

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра физики

**ПОСТОЯННЫЙ ТОК**  
**Комплекс К-310.3**

Методические указания для лабораторных работ  
по разделу физики «Электродинамика»  
для студентов всех направлений и специальностей

Составители **В. В. Дырдин**  
**А. А. Мальшин**  
**Т. И. Янина**

Утверждены на заседании кафедры  
Протокол № 9 от 24.03.2015  
Рекомендованы к печати  
учебно-методической комиссией  
направления 20.03.01 (280700.62)  
Протокол № 8 от 31.03.2015  
Электронная копия находится  
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2015

## Содержание

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>2</b>
<b>I. Погрешности электрических измерений.....</b>	<b>3</b>
<b>II. Лабораторная работа №1.</b>	
<b>ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТОДОМ АМПЕРМЕТРА - ВОЛЬТМЕТРА.....</b>	<b>5</b>
<b>III. Лабораторная работа №2.</b>	
<b>ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ МОСТА УИТСТОНА.....</b>	<b>12</b>
<b>IV. Лабораторная работа №3.</b>	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗИСТИВНОГО ПРОВОДА .....</b>	<b>19</b>
<b>V. Лабораторная работа №4.</b>	
<b>ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ .....</b>	<b>27</b>
<b>VI. Лабораторная работа №5.</b>	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ МЕТАЛЛА .....</b>	<b>33</b>
<b>VII. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>40</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Комплекс К-310.3 представляет собой перечень лабораторных работ, предусмотренных образовательным стандартом и рабочей программой по разделу «Постоянный ток» дисциплины «Физика». Он включает в себя описание лабораторных установок, порядок измерений и алгоритм расчета определенных физических величин.

Для подготовки к выполнению лабораторной работы в соответствии с образовательным стандартом второго поколения 50 % от объема часов, отводимых на изучение дисциплины, приходится на самостоятельную работу, которая является необходимым компонентом процесса обучения. *Целью самостоятельной работы является закрепление и углубление знаний и навыков, подготовка к лекциям, практическим и лабораторным занятиям, а также формирование у студентов самостоятельности в приобретении новых знаний и умений.*

Учебными планами для различных специальностей предусмотрено на самостоятельное изучение дисциплины «физика» в течение семестра от 60 до 120 часов. Из них на подготовку к лабораторным работам приходится 20–40 часов, или 2–4 часа на одну работу. В течение этого времени студент должен: прочитать соответствующие параграфы в учебниках; выучить основные формулы и законы; познакомиться с установкой и порядком измерений.

Для допуска к выполнению работы на установке студент должен знать устройство установки, уметь определять цену деления измерительного прибора, знать последовательность измерений, уметь обрабатывать результаты измерений, оценивать погрешность. Ответить на контрольные вопросы, помещённые в конце методических указаний. После всех расчетов и оформления отчета, студент должен сделать вывод, в котором конкретно указать те физические закономерности, которые были проверены в ходе выполнения работы и указать каким образом это сделано.

На выполнение каждой из представленных в данном комплексе лабораторных работ отводится два часа аудиторных занятий.

## I. Погрешности электрических измерений

Измерения принципиально не могут быть абсолютно точными. Погрешности измерений (ошибки измерений) – это отклонения результатов измерений от истинных значений измеряемых величин. Различают систематические, случайные и грубые погрешности измерений (последний вид погрешности часто называют промахами). Систематические погрешности измерений обусловлены, главным образом, погрешностями средств измерений и несовершенством методов измерений; случайные погрешности измерений – рядом неконтролируемых обстоятельств (незначительными изменениями условий измерений и т.п.); промахи – неисправностью средств измерений, неправильным отсчитыванием показаний, резким изменением условий измерения и т.д.

При обработке результатов измерений промахи обычно отбрасывают. Влияние систематических погрешностей стремятся уменьшить внесением поправок или умножением показаний приборов на поправочные коэффициенты. Оценку случайных погрешностей измерений осуществляют методами математической статистики.

Представление о точности измерений электроизмерительным прибором дает относительная погрешность

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A} 100 \% , \quad (1.1)$$

где  $\Delta A$  – абсолютная погрешность (разность между показаниями прибора  $A$  и истинным значением  $A_{\text{ист}}$  измеряемой величины).

Отношение минимальной абсолютной погрешности  $\Delta A_{\text{min}}$  к предельному (максимальному) значению измеряемой величины  $A_{\text{max}}$  данным прибором называется приведенной относительной погрешностью

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{\Delta A_{\text{min}}}{A_{\text{max}}} 100 \% . \quad (1.2)$$

Приведенная относительная погрешность  $\varepsilon_{\text{пр}}$ , выраженная в процентах, определяет класс точности прибора ( $\gamma$ ). Применяются следующие классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Обозначение класса точности записывается на его шкале в виде соответствующих цифр. Иногда класс точности обозначается числом в кружке. Приборы класса точности 0,05 дают наименьшую относи-

тельную погрешность измерения и употребляются в точных лабораторных исследованиях, а также как образцовые приборы для проверки менее точных приборов. Приборы остальных классов 0,1–4 относятся к техническим.

Зная класс точности прибора, можно найти относительную погрешность конкретного измерения  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon_x = \gamma \frac{X_{пред}}{X} \%, \quad (1.3)$$

где  $X$  – показания прибора.

Общая формула для расчета минимальной абсолютной погрешности имеет вид

$$\Delta A_{\min} = \frac{\gamma}{100} A_{\max}, \quad (1.4)$$

где  $\gamma$  – класс точности прибора, %;  $A_{\max}$  – верхний предел измерений прибора.

Из вышесказанного следует, что чем ближе измеряемая величина к предельному значению прибора, тем меньше относительная ошибка, тем она ближе к значению класса точности прибора. Электроизмерительный прибор или его предел для работы следует выбирать так, чтобы значение измеряемой величины было близким к предельному (наибольшему) значению шкалы прибора.

Важнейшей характеристикой измерительного прибора является его внутреннее сопротивление, определяемое как

$$R_{пр} = \frac{U_{\max}}{I_{\max}}, \quad (1.5)$$

где  $U_{\max}$  – максимальное падение напряжения на приборе;  $I_{\max}$  – максимальное допустимое значение силы тока, протекающего через прибор.

## II. Лабораторная работа №1. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТОДОМ АМПЕРМЕТРА - ВОЛЬТМЕТРА

### 1. Цель работы

Освоить метод измерения неизвестных сопротивлений с помощью вольтметра и амперметра неизвестное сопротивление и оценить погрешность измерения с использованием двух схем, а также выработать умение графического построения вольтамперных характеристик.

### 2. Подготовка к работе

Изучить теоретические положения, касающиеся данного метода по литературным источникам [1] – гл.18, [2] – гл. 12, [3] – гл. V. Для выполнения работы студент должен знать: а) законы Ома и Кирхгофа для постоянного тока; б) физическое обоснование сопротивления проводника и его зависимость от других факторов; в) расчёт погрешности измерений; г) порядок работы на лабораторной установке и предельные параметры приборов.

### 3. Выполнение работы

#### 3.1. Описание лабораторного стенда

Принципиальные электрические схемы для определения сопротивления методом амперметра - вольтметра, показаны на рис. 2.1, 2.2. Напряжение, подаваемое от источника питания с помощью ключа К через реостат (потенциометр) П на неизвестное со-

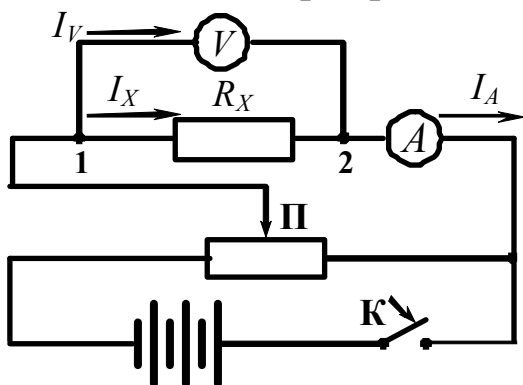


Рис. 2.1 Электрическая схема для измерения неизвестного сопротивления по схеме (I)

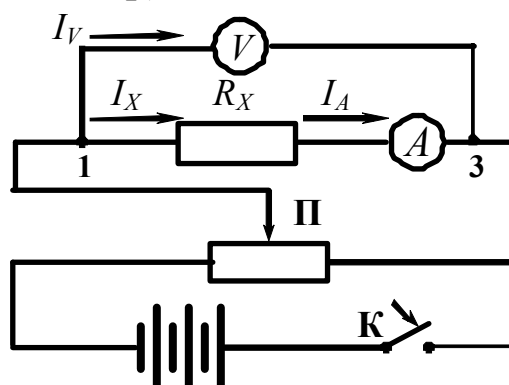


Рис. 2.2 Электрическая схема для измерения неизвестного сопротивления по схеме (II)

противление  $R_X$ , определяется вольтметром  $V$ , ток регистрируется амперметром  $A$ .

При подключении вольтметра к точкам 1 и 2 осуществляется работа по схеме (I) (рис. 2.1). При подключении вольтметра к точкам 1 и 3 осуществляется работа по схеме (II) (рис. 2.2).

В работе используются два неизвестных сопротивления  $R_{X1}$ ,  $R_{X2}$ , при различном соединении которых можно получить ещё два неизвестных сопротивления.

### 3.2. Методика измерений и расчёта

Для схемы измерения (I) (рис. 2.1) ток, измеряемый амперметром  $I_A$  не равен току  $I_X$ , идущему через неизвестное сопротивление, а представляет собой сумму токов через вольтметр и неизвестное сопротивление:

$$I_A = I_X + I_V = I_X + \frac{U_V}{R_V},$$

где  $R_V$  – сопротивление вольтметра.

Тогда неизвестное сопротивление будет равно:

$$R_{X(I)} = \frac{U_X}{I_X} = \frac{U_X}{I_A - I_V} = \frac{U_X}{I_A - \frac{U_V}{R_V}}. \quad (2.1)$$

В схеме измерения (II) (рис. 2.2) показание вольтметра  $U_V$  не соответствует напряжению на концах неизвестного сопротивления  $U_X$ , так как оно равно сумме напряжений:

$$U_V = U_X + U_A = U_X + I_A \cdot R_A,$$

где  $R_A$  – сопротивление амперметра.

Тогда неизвестное сопротивление будет равно:

$$R_{X(II)} = \frac{U_X}{I_X} = \frac{U_V - U_A}{I_A} = \frac{U_V}{I_A} - R_A. \quad (2.2)$$

Как видно из формул (2.1) и (2.2), при измерении сопротивления методом амперметра – вольтметра по схеме (I) в расчётную формулу входит сопротивление вольтметра  $R_V$ , а по схеме (II) – сопротивление амперметра  $R_A$ .

В случае, если сопротивления приборов неизвестны, то неизвестное сопротивление рассчитывают по упрощённой формуле:

$$R'_X = \frac{U_V}{I_A}. \quad (2.3)$$

В этом случае *возникает относительная методическая погрешность* измерения  $\varepsilon_m$ , равная:

$$\varepsilon_m = \frac{|R_X - R'_X|}{R_X} \cdot 100\%, \quad (2.4)$$

где  $R_X$  – истинное значение измеряемого сопротивления, рассчитанное по формуле (2.1) или (2.2) в зависимости от используемой схемы измерения.

Относительная методическая погрешность измерения для схемы (I):

$$\varepsilon_{m(I)} = \frac{R_X}{R_X + R_V} \cdot 100\% = \frac{1}{1 + \frac{R_V}{R_X}} \cdot 100\%. \quad (2.5)$$

Относительная методическая погрешность измерения для схемы (II):

$$\varepsilon_{m(II)} = \frac{R_A}{R_X} \cdot 100\%. \quad (2.6)$$

Из формул (2.5) и (2.6) видно, что относительная методическая погрешность измерения сопротивления при расчёте по упрощённой формуле (2.4) зависит от соотношения между измеряемым сопротивлением  $R_X$  и сопротивлениями приборов  $R_A$  и  $R_V$ . Действительно, при использовании *схемы измерения (I)*  $\varepsilon_{m(I)} = 50\%$  при  $R_X = R_V$  и  $2\%$  при  $R_V = 49R_X$ . При использовании *схемы измерения (II)*  $\varepsilon_{m(II)} = 50\%$  при  $R_X = 2R_A$  и  $2\%$  при  $R_X = 50R_A$ .

Таким образом, первую схему (I) измерения можно использовать, когда измеряемые сопротивления во много раз меньше сопротивления вольтметра ( $R_V \gg R_X$ ), а вторую схему (II) измерения можно использовать, когда измеряемые сопротивления во много раз больше сопротивления амперметра ( $R_X \gg R_A$ ). Следует отметить, что рассмотренный метод не обеспечивает высокой точности, так как погрешность измерения сопротивления этим методом всегда боль-



ше суммы *приведённых погрешностей* обоих приборов [см. (1.3), (1.4)].

### 3.3. Порядок выполнения работы

#### 3.3.1. Определение параметров приборов (вольтметра и амперметра)

а.) Выбрать пределы измерения прибора  $U_{пред}$ ,  $I_{пред}$  (повернуть переключатель).

б.) Рассчитать цену деления прибора (предел измерения разделить на число делений).

в.) Записать класс точности (на шкале прибора). Рассчитать абсолютную погрешность прибора по формуле

$$\Delta X = \frac{\gamma_{пр} \cdot X_{пред}}{100\%}.$$

г.) Определить максимальный ток  $I_{max}$  для вольтметра и максимальное напряжение  $U_{max}$  для амперметра (по данным на шкале прибора). Найти внутреннее сопротивление вольтметра  $R_V$  и амперметра  $R_A$  по формулам:

$$R_V = \frac{U_{пред}}{I_{max}}, \quad R_A = \frac{U_{max}}{I_{пред}},$$

данные занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

*Параметры амперметра и вольтметра*

Параметры	Вольтметр	Амперметр
Предел измерения		
Цена деления		
Класс точности $\gamma_{пр}$ , %		
Абсолютная приборная погрешность $\Delta X$		
Внутреннее сопротивление, Ом		

#### 3.3.2. Определение сопротивления $R_X$ по схеме (I)

а.) Собрать схему (I) (рис. 2.1). Подключить сопротивление  $R_{X1}$ .

б.) Потенциометр П поставить в положение минимума снимаемого напряжения.

в.) Включить ключ К.

г.) Снять вольт-амперную зависимость (показания приборов для значений напряжения  $U_V$  и тока  $I_A$  занести в табл. 2.2).

д.) Построить на рис. 1 отчёта график вольт-амперной зависимости  $U_V(I_A)$ , откладывая по оси абсцисс ток  $I_A$  по оси ординат напряжение  $U_V$ . Тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс, проведённой через точки графика, определяет омическое сопротивление, как частное от деления напряжения на вольтметре на суммарный ток через неизвестное сопротивление и вольтметр

$$R'_{X(I)} = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

По формуле  $I_X = I_A - I_V = I_A - \frac{U_V}{R_V}$  рассчитать ток через неизвестное сопротивление. Результаты расчёта занести в табл. 2.2 и по полученным данным рассчитать неизвестное сопротивление  $R_{X(I)}$  и погрешности измерений. Расчёт относительной погрешности измерений для различных значений тока и напряжения проводить по формуле

$$\varepsilon = \gamma \frac{X_{пред}}{X} \%,$$

а методической погрешности – по формуле

$$\varepsilon_{m(I)} = \frac{R_X}{R_X + R_V} \cdot 100\%$$

Рассчитать абсолютную погрешность измерений:  $\Delta R = R_{X(I)} \cdot \varepsilon_{R(I)}$ , где  $\varepsilon_{R(I)} = \sqrt{\varepsilon_V^2 + \varepsilon_A^2 + \varepsilon_{m(I)}^2}$  – относительная погрешность определения сопротивления;  $\varepsilon_V$  – максимальная относительная погрешность вольтметра;  $\varepsilon_A$  – максимальная относительная погрешность амперметра (выбрать из табл. 2.2).

е.) 3.3.2.11. Повторить пункты (а–е) для  $R_{X2}$ . Построить на рис. 2 отчёта графики вольт-амперной зависимости  $U_V(I_A)$ .

Таблица 2.2

*Результаты измерения неизвестного  
сопротивления по схеме (I) и расчёта погрешностей*

№	$U_V$	$I_A$	$I_X$	$R'_{X(I)}$	$R_{X(I)}$	$\varepsilon_V$	$\varepsilon_A$	$\varepsilon_{M(I)}$	$\Delta R$
	В	А	А	Ом	Ом	%	%	%	Ом
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									

### 3.3.3. Определение сопротивления $R_X$ по схеме (II)

а.) Собрать схему (II) (рис. 2.2). Подключить сопротивление  $R_{X1}$ .

б.) Потенциометр П поставить в положение минимума снимаемого напряжения.

в.) Включить ключ К и снять вольт-амперную зависимость напряжения  $U_V$  от тока  $I_A$  результаты занести в табл. 2.3.

г.) Построить на рис. 1 отчёта график вольт-амперной зависимости  $U_V(I_A)$ , откладывая по оси абсцисс ток  $I_A$  по оси ординат напряжение  $U_V$ . Тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс, проведённой через точки графика, определяет омическое сопротивление, как частное от деления напряжения на вольтметре на ток через неизвестное сопротивление, без учёта падения напряжения на амперметре

$$\text{метре} \quad R''_{X(II)} = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

д.) По формуле  $U_X = U_V - U_A = U_V - I_A R_A$  рассчитать напряжение на неизвестном сопротивлении, результаты вычислений занести в табл. 2.3. По полученным данным рассчитать неизвестное сопротивление  $R_{X(II)}$ .

- е.) Рассчитать относительную погрешность измерений для различных значений тока и напряжения:  $\varepsilon = \gamma \frac{X_{\text{пред}}}{X} \%$ .

Таблица 2.3

*Результаты измерения неизвестного сопротивления по схеме(II) и расчёта погрешностей*

№	$U_V$	$I_A$	$U_X$	$R''_{X(II)}$	$R_{X(II)}$	$\varepsilon_V$	$\varepsilon_A$	$\varepsilon_{m(II)}$	$\Delta R$
	В	А	В	Ом	Ом	%	%	%	Ом
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									

Сравнить полученное значение сопротивления с сопротивлением амперметра. Рассчитать относительную методическую погрешность измерения для схемы (II) по формуле (2.6). Рассчитать абсолютную погрешность измерений:  $\Delta R = R_{X(II)} \cdot \varepsilon_{R(II)}$ , где  $\varepsilon_{R(II)} = \sqrt{\varepsilon_V^2 + \varepsilon_A^2 + \varepsilon_{m(II)}^2}$  – относительная погрешность определения сопротивления;  $\varepsilon_V$  – максимальная относительная погрешность вольтметра;  $\varepsilon_A$  – максимальная относительная погрешность амперметра (по данным табл. 2.3).

ж.) Повторить пункты (а–е) для  $R_{X2}$ . Построить на рис. 2 отчёта графики зависимости  $U_V(I_A)$ .

### 3.3.4. Сделать выводы.

## 4. Вопросы для самоподготовки

4.1. Что такое сопротивление? От чего оно зависит и что определяет в цепи постоянного тока?

4.2. Какие существуют способы определения сопротивления?

4.3. Как записывается закон Ома для пассивного и активного участков цепи? Как учитывать направление ЭДС?

4.4. Чем отличаются схемы измерения сопротивления (I) и (II)?

4.5. Каким образом, зная класс точности прибора, можно найти абсолютную погрешность измерения?

4.6. При каких соотношениях неизвестного сопротивления и сопротивлений приборов можно использовать схему (I) измерения, если задано, что погрешность измерений должна быть 2%; 10%; 15%?

4.7. При каких соотношениях неизвестного сопротивления и сопротивлений приборов можно использовать схему (II) измерения, если задано, что точность измерений должна быть не больше 2%; 10%; 15%?

4.8. Дан многопредельный амперметр на 30 мА, 150 мА и 300 мА. Класс точности прибора 0,2. Определите абсолютную погрешность прибора для каждого предела измерения.

4.9. Какова природа сопротивления?

4.10. Как записывается закон Ома в дифференциальной форме? Когда он применяется?

4.11. В чём заключается классическая теория электропроводности металлов?

### **III. Лабораторная работа №2. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ МОСТА УИТСТОНА**

#### **1. Цель работы**

Освоить метод моста Уитстона для измерения неизвестного омического сопротивления.

#### **2. Подготовка к работе**

Изучить теоретические положения, касающиеся данного явления по литературным источникам [1] – гл.18, [2] – гл. 12, [3] – гл. V. Для выполнения работы студент должен знать: а) законы Ома в интегральной и дифференциальной форме; б) что такое сопротивление проводника и от чего оно зависит; в) как рассчитывать

погрешность электроизмерительных приборов и погрешность измерения; г) условие баланса моста Уитстона; д) основные положения классической теории электропроводности металлов и её недостатки.

### 3. Выполнение работы

#### 3.1. Описание электрической схемы моста Уитстона

Метод моста Уитстона применяется в настоящее время для разнообразных электрических измерений, в частности для измерения омических сопротивлений, т. е. сопротивлений в цепях постоянного тока.

Применяемая в данной работе схема моста Уитстона представлена на рис. 3.1. Последовательно с гальванометром  $G$  включается добавочное сопротивление  $R_G$ , предохраняющее гальванометр от протекания больших токов при плохо сбалансированном мосте. По мере улучшения балансировки моста показания гальванометра уменьшаются и для повышения его чувствительности добавочное сопротивление  $R_G$  постепенно уменьшают до нуля.

Реостат АС подсоединяется к сопротивлениям  $R_x$  и  $R_0$  через двухполюсный переключатель  $T$ . Измерения сопротивления производятся при двух положениях тумблера  $T$ . В первом случае переключатель  $T$  устанавливают в положение 1 – 1'. Сопротивление  $R_x$  одним концом подсоединяется к точке А, а другим – к сопротивлению магазина  $R_0$ .

Во втором случае переключатель  $T$  ставят в положение 2–2'. Это равносильно тому, что сопротивления  $R_x$  и  $R_0$  поменялись местами, т.е.  $R_x$  подключается к точке С, а  $R_0$  – к точке А.

Все измерения необходимо производить при кратковременном нажатии на ключ  $K$ , так как длительное протекание тока по цепи ведет к нагреванию сопротивлений и изменению их величин.

Измерения путем уравнивания моста обеспечивают высокую точность, так как результат не определяется показанием измерителя тока (только индикацией отсутствия тока) и не зависит от колебаний напряжения источника питания моста. Однако часто мост используется в качестве прибора для наблюдения за изменением сопротивления. В этом случае мост не уравнивается и величина изменения сопротивления  $\Delta r_x$  пропорциональна величине тока

или напряжения в диагонали моста, пока это изменение невелико. На практике этот метод может применяться не только при аналоговых измерениях, но и в схемах автоматического регулирования.

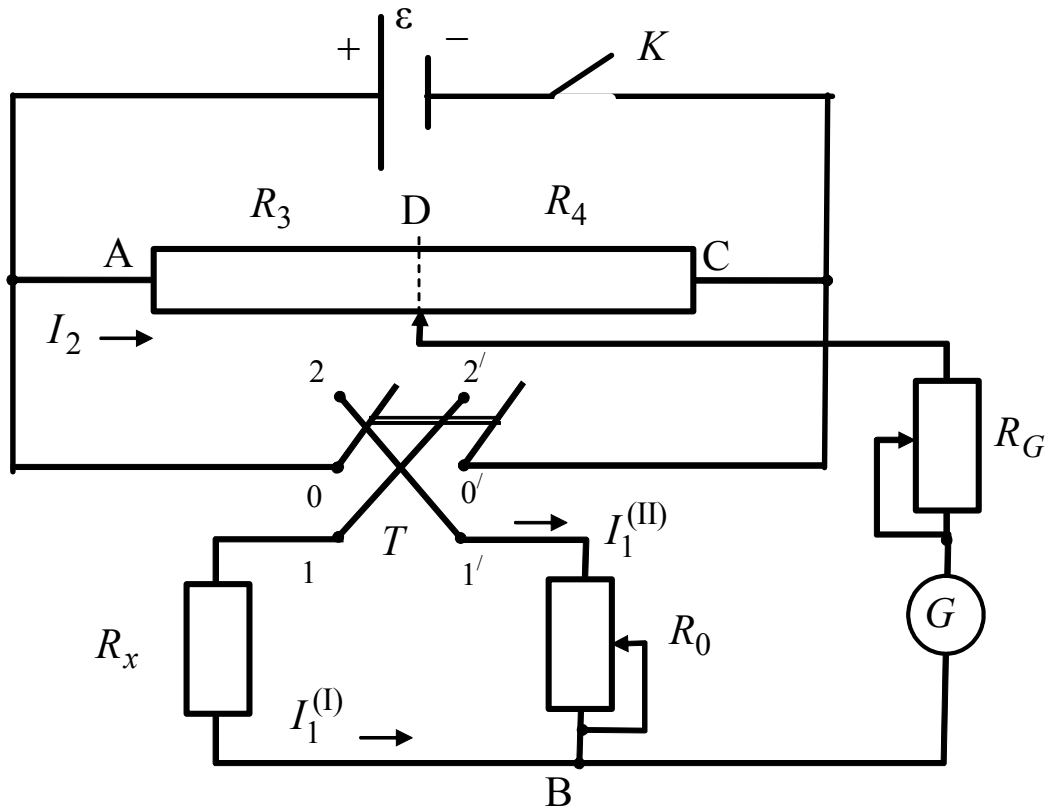


Рис. 3.1. Электрическая схема для измерения омического сопротивления при помощи моста Уитстона

### 3.2. Методика измерений и расчёта

Схема одинарного моста состоит из четырех сопротивлений, включенных, как показано на рис. 3.1. Они образуют две параллельные ветви (ABC и ADC), между которыми переброшен мост (диагональ BD). В диагональ, включен индикатор нуля – гальванометр  $G$ . Принципиальная схема моста приведена на рис. 3.2.

Ток, протекающий через гальванометр, зависит от сопротивлений  $R_x$ ,  $R_0$ ,  $R_3$  и  $R_4$ . Изменяя  $R_0$  и  $R_3$ , можно подобрать такие их значения, при котором ток в диагонали моста станет равным нулю. В этом случае говорят о балансе моста. При балансе ток через сопротивления  $R_x$  и  $R_0$  равен  $I_1$ , а через сопротивления  $R_3$  и  $R_4$ , соответственно,  $I_2$ .

Отсутствие тока в гальванометре свидетельствует о том, что разность потенциалов на концах диагонали BD равна нулю, т. е.

$$\Phi_B = \Phi_D \quad (3.1)$$

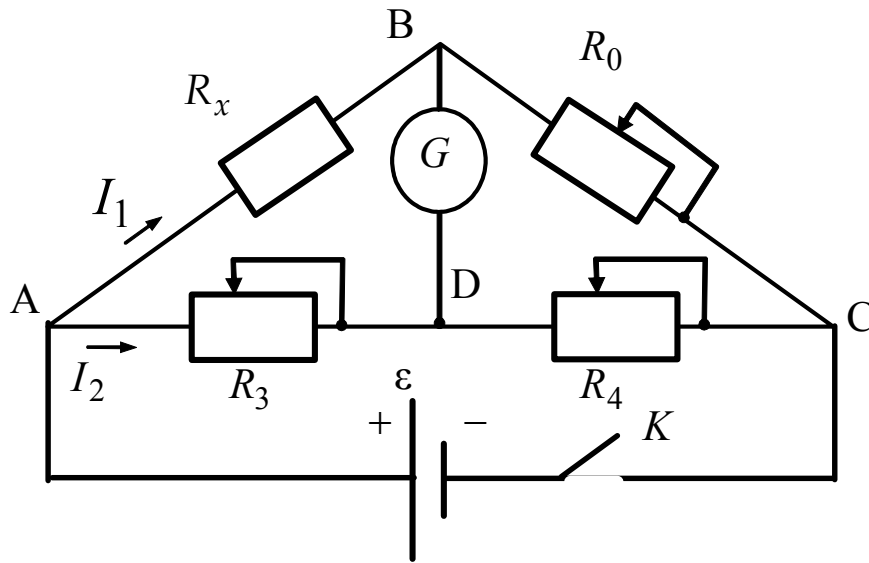


Рис. 3.2. Принципиальная электрическая схема моста Уитстона

Так как напряжение на участке цепи, на котором не действуют сторонние силы (однородном участке цепи), равно разности потенциалов на его концах, то

$$\begin{aligned} U_x &= \Phi_A - \Phi_B & U_0 &= \Phi_B - \Phi_C \\ U_3 &= \Phi_A - \Phi_D & U_4 &= \Phi_D - \Phi_C \end{aligned} \quad (3.2)$$

Учитывая (3.1), можно записать

$$\begin{aligned} U_x &= U_3 \\ U_0 &= U_4. \end{aligned} \quad (3.3)$$

По закону Ома для однородного участка цепи

$$\begin{aligned} U_x &= I_1 \cdot R_x & U_0 &= I_1 \cdot R_0 \\ U_3 &= I_2 \cdot R_3 & U_4 &= I_2 \cdot R_4. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Подставив (3.4) в (3.3), получим

$$\begin{aligned} I_1 R_x &= I_2 \cdot R_3 \\ I_2 R_4 &= I_1 \cdot R_0. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Отсюда следует, что

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{R_3}{R_4}. \quad (3.6)$$



Окончательно получим:

$$R_x = R_0 \frac{R_3}{R_4} . \quad (3.7)$$

1) В случае когда переключатель  $T$  устанавливают в положение 1 – 1' . Сопротивление  $R_x$  одним концом подсоединяется к точке А, а другим – к сопротивлению магазина  $R_0$ . Исходя из рис. 3.1. расчет неизвестного сопротивления необходимо производить по формуле

$$R_x = R_0 \frac{R_3}{R_4} = R_0 \frac{\rho \frac{\ell_3}{S}}{\rho \frac{\ell_4}{S}} = R_0 \frac{\ell_3}{\ell_4} , \quad (3.8)$$

где  $\ell_3$  и  $\ell_4$  – плечи реостата АС.

Плечо  $\ell_3$  отсчитывают от точки А в направлении С до бегунка, плечо  $\ell_4$  – от бегунка до точки С.

2) В случае когда переключатель  $T$  ставят в положение 2–2'. Это равносильно тому, что сопротивления  $R_x$  и  $R_0$  поменялись местами, т.е.  $R_x$  подключается к точке С, а  $R_0$  – к точке А. Расчетная формула в этом случае будет иметь вид

$$R_x = R_0 \frac{R_4}{R_3} = R_0 \frac{\ell_4}{\ell_3} , \quad (3.9)$$

где  $\ell_3$  – по-прежнему отсчитывается от точки А до бегунка, а  $\ell_4$  – от точки С до бегунка реостата.

Относительная погрешность измерений при определении неизвестного сопротивления  $R_x$  находится по формуле:

$$\varepsilon_{R_x} = \sqrt{\varepsilon_{R_0}^2 + \varepsilon_{R_3}^2 + \varepsilon_{R_4}^2} , \quad (3.10)$$

где  $\varepsilon_{R_0} = \frac{\Delta R_0}{R_0}$ ,  $\varepsilon_{R_3} = \frac{\Delta R_3}{R_3}$ ,  $\varepsilon_{R_4} = \frac{\Delta R_4}{R_4}$  – относительные погрешности величин сопротивлений  $R_0$ ,  $R_3$  и  $R_4$ .

Погрешности  $\Delta R_3$  и  $\Delta R_4$  определяются путем учёта погрешности при измерении длин  $l_3$  и  $l_4$ . Также необходимо учесть погрешность установления показаний гальванометра на нуль.

### 3.3. Порядок выполнения работы

#### 3.3.1 Подготовка установки к измерениям

а.) Установить скользящий контакт (движок D) на середину реостата АС.

б.) При положении двухполюсного рубильника  $T$  в положении 1 – 1' (рис. 3.1), подобрать такое значение сопротивления  $R_0$ , при котором показания гальванометра приближаются к нулевым, при постепенном уменьшении  $R_G$ . Записать показания магазина  $R_0$  и величину плеч  $l_3$  и  $l_4$  в табл. 3.1.

в.) Повторить измерения  $R_x$  не менее пяти раз, каждый раз изменяя длину  $l_3$  на 10-20 % длины реостата от первоначального положения.

г.) Переключить двухполюсный рубильник  $T$  в положение 2 – 2' и повторить измерения по пункту 3.3.2., 3.3.4. Произвести необходимые вычисления и записать результаты в табл. 3.1.

#### 3.3.2. Определение неизвестного сопротивления

а.) Указанным выше способом измерить два неизвестных сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  сначала по отдельности, а затем – при последовательном и параллельном их соединении.

б.) Рассчитать величину эквивалентного сопротивлений при параллельном соединении  $R_1$  и  $R_2$

$$\frac{1}{R_{нар}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

и их последовательном соединении  $R_{нос} = R_1 + R_2$ .

в.) Оценить абсолютную и относительную погрешность измеренных значений сопротивлений.

г.) Оценить относительное расхождение между расчетными значениями сопротивлений, вычисленными и измеренными.



**3.4.** Сделать вывод по результатам работы.

#### **4. Вопросы для самоподготовки**

**4.1.** Что называется постоянным электрическим током? Какими параметрами он характеризуется?

**4.2.** Сформулируйте закон Ома для участка цепи, содержащего и не содержащего ЭДС.

**4.3.** В чем заключается физическая сущность сопротивления по классическим представлениям?

**4.4.** Сформулируйте основные соотношения для силы тока и напряжения при последовательном и параллельном соединении сопротивлений.

**4.5.** Сформулируйте законы Ома и Джоуля – Ленца в дифференциальной форме.

**4.6.** В чем состоят недостатки классической электронной теории электропроводности металлов?

**4.7.** Сформулируйте закон Видемана – Франца.

**4.8.** В чем заключается физический смысл ЭДС?

**4.9.** Сформулируйте правила Кирхгофа и определите, сколько уравнений необходимо составить по первому закону и сколько по второму для расчета неизвестных токов.

### **IV. Лабораторная работа №3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗИСТИВНОГО ПРОВОДА**

#### **1. Цель работы**

Освоить метод вольтметра – амперметра для измерения удельного сопротивления резистивного провода.

#### **2. Подготовка к работе**

Изучить теоретические положения, касающиеся данного явления по литературным источникам [1] – гл.18, [2] – гл. 12, [3] – гл. V. Для выполнения работы студент должен знать: а) законы постоянного тока; б) физическую сущность сопротивления проводника; в) как рассчитывать погрешность электроизмерительных приборов; г) как рассчитывать погрешность косвенных и прямых измерений; д) как работает лабораторная установка.

### 3. Выполнение работы

#### 3.1. Описание лабораторного стенда

Общий вид установки представлен на рис. 4.1. Основание оснащено регулируемыми винтами, которые позволяют произвести выравнивание положения прибора. К основанию прикреплена колонна с нанесённой метрической шкалой. На колонне смонтированы два неподвижных кронштейна и один подвижный кронштейн, который может передвигаться вдоль колонны и фиксироваться в любом положении. Между кронштейнами натянут металлический провод, который прикреплён к зажимам с помощью винтов. Через контакт на подвижном кронштейне обеспечивается хорошее соединение с проводом. Измерительная часть установки находится в корпусе, укрепленном на основании установки.



Рис. 4.1. Общий вид установки

Электрическая схема прибора обеспечивает преобразование переменного напряжения от сети в постоянное, которое через потенциометр подаётся на измерительную цепь. С помощью переключателя 3 осуществляется работа по

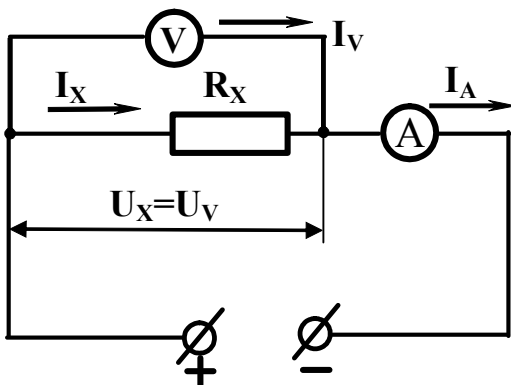


Рис. 4.2. Схема измерения (I)

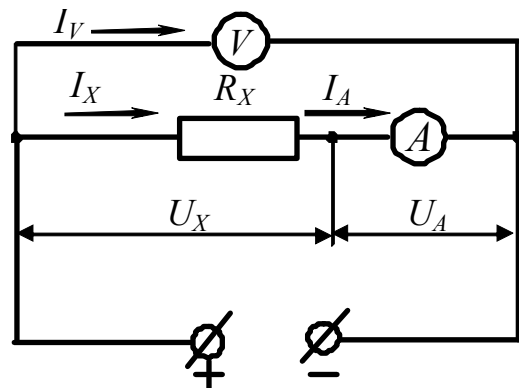


Рис. 4.3. Схема измерения (II)

схеме (I) (рис. 4.2), если переключатель 3 нажат, либо по схеме (II) (рис. 4.3), если переключатель отжат. Сопротивление: вольтметра  $R_V = 2500$  Ом, амперметра  $R_A = 0,15$  Ом. Диаметр провода (стальной)  $d = 0,36$  мм.

### 3.2. Методика измерений и расчёта

Для схемы измерения (I) (рис. 4.2.) показания амперметра  $I_A$  не соответствуют току  $I_X$ , идущему через неизвестное сопротивление:

$$I_A = I_X + I_V = I_X + \frac{U_V}{R_V},$$

где  $R_V$  – сопротивление вольтметра.

Тогда неизвестное сопротивление будет равно:

$$R_{X(I)} = \frac{U_X}{I_X} = \frac{U_X}{I_A - I_V} = \frac{U_X}{I_A - \frac{U_V}{R_V}}. \quad (4.1)$$

В схеме измерения (II) (рис. 4.3) показание вольтметра  $U_V$  не соответствует напряжению на концах неизвестного сопротивления  $U_X$ , так как оно равно сумме напряжений:

$$U_V = U_X + U_A = U_X + I_A \cdot R_A,$$

где  $R_A$  – сопротивление амперметра.

Тогда неизвестное сопротивление будет равно:

$$R_{X(II)} = \frac{U_X}{I_X} = \frac{U_V - U_A}{I_A} = \frac{U_V}{I_A} - R_A. \quad (4.2)$$

Как видно из формул (4.1) и (4.2), при измерении сопротивления методом амперметра – вольтметра по схеме (I) в расчётную формулу входит сопротивление вольтметра  $R_V$ , а по схеме (II) – сопротивление амперметра  $R_A$ .

В случае, если сопротивления приборов неизвестны, то неизвестное сопротивление рассчитывают по упрощённой формуле:

$$R'_X = \frac{U_V}{I_A}. \quad (4.3)$$

В этом случае возникает относительная методическая погрешность измерения  $\varepsilon_m$ , равная:

$$\varepsilon_m = \frac{|R_X - R'_X|}{R_X} \cdot 100\%, \quad (4.4)$$

где  $R_X$  – истинное значение измеряемого сопротивления, рассчитанное по формуле (4.1) или (4.2) в зависимости от используемой схемы измерения.

Относительная методическая погрешность измерения для схемы (I):

$$\varepsilon_{m(I)} = \frac{R_X}{R_X + R_V} \cdot 100\% = \frac{1}{1 + \frac{R_V}{R_X}} \cdot 100\%. \quad (4.5)$$

Относительная методическая погрешность измерения для схемы (II):

$$\varepsilon_{m(II)} = \frac{R_A}{R_X} \cdot 100\%. \quad (4.6)$$

Таким образом, первую схему (I) измерения можно использовать, когда измеряемые сопротивления во много раз меньше сопротивления вольтметра ( $R_V \gg R_X$ ), а вторую схему (II) измерения можно использовать, когда измеряемые сопротивления во много раз больше сопротивления амперметра ( $R_X \gg R_A$ ). Следует отметить, что рассмотренный метод не обеспечивает высокой точности, так как погрешность измерения сопротивления этим методом всегда больше суммы *приведённых погрешностей* обоих приборов (1.3, 1.4).

### 3.3. Порядок выполнения работы

#### 3.3.1. Подготовка установки к работе

- а.) Включить прибор в сеть, затем нажать клавишу 1 рис. 4.1.
- б.) Нажать клавишу 2. Это позволяет измерять сопротивление провода по методу амперметра – вольтметра.
- в.) Отжать клавишу 3, если измерения ведутся по схеме (I), и нажать на клавишу 3, если измерения осуществляются по схеме (II).

#### 3.3.2. Определение сопротивления провода по схеме (I)

- а.) Передвинуть подвижный кронштейн так, чтобы рабочая длина провода составляла более 0,6 его длины относительно основания.

б.) Нажать клавишу 3. Потенциометр поставить в положение минимума снимаемого напряжения.

в.) Снять вольт-амперную зависимость (показания приборов для значений напряжения  $U_V$  и тока  $I_A$  занести в табл. 4.1).

Таблица 4.1

Результаты измерения вольт-амперной зависимости по схеме (I)

№	$U_V$	$I_A$	$I_X$	$R'_{X(I)}$	$R_{X(I)}$	$\varepsilon_V$	$\varepsilon_A$	$\varepsilon_{m(I)}$
	В	А	А	Ом	Ом	%	%	%
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

г.) Построить на рис. 1 отчёта график вольт-амперной зависимости  $U_V(I_A)$ , откладывая по оси абсцисс ток  $I_A$  по оси ординат напряжение  $U_V$ . Тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс, проведённой через точки графика, определяет омическое сопротивление, как частное от деления напряжения на вольтметре на суммарный ток через неизвестное сопротивление и вольтметр

$$R'_{X(I)} = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

д.) По формуле  $I_X = I_A - I_V = I_A - \frac{U_V}{R_V}$  рассчитать ток через неизвестное сопротивление, данные занести в табл. 4.1. Найти неизвестное сопротивление, определяемое по схеме (I)

$$R_{X(I)} = \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

е.) Рассчитать относительную погрешность измерений для различных значений тока и напряжения:





д.) По формуле  $U_X = U_V - U_A = U_V - I_A \cdot R_A$  рассчитать напряжение на неизвестном сопротивлении, его величину занести в табл. 4.2. Найти неизвестное сопротивление, определяемое по схеме (II)

$$R_{X(II)} = \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

е.) Рассчитать относительную погрешность измерений для различных значений тока и напряжения:

$$\varepsilon = \gamma \frac{X_{\text{пред}}}{X} \%.$$

Рассчитать относительную методическую погрешность измерения для схемы (II) по формуле (4.6).

ж.) Рассчитать абсолютную погрешность измерений:  $\Delta R = R_{X(II)} \cdot \varepsilon_{R(II)}$ , где  $\varepsilon_{R(II)} = \sqrt{\varepsilon_V^2 + \varepsilon_A^2 + \varepsilon_{m(II)}^2}$  – относительная погрешность определения сопротивления;  $\varepsilon_V$  – максимальная относительная погрешность вольтметра;  $\varepsilon_A$  – максимальная относительная погрешность амперметра.

### 3.3.4. Определение удельного сопротивления провода

а.) Используя схему измерения, которая даёт меньшую погрешность, снять зависимость тока от максимального напряжения при различных значениях рабочей длины провода. Результаты занести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

*Измерения напряжения и тока в зависимости от длины провода*

№	$\ell$	$U_V$	$I_A$	$\frac{\ell}{S}$	$R$	$\rho$
	м	В	А	м <sup>-1</sup>	Ом	Ом·м
1						
2						
3						
4						
5						

**б.)** Построить на рис. 3 отчёта зависимость между сопротивлением  $R = \frac{U}{I}$  и отношением длины провода к его сечению ( $S = \frac{\pi d^2}{4}$ ), откладывая по оси абсцисс  $\frac{\ell}{S}$ , по оси ординат сопротивление  $R = \frac{U}{I}$ . Тангенс угла наклона прямой  $\operatorname{tg} \varphi_3$ , проведённой через точки графика (методом наименьших квадратов, экспериментальные точки должны располагаться примерно поровну по обеим сторонам прямой), определяет неизвестное удельное сопротивление

$$\rho = \operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{\Delta R}{\Delta \left( \frac{\ell}{S} \right)}.$$

**в.)** Рассчитать абсолютную погрешность измерений:  $\Delta \rho = \langle \rho \rangle \cdot \varepsilon_\rho$ , где  $\varepsilon_\rho = \sqrt{\varepsilon_V^2 + \varepsilon_A^2 + \varepsilon_\ell^2 + 4\varepsilon_d^2}$  – относительная погрешность определения удельного сопротивления;  $\varepsilon_V$  – максимальная относительная погрешность вольтметра;  $\varepsilon_A$  – максимальная относительная погрешность амперметра;  $\varepsilon_\ell$  – относительная погрешность определения длины;  $\varepsilon_d$  – относительная погрешность определения диаметра.

**3.4.** Сделать выводы.

#### **4. Вопросы для самоподготовки**

4.1. Что такое сопротивление? От чего оно зависит и что определяет в цепи постоянного тока?

4.2. Какие существуют способы определения сопротивления?

4.3. Как записывается закон Ома для пассивного и активного участков цепи? Как учитывается направление тока и ЭДС?

4.4. Чем отличаются схемы измерения сопротивления (I) и (II)?

4.5. Каким образом, зная класс точности прибора найти абсолютную погрешность измерения?

4.6. При каких значениях неизвестного сопротивления и сопротивлений приборов можно использовать (I) схему измерения,

если задано, что точность измерений должна быть меньше 3%; 10%; 15%?

4.7. При каких значениях неизвестного сопротивления и сопротивлений приборов можно использовать (II) схему измерения, если задано, что точность измерений должна быть меньше 3%; 10%; 15%?

4.8. Дан многопредельный амперметр на 30 мА, 150 мА и 300 мА. Класс точности прибора 0,2. Определите абсолютную погрешность прибора для каждого предела измерения.

4.9. Какова природа сопротивления?

4.10. В чём заключается закон Видемана – Франца?

## **V. Лабораторная работа №4.**

### **ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

#### **1. Цель работы**

Изучить температурную зависимость электропроводности металлов и полупроводников (ПП).

#### **2. Подготовка к работе**

Изучить теоретические положения, касающиеся данного явления по литературным источникам [1] – гл.18, 19, [2] – гл. 12, 13, [3] – гл. V, XI. Для выполнения работы студент должен знать: а) классическую теорию теплопроводности; б) длину волн де Бройля; в) коэффициент рассеяния электронных волн; г) типы кристаллических решеток металлов; д) расчёт энергии Тепловых колебаний ионов решетки; е) основы зонной теории проводников и полупроводников.

#### **3. Выполнение работы**

##### **3.1. Описание лабораторного стенда**

Исследуемый образец представляет металлическое или полупроводниковое сопротивление в герметизированной оболочке, помещенный в пробирку с маслом. Это предохраняет образец от повреждений и обеспечивает хороший теплообмен. Нагрев образца осуществляется печкой. Для измерения температуры образца при-

меняется термопара. Сопротивление измеряется омметром. На рис. 5.1 дана блок-схема установки.

### 3.2. Методика измерений и расчёта

#### 3.2.1. Расчет коэффициента $\mu$ рассеяния электронных волн в металле

Согласно представлениям квантовой механики электроны, создающие ток проводимости в металле, проявляют волновые свойства, т. е. движущемуся электрону можно поставить в соответствие волну длиной

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e \langle v \rangle}, \quad (5.1)$$

где  $h$  – постоянная Планка;

$m_e$  – масса электрона;  $\langle v \rangle$  – его средняя скорость.

Тогда сопротивление металла можно объяснить рассеянием электронных волн на центрах рассеяния в кристаллической решетке. Величина рассеяния и, следовательно, сопротивление определяется коэффициентом рассеяния  $\mu$ .

#### 3.2.2. Сопротивление полупроводников

Уменьшение сопротивления полупроводника при нагреве объясняет зонная теория проводимости полупроводников.

Согласно квантовой теории сопротивление полупроводника изменяется с температурой по формуле

$$R = \frac{e^{\frac{\Delta E}{kT}}}{A}, \quad (5.2)$$

где  $\Delta E$  – энергия активации полупроводника;  $k$  – постоянная Больцмана;  $A$  – некоторая постоянная;  $T$  – температура по шкале Кельвина. Логарифмируя выражение (5.2), получаем линейную зависимость  $\ln R = f(1/T)$ :

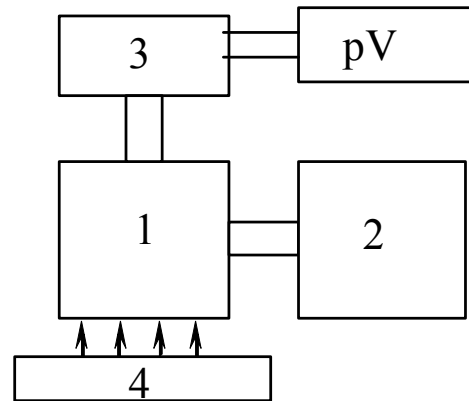


Рис. 3.13. Блок-схема установки:

- 1 – термостат с образцом;
- 2 – омметр; 3 – термопара;
- 4 – печь; 5 – милливольтметр

$$\ln R = \ln \frac{1}{A} + \frac{\Delta E}{k} \left( \frac{1}{T} \right). \quad (5.3)$$

### 3.3. Определение характеристик электропроводности металлов.

#### 3.3.1. Определение температурного коэффициента сопротивления металла и температурного коэффициента рассеяния электронных волн в металле

Для получения температурной зависимости сопротивления металлов первые измерения сопротивления проводят при комнатной температуре. Дальнейшие измерения  $R_t$  ведут при включенном нагревателе через каждые  $5^\circ$  до  $(70 \div 80)^\circ \text{C}$ . Одновременно с измерением  $R_t$  снимают показания милливольтметра, а температура образца ( $t^\circ \text{C}$ ) определяется по прилагаемой зависимости  $t^\circ \text{C} = f(U)$  (мВ). Данные занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Зависимость сопротивления металла от температуры

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_t$ Ом										
$U$ мВ										
$t$ $^\circ \text{C}$										

Для определения  $R_0$  (сопротивления образца при  $t = 0^\circ \text{C}$ ) и  $\alpha$  строится график  $R = R(t)$ . Ось абсцисс – ось температуры  $t$  необходимо начинать с  $0^\circ \text{C}$ , в то время как ось ординат – ось сопротивления  $R$  желательно начать со значения  $R < R_{\min}$ . Проводят прямую между экспериментальными точками (геометри-

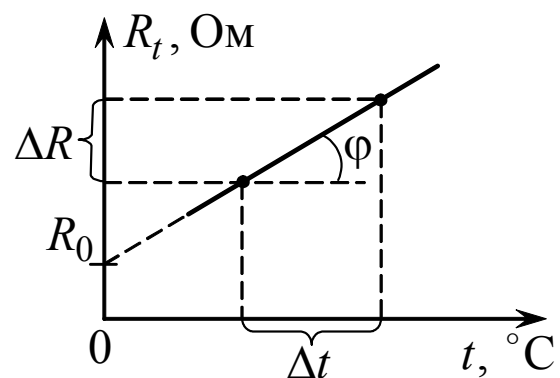


Рис. 5.2. Зависимость сопротивления металла от температуры

ческое усреднение) и экстраполируют ее до пересечения с осью ординат, определяя таким образом значение  $R_0$  (см. рис. 5.2).

Аналитически полученная зависимость  $R = R(t)$  описывается формулой

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (5.4)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления металла.

Из формулы (5.4) следует выражение для  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t} = \frac{\Delta R}{R_0 \Delta t}. \quad (5.5)$$

Таким образом, температурный коэффициент сопротивления металла есть относительное изменение сопротивления проводника при изменении его температуры на  $1^\circ\text{C}$ . Величина температурного коэффициента металла зависит от структуры кристаллической решетки, упругих свойств металла, вида связи ионов решетки металла. Для большинства металлов температурный коэффициент равен или слегка превышает величину  $1/273$ , т. е.  $\alpha \geq 1/273$ . Среднее значение коэффициента  $\langle \alpha \rangle$  вычисляется по формуле (5.7), где  $\frac{\Delta R}{\Delta t} = \text{tg}\varphi$  определяется из графика (см. рис. 5.2). Полученные значения  $R_0$  и  $\langle \alpha \rangle$  занести в табл.5.2.

### 3.3.2. Определение температурного коэффициента рассеяния электронных волн в металле

Студентам предлагается коэффициент  $\mu$  определить двумя способами.

1. На основе значения температурного коэффициента проводимости металла  $\alpha$ :

$$\mu_{\text{э}} = \frac{\rho_0 \alpha T_0 n e^2}{2m \langle v_{\text{KB}} \rangle}, \quad (5.6)$$

где  $\rho_0$  – удельное сопротивление изучаемого металла (меди) при  $T_0 = 273 \text{ K}$  (находят по таблице);  $n$  – концентрация, т. е. число электронов проводимости в единице объема металла;  $e$  – заряд электрона;  $m$  – масса электрона;  $\langle v_{\text{KB}} \rangle$  – средняя квадратичная скорость теплового движения электронов.

2. На основе учета энергии тепловых колебаний ионов решетки и макроскопической теории упругости:

$$\mu_T = \frac{2\pi n k T_0}{E a}, \quad (5.7)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $E$  – модуль Юнга;  $a$  – постоянная решетки, которая составляет порядка  $10^{-10}$  м. Данные для расчета  $\mu_\varepsilon$  и  $\mu_T$  приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

*Данные для расчета коэффициента рассеяния электронных волн*

$\rho_0$	$n$	$\langle v_{KB} \rangle$	$a$	$E$	$k$
Ом·м	м <sup>-3</sup>	м/с	м	Н/м	Дж/К
$1,6 \cdot 10^{-8}$	$10^{28}$	$10^5$	$10^{-10}$	$12 \cdot 10^{10}$	$1,38 \cdot 10^{-23}$

Полученные значения  $\mu_\varepsilon$  и  $\mu_T$  занести в табл. 5.3 и определить их расходимость  $\varepsilon$ .

Таблица 5.3

*Сводная таблица данных по определению коэффициентов  $\alpha$  и  $\mu$*

$R_0$	$\langle \alpha \rangle$	$\mu_\varepsilon$	$\mu_T$	$\varepsilon$
Ом	град <sup>-1</sup>	м <sup>-1</sup>	м <sup>-1</sup>	%

### **3.4. Определение характеристик проводимости полупроводников.**

#### **3.4.1. Изучение зависимости сопротивления полупроводников от температуры**

Первые измерения сопротивления полупроводника провести при комнатной температуре. Так как сопротивление полупроводника больше, чем у металлов, и меньше, чем у диэлектриков, начальное сопротивление полупроводника может иметь значение порядка 1 кОм. Дальнейшие измерения  $R$  проводить при включенном нагревателе через каждые 5°C до (70÷80)°C. Нагреть до 100°C и до-



водить воду в колбе до кипения не рекомендуется. Значения  $R$  и  $t$  занести в табл. 5.4.

Таблица 5.4

*Результаты измерения  $R$ ,  $T$  и определения энергии активации*

№ п/п	$t$	$T$	$R$	$1/T$	$\ln R$	$\langle \Delta E \rangle$
	°С	К	Ом	К <sup>-1</sup>		эВ
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Рассчитать  $\ln R$  и  $(1/T)$  на основе экспериментальных данных, занести в табл. 5.4 и построить графическую зависимость  $\ln R = f(1/T)$ .

### **3.4.2 Определение энергии активации $\Delta E$ примесного полупроводника**

Энергия активации примесного полупроводника есть энергия, которую необходимо сообщить электрону в полупроводнике  $n$ -типа, чтобы он перешел с донорного энергетического уровня примеси в зону проводимости, а в полупроводнике  $p$ -типа – с верхнего уровня валентной зоны на акцепторный уровень примеси, в результате чего образуется дырка.

Энергию активации можно найти, используя график линейной зависимости  $\ln R = f(1/T)$ . Действительно, из формулы (5.7) следует, что  $\frac{\Delta(\ln R)}{\Delta(1/T)} = \frac{\Delta E}{k}$ , с другой стороны,  $\frac{\Delta(\ln R)}{\Delta(1/T)} = \text{tg}\varphi$ , где  $\varphi$  – угол наклона графика  $\ln R = f(1/T)$  относительно оси  $(1/T)$ .

Отсюда 
$$\langle \Delta E \rangle = \frac{\Delta(\ln R)}{\Delta(1/T)} \cdot k.$$

Полученное значение энергии активации  $\langle \Delta E \rangle$  в джоулях [Дж] перевести в электрон-вольты [эВ], занести в табл. 5.4 и сравнить с энергией активации чистого полупроводника, которая для германия составляет порядка 1 эВ. Сделать выводы.

### 3.5. Вопросы для самоподготовки

3.5.1. На чем основано утверждение о существовании электронных волн? Сколько составляет длина волны де Бройля для валентных электронов?

3.5.2. Как графически и математически представить зависимость сопротивления металлов от температуры? Что собой представляет температурный коэффициент сопротивления металлов?

3.5.3. Как на основе графика зависимости  $R$  от  $t$  °С рассчитать среднее значение температурного коэффициента сопротивления металла?

3.5.4. Как определяется коэффициент рассеяния электронных волн в металле?

3.5.5. Как сопротивление полупроводников (ПП) зависит от температуры?

3.5.6. Как повышение температуры влияет на количество электронов или дырок в примесных ПП?

## VI. Лабораторная работа №5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ МЕТАЛЛА

### 1. Цель работы

Экспериментальное изучение вольтамперной характеристики диода и определение работы выхода электронов из вольфрама методом прямых Ричардсона.

### 2. Подготовка к работе

Изучить теоретические положения, касающиеся данного явления по литературным источникам [1] – гл.18, [2] – гл. 13, [3] – гл.

XI. Для выполнения работы студент должен знать: а) устройство диода; б) примерный ход вольт-амперной характеристики диода и её зависимости от температуры катода; в) понятие работы выхода; г) метод прямых Ричардсона д) данные методические указания; е) ответить на контрольные вопросы.

### 3. Выполнение работы

#### 3.1. Описание лабораторного стенда

Блок-схема установки приведена на рис. 6.1. Электрическая схема представлена на рис. 6.2.

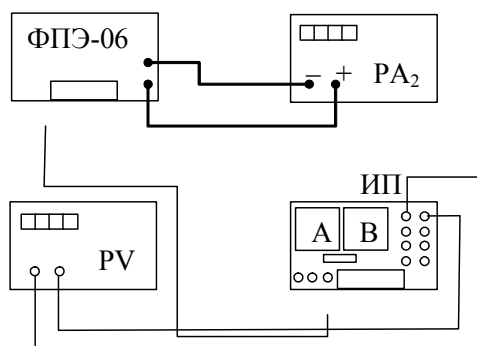


Рис. 6.1. Блок-схема установки

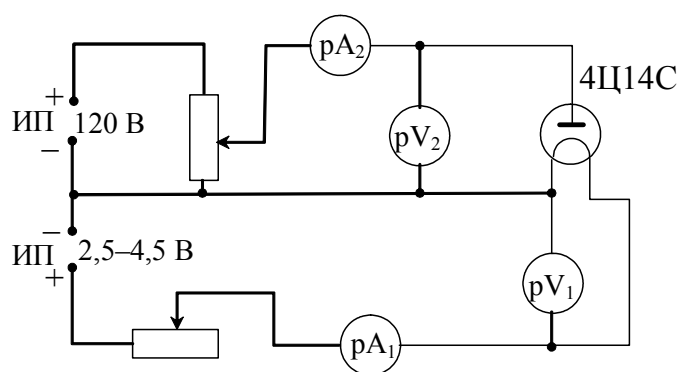


Рис. 6.2. Принципиальная электрическая схема установки

В работе используется ламповый диод 4Ц14С с вольфрамовым катодом прямого накала. Нагрев катода осуществляется постоянным током. Амперметр и вольтметр в цепи накала служат для определения мощности, расходуемой на нагрев катода, что необходимо для определения температуры.

Модуль ФПЭ-06 подключен соединительным кабелем к источнику питания ИП (рис. 6.1). Амперметр «А» на панели источника питания служит для контроля тока накала  $I_n$ , максимальное значение которого не должно превышать 2,2 А. Плавная регулировка напряжения накала осуществляется ручкой, расположенной под амперметром.

Напряжение накала  $U_n$  измеряется вольтметром  $pV_1$ , который подключается к тем клеммам на источнике питания ИП, где указано напряжение 2,5–4,5 В.

Вольтметр на панели источника  $pV_2$  питания ИП измеряет анодное напряжение  $U_a$ , регулировка которого осуществляется ручкой на панели ИП, расположенной непосредственно под вольтметром.

Для измерения анодного тока  $I_a$  используется миллиамперметр  $pA_2$ , который подключается на модуле ФПЭ-06 к клеммам РА (измеряет ток до 20 мА).

## 3.2. Методика измерений и расчёта

### 3.2.1. Термоэлектронная эмиссия

Термоэлектронную эмиссию можно изучать с помощью вакуумного диода. Он представляет собой стеклянную трубку, откачанную до глубокого вакуума, в которую впаяны два электрода: накаливаемый током катод К и холодный электрод, собирающий термоэлектроны, – анод А.

На рис. 6.3 изображена схема включения диода. Ток в этой цепи появляется только в том случае, когда положительный полюс батареи соединен с анодом, а отрицательный с катодом. Это подтверждает тот факт, что катод испускает отрицательные частицы – электроны. Сила термоэлектронного тока в диоде зависит от величины потенциала анода относительно катода.

На рис. 6.4 показана зависимость силы тока  $I_a$  в диоде от анодного напряжения  $U_a$  – вольтамперная характеристика. Она нелинейная, значит, закон Ома не выполняется. Когда потенциал анода равен нулю, сила тока мала. Она определяется лишь са-

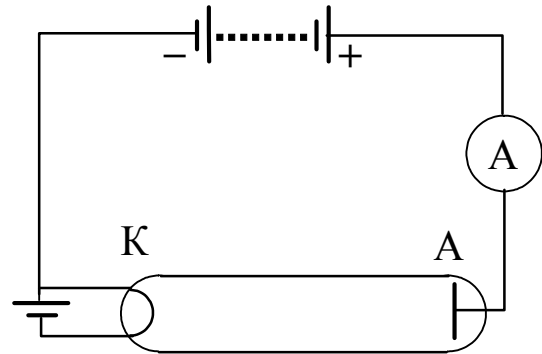


Рис. 6.3. Схема включения лампового диода в электрическую цепь

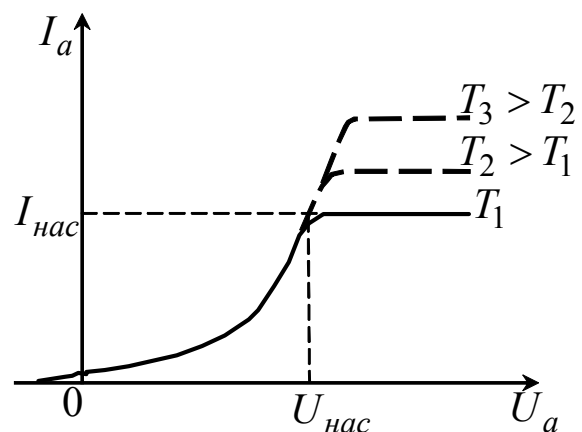


Рис. 6.4. Зависимость силы тока в диоде от анодного напряжения при разной температуре катода

мыми быстрыми термоэлектронами, способными достигнуть анода. При небольших анодных напряжениях сила тока также мала и медленно увеличивается с увеличением напряжения. На этом участке не все термоэлектроны, эмитируемые катодом, достигают анода, так как этому препятствует электронное облако. При дальнейшем росте  $U_a$  электронное облако постепенно рассеивается и сила тока растет быстрее. При  $U_a = U_{нас}$  наступает насыщение: все электроны, вылетевшие из катода, достигают анода. Максимальный термоэлектронный ток  $I_{нас}$ , возможный при данной температуре катода, называется током насыщения. С увеличением температуры катода увеличивается ток насыщения. Одновременно незначительно увеличивается и анодное напряжение, при котором наступает насыщение.

Теоретически зависимость анодного тока от анодного напряжения была получена И. Ленгмюром и С.А. Богуславским, которая справедлива при  $I \leq I_{нас}$  и  $U \leq U_{нас}$

$$I_a = B' U_a^{\frac{3}{2}},$$

где  $B'$  – коэффициент пропорциональности, зависящий только от формы, размеров и взаимного расположения электродов.

Этот закон часто называют законом «трех вторых».

При повышении температуры катода увеличивается скорость хаотического движения электронов в металле. При этом число электронов, эмитируемых катодом, резко возрастает. Было показано, что плотность тока насыщения на катоде удовлетворяет формуле Ричардсона – Дешмана:

$$j_{нас} = BT^2 \exp\left(-\frac{A}{kT}\right), \quad (6.1)$$

где  $B$  – постоянная эмиссии;  $A$  – работа выхода;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – термодинамическая температура;  $kT$  – средняя энергия теплового движения электронов.

Для вольфрамового катода работа выхода  $A = 4,54 \text{ эВ} = 7,26 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ . При температуре  $T = 2000 \text{ К}$  средняя тепловая энергия электронов  $kT = 2,76 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$ .

Для получения большой плотности токов насыщения при сравнительно невысокой рабочей температуре катода нужно применять катоды с малой работой выхода. Например, оксидные катоды, состоящие из металлической тугоплавкой подложки, поверхность которой покрыта пленкой оксидов щелочноземельных металлов (BaO и SrO или BaO, SrO и CaO) толщиной в десятки тысяч атомных слоев.

### 3.2.2. Метод прямых Ричардсона

Измеряя зависимость тока насыщения от температуры, можно определить работу выхода для данного металла. Для этого прологарифмируем уравнение (6.1):

$$\ln \frac{j_{нас}}{T^2} = \ln B - \frac{A}{k} \cdot \frac{1}{T}.$$

Перейдем от натуральных логарифмов к десятичным:

$$\lg \frac{j_{нас}}{T^2} = \lg B - \frac{A}{k} \cdot \frac{1}{T} \lg e.$$

Подставляя  $\lg e = 0,43$ , получим

$$\lg \frac{j_{нас}}{T^2} = \lg B - \frac{0,43A}{k} \cdot \frac{1}{T}.$$

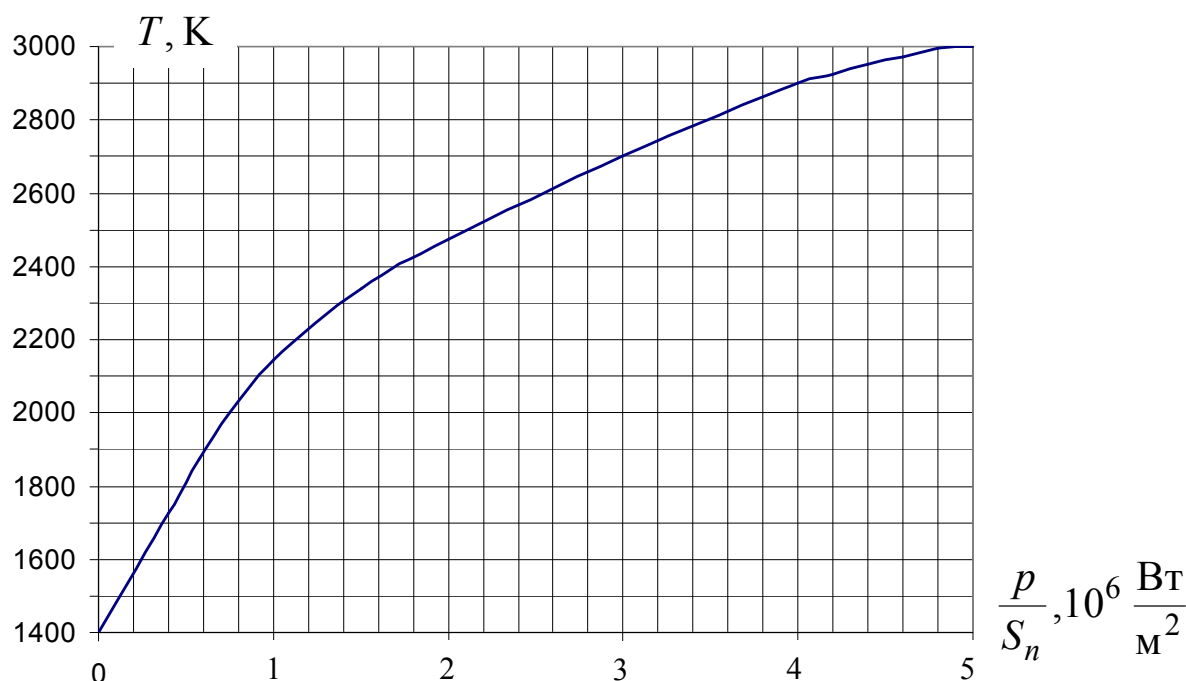
Такой вид уравнения удобен для его экспериментальной проверки.

График зависимости  $\lg j_{нас} / T^2$  от  $1/T$  является прямой линией с угловым коэффициентом  $0,43A/k$ . Определив тангенс наклона прямой к оси абсцисс, рассчитаем работу выхода:

$$A = \frac{k \cdot \operatorname{tg} \alpha}{0,43}. \quad (6.2)$$

Для построения графика необходимо знать плотность анодного тока насыщения  $j_{нас}$  и температуру катода  $T$ . Подводимая к катоду мощность расходуется в вакуумной лампе в основном на тепловое излучение. Для вольфрама была экспериментально определена зависимость температуры катода от расходуемой на его нагрев джоулевой мощности, приходящейся на единицу площади поверхности катода. Данная зависимость представлена на рис. 6.5. Зная

мощность, подводимую к катоду, по графику можно определить температуру катода. Мощность можно рассчитать, если измерить ток накала и напряжение.



*Рис. 6.5. Экспериментальная зависимость температуры катода от подводимой удельной мощности*

### 3.3. Выполнение работы

**3.3.1.** Установить напряжение накала  $U_n$  3,7 В. Измерить ток накала  $I_n$ . Увеличивая анодное напряжение  $U_a$  от 10 до 100 В через каждые 10 В, повторить измерения для 5–7 значений напряжения накала  $U_n$  в интервале от 3,7 до 4,3 В. Данные занести в табл. 6.1.

**3.3.2.** Для каждого значения тока накала  $I_n$  построить вольт-амперную характеристику. Точку перегиба полученной кривой считать точкой насыщения ( $I_{нас}$ ).

**3.3.3.** Для всех значений напряжения накала  $U_n$  рассчитать мощность, выделенную на катоде, по формуле  $P = I_n U_n$ , а также удельную мощность, т. е. приходящуюся на единицу площади поверхности катода. Для данной лампы площадь поверхности катода  $S_n$  принять равной  $S_n = 3,52 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ .





**3.3.6.** Построить график зависимости  $\lg \frac{J_{нас}}{T^2}$  от  $\frac{1}{T}$ , откладывая по оси абсцисс  $\frac{1}{T}$ , а по оси ординат  $\lg \frac{J_{нас}}{T^2}$ .

**3.3.7.** Определить тангенс угла наклона полученной прямой к оси абсцисс и рассчитать работу выхода по формуле (6.2). Сравнить полученное значение работы выхода электронов из вольфрама со справочным.

**3.3.8.** Сделать вывод.

### **3.4. Вопросы для самоподготовки**

**3.4.1.** В чем особенность строения металлических твердых тел?

**3.4.2.** Опишите поведение электронов в потенциальной яме с помощью распределения Ферми–Дирака.

**3.4.3.** Чем обусловлена работа выхода электронов из металла?

**3.4.4.** Что такое «двойной электрический слой»?

**3.4.5.** В чём заключаются особенности термоэлектронной эмиссии?

**3.4.6.** Объясните зависимость термоэлектронного тока от анодного напряжения. Чем обусловлен ток насыщения?

**3.4.7.** Для чего служит метод прямых Ричардсона и как его применить?

## **VII. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

**1.** Детлаф, А. А. Курс физики : учеб. пособие для вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – 4-е изд., испр. – М. : Академия, 2007. – 720 с.

**2.** Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для инж.-техн. специальностей вузов / Т. И. Трофимова. – 14-е изд., стереотип. – М. : Академия, 2007. – 560 с.

**3.** Савельев, И. В. Курс общей физики : учеб. пособие: в 3 т. Т. 2 : Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И. В. Савельев. – 8-е изд., стереотип. – СПб. : Лань, 2007. – 496 с.

Составители

Валерий Васильевич Дырдин  
Анатолий Александрович Мальшин  
Татьяна Ивановна Янина

**ПОСТОЯННЫЙ ТОК**  
**Комплекс К-310.3**

Методические указания для лабораторных работ  
по разделу физики «Электродинамика»  
для студентов всех направлений и специальностей

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 20.04.2015. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе. Уч.-изд. л. 2,2.

Тираж 44 экз. Заказ .

КузГТУ, 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский центр КузГТУ, 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4 А.