4) можно получить выражение для r , а затем и для полной энергии атома W как функции квантового числа n :

$$W = -\left(\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \right) \frac{1}{n^2}. \quad (5)$$

Из последней формулы следует, что энергия атома, находящегося в любом стационарном состоянии, выражается через константы m , e , ϵ_0 , h и зависит от значения главного квантового числа n .

Согласно третьему постулату Бора, энергия кванта, излученного атомом при переходе электрона с орбиты n на орбиту k , равна

$$h\nu = W_n - W_k = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (6)$$

Соответственно волновое число $\tilde{\nu}$, равное $\frac{1}{\lambda}$, имеет значение

$$\tilde{\nu} = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 ch^3} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (7)$$

Введя обозначение $R = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 ch^3}$, формулу (7) можно переписать так:

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

Постоянная R носит название постоянной Ридберга, а формулу (8) называют сериальной формулой. Положив в формуле (8) $k = 1$, а $n = 2, 3, 4$ и т.д., получим волновые числа, соответствующие переходам электрона на самую близкую к ядру орбиту со всех вышележащих. Соответственные линии в спектре водорода образуют *серию Лаймана* и лежат в ультрафиолетовой области.

При переходе электрона на вторую орбиту ($k = 2$) со всех вышележащих орбит излучается *серия Бальмера*. Волновые числа этой серии определяются по формуле

$$\tilde{\nu} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad \text{где } n=3, 4, 5 \text{ и т. д.} \quad (9)$$

Линии, соответствующие переходу электрона с третьей, четвертой, пятой и шестой орбит на вторую, лежат в видимой части спектра.

При переходе электрона на третью орбиту в спектре появляются линии *серии Пашена*, расположенные в инфракрасной области, и т. д.

Нормальным для атома водорода является состояние, соответствующее значению $k = 1$. Если положить $n = \infty$, то на основании формулы (8) получим:

$$\tilde{\nu}_\infty = R \quad \text{и} \quad h\nu_\infty = Rhc = W'. \quad (10)$$

Очевидно, что величина $h\nu_\infty$ равна энергии, которую атом выделил бы при переходе электрона из бесконечности на первую орбиту. И наоборот, если эту энергию получит электрон, находящийся на первой орбите, то он удалится на бесконечность, то есть покинет атом. Как известно, атом потерявший элек-

трон перестает быть электронейтральным, он становится положительным ионом (ионизуется). Поэтому энергия W' называется *энергией ионизации*.

3. Принцип метода измерений и рабочая формула

Наблюдение спектров излучений основано на известном физическом явлении: зависимости угла преломления луча света призмой от длины волны падающего на призму излучения (дисперсии света, обусловленной зависимостью показателя преломления вещества от длины волны излучения). Если известна связь между углом преломления и длиной волны, то, измеряя эти углы, можно определить длины волн излучения (см. ниже описание установки).

Определение длин волн линий наблюдаемого спектра позволяет найти величину постоянной Ридберга

$$R = \frac{\tilde{\nu}}{\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)},$$

энергию ионизации W' (см. формулы 8-10) и энергии квантов излучения атомов водорода.

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} \equiv hc\tilde{\nu} \equiv hcR \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (11)$$

4. Экспериментальная установка в статике и динамике

В качестве спектрального прибора, позволяющего определить длину световой волны, используют спектрометры. Спектрометр состоит из щели, объектива, призмы и окуляра. Принципиальная схема хода лучей в приборе показана на рис. 1.

Свет, исследуемого источника I через узкую щель K попадает на коллиматорную линзу L_1 . Щель K помещается в фокусе линзы L_1 и свет, пройдя линзу, параллельным пучком падает на диспергирующую призму. Из призмы параллельные пучки света различных длин волн выходят под различными углами, так как показатель преломления материала призмы зависит от длины волны падающего света. Линза L_2 фокусирует пучки разложенного света в раз-

личных местах фокальной плоскости $\Phi\Phi'$ в зависимости от угла их падения на линзу L_2 . Получающееся изображение щелей в различных цветах – спектр источника рассматривается через окулярную лупу O . Подробная схема спектрального прибора, используемого в данной работе, находится на столе установки.

В качестве источников света используют газоразрядные трубки, питающиеся от источника высокого напряжения.

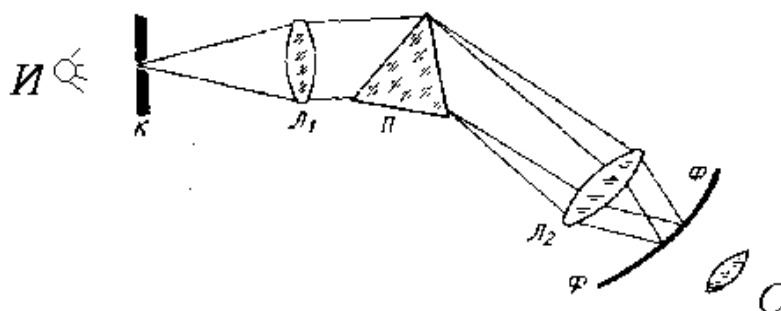


Рис. 1

На рис. 1 видно, что наблюдение спектра и измерения можно проводить двумя способами: либо вращать тубус окуляра (в этом случае призма неподвижна), либо поворачивать призму при неподвижном окуляре. В обоих случаях в поле зрения последовательно оказываются линии изучаемого спектра.

В нашей лаборатории используются оба способа наблюдения.

В случае выполнения работы с подвижной призмой (монокроматором) углы отсчитываются по делениям вращающегося барабана. При выполнении работы с подвижным окуляром (спектроскопом) углы определяются по делениям линейки, изображение которой проецируется на фокальную плоскость $\Phi\Phi'$ и видно на фоне спектра.

5. Порядок выполнения работы

1. Прежде чем приступить к измерению длин волн излучения водорода, производят градуировку спектрального прибора. Для этого включают газоразрядную рубку, наполненную гелием. Светящийся капилляр устанавливают про-

тив входной щели прибора, и, фокусируя окулярную линзу, получают четкое изображение спектральных линий. Значения длин волн гелия указаны на цветном рисунке спектра, который находится на столе установки.

Каждая спектральная линия гелия отвечает определенному положению (либо делению шкалы спектроскопа, либо делению барабана монохроматора).

2. Заполнить таблицу значений по форме

Длина волны гелия, мкм	красный		жёлтый	зелёный		голубой	синий	фиолетовый	
	0,7065	0,26678	0,5876	0,5046	0,5016	04922	0,4613	0,4471	0,438
Деление шкалы (барабана)									

3. С помощью таблицы строят градуировочную кривую прибора, откладывая по оси абсцисс отсчеты по шкале или барабану, по оси ординат – длины волн гелия. Вид градуировочной кривой определяется дисперсией спектрального прибора.

4. Включают газоразрядную трубку с водородом и, также как при градуировании прибора, определяют положение каждой линии водородного спектра.

5. Пользуясь градуировочной кривой, находят длины волн и вычисляют волновые числа линий водородного спектра.

Все наблюдаемые линии принадлежат к серии Бальмера ($k = 2$). Красная линия появляется в спектре при переходе электрона с третьей орбиты, синезеленая – с четвертой, синяя – с пятой и фиолетовая – с шестой орбиты на вторую. Определив длины волн линий спектра водорода, вычисляют энергию квантов видимой части водородного спектра.

6. Подставляя в формулу (9) найденные из опыта величины $\tilde{\nu}$ и значения n , вычисляют постоянную Ридберга по каждой линии. Находят среднее значение постоянной R .

7. Используя среднее значение постоянной R , вычисляют энергию ионизации атома водорода W' и энергии квантов (формула 11). Энергию выражают в джоулях и электрон-вольтах.

При вычислении следует иметь ввиду, что постоянная Планка $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж \cdot с и что $1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

6. Контрольные вопросы

1. Как представляется строение атома по модели Резерфорда?
2. В чем заключается содержание постулатов Бора?
3. Когда атом излучает свет?
4. Как определяется частота света, испускаемого атомом?
5. Что такое длина волны?
6. Какой процесс называется ионизацией атома?
7. Что такое электрон-вольт?
8. Какая величина называется волновым числом?
9. Что такое главное число?
10. Что называется серией линий?
11. Какая серия линий получила название серии Бальмера?
12. Чему равна энергия кванта света?

Литература: [1], § 208 – 212; [2], § 38.1 – 38.4.

РАБОТА 89. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА ПОЛУРАСПАДА РАДИОАКТИВНОГО ИЗОТОПА КАЛИЯ

1. Цель работы

Целью работы является изучение закона радиоактивного распада на примере радиоактивного изотопа калия.

2. Краткая теория исследуемого явления

Радиоактивностью называется самопроизвольное превращение изотопов одного химического элемента в изотопы других элементов, сопровождающееся испусканием элементарных частиц.

Изотопами называют атомы, имеющие один и тот же атомный номер Z , но различные массовые числа A (например, ${}^1_1\text{H}$ – водород, ${}^2_1\text{H}$ – дейтерий, ${}^3_1\text{H}$ – тритий). Изотопы каждого химического элемента разделяются на стабильные и нестабильные – радиоактивные. Радиоактивность, наблюдающаяся у природных изотопов, называется *естественной*.

Естественное радиоактивное излучение обычно состоит из трех компонентов:

α -лучи – обладают малой проникающей способностью и сильным ионизирующим действием (поток ядер гелия);

β -лучи – легкие частицы с большей проникающей способностью и меньшим ионизирующим действием (поток быстрых электронов);

γ -лучи – излучение с наивысшей проникающей способностью и наименьшим ионизирующим действием (поток фотонов высокой энергии).

В результате α -распада получается ядро элемента, стоящего в периодической системе элементов на 2 клетки раньше исходного.

β -распад – процесс самопроизвольного превращения материнского ядра ${}_Z^AX$ в дочернее ядро ${}_{Z+1}^AY$ с одновременным испусканием электрона.

γ -излучение – это жесткое электромагнитное излучение (длина волны от 1 А до 0,003 А), испускаемое дочерним ядром, находившимся в момент своего образования в возбужденном состоянии.

Пусть в некоторый момент времени t имеется N ядер изотопа. Тогда количество распавшихся за время dt атомов dN будет пропорционально числу атомов N и промежутку времени dt :

$$-dN = \lambda N dt, \quad (1)$$

где λ есть вероятность распада ядра за единицу времени, знак « $-$ » в формуле (1) означает, что число нераспавшихся ядер уменьшается. Интегрирование выражения (1) приводит к закону радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (2)$$

Время, в течение которого начальное число нераспавшихся ядер уменьшается вдвое, называется периодом полураспада T :

$$N(T) = (1/2) N_0 = N_0 e^{-\lambda T}. \quad (3)$$

Из (3) следует:

$$\ln N(T) = \ln N_0 - \ln 2 \equiv \ln N_0 - \lambda T, \quad (4)$$

отсюда

$$T = \ln 2 / \lambda \approx 0,693 / \lambda. \quad (5)$$

Число ядер, распадающихся в единицу времени, называется активностью препарата:

$$A = |dN/dt|. \quad (6)$$

Из (5) и (1) следует, что

$$T = (0,693/A)N. \quad (7)$$

В настоящее время известно около 1100 радиоактивных изотопов. Так, природный калий представляет собой смесь трех изотопов: $^{39}_{19}\text{K}$, $^{41}_{19}\text{K}$, $^{40}_{19}\text{K}$. Первые два стабильны, а $^{40}_{19}\text{K}$ – радиоактивен.

89% $^{40}_{19}\text{K}$ распадаются по схеме: $^{40}_{19}\text{K} \rightarrow ^{40}_{20}\text{Ca} + {}_{-1}^0e + \tilde{\nu}$, а 11% $^{40}_{19}\text{K}$ распадаются по схеме: $^{40}_{19}\text{K} + e_{\text{к}} \rightarrow ^{40}_{18}\text{Ar} + \nu$,

где e_k электрон, захваченный ядром ${}^{40}_{19}\text{K}$ из К-оболочки атома (так называемый К-захват), ν – нейтрино, $\bar{\nu}$ – антинейтрино. Таким образом, радиоактивный распад ${}^{40}_{19}\text{K}$ по первой схеме сопровождается β -излучением, которое регистрируется в предлагаемой лабораторной работе с помощью газоразрядного счетчика Гейгера-Мюллера.

3. Принцип метода измерений радиоактивных излучений и рабочая формула

Метод регистрации и определения параметров радиоактивных излучений с помощью газоразрядных счётчиков основан на том, что попадающее в счётчик излучение (в нашем случае электроны) ионизирует газ в счётчике и вызывает электрический разряд. Количество таких разрядов (импульсов) тока за 1 секунду пропорционально числу частиц вылетающих за 1 секунду из препарата, т.е. активности препарата $A = \frac{\Delta N}{\Delta t}$. Определив активность препарата A (см. раздел «Порядок выполнения работы»), по формуле (7) находят период полураспада.

4. Измеряемый объект

Измеряемым объектом является природный препарат KCl, содержащий изотоп ${}^{40}_{19}\text{K}$.

Непосредственная задача работы – определение периода полураспада изотопа калия.

5. Экспериментальная установка в статике и динамике

Блок-схема установки показана на рис. 1. Установка состоит из счётчика 1, усилителя 2 и пересчётного устройства 3. Счётчик 1 представляет собой проводящий цилиндр (катод) с натянутой вдоль оси тонкой металлической нитью. Внутренняя полость счётчика герметизирована и обычно заполнена инертным газом (аргоном или неоном) с небольшой примесью паров многоатомных органических веществ. Между анодом и катодом прикладывается раз-

ность потенциалов порядка 400-1200 В. Возникающие в счётчике I ионы или вторичные электроны вследствие лавинного разряда образуют импульс тока, который после усиления (усилитель 2) поступает на пересчётное устройство 3.

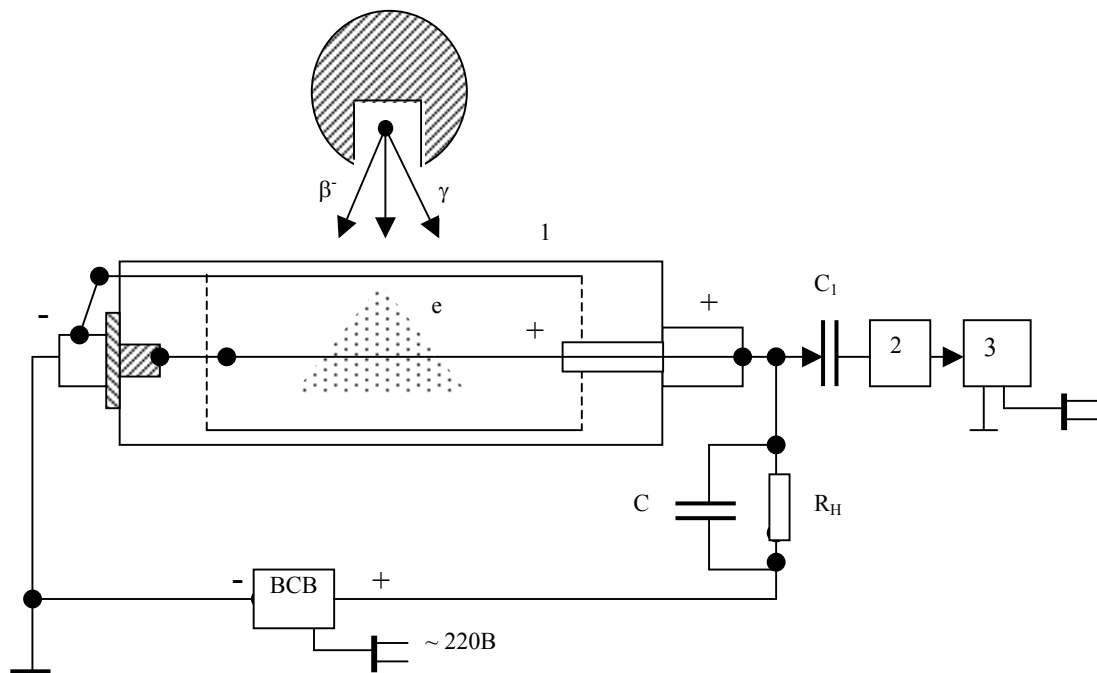


Рис. 1

BCB – высоковольтный источник питания счетчика.

Средняя частота следования импульсов I пропорциональна плотности излучения J , поступающего на счётчик. Такая зависимость $I = kJ$ позволяет использовать счётчик в качестве детектора радиоактивного излучения.

Определение числа активных ядер

Обозначим через m – массу препарата, μ – масса одного моля KCl,

N_A – число Авогадро. Тогда число молекул KCl (а следовательно, и число атомов калия) будет равно:

$$N_K = \frac{m}{\mu} N_A. \quad (8)$$

Из этого числа атомов 0,019 % составляют атомы радиоактивного изотопа $^{40}_{19}\text{K}$, причем 89 % от числа последних испытывают распад с испусканием электронов, которые регистрирует лабораторный прибор.

Таким образом, число ядер ${}^{40}_{19}\text{K}$ определяется для данного препарата формулой

$$N = 0,89 \cdot 1,9 \cdot 10^{-4} \frac{m}{\mu} N_A. \quad (9)$$

Определение активности препарата

Расчетная формула для определения активности толстых препаратов имеет вид:

$$A = C(n - n_{\phi}), \quad (10)$$

где C – постоянная для данного опыта величина, которая определяется поправочными коэффициентами на отражение от подложки, на поглощение и рассеяние β -частиц в препарате; n – скорость счета при наличии препарата; n_{ϕ} – скорость счета без препарата (фон).

Подставив полученные значения N и A в формулу (7), находим период полураспада (значение $C \cdot 1000$).

Схема лабораторной установки для измерения A – на рабочем столе.

6. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством радиометра и подготовить его к работе.

ВНИМАНИЕ: Включение прибора и установка препарата в «свинцовый домик» производится в присутствии преподавателя.

2. Включить установку и измерить скорость счета фона за 10 минут (препарат при этом из домика вынуть).

3. Выключить установку. Вложить препарат в домик и закрыть домик. Включить установку и дать ей прогреться 3-4 минуты.

Измерить скорость счета за 10-15 минут.

4. Выключить установку. Подсчитать активность препарата по формуле (10) и число радиоактивных ядер по формуле (9).

5. Результаты измерений занести в таблицу по указанной форме.

Скорость счета	Значение
n (имп/мин)	
n_{ϕ} (имп/мин)	

6. Найти период полураспада по формуле (7).

7. Контрольные вопросы

1. Чем отличаются изотопы калия? Как распадается $^{40}_{19}\text{K}$?
2. Из каждого миллиарда атомов препарата радиоактивного изотопа каждую минуту распадается 2000 атомов. Определить период полураспада T .
3. Что такое активность препарата?
4. Что такое период полураспада радиоактивного препарата?
5. Из каждого миллиона атомов препарата радиоактивного изотопа каждую минуту распадается 2 атома. Определить период полураспада T .

Литература: [1], §255, 256; [2], § 45.4; [5], §51.

Содержание

Стр.

Общие указания.....	3
Библиографический список.....	5
Обработка результатов измерений.....	6
Работа 81. Определение постоянной Стефана-Больцмана и постоянной Планка.....	13
Работа 82. Изучение внешнего фотоэффекта.....	22
Работа 83. Исследование эффекта Холла в металлах и полупроводниках.....	28
Работа 84. Термоэлектронная эмиссия.....	33
Работа 85. Изучение выпрямляющих свойств р-п перехода.....	41
Работа 86. Изучение внутреннего фотоэффекта в полупроводниках.	47
Работа 87. Изучение работы полупроводникового излучателя.....	53
Работа 88. Определение постоянной Ридберга и вычисление энергии ионизации атома водорода.....	60
Работа 89. Определение периода полураспада радиоактивного изотопа калия.....	67

Редактор Т.В.Шабанова

Сводный темплан 2004 г.

Лицензия ЛР № 020308 от 14.02.97

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 78.01.07.953.п.005641.11.03 от 21.11.2003г.

Подписано в печать 2004. Формат 60х84 1/16.

Б. кн.-журн. П.л. 4,75. .Б.л.2,37. РТП РИО СЗТУ.
Тираж 300. Заказ .

Северо-Западный государственный заочный технический университет

РИО СЗТУ, член Издательско-полиграфической ассоциации вузов
России

191186 Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д.5