

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ РАСТИТЕЛЬНЫХ  
ПОЛИМЕРОВ

---

Кафедра физики

# ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Методические указания  
к лабораторным работам № 2-31, 2-32, 2-41

Для всех факультетов

Санкт-Петербург  
2012 г.

УДК 53 /075.8/

Электромагнетизм: методические указания к лабораторным работам № 2-31б 2-32, 2-41/сост. В. И. Лейман, В. М. Максимов А.Л. Ашкалуни, О.Ю. Деркачева; под общей ред. профессора А. Л. Ашкалунина. - СПбГТУРП. – СПб., - 2012. – 39с.

Рецензенты: канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики СПбГТУРП М. Н. Полянский; канд. хим. наук, доцент кафедры физики СПбГТУРП А. В. Фёдоров.

Методические указания содержат описания трех лабораторных работ по темам: "Электронная теория проводимости" и "Термоэлектронная эмиссия". Предназначены для студентов всех факультетов дневной, вечерней и заочной форм обучения.

Подготовлены и рекомендованы к печати кафедрой физики ГОУВПО Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров (протокол № 6 от 2011 года).

Утверждены к изданию методической комиссией факультета ПЭ ГОУВПО СПб ГТУРП (протокол № от 2011 года).

Редактор и корректор Т. А. Смирнова.  
Техн. редактор Л.Я. Титова.

-----  
Подп. к печати . Формат 60x84/16 Бумага тип. № 1. Печать офсетная. Объем 2,5 печ. л., 2,5 уч.-изд. л. Тираж 300. Изд. № 52.

Цена "С". Заказ  
Ризограф ГОУВПО Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров, 198095, Санкт-Петербург, ул.Ивана Черных, 4.

© Санкт-Петербургский  
государственный технологи-  
ческий университет расти-  
тельных полимеров, 2012.

## ТЕМА 2-3. ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕОРИЯ ПРОВОДИМОСТИ

### *Классическая теория проводимости металлов*

Металлы представляют собой кристаллическую решетку, состоящую из положительных ионов и хаотически двигающихся между ними свободных электронов, образующих электронный газ (рис.1). Например, при образовании металлической меди нейтральные атомы меди отщепляют один электрон, который может перемещаться по всему металлу. Образовавшиеся положительные ионы меди располагаются в узлах кристаллической решетки. Электроны двигаются хаотически со скоростью около 100 км/с (при комнатной температуре) и сталкиваются в основном с ионами.

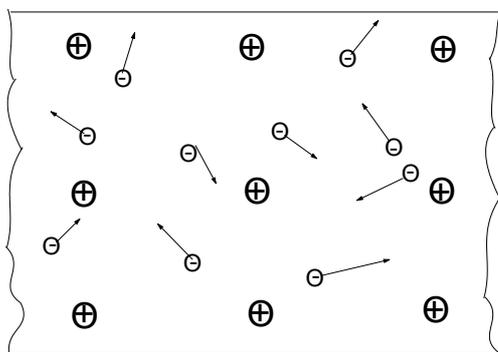


Рис. 1

При создании внешнего электрического поля напряженностью  $E$  (включение разности потенциалов между концами проводника) электроны приобретут дополнительную скорость в направлении действия сил поля. В результате возникнет направленный перенос зарядов - электрический ток. Под действием силы электрического поля  $F = eE$

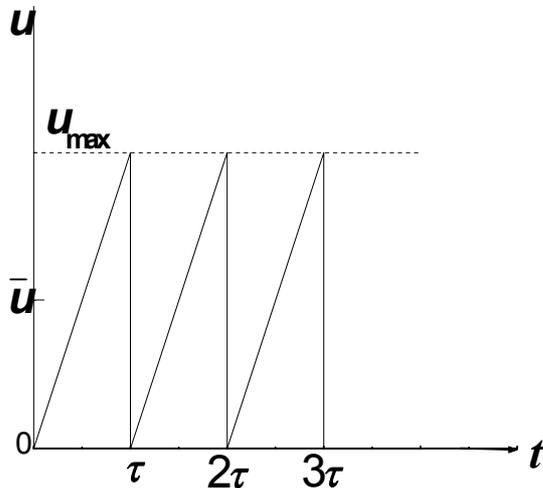
каждый электрон начнёт двигаться с ускорением, равным

$$a = \frac{F}{m} = \frac{eE}{m}, \quad (1)$$

где  $m$  - масса электрона,  $e$  - заряд электрона. Со временем скорость электрона будет возрастать  $u=at$ . Однако при столкновении с положительными ионами направление движения электрона изменяется случайным образом, при этом направленное движе-

ние переходит в хаотическое. За время свободного пробега  $\tau$  электронов скорость их дрейфа меняется от нуля до максимальной величины  $u_{max} = a\tau$  (рис.2). Тогда средняя скорость их

направленного движения с учетом (I), будет равна



$$\bar{u} = \frac{0 + u_{max}}{2} = \frac{eE}{2m} \tau. \quad (2)$$

Зная концентрацию электронов  $n$  в проводнике и их среднюю скорость дрейфа  $u$  можно вычислить плотность тока  $j$  в проводнике:

Рис. 2

$$j = ne\bar{u} \quad (3)$$

С учетом (2) получаем

$$j = \frac{ne^2\tau}{2m} E. \quad (4)$$

Время свободного пробега электронов  $\tau$  определяется отношением средней длины свободного пробега  $l$  к полной скорости электрона, состоящей из скорости хаотического движения  $v$  и скорости дрейфа  $\bar{u}$ . Но так как  $v \gg u$ , то  $\tau = l/v$ . Подставляя это значение  $\tau$  в (4), получим

$$j = \frac{ne^2l}{2mv} E = \sigma E, \quad (5)$$

т.е. плотность тока в проводнике пропорциональна напряженности поля, а это и есть формулировка закона Ома в дифференциальной форме. Коэффициент  $\sigma$  в выражении (5) называется удельной проводимостью металла:

$$\sigma = \frac{ne^2l}{2mv}, \quad (6)$$

обратная величина  $\rho = 1/\sigma$  называется удельным сопротивлением:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{2m\nu}{ne^2l} \quad (7)$$

Согласно теории идеального газа скорость хаотического движения электронов;

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad (8)$$

Отсюда следует, что сопротивление проводника должно возрасти пропорционально  $\sqrt{T}$ . В действительности сопротивление металлов в широком диапазоне температур линейно возрастает с ростом  $T$ . Причина этого расхождения объясняется квантовой теорией электропроводности, в которой учитывается уменьшение длины свободного пробега с ростом тепловых колебания кристаллической решетки, состоящей из положительных ионов ( $l \sim T^{-1}$ ). В то же время  $\nu$  мало меняется с ростом температуры. Отсюда следует, что

$$R \sim \rho \sim T \quad (9)$$

### *Выводы*

1. В отсутствие электрического поля электроны в проводнике совершают тепловое хаотическое движение.

2. При включении поля возникает направленное движение электронов - дрейф вдоль силовых линий поля (скорость направленного движения приобретает электронами между столкновениями их с ионами решетки).

3. Сопротивление металлов обусловлено столкновением электронов с положительными ионами. При этом направленное движение переходит в хаотическое, так как направление движения при столкновении меняется произвольным образом.

4. При столкновении энергия направленного движения электронов переходит в энергию теплового движения кристаллической решетки - джоулево тепло.

## *Понятие о зонной теории проводимости*

Как известно, электроны в атоме могут находиться только в стационарных состояниях, которым соответствуют определенные значения энергии электрона - *энергетические уровни*. При сближении атомов в кристаллах эти уровни расщепляются на большое число близких уровней, образуя разрешенную *энергетическую зону*. Число уровней в зоне очень велико - порядка числа атомов в кристалле, а расстояние (энергетическое) между соседними уровнями мало. Разрешенные зоны отделены друг от друга *запрещенными зонами* – интервалами энергий, в которых нет энергетических уровней. Наиболее внешние электроны атомов (валентные электроны) заполняют одну из разрешенных зон энергии в кристаллах - *валентную зону*. Это наиболее высокая зона, в которой имеются электроны при  $0^\circ \text{K}$ . Структура зон и их заполнение определяют электропроводящие свойства кристалла.

Заполнение энергетических зон в кристаллах определяется *принципом Паули*: на каждом энергетическом уровне может находиться не более одного электрона. В соответствии с этим принципом при  $0^\circ \text{K}$  электроны заполняют все уровни, начиная с самого нижнего до некоторого уровня.

В *диэлектриках* валентная зона полностью заполнена, и это приводит к отсутствию проводимости. Различные энергетические уровни электрона в валентной зоне соответствуют движению электрона с разной скоростью и в разных направлениях. Для того, чтобы возник ток под действием электрического поля необходимо чтобы увеличилась скорость и количество электронов, движущихся в направлении поля. Это соответствует переходу электронов на другие энергетические уровни. Но такой переход на уровни валентной зоны невозможен по принципу Паули, так как они уже все заполнены. Переход на уровни в более высокой зоне невозможен, так как ширина запрещенной зоны в диэлектриках  $3 - 10 \text{ эВ}$ , а электрическое поле может сообщить энергию не более  $10^{-8} \text{ эВ}$ . Таким образом, электрическое поле не

может изменить движение электронов в диэлектриках и вызвать появление электрического тока.

В *металлах* валентная зона заполнена частично. Поэтому под действием электрического поля электроны переходят на свободные уровни, т.е. изменяют свое движение и возникает ток. В переносе тока участвуют только электроны этой зоны, поэтому верхнюю частично заполненную зону называют зоной проводимости. Концентрация электронов в зоне проводимости металлов велика, порядка концентрации ионов, и не зависит от температуры.

В *полупроводниках* заполнение зон такое же, как и в диэлектриках. Поэтому при температурах, близких к  $0^\circ\text{K}$ , они не проводят электрический ток. Но ширина запрещенной зоны у них меньше чем у диэлектриков, она не превышает 3 эВ. Поэтому при более высоких температурах часть электронов из валентной зоны переходит за счет теплового движения в более высокую зону. Эти электроны под действием электрического поля легко изменяют свое движение, и возникает электрический ток. Эти электроны называются *электронами проводимости*, а зона, в которой они находятся – *зоной проводимости*.

На рис. 3 показана схема зон различных кристаллов, где  $o$  - электрон на данном уровне;  $V$  - валентная зона;  $C$  - зона проводимости;  $W_g$  - ширина запрещенной зоны;  $W$  - энергия электронов.

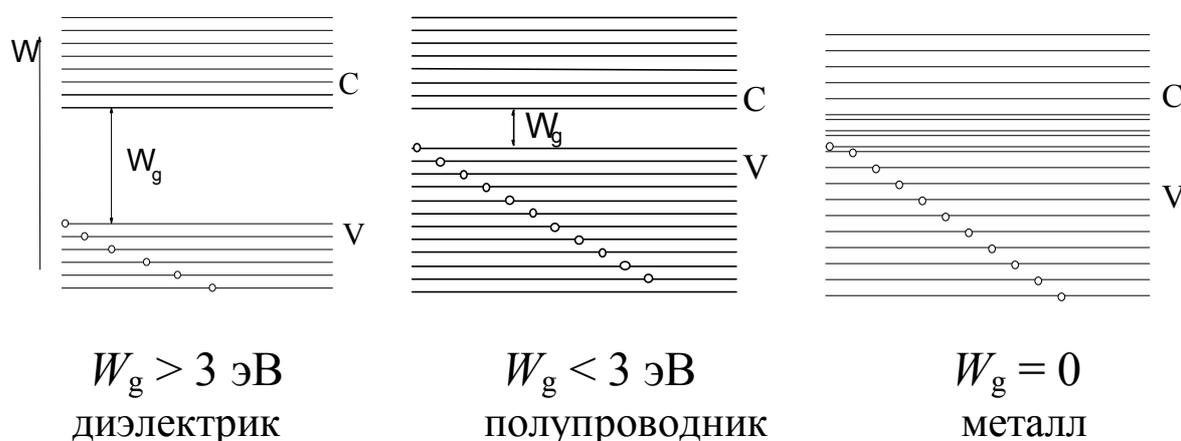


Рис. 3

Проводимость полупроводника, обусловленная электронами в зоне проводимости, называется электронной или  $n$  – проводимостью. Но после ухода части электронов из валентной зоны в зону проводимости в валентной зоне появляются вакантные уровни - дырки. Под действием внешнего поля электроны валентной зоны могут переходить на вакантные уровни, при этом также возникает ток. Движение электронов валентной зоны удобно описывать как движение вакансий - дырок, которые ведут себя как частицы с положительным зарядом. Проводимость полупроводника, обусловленная вакантными уровнями в валентной зоне, называется – дырочной проводимостью или проводимостью  $p$  - типа. Пусть  $n_-$  и  $n_+$  концентрации электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. В чистом полупроводнике

$$n_- = n_+ = n_0 \cdot \exp(-W_g/2kT).$$

Плотность тока в полупроводнике складывается из плотности тока электронов и дырок.  $j = en_-u_- + en_+u_+$ . Дырки и электроны имеют противоположные заряды, но они и двигаются в противоположные стороны, поэтому плотности их тока имеют один знак. Скорости направленного движения электронов и дырок пропорциональны напряженности поля

$u_+ = b_+E, u_- = b_-E$ .  $b_+$  и  $b_-$  называются подвижностями дырок и электронов.

С ростом температуры экспоненциально растет концентрация носителей тока, поэтому экспоненциально растет и удельная проводимость полупроводников:

$$\sigma = A e^{-\frac{W_g}{2kT}}. \quad (10)$$

Добавляя специальные примеси можно менять концентрацию носителей тока в полупроводнике. Донорные примеси отдают электроны в зону проводимости и увеличивают  $n$  - проводимость полупроводника. Акцепторные примеси забирают электроны из валентной зоны и создают дырочную проводимость. На рис.4 показана зонная схема собственного и примес-

ного полупроводника, где а - собственный полупроводник; б - полупроводник с донорной примесью; в - полупроводник с акцепторной примесью.

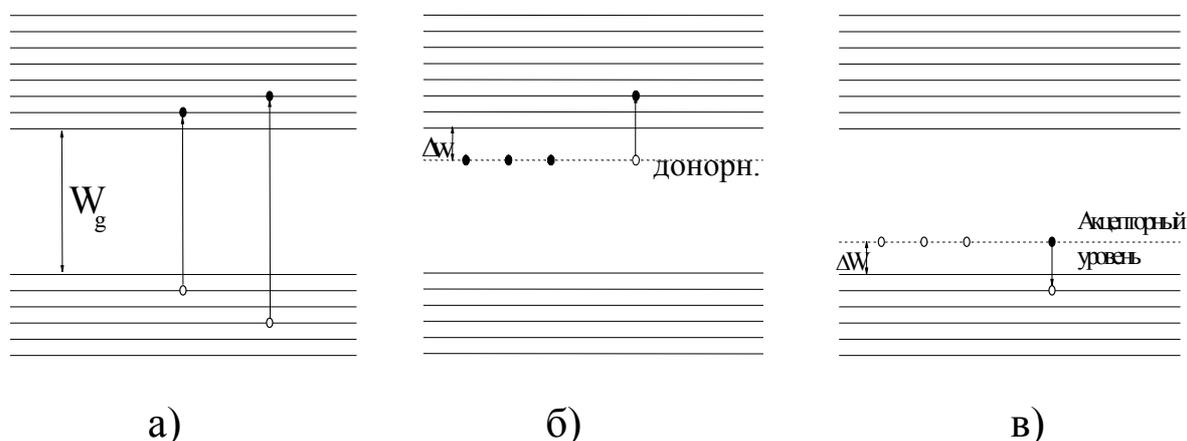


Рис. 4

С помощью примесей можно создавать полупроводники с чисто электронной ( $n$ -типа) и чисто дырочной ( $p$ -типа) проводимостью. Для примесных полупроводников;

$$\sigma = A e^{-\frac{\Delta W}{kT}}, \quad (13)$$

где  $\Delta W$  - энергия, необходимая для перевода электронов с донорных уровней в зону проводимости или валентных электронов на уровни акцепторной примеси.

### *Контактные явления. Термоэдс*

Внутри металла силы кулоновского притяжения, действующие на электроны со стороны положительных ионов кристаллической решетки, в среднем равны силам отталкивания между самими электронами. В результате средняя сила, действующая на каждый электрон, равна нулю и электрон движется свободно. По-иному обстоит дело на поверхности проводника. Допустим, электрон вылетел из металла. Тогда на поверхности возникает

избыточный положительный заряд, который мешает дальнейшему вылету электрона, удерживая его в металле.

Минимальная работа, которую нужно затратить, чтобы электрон покинул металл, называется *работой выхода*.

Чем больше работа выхода, тем труднее электрону вылететь из металла. Величина работы выхода зависит от химической природы металла и состояния его поверхности. Для чистых металлов она равна  $2 \div 6$  эВ.

Потенциальная энергия электрона вдали от металла равна нулю, внутри металла она отрицательна. Таким образом, металл представляет собой потенциальную "яму" для электронов. Полная энергия электрона в металле складывается из потенциальной и кинетической энергии. Работа выхода равна максимальной энергии электрона в металле взятой с обратным знаком.

На рис. 5 изображена зависимость энергии электрона от координаты. Потенциальная энергия изображается кривой - потенциальной ямой. Полная энергия сохраняется, она не зависит от координаты и изображается прямыми. Так как полная энергия не может быть меньше потенциальной, то при отрицательной энергии электроны могут двигаться только внутри ямы.

Наивысший, заполненный при абсолютном нуле температур уровень, называется уровнем Ферми (рис.5).

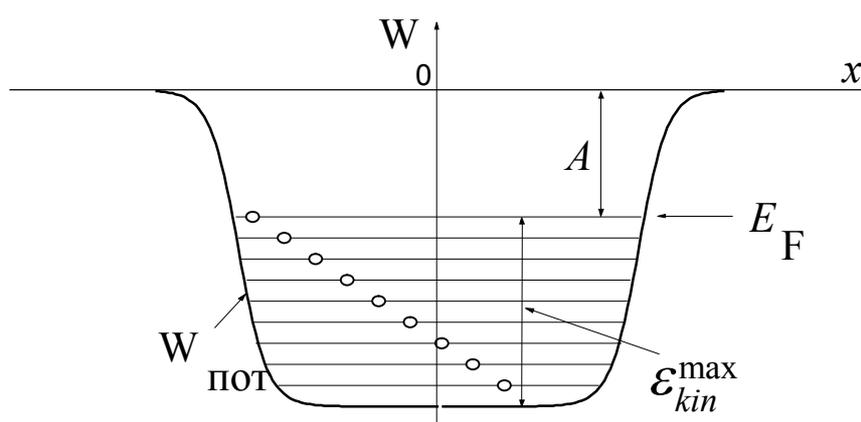


Рис. 5

При контакте двух разных металлов электроны, стремясь за-

нять состояние с наименьшей энергией, начинают перетекать из металла с меньшей работой выхода в металл с большей работой выхода. При этом первый металл заряжается положительно, а второй отрицательно. Электроны будут перетекать, пока возникающее на контакте электрическое поле не выровняет максимальные энергии электронов в металлах. При этом между металлами возникает **к о н т а к т н а я** разность потенциалов,

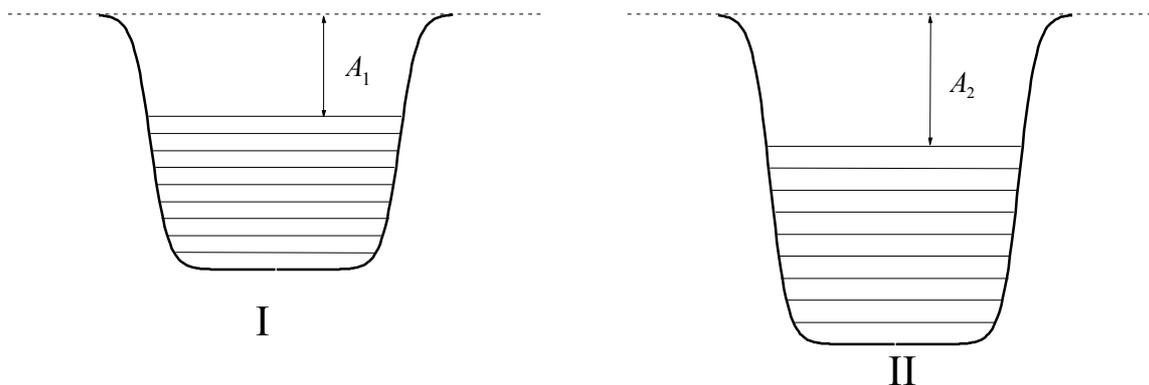


Рис. 6  
Два металла до приведения в контакт.

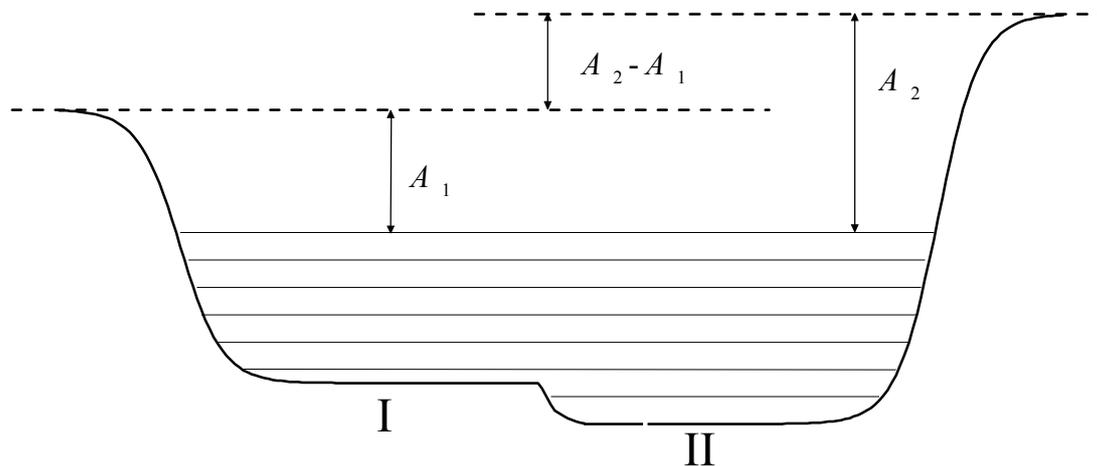


Рис. 7  
Эти же металлы, находящиеся в контакте.

Потенциальная энергия электронов повысилась во втором металле на  $A_2 - A_1$  по отношению к первому металлу, это соответст-

вует возникновению разности потенциалов

$$U_k = \frac{A_2 - A_1}{e}$$

так как потенциальная энергия заряда в электрическом поле  $W_{пот} = e\phi$ , где  $e$  - заряд электрона.

Рассмотрим замкнутую электрическую цепь, составленную из разных металлов (рис.8).

Пока температура контактов одинакова, сумма контактных разностей потенциалов при обходе по замкнутой цепи равна нулю:

$$U_1 + U_2 = \frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{A_2 - A_1}{e} = 0$$

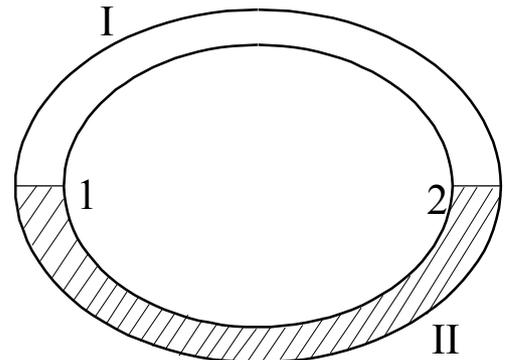


Рис. 8

Но так как контактные разности потенциалов зависят от температуры контактов, то при различных температурах контактов

$U_1 + U_2 \neq 0$  и в цепи появляется ЭДС.

Явление возникновения ЭДС в цепи из разных металлов при разных температурах контактов называется **термоэлектрическим эффектом**, а возникающая при этом ЭДС - **термоэдс**. Термоэдс  $\varepsilon_T$  приблизительно пропорциональна разности температур контактов  $\varepsilon_T = \eta(T_2 - T_1)$ , где  $\eta$  - постоянная термоэдс, которая зависит от материалов контактов.

Возникновение термоэдс – это **прямой термоэффект**. Существует и обратный термоэффект – **эффект Пельтье**. Он заключается в том, что при пропускании тока через цепь из разных металлов на контактах поглощается или выделяется тепло и возникает разность температур между контактами.

Термоэлектрический эффект используется для измерения температур. Для этого изготавливают термопару. Берут два проводника из разных металлов и спаивают их концами. В разрыв одного из проводников включают гальванометр. Один спай помеща-

ют в тающий лёд, а второй приводят в контакт с телом, температура которого измеряют. По току гальванометра можно определить термоэдс и, следовательно, искомую температуру (рис.9).

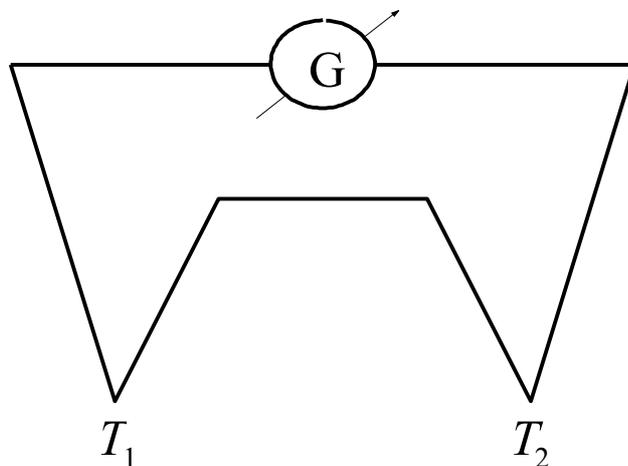
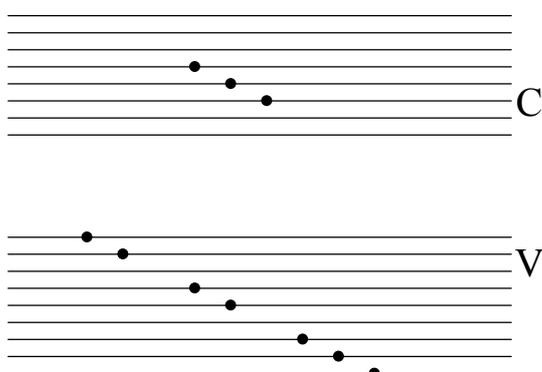


Рис. 9

### Контрольные вопросы и задачи

1. К проводнику длиной 20 см приложено напряжение 10 В. Найдите среднюю скорость направленного движения электронов в этом проводнике, если среднее время свободного пробега электронов 0,2 нс. Какой ток течет по проводнику, если площадь его сечения 5 мм<sup>2</sup>, а концентрация свободных электронов в нём  $4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ ?

2. На рис. условно изображены зоны полупроводника.



Сколько носителей тока изображено на рис?

Сколько возможных переходов имеется у каждого электрона зоны проводимости в валентную зону?

3. Квантовая система имеет четыре энергетических уровня, на которых находятся три электрона. Сколько различных заполнений уровней имеет данная система? Нарисуйте их.

4. Сопротивление металла при нагревании увеличилось на 20%. Почему? Что и как изменилось в металле?
5. Сопротивление полупроводника уменьшилось при нагревании в два раза. Почему? Что и как изменилось в полупроводнике?
6. Имеются три вещества со следующими зонами: а) валентная зона заполнена на половину; б) валентная зона полностью заполнена, ширина запрещенной зоны 0,9 эВ; в) валентная зона полностью заполнена, ширина запрещенной зоны 9 эВ. Как и почему изменится удельное сопротивление этих веществ при нагревании?
7. В некотором полупроводнике концентрация дырок в три раза превышает концентрацию электронов проводимости. Какая примесь была добавлена к полупроводнику? Найдите общий ток в полупроводнике, если ток электронов проводимости 2 мА и подвижность электронов в 2 раза больше, чем дырок.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-31

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЙ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

В работе исследуются температурные зависимости сопротивления металлов и полупроводников, определяется температурный коэффициент сопротивления металла и ширина запрещенной зоны полупроводника.

*Описание установки.* Для измерения сопротивления в работе используется мост Уитстона (рис.1).

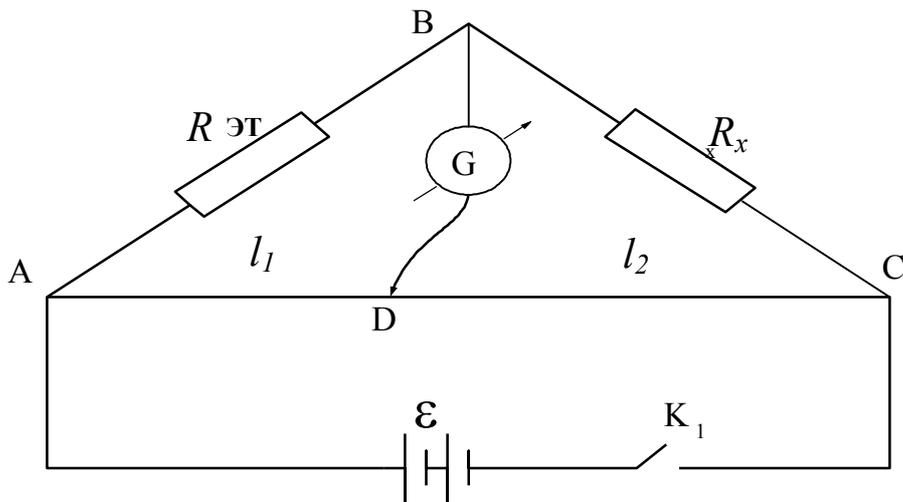


Рис.1

Мост представляет собой четыре сопротивления, образующие замкнутый четырехугольник  $ABCD$ , к одной диагонали которого  $AC$  подводится напряжение от источника питания, а в другую  $BD$  включён гальванометр  $G$ . В качестве сопротивлений  $AD$  и  $DC$  обычно используется *реохорд* - однородная калиброванная проволока из материалов с высоким удельным сопротивлением. По реохорду перемещается подвижный контакт  $D$ . Это позволяет плавно изменять сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  участков реохорда  $AD$  и  $DC$ .

$$R_1 = \rho \frac{l_1}{S} \quad , \quad R_2 = \rho \frac{l_2}{S} \quad .$$

Мост называется уравновешенным, если ток в диагонали  $BD$  отсутствует. Для этого должны быть равны потенциалы точек  $B$  и  $D$ . Но тогда  $U_{AB} = U_{AD}$  и  $U_{BC} = U_{DC}$ . При отсутствии тока через гальванометр ток на участке  $AB$  равен току на участке  $BC$ , а ток в  $AD$  равен току в  $DC$ . Из закона Ома  $U = IR$ , тогда следует, что (при  $R_{эт.} = R_0$ )

$$\frac{U_{AB}}{U_{BC}} = \frac{R_0}{R_x} \quad , \quad \frac{U_{AD}}{U_{DC}} = \frac{R_1}{R_2} \quad .$$

Таким образом, равновесие моста достигается при

$$\frac{R_0}{R_x} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2}$$

Зная  $R_0$  и измерив  $l_1$  и  $l_2$ , можно найти  $R_x$ :

$$R_x = R_0 \frac{l_2}{l_1}. \quad (1)$$

Равновесия моста добиваются, передвигая движок реохорда.

В качестве  $R_x$  используются исследуемая металлическая проволока и полупроводниковое термосопротивление, закрепленное внутри нагревателя. Нагреватель подключается к регулируемому источнику напряжения. Схема питания нагревателя изображена на рис.2.

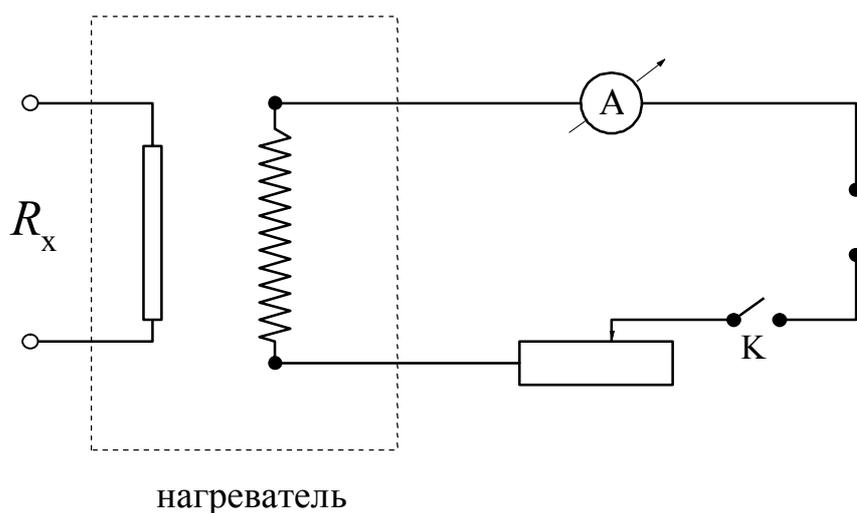


Рис.2

Температура сопротивления измеряется термометром. Все элементы моста Уитстона находятся на специальной панели и подключены к соответствующим клеммам. Имеется переключатель эталонных сопротивлений и клеммы для подключения измеряемого сопротивления  $R_x$ . Гальванометр снабжен переключателем грубо-точно позволяющим менять чувствительность гальванометра.

## Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (рис. 1 и рис. 2). В качестве  $R_x$  подключить полупроводниковое термосопротивление. Подключить указанное эталонное сопротивление  $R_0$ .

2. После проверки преподавателем включить схему моста и измерить сопротивление при комнатной температуре. Для этого уравновесить мост, передвигая движок реохорда. В положении равновесия стрелка гальванометра стоит на нуле (посередине шкалы). При отклонении от положения равновесия в разные стороны стрелка гальванометра также отклоняется в разные стороны. Отсутствие отклонений стрелки гальванометра при разных положениях движка реохорда означает отсутствие контакта в цепи. После того как установлено приблизительное равновесие моста, следует нажать кнопку "точно" около гальванометра и окончательно уравновесить мост.

3. Записать температуру  $t$ ,  $R_0$  и длины плеч реохорда  $l_1$  и  $l_2$  в таблицу.

4. Включить нагреватель и установить заданный режим тока нагревателя, нагреть его на  $10 - 20^\circ$ .

5. После установления заданной температуры нагревателя измерить сопротивление, повторив пункты 2 и 3. Записать температуру нагревателя. Показания термометра следует записывать в момент равновесия моста.

6. Измерения сопротивления проводятся до температур  $140 - 160^\circ\text{C}$ . Если при равновесии моста  $l_1$  составляет меньше трети полной длины реохорда, следует включить другое  $R_0$ , так как при больших  $l_2 / l_1$  резко возрастает погрешность измерения сопротивления.

7. Провести измерения для металлического сопротивления. Для этого выполнить пункты 1-6, заменив нагреватель с термосопротивлением на нагреватель с металлическим сопротивлением.

8. Данные измерений занести в таблицу, указать номера исследуемых сопротивлений.

9. Рассчитать сопротивления  $R_x$  по формуле (1).

Металл №						Полупроводник №							
№	$t$ °C	$R_0$ Ом	$l_1$ мм	$l_2$ мм	$R_M$ Ом	$t$ °C	$T$ К	$1000/T$ К <sup>-1</sup>	$R_0$ Ом	$l_1$ мм	$l_2$ мм	$R_T$ Ом	$\ln R_T$
1													
2													
3													
·													
·													
·													

10. По данным таблицы построить графики зависимости  $R = f(t)$  для металлического проводника и термосопротивления.

11. Из графика  $R_M = f(t)$  для металлического проводника определить температурный коэффициент сопротивления  $\alpha$  как значение тангенса угла наклона прямой, деленного на  $R_{M0}$ :

$$R = R_{M0} (1 + \alpha t)$$

На рис. 3 показан принцип вычисления  $R_0$  и  $\alpha$  из графика:

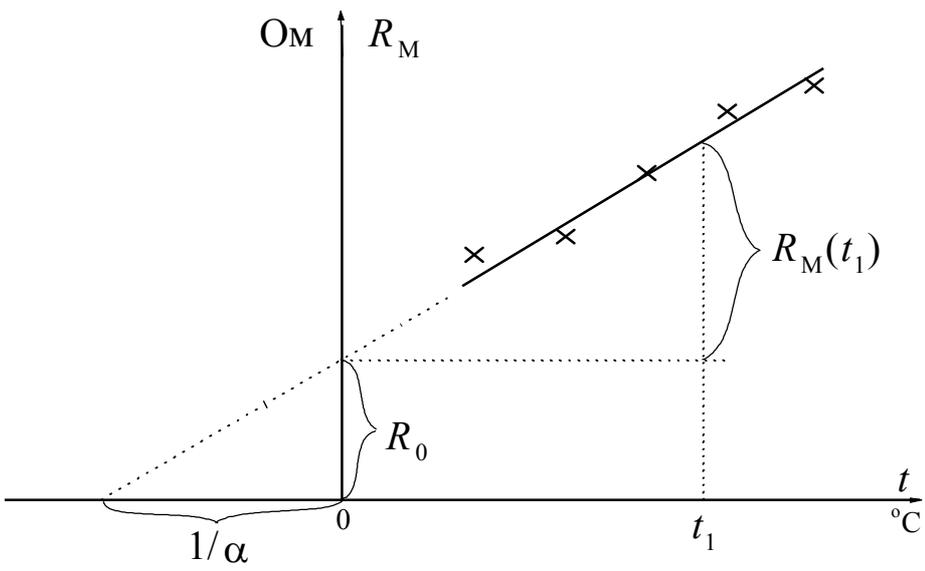


Рис.3

$$\alpha = \frac{R_M(t) - R_0}{R_0 t_1} \quad (2)$$

12. Построить график  $\ln R_T = f(1000/T)$  для полупроводникового термосопротивления и определить ширину запрещенной зоны полупроводника  $E_g$  из наклона прямой на графике. Для этого используем формулу зависимости сопротивления полупроводников от температуры.

$$R = A \exp\left[-E_g / 2kT\right], \quad (3)$$

отсюда

$$\ln R = \ln A - \frac{E_g}{2kT}.$$

Запишем уравнение (3) при разных температурах и вычтем одно из другого

$$\ln R_2 - \ln R_1 = -\frac{E_g}{2k} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right),$$

найдем  $E_g$ ,

$$E_g = 2000k \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{1000/T_1 - 1000/T_2}. \quad (4)$$

Используя данные графика, находим  $E_g$  как тангенс угла наклона прямой. Ширину запрещенной зоны  $E_g$  привести в эВ.

На рис.4 показан принцип вычисления  $E_g$  из графика

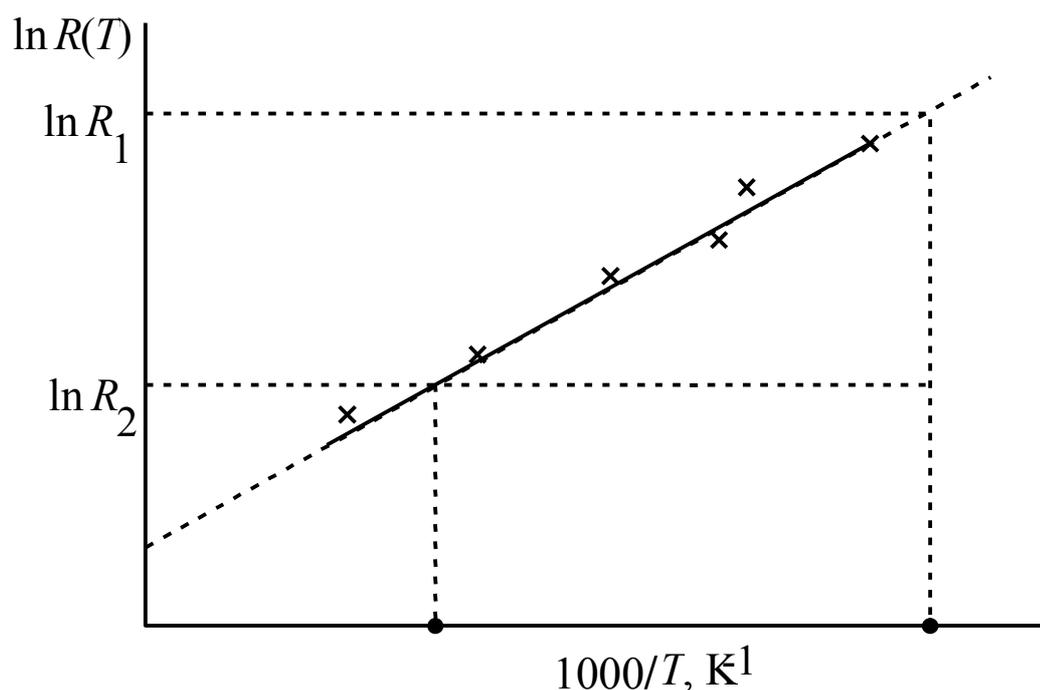


Рис. 4.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-32 .

#### ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОПАРЫ

В работе проводится градуировка термопары, определяется постоянная термопары и с ее помощью измеряется температура кипения спирта.

*Установка.* Для точного измерения термоэдс применяется метод компенсации. Он основан на законе Ома для участка цепи с ЭДС.

По закону Ома ток на участке цепи  $AC$  равен (рис. 1)

$$I = \frac{\mathcal{E}_x - U}{R} \quad (1)$$

Здесь  $U = \phi_C - \phi_A$  - разность потенциалов между точками  $C$  и  $A$ ,

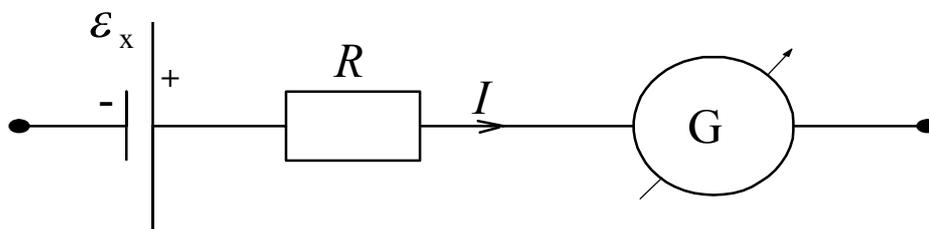


Рис. 1

$R$  - полное сопротивление участка  $AC$ . Положительное к  $C$ , если  $U > \mathcal{E}_x$  ток течет от  $C$  к  $A$ . При  $U = \mathcal{E}_x$  ток на участке  $AC$  отсутствует.

Полная электрическая схема измерения термоэдс приведена на рис. 2. В качестве компенсирующего напряжения  $U$  используется падение напряжения на участке реохорда  $AC$ . Р е о х о р д - тонкая, однородная, калиброванная проволока  $AB$  с подвижным контактом  $C$ . Падение напряжения  $U$  на участке  $AC$  пропорционально длине  $l$  этого участка.

$U = I R_1 = I \rho l / S$ , где  $R_1$  - сопротивление участка реохорда  $AC$ , а  $I$  - ток в реохорде. Момент компенсации устанавливается по отсутствию тока в гальванометре  $G$ .

Так как термоэдс составляет всего несколько мВ, а напряжение источника питания несколько вольт, то последовательно с реохордом включены сопротивления  $R$  и  $R_{\sim}$ , на которых падает большая часть напряжения источника питания. С помощью переключателя  $\Pi_1$  можно менять сопротивление  $R$  и тем самым менять напряжение на реохорде. Для измерения напряжения нужно сначала откалибровать реохорд, т.е. определить падение напряжения при определенной длине  $l_0$  участка  $AC$ . В работе калибровка проводится при длине  $l_0 = 500$  мм. Для калибровки используется источник эталонных напряжений, который представляет собой специальный «нормальный» элемент, который имеет очень стабильную ЭДС, подключенный к дели-

телю напряжений.

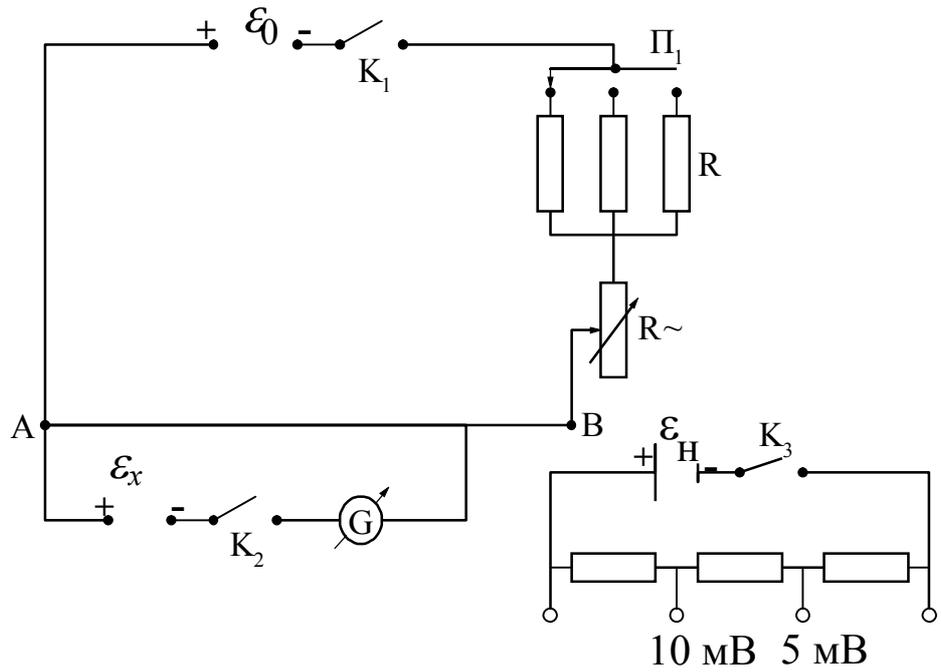


Рис. 2

Для калибровки следует поставить переключатель  $\Pi_1$  в положение "10 мВ", подключить к клеммам  $\epsilon_x$  источник эталонного напряжения  $\epsilon_{эТ} = 5\text{ мВ}$ , установить движок реохорда  $C$  в положение 500 мм. Включить ключом  $K_3$  эталонный источник, ключом  $K_1$  - питание реохорда и замкнуть ключ  $K_2$ . Ручкой сопротивления  $R\sim$  добиться компенсации, т.е. установить стрелку гальванометра на ноль.

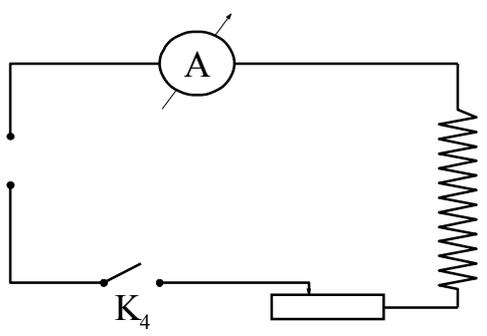


Рис. 3

Выключить  $K_2$ ,  $K_1$  и  $K_3$ . После калибровки напряжение  $U$ , на участке реохорда  $AC$  может быть рассчитано:

$$U = \epsilon_{эТ} l / l_0 . \tag{2}$$

Установка содержит также нагреватель и схему питания нагревателя (рис.3).

Все элементы схемы измерения термоэдс расположены на

специальной панели и подсоединены к соответствующим клеммам. На той же панели расположен источник эталонного напряжения и клеммы для подключения измеряемой термоэдс. Гальванометр снабжен переключателем ГРУБО-ТОЧНО, который отключает шунт и увеличивает чувствительность гальванометра. Нагреватель и элементы схемы его питания расположены отдельно.

Термопара состоит из двух разнородных проволок диаметром 1-2 мм, концы которых обычно спаяны. Для удобства измерений один из спаев термопары поддерживается при неизменной температуре, для чего этот спай погружает в пробирку с маслом. Пробирка в свою очередь опускается в сосуд с водой комнатной температуры (рис. 4). Другой спай термопары помещают в пробирку, находящуюся в сосуде с водой, температура которой может изменяться. (Схема питания нагревателя приведена на рис. 3). Сосуд снабжен мешалкой.

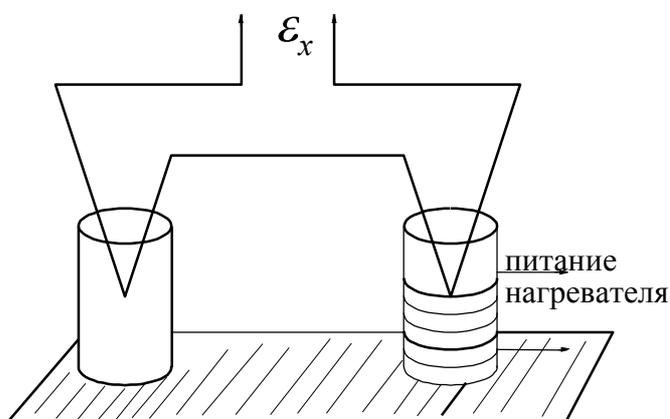


Рис. 4

### Порядок выполнения работы.

1. *Сборка схемы и калибровка реохорда.* Собирают схему согласно рис. 2 и 3. Переключатель  $\Pi_1$  включают в положение "10 мВ".

Проводят калибровку реохорда. Для этого к гнездам  $\varepsilon_x$  присоединяют эталонное напряжение  $\varepsilon_x = 5$  мВ, движок реохорда

устанавливают в положение 500 мм. Включают источник эталонного напряжения и питание реохорда. Далее замыкают ключ  $K_2$  и, изменяя сопротивление  $R_{\sim}$ , добиваются того, чтобы ток в нуль-гальванометре отсутствовал. После предварительной регулировки  $R_{\sim}$  следует нажать кнопку "ТОЧНО" и окончательно отрегулировать  $R_{\sim}$ . После этого в течение всей работы  $R_{\sim}$  трогать нельзя. Выключают ключи  $K_2, K_1$ . Выключают эталонный источник и отсоединяют его от клемм  $\mathcal{E}_x$ .

2. *Градуировка термопары.* Градуировка заключается в установлении зависимости термоэдс от разности температур "холодного" и "горячего" спаев. Термопару подключают к гнездам  $\mathcal{E}_x$ . В сосуды с водой опускают ртутные термометры. Начинают подогревать один сосуд, тщательно перемешивая воду мешалкой. Подогрев сосуда на  $\sim 10^\circ\text{C}$ , прекращают нагревание и, продолжая помешивать мешалкой воду, наблюдают за термометром. Вследствие тепловой инерции системы температура будет еще некоторое время подниматься. Когда температура установится, измеряют термоэдс. Для этого замыкают ключ  $K_1$ , а затем  $K_2$ . Движком реохорда подбирают такое положение, чтобы ток в гальванометре равнялся нулю. При отклонении от этого положения в разные стороны стрелка гальванометра должна также отклоняться в разные стороны. После предварительной компенсации нажимают кнопку "ТОЧНО" и, не отпуская её, добиваются точной компенсации. Записывают положение движка реохорда  $l$  и рассчитывают  $\mathcal{E}_x$  по формуле (2). В момент компенсации записывают температуры холодного ( $T_0$ ) и горячего ( $T_1$ ) спаев.

Продолжают нагревание до  $90-95^\circ\text{C}$ , производя измерение термоэдс через каждые  $8-10^\circ\text{C}$  (всего 10-12 измерений). Периодически контролируют  $T_0$  и записывают её значение.

Результаты измерений заносят в таблицу.

Таблица

№ измерения	$T_0$ °С	$T$ °С	$T - T_0$ °С	$l$ мм	$\varepsilon_T$ мВ	$\eta$ мВ/К	$\Delta\eta$	$\Delta\eta^2$	Погрешность
1									$\Delta\eta = S_\eta$
2									
.									
Сред.	X	X	X	X	X		$S_\eta^2 =$		$\eta =$

3. *Измерение температуры кипения спирта.* В сосуде с водой устанавливается пробирка со спиртом, в эту пробирку опускается "горячий" спай термоэлемента, второй спай ("холодный") - в другом сосуде с водой комнатной температуры. Первый сосуд подогревают до тех пор, пока закипит спирт в пробирке. Включают компенсационную схему и измеряют термоэдс как в п. 2.

4. *Оформление работы.* По результатам измерений рассчитывают константу термопары  $\eta$  по формуле  $\eta = \varepsilon_T / (T - T_0)$ . Определяют среднее значение  $\eta$  и ошибки намерения.

Строят график зависимости термоэдс от разности температур. По оси абсцисс откладывают разность температур, а по оси ординат - термоэдс.

По градуировочной кривой определяют разность температур  $\Delta T$ , соответствующую значению ЭДС полученному при кипении старта; прибавляя к ней температуру холодного спая, определяют температуру кипения спирта.

## ТЕМА 2 - 4. ЯВЛЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

Металлы состоят из положительных ионов, расположенных в узлах кристаллической решетки и свободных электронов,двигающихся между ионами. Свободные электроны образуют электронный газ. Концентрация свободных электронов в металлах  $n = 10^{28} - 10^{29} \text{ м}^{-3}$ .

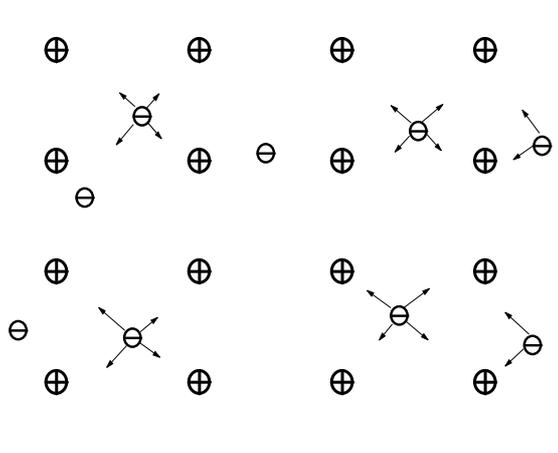


Рис. 1

На рис. 1 схематически изображено строение металла. Электроны внутри металла находятся в состоянии хаотического движения, но они не могут выйти из металла.

Рассмотрим причины этого. Между свободными электронами и положительно заряженными ионами решетки существуют силы кулоновского притяжения. Внутри металла эти силы в среднем уравниваются. Для электронов, находящихся вблизи поверхности металла,

равнодействующая этих сил направлена внутрь металла. В результате теплового движения отдельные электроны всё же покидают поверхность металла, удаляются от неё на несколько межатомных расстояний и затем, под действием сил притяжения, поворачивают обратно. Поэтому поверхность металла окутана электронной оболочкой толщиной в несколько межатомных расстояний.

Потенциальная энергия электрона вне металла равна нулю. Так как электрон втягивается внутрь металла, то его потенциальная энергия уменьшается и внутри металла отрицательна. Изменение потенциальной энергии внутри и вблизи металла в

зависимости от координаты  $X$  представлено на рис. 2.

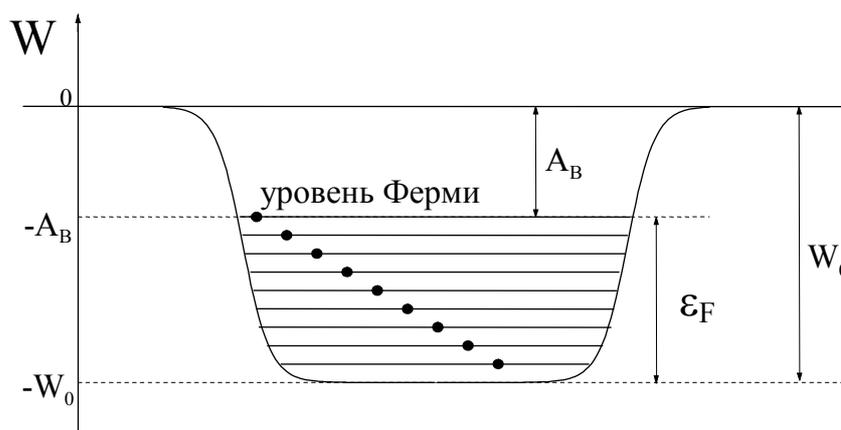


Рис. 2

По вертикальной оси отложена энергия электрона. В поверхностном слое потенциальная энергия быстро уменьшается, а внутри металла остаётся постоянной, таким образом, распределение потенциальной энергии электрона внутри металла можно представить в виде потенциальной ямы.

В классической электронной теории считается, что электроны проводимости могут обладать любыми значениями энергии. Согласно квантовой теории эта энергия может принимать дискретные (т.е. разделённые конечными промежутками) значения, называемые уровнями энергии. В кристалле уровни образуют зоны (см. тему 2-3). Расстояние между уровнями в зоне весьма невелико  $10^{-22}$  эВ ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж). Тепловое движение и электрическое поле легко переводит электроны на более высокие энергетические уровни. Согласно квантовой теории электроны обладают ненулевой кинетической энергией даже при  $T = 0^\circ\text{K}$ . Это связано с *принципом Паули*: на каждом уровне может находиться не более одного электрона. При абсолютном нуле температур электроны заполняют уровни по порядку, начиная с самого нижнего. Высший заполненный уровень называется уровнем Ферми. Полная энергия электрона в металле складывается из потенциальной энергии  $W_{\text{пот}} = -W_0$ , где  $W_0$  - глубина потенциальной ямы, и кинетической энергии  $\epsilon$ ,  $W = -W_0 + \epsilon$ . При абсолютном нуле температур наибольшая кинетическая энергия

соответствует уровню Ферми и называется энергией Ферми  $\mathcal{E}_F$ . Следовательно, наибольшая энергия электронов в металле  $W = -W_0 + \mathcal{E}_F < 0$ . На рис. 2 электроны на заполненных уровнях изображены точками.

Наименьшая энергия электрона вне металла равна нулю ( $W_{\text{пот}} = 0$  и  $\mathcal{E} = 0$ ). Поэтому чтобы вырвать электрон из металла, ему нужно сообщить недостающую энергию. Легче всего вырвать электрон с самого высокого уровня - уровня Ферми, для этого электрону нужно сообщить энергию

$$A = 0 - W_{\text{max}} = W_0 - \mathcal{E}_F.$$

*Работа выхода*  $A$  электрона из металла - это наименьшая энергия, которую нужно сообщить электрону, чтобы удалить его из металла. Величина работы выхода зависит от природы металла и состояния его поверхности. Наименьшей работой выхода обладают щелочные металлы. Для чистых металлов она изменяется от 1.5 эВ до 5.3 эВ. Работа выхода сильно зависит от чистоты поверхности металла, что используется на практике. Подобрав соответствующее покрытие поверхности, существенно понижают работу выхода. Так, например, нанесение на поверхность вольфрама окислов кальция, бария или стронция снижает работу выхода с 4.5 эВ (для чистого вольфрама) до 1.5-2 эВ.

При повышении температуры часть электронов переходит на более высокие энергетические уровни, т.е. появляются электроны с кинетической энергией, большей энергии Ферми. Число электронов, имеющих кинетическую энергию  $\mathcal{E}$ , описывается распределением Больцмана

$$n \approx n_0 \exp\left[\frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_F}{kT}\right]$$

Только те электроны, для которых  $\mathcal{E} - \mathcal{E}_F > A$  могут вылететь из металла. При комнатной температуре таких электронов ничтожно мало, так как в этом случае  $kT \sim 0.026$  эВ, что даёт при  $A = 3$  эВ,  $\exp[-A/kT] = 10^{-50}$ .

При увеличении температуры количество электронов, обладающих достаточной энергией, чтобы вырваться из металла, быстро увеличивается и при температурах превышающих 1000 К, имеется заметная эмиссия электронов. Чем ниже работа выхода, тем при более низких температурах начинается эмиссия электронов. Явление испускания электронов нагретыми металлами называется *термоэлектронной эмиссией*.

### Электронные лампы.

Термоэлектронная эмиссия - испускание электронов накаливаемыми металлами лежит в основе устройства электронных ламп. Простейшая электронная лампа - *диод* (см. рис. 3а) имеет два электрода:

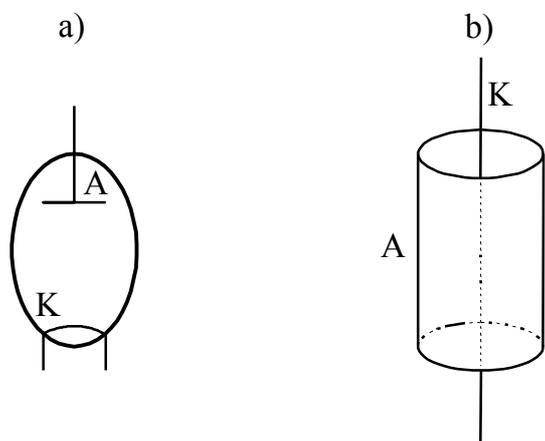


Рис. 3

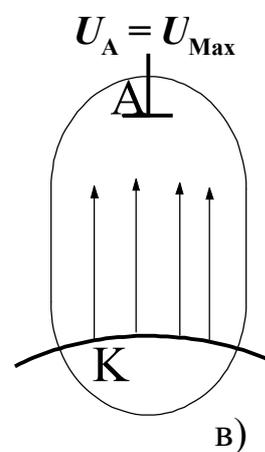
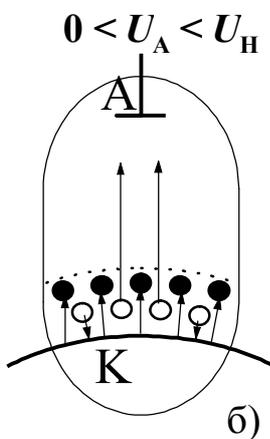
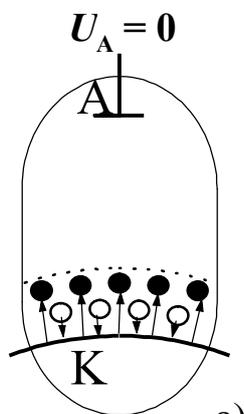
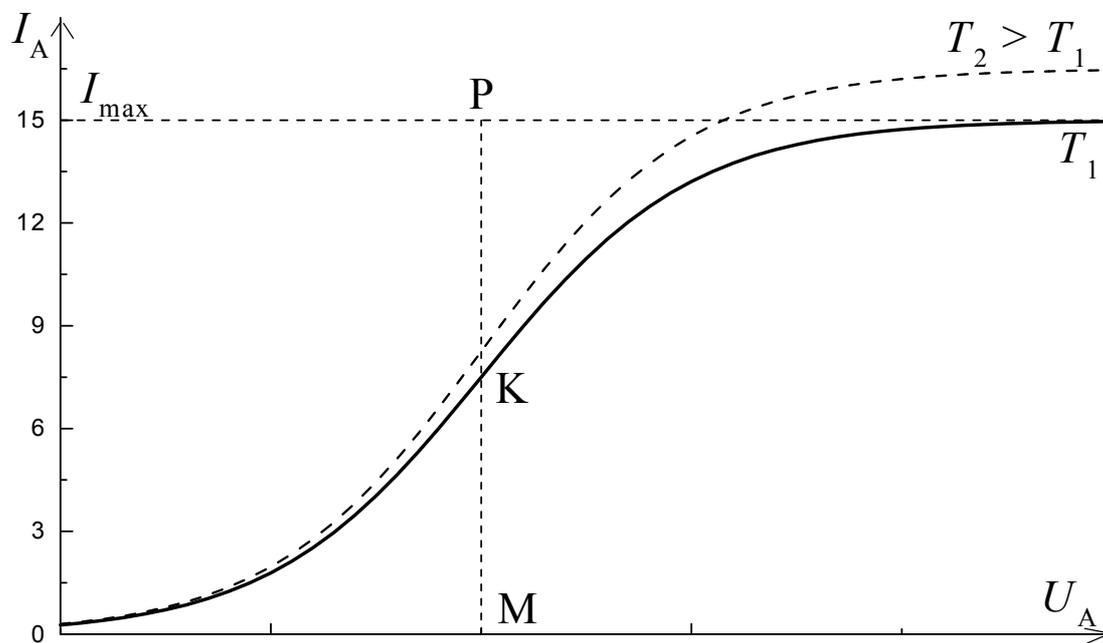
катод К в виде тонкой нити и анод А, выполненный обычно, в форме цилиндра (см. рис. 3б) Электроды впаяны в стеклянный баллон, из которого выкачен воздух. Через катод пропускают ток накала от специального источника напряжения, при этом он разогревается и начинает испускать электроны. Между анодом и катодом прикладывается напряжение, называемое анодным, положительным считается

напряжение, при котором на аноде положительный потенциал относительно катода. Если установить постоянный накал катода и исследовать зависимость силы анодного тока  $I_A$  от анодного напряжения  $U_A$ , то получится кривая, которая называется вольт-амперной или анодной характеристикой. Эта кривая изображена на рис. 4.

На рис. 4а, 4б, 4в условно изображены процессы, протекающие в лампе при разных значениях анодного напряжения.

При  $U_A \leq 0$  вылетевшие из катода электроны отталкиваются

от анода и скапливаются возле катода, образуя "электронное облако", которое имеет отрицательный объёмный заряд. При некоторой концентрации электронов в облаке устанавливается



**Все электроны возвращаются на катод**

**МК - количество электронов достигающих анода за 1 с,  
КР - возвращенных на катод**

**Все электроны достигают анода**

Рис. 4

динамическое равновесие - число электронов вылетевших из катода, равно числу возвратившихся на катод (рис. 4а).

При положительном анодном напряжении (рис. 4б) электроны притягиваются к аноду и часть электронов начинает уходить из электронного облака на анод (тем большая, чем больше напряжение), а часть возвращается обратно на катод.

По мере роста  $U_A$  всё большее число электронов уходит к аноду, и, наконец, при определенном значении  $U_A$  электронное облако полностью рассасывается и все, вылетевшие из катода электроны, достигают анода (рис. 4в). Дальнейшее увеличение анодного напряжения не может увеличить силу анодного тока - ток достигает насыщения.

Таким образом, в диоде происходят три процесса: испускание электронов катодом, возвращение электронов из облака в катод, попадание электронов на анод. Пусть  $N_{ЭМ}$ ,  $N_K$ ,  $N_A$  - числа электронов, испускаемых катодом, возвращающихся в катод и достигающих анода в единицу времени. Тогда  $N_K + N_A = N_{ЭМ}$  - не зависит от анодного напряжения и зависит только от температуры катода. Ток насыщения  $I_{нас} = e N_{ЭМ}$ , анодный ток  $I_A = e N_A$ . Следовательно, на рис. 4 отрезки  $KM \sim N_A$ , а  $KP \sim N_K$ . Таким образом, анодное напряжение не влияет на эмиссию электронов катодом, а только перераспределяет вылетевшие из катода электроны между катодом и анодом. Максимальный ток диода - *ток насыщения* - определяется эмиссией катода.

При малых анодных напряжениях анодный ток растет медленно  $I_A \sim U^{3/2}$  - закон трёх вторых - эта зависимость была установлена Лэнгмюром и Богуславским и объясняется влиянием электронного облака, которое экранирует поле анода.

Для плотности тока насыщения Ричардсоном получена следующая формула

$$j_{нас} = BT^2 e^{-A/kT},$$

где  $j_{нас}$  - плотность тока насыщения;

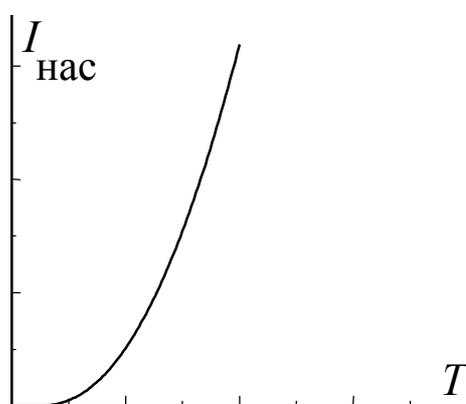
$T$  - температура по шкале Кельвина;

$k$  - постоянная Больцмана;

$B$  - константа, равная  $1.2 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2\text{K}^2$  ;

$A$  - работа выхода.

Силу тока насыщения для данного катода можно увеличить, лишь увеличив температуру катода. На рис. 4 пунктиром, изображена кривая, снятая при более высокой температуре  $T_2 > T_1$ . Как следует из формулы Ричардсона, ток насыщения резко, по экспоненциальному закону возрастает при росте температуры. Эта зависимость изображена на рис. 5 и называется *температурной характеристикой диода*.



На рис. 4 участок кривой, отображающий ток насыщения, идёт параллельно оси абсцисс. В действительности он идёт под небольшим углом к ней. Это объясняется так называемым эффектом Шоттки, который заключается в том, что внешнее электрическое поле уменьшает высоту потенциального барьера и тем самым снижает работу выхода. В заключение несколько слов о применении диода.

Рис. 5

Диод проводит ток только при положительном потенциале анода. При отрицательном потенциале анода электроны отталкиваются от анода, и ток через диод отсутствует. Поэтому диод используется для выпрямления переменного тока.

Более сложной электронной лампой является *триод* - он получается добавлением третьего электрода - сетки, расположенного между анодом и катодом. Ток через триод (как и диод) определяется в основном электрическим полем вблизи катода. Это поле создаётся как анодным, так и сеточным напряжением, но так как сетка значительно ближе к катоду, то напряжение на сетке влияет на анодный ток значительно сильнее, чем анодное.

Коэффициент усиления триода показывает, во сколько раз напряжение на сетке влияет на анодный ток сильнее, чем анод-

ное напряжение. Для триодов он составляет от 10 до 100. Триод используется для усиления слабых сигналов. Усиливаемое напряжение подается на сетку, а усиленное снимается с анодной нагрузки - сопротивления, включенного в анодную цепь. Явление термоэлектронной эмиссии используется также в электронно-лучевых трубках и других электронных приборах.

### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Глубина потенциальной ямы металла 8 эВ. Кинетическая энергия на уровне Ферми 5.2 эВ. Найдите работу выхода электрона для данного металла.
2. Из катода диода каждую секунду вылетает  $2 \cdot 10^{16}$  электронов. Найдите ток насыщения данного диода. Сколько электронов возвращается из электронного облака в катод каждую секунду при анодном токе 2 мА.
3. Каким образом можно увеличить ток насыщения диода? Увеличить анодное напряжение, увеличить напряжение накала, увеличить площадь анода, увеличить площадь катода, уменьшить работу выхода электронов из катода.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-41 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИОДА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ КАТОДА

В работе используется двухэлектродная лампа с вольфрамовым катодом, снимаются две вольтамперные и температурная характеристики лампы, определяется работа выхода электронов из катодов.

Электрическая схема представлена на рис. 1, где Л – диод с вольфрамовым катодом;  $\mathcal{E}_H$  - источник напряжения накала;  $V_H$  - вольтметр в цепи накала;  $A_H$  - амперметр в цепи накала;  $R_H$  - реостат в цепи накала;  $\mathcal{E}_A$  - источник анодного напряжения;  $R_A$  - потенциометр в цепи анода,  $V_A$  - вольтметр в цепи анода;  $mA$  - миллиамперметр в цепи анода.

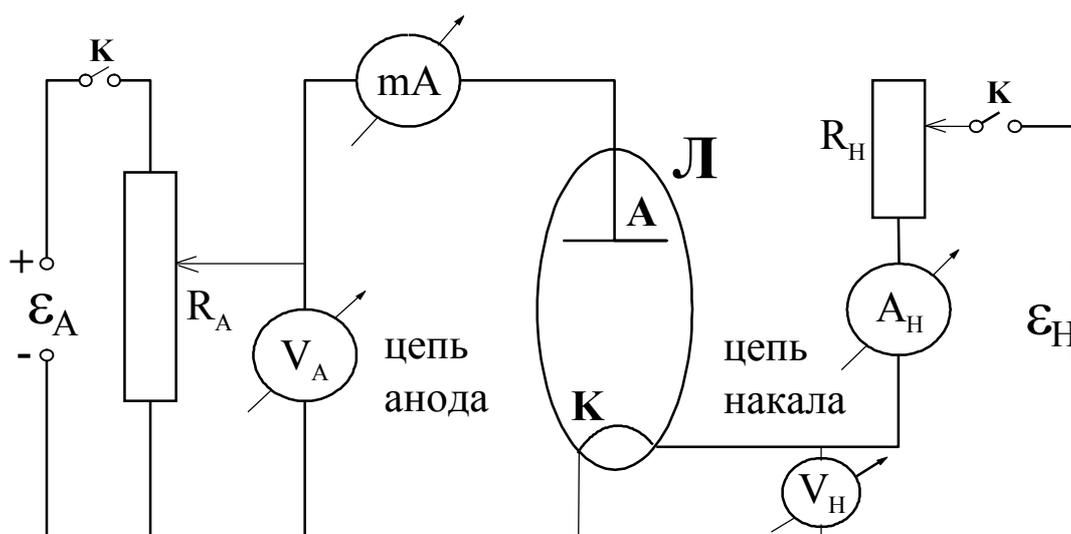


Рис.1

Для наглядности все элементы схемы размещены на панели из оргстекла. Приборы находятся вне панели, но они подсоединены к соответствующим клеммам на панели. Монтаж анодной цепи выполнен красным проводом, общей минусовой цепи - синим проводом, а цепи накала - белым. Перед выполнением работы студенту следует разобраться в назначении каждого элемента схемы и определить цену деления приборов. Питание схемы производится от универсального источника питания УИП-2, который также подключен к клеммам  $\mathcal{E}_A$  и  $\mathcal{E}_H$  на панели. На панели имеется тумблер, позволяющий включать и выключать питание схемы.

Для изучения температурных характеристик необходимо измерить температуру катода. Её измеряют косвенно, исходя из температурной зависимости сопротивления вольфрамовой нити накала. Сопротивление металлов возрастает с ростом температу-

ры по закону:  $R_t = R_0 (1 - \alpha t)$ , где  $\alpha$  - термический коэффициент сопротивления, значение которого для различных металлов известно и приводится в таблицах.  $R_t$  и  $R_0$  - сопротивление нити при температурах  $t^\circ$  и  $0^\circ\text{C}$ . Величина сопротивления вольфрамовой нити накала определяется из закона Ома  $R = U_H/I_H$ . Значения  $I_H$  и  $U_H$  определяются по показаниям приборов  $A_H$  и  $V_H$ . Зависимость  $R_H = f(t)$  задана на макете лабораторной работы.

### *Порядок выполнения работы*

В работе снимаются температурная и две анодные характеристики диода. Температурная характеристика снимается при анодном напряжении  $U_A = 40 - 80$  В. Напряжение накала изменяется от 3 В до 5 В через 0.2 В. (Более точные указания смотрите на макете).

1. Установить анодное напряжение  $U_A = 40 - 80$  В, при котором достигается насыщение анодного тока.
2. Установить напряжение накала, при котором появляется анодный ток (ток составляет одно-два деления прибора), подождать пока нагреется катод, что определяется по прекращению возрастания анодного тока. После окончания прогрева катода следует записать  $U_H$ ,  $I_H$  и  $I_A$ .
3. Увеличить напряжение накала на 0.2 – 0.25 В и повторить измерения п.2. Измерения повторять пока ток не превысит предел измерения амперметра анодного тока. Данные измерений заносят в таблицу 1.

Таблица 1

№ изме- рения	$U_A = \text{В}$								
	$U_H$		$I_H$		$I_A$		$R$ Ом	$t^{\circ}\text{C}$	$T\text{К}$
	дел	В	дел	А	дел	мкА			
1									
2									
3									
·									
·									

Анодные характеристики снимаются при двух напряжениях накала, указанных на макете. Эти напряжения накала могут быть выбраны по температурной характеристике. При большем напряжении ток насыщения должен составлять около 80 % предела измерения амперметра анодного тока, при меньшем около 60 %. Анодное напряжение меняется в пределах от 0 до 15 В, в начале через 1 В. При приближении к насыщению изменение можно увеличить до 2 В.

1. Устанавливают напряжение накала.
2. Устанавливают анодное напряжение 1 В, 2 В и т.д. и записывают анодный ток.
3. Повторяют пункты 1 и 2 при втором напряжении накала. Данные измерений заносят в таблицу 2.

Таблица 2

№ изме- рения	$U_A$		$U_H = \text{В}$		$U_H = \text{В}$	
	дел	В	$I_A$		$I_A$	
			дел	мкА	дел	мкА
1						
2						
3						
·						
·						

### Оформление работы

По измеренным, при снятии температурной характеристики  $U_H$  и  $I_H$  рассчитывают сопротивление нити накала  $R$ , и по зависимости  $R = f(T)$ , приведенной на макете, определяют температуру нити накала при всех напряжениях накала. Строят температурную характеристику диода  $I_{\text{нас}} = f(T)$ .

По измеренным значениям  $U_A$ ,  $I_A$  (таблица 2) строят графики анодных характеристик  $I_A = f(U_A)$  (обе кривые на одном графике).

### *Определение работы выхода электрона*

При выполнении этого задания используются данные таблицы 1. Из формулы Ричардсона следует, что ток насыщения  $I_A$

$$I_A = CT^2 \exp[-A/kT],$$

где  $A$  - работа выхода,  $C$  - постоянная для данного катода величина. Отсюда

$$I_A/T^2 = C \cdot \exp[-A/kT].$$

Логарифмируя это выражение, получим:

$$\ln \frac{I_A}{T^2} = \ln C - \frac{A}{k} \frac{1}{T}.$$

Если построить график зависимости  $\ln \frac{I_A}{T^2}$  от  $\frac{1}{T}$ , получится прямая линия, угловой коэффициент которой  $-\frac{A}{k}$ .

Отсюда можно определить работу выхода.

Для удобства расчетов можно строить зависимость  $\ln \frac{I_A}{(10^{-3} T)^2}$  от  $\frac{10000}{T}$  и брать значение тока в мкА. Тогда

$$\ln \frac{I_A}{(10^{-3} T)^2} = \ln C' - \frac{A}{10^4 k} \left( \frac{10^4}{T} \right).$$

Расчетные данные следует занести в таблицу 3.

Таблица 3

№ измерения	$T$	$\frac{10^4}{T}$	$(10^{-3} T)^2$	$I_A$ мкА	$\frac{I_A}{(10^{-3} T)^2}$	$\ln \frac{I_A}{(10^{-3} T)^2}$
1						
2						
3						
.						

По данным таблицы 3 строится график как на рис. 2

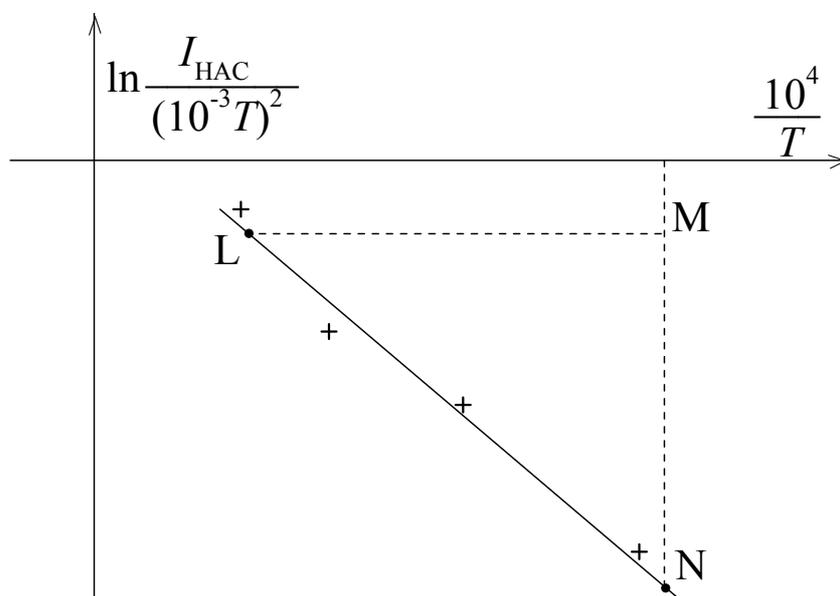


Рис. 2.

По нанесенным точкам проводится прямая, строится треугольник LMN и определяются величины отрезков LM и MN с уче-

том масштабов по осям.

Работа выхода рассчитывается в джоулях по формуле

$$A = 10^4 k \cdot \frac{MN}{ML},$$

где  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана. Затем значение работы выхода переводится в эВ.  $1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Дж.

## СОДЕРЖАНИЕ

Тема 2 – 3. Электронная теория проводимости .....	3
Лабораторная работа №2 – 31. Исследование температурной зависимости металлов и полупроводников .....	14
Лабораторная работа №2 – 32. Измерение температуры с помощью термопары .....	20
Тема 2 – 4. Явление термоэлектронной эмиссии .....	26
Лабораторная работа №2 – 41. Исследование диода и определение работы выхода электронов из катода .....	33