

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет**

**промышленных технологий и дизайна»**

**Высшая школа технологии и энергетики**

**Кафедра физики**

**Физика**

**ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ**

**Выполнение лабораторной работы**

Методические указания

к лабораторным работам № 2 — 31, 2 — 41

для бакалавров всех факультетов

Составители:

В.И. Лейман

О.Ю. Деркачева

А.В. Федоров

Санкт-Петербург

2021

Утверждено  
на заседании кафедры физики  
28.03.2021г., протокол №2  
Рецензент профессор каф.физики  
ВШТЭ СПбГУПТД, к.ф.-м. н. А.Л.Ашкалунин

Методические указания содержат описание трех лабораторных работ по электричеству с кратким изложением теории по каждой работе.

Предназначается для бакалавров всех специальностей.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве методических указаний.

**Режим доступа: [http://publish.sutd.ru/tp\\_get\\_file.php?id=202016](http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016), по паролю.  
- Загл. с экрана.**

**Дата подписания к использованию 21.10.2021 г. Рег.№ 56**

**Высшая школа технологии и энергетики СПб ГУПТД  
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4**

## СОДЕРЖАНИЕ

ТЕМА 2-3. ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕОРИЯ ПРОВОДИМОСТИ .....	4
Классическая теория проводимости металлов.....	4
Выводы.....	6
Понятие о зонной теории проводимости.....	6
Контрольные вопросы и задачи.....	11
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2-31 .....	12
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ.....	12
Порядок выполнения работы .....	13
ТЕМА 2-4. ЯВЛЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ .....	16
Электронные лампы.....	19
Контрольные вопросы и задачи.....	23
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-41 .....	24
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИОДА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ КАТОДА .....	24
Порядок выполнения работы .....	25
Оформление работы.....	26
Определение работы выхода электрона .....	27

## 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.

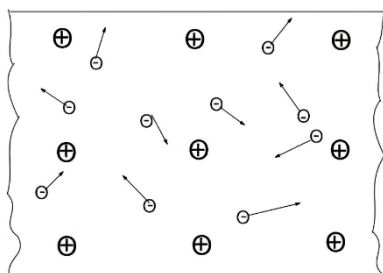


Рис.1. Хаотическое тепловое движение электронов в металле

При создании внешнего электрического поля напряженностью  $E$  (включение разности потенциалов между концами проводника) электроны приобретут дополнительную скорость движения в направлении действия поля. В результате возникает 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 движение переходит в хаотическое. За время свободного пробега  $\tau$  электронов скорость их дрейфа меняется от нуля до максимальной величины  $u_{\max} = a\tau$  (рис. 2).

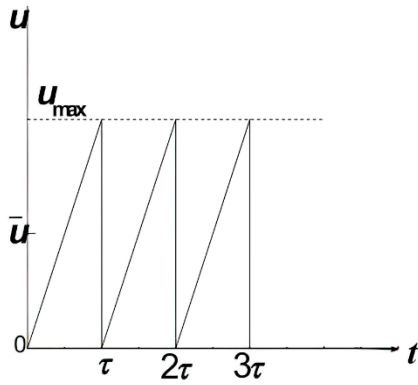


Рис. 2. Движение электронов в электрическом поле в металле

Тогда средняя скорость их направленного движения с учетом (1),

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

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

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

С учетом (2) получаем

$$j = \frac{ne^2 l}{2m\nu} E = \sigma E, \quad (4)$$

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

$$j = \frac{ne^2 \tau}{2m\nu} E = \sigma E, \quad (5)$$

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

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

обратная величина  $\rho = \frac{1}{\sigma}$  называется удельным сопротивлением

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

Согласно теории идеального газа скорость хаотического движения электронов:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{2kT}{\pi m}}. \quad (8)$$

Отсюда следует, что сопротивление проводника должно возрастать 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 температуры кристаллической решетки, состоящей из положительных ионов ( $l \sim T^{-1}$ ). В то же время  $V$  мало меняется с ростом температуры.

### ***Выводы***

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

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

2. При включении поля возникает направленное движение электронов — дрейф вдоль силовых линий поля (скорость направленного движения приобретает электроны за время 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  $0^\circ\text{K}$  электроны заполняют все уровни, начиная с самого нижнего до уровня Ферма.

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  $3 — 10$  эВ, а электрическое поле может сообщить энергию не более  $10^{-8}$  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 и не зависит от температуры.

В *полупроводниках* заполнение зон такое же, как и в диэлектриках. Поэтому при температурах, близких к  $0^\circ K$ , 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 начинают 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.

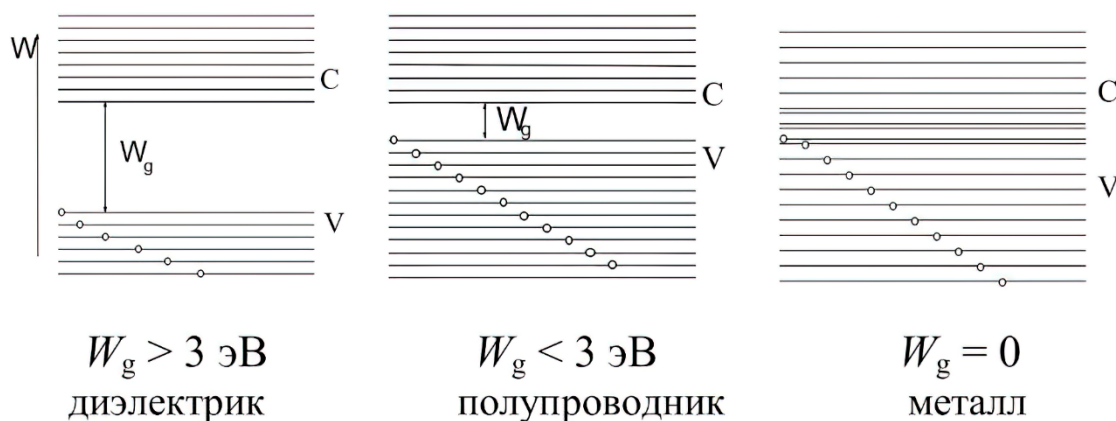


Рис. 3. Зонная схема твердых тел, где о — электрон на данном уровне; V—валентная зона; C — зона проводимости;  $W_g$  — ширина запрещенной зоны; W—энергия электронов

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

$$n_- = n_+ = n_0 \exp\left(-\frac{W_g}{2kT}\right).$$

Плотность тока в полупроводнике складывается из плотности тока электронов и дырок  $y = en_-u_- + en_+u_+$ . 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:

$$u_+ = b_+E, \quad u_- = b_-E.$$

$b_+$  и  $b_-$  называются подвижностями дырок и электронов.

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

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

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 *p*-проводимость. На рис. 4 показана зонная схема собственного и примесного полупроводника.

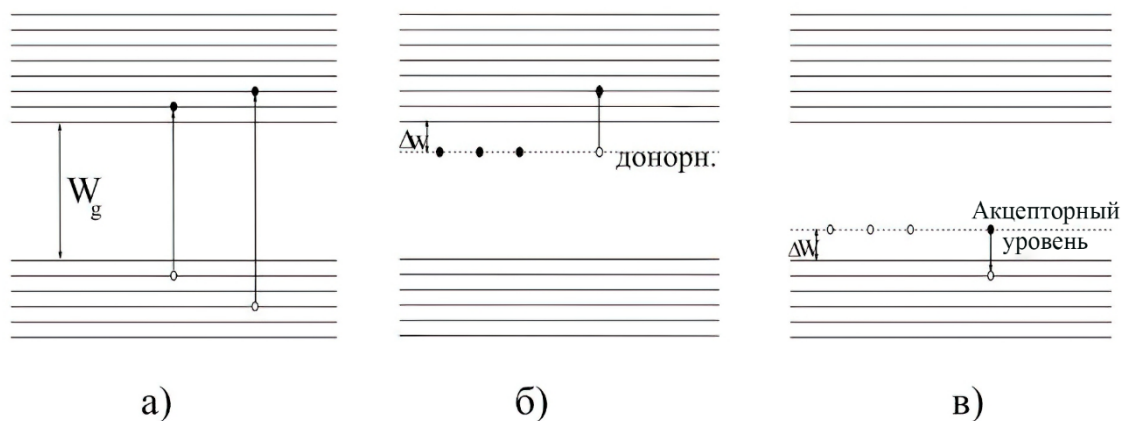


Рис. 4. Зонная схема полупроводников где а–собственный полупроводник; б–полупроводник с донорской примесью; в–полупроводник с акцепторной примесью.

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

$$\sigma = A e^{-\frac{\Delta W}{kT}}, \quad (11)$$

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

### ***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.
2. Квантовая система имеет четыре энергетических уровня, на которых находятся три электрона. Сколько различных заполнений уровней имеет данная система? Нарисуйте их.
3. Сопротивление металла при нагревании увеличилось на 20 %. Почему? Что и как изменилось в металле?
4. Сопротивление полупроводника уменьшилось при нагревании в 2 раза. Почему? Что и как изменилось в полупроводнике?
5. 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?
6. В некотором полупроводнике концентрация дырок в три раза превышает концентрацию электронов проводимости. Какая примесь была добавлена в полупроводник?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2-31

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

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

Описание установки. Для измерения сопротивления в работе используется следующая схема установки (рис.5).

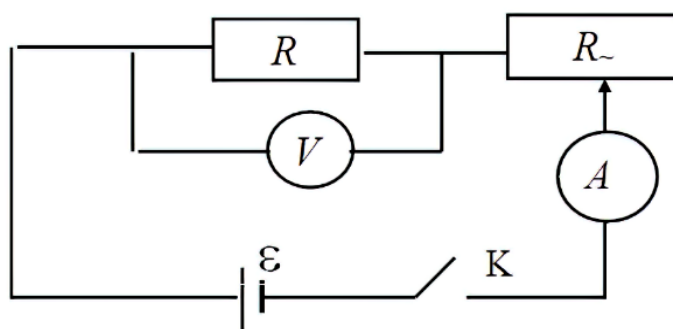


Рис. 5. Электрическая схема установки

Из закона Ома следует, что ток в проводнике пропорционален приложенному к нему напряжению:

$$R_x = \frac{U}{I}, \quad (12)$$

где  $U$  — показания вольтметра, а  $I$  — показания амперметра. На схеме (рис. 6) в качестве  $R = R_x$  используются металлическая проволока и полупроводниковое термосопротивление, закрепленные внутри нагревателя. Нагреватель подсоединяется к регулируемому источнику напряжения.

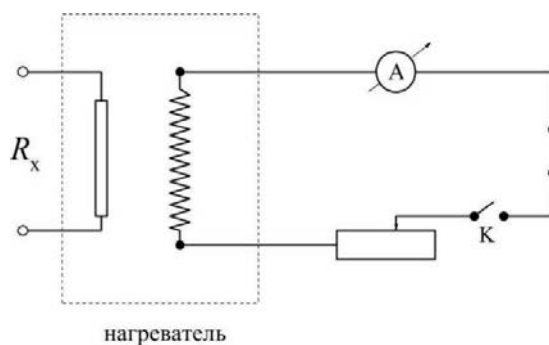


Рис. 6. Схема питания нагревателя

Температура сопротивлений измеряется термометром.

## **Порядок выполнения работы**

1. Собрать схему (рис. 5 и 6). И качестве  $R$  подключить полупроводниковое термосопротивление;
2. После проверки преподавателем включить схему рис. 5;
3. Записать данные напряжения и тока в таблицу 1;
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 измерения тока и напряжения;
6. Измерения сопротивления проводятся до температур  $100 — 110^\circ\text{C}$ .
7. Провести измерения для металлического сопротивления. Для этого выполнить пункты 1 — 6, переключив контакт на металлическое сопротивление;
8. Данные измерений занести в таблицу 1;
9. Рассчитать сопротивления  $R_x$  по формуле (12);

Таблица 1

№	Металл №				Полупроводник №			
	$t$	$R_M$	$T$	$1000/T$	$t$	$R_T$	$T$	$1000/T$
	$^\circ\text{C}$	$\text{О}_M$	$\text{К}$	$\text{К}^{-1}$	$^\circ\text{C}$	$\text{О}_M$	$\text{К}$	$\text{К}^{-1}$
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  $\alpha$

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

На рис. 7 показан принцип вычисления  $R_0$  и  $\alpha$  из графика:

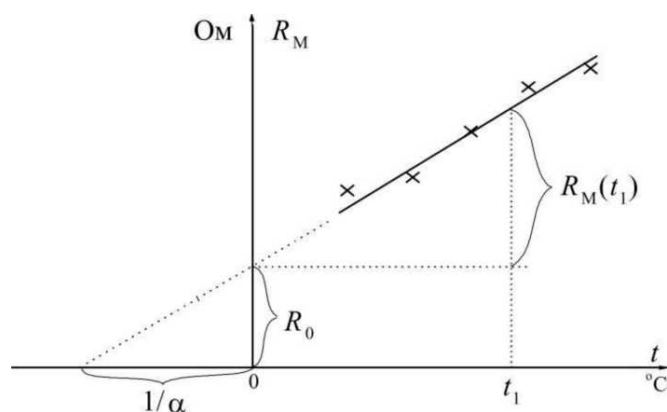


Рис. 7. Зависимость сопротивления металла от температуры

$$\alpha = \frac{R_M(t) - R_0}{R_0 t_1} \quad (13)$$

12. Построить график  $\ln R_T = f\left(\frac{1000}{T}\right)$  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:

$$R = A \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right], \quad (14)$$

отсюда

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

Запишем уравнение (14) 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  $E_g$ ,

$$E_g = 2000k \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}. \quad (15)$$

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

На рис. 8 показан принцип вычисления  $E_g$  из графика.

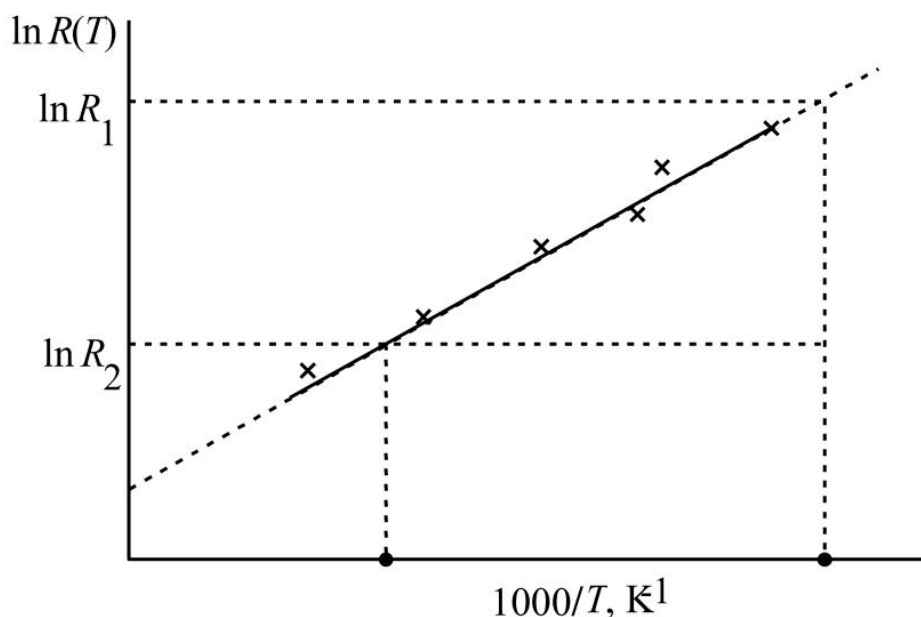


Рис. 8. График зависимости сопротивления металла РТ температуры в приведенных координатах  $\ln R - 10^3/T$

На оси ординат  $\ln R(T)$  выделить два некоторых значения величин  $\ln R_1$  и  $\ln R_2$ , затем провести две прямые, параллельные оси абсцисс  $1000/T$ . После этого на оси абсцисс  $1000/T$  также провести две вертикальные линии до пересечения с прямой данных эксперимента из таблицы 1, как показано на рисунке 8. Определив разницу  $(\ln R_1 - \ln R_2)$  и  $(1000/T_2 - 1000/T_1)$  в точках 1 и 2 на рис. 8 вычислить значение по формуле (15)

## 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  $n = 10^{28} - 10^{29} \text{ м}^{-3}$ .

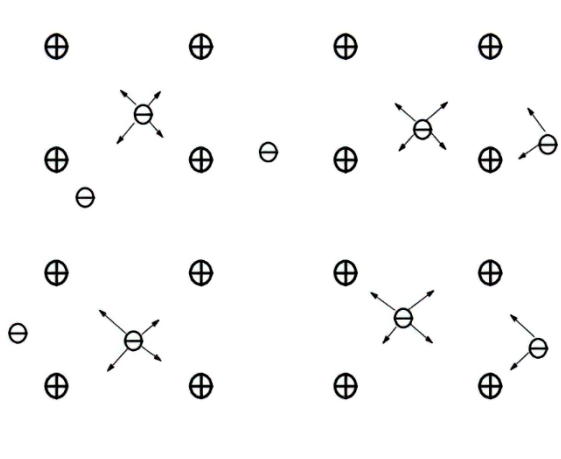


Рис. 9. Тепловое движение электронов в металле

На рис. 9 схематически изображено строение металла. Электроны внутри металла находятся в состоянии хаотического движения, но 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 является отрицательной. Изменение



потенциальной энергии внутри и вблизи металла в зависимости от координаты  $X$  представлено на рис. 10.



Рис. 10. Энергия электронов в металле. Уровень Ферми

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  $\mathcal{E}$ ,  $W = -W_0 + \mathcal{E}$ . При абсолютном нуле температур наибольшая кинетическая энергия соответствует уровню Ферми и называется энергией Ферми  $\mathcal{E}_F$ . Следовательно, наибольшая

энергия электронов в металле  $W = -W_0 + \varepsilon_\phi < 0$ . На рис. 10 электроны на заполненных уровнях изображены точками.

Наименьшая энергия электрона вне металла равна нулю ( $W_{nom} = 0$  и  $\varepsilon = 0$ ). 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

$$A = 0 - W_{max} = W_0 - \varepsilon_\phi$$

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. Подбор соответствующего покрытия поверхности существенно понижает 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  $\varepsilon$ , описывается распределением Больцмана

$$n \approx n_0 \exp \left[ \frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT} \right].$$

Только те электроны, для которых  $\varepsilon - \varepsilon_\phi > A$ , 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,  $\exp \left[ -\frac{A}{kT} \right] = 10^{-50}$ .

При увеличении температуры количество электронов, обладающих достаточной энергией, чтобы вырваться из металла, быстро увеличивается и при температурах превышающих 1000 °К, наблюдается заметная эмиссия электронов. Чем ниже работа выхода, тем ниже температуры, при которых

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 (рис. 11а) имеет два электрода: катод К в виде тонкой нити и анод А, выполненный обычно в форме цилиндра (рис. 11б).

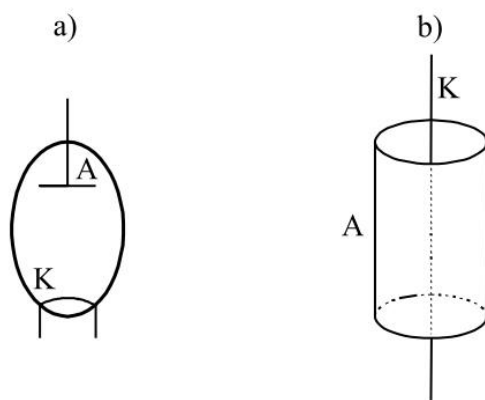


Рис. 11. Конструкция вакуумных ламп – диодов

Электроды впаяны в стеклянный баллон, из которого выкачан 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 вольтамперной или анодной характеристикой. Эта кривая изображена на рис. 12.

На рис. 12а, 12б, 12в 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 динамическое равновесие – число электронов, вылетевших из катода, равно числу возвратившихся на катод (рис. 12а).

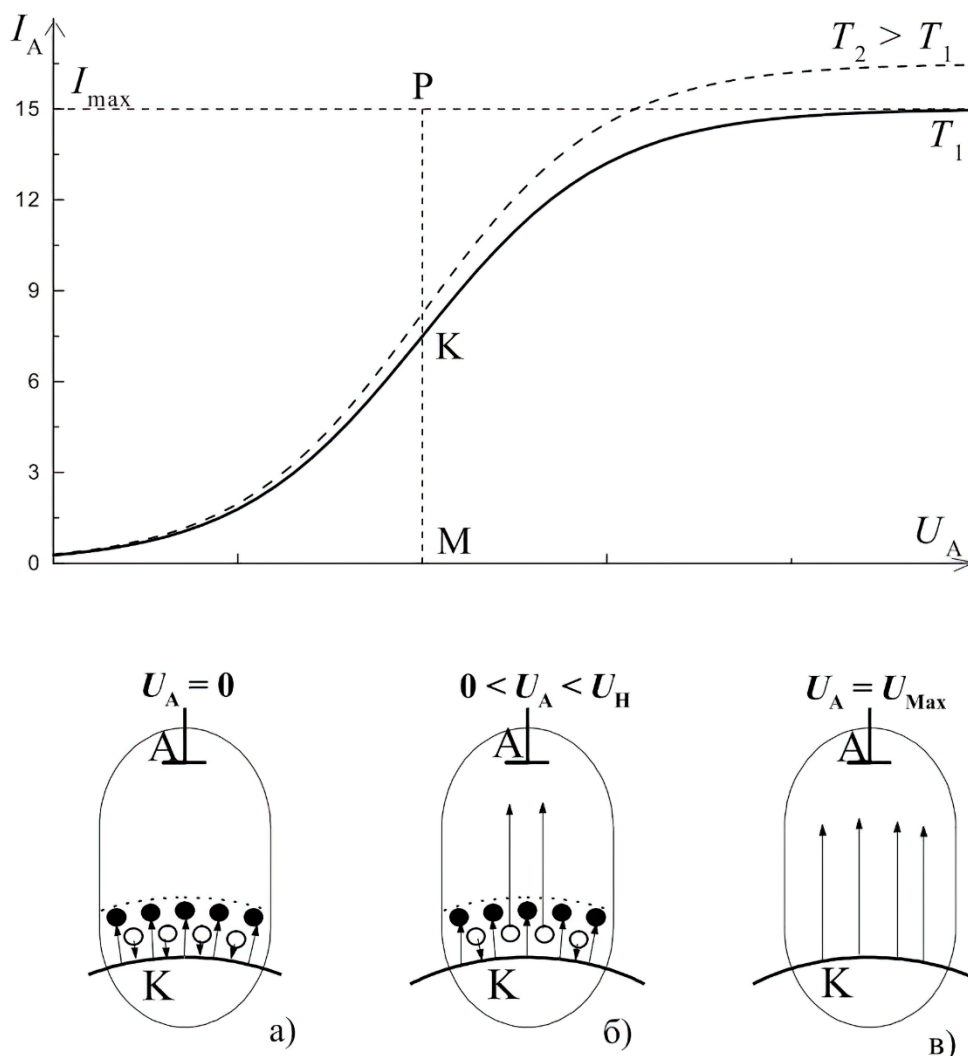


Рис. 12. Вольтамперная зависимость диода. Схема движения электронов от горячего катода к аноду

При положительном анодном напряжении (рис. 12б) 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. 12в). 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  $I_{нас} = eN_{ЭМ}$ , анодный ток  $I_A = eN_A$ . Следовательно, на рис. 12 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:

$$j_{нас} = VT^2 e^{-A/kT},$$

где  $j_{нас}$  — плотность тока насыщения,  $k$  — постоянная Больцмана,  $V$  — 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. 12 пунктиром, изображена кривая, снятая при более высокой температуре  $T_2 > T_1$ . Как следует из формулы Ричардсона, ток насыщения, по экспоненциальному закону резко возрастает при росте температуры. Эта зависимость изображена на рис. 13 и называется температурной характеристикой диода.

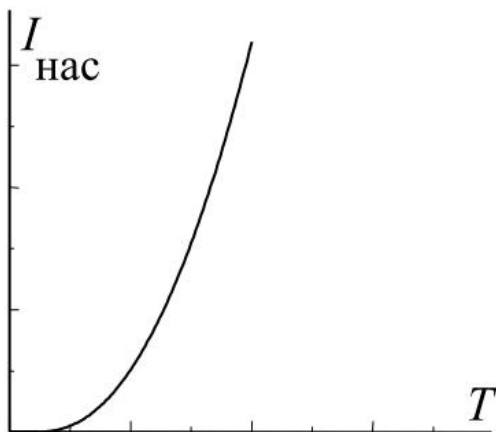


Рис. 13. Температурная зависимость тока в диоде

На рис. 12 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.

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 анодное 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. 14, где  $\mathcal{L}$  — 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.

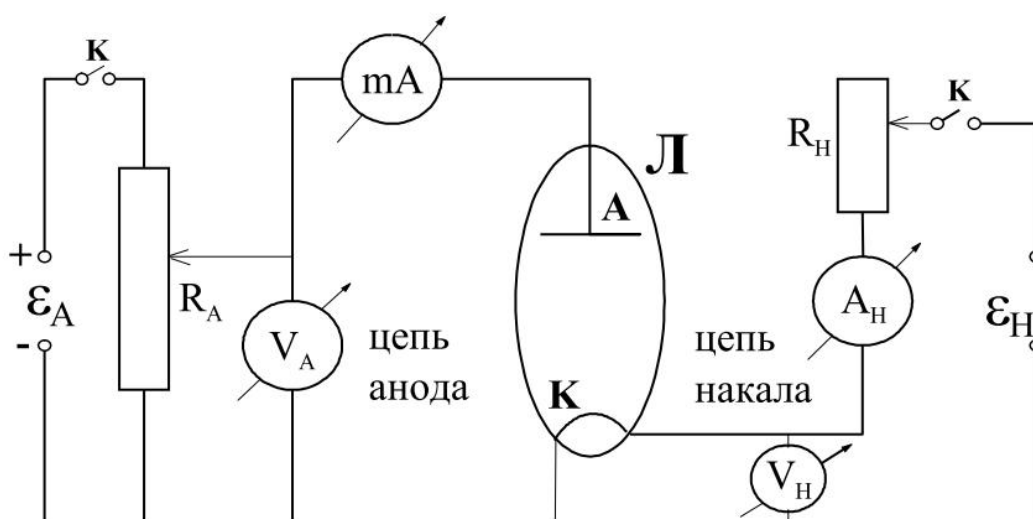


Рис. 14. Электрическая схема установки

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 температуры 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  $U_A = 40 - 80\text{В}$ . Напряжение накала изменяется от 3 В до 5 В через 0.2 В. (Более точные указания смотрите на макете).

1. Установить анодное напряжение  $U_A = 40 - 80\text{ В}$ , 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 табл.2.

Таблица 2

№	$U_A = B$								
	$U_H$		$I_H$		$I_A$		$R$ Ом	$t$ °С	$T$ 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 ит. д. и записывают анодный ток.
3. Повторяют пункты 1 и 2 при втором напряжении накала. Данные измерений заносят в табл. 2.

### ***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  $I_{нас} = f(T)$ .

По измеренным значениям  $U_A$ ,  $I_A$  (табл. 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 табл.2. Из формулы Ричардсона следует, что ток насыщения  $I_A$

$$I_A = CT^2 \exp\left[-\frac{A}{kT}\right],$$

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

$$\frac{I_A}{T^2} = C \cdot \exp\left[-\frac{A}{kT}\right].$$

Логарифмируя это выражение, получим:

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

Если построить график зависимости

$$\ln \frac{I_A}{T^2} \text{ от } \frac{1}{T},$$

получится прямая линия, угловой коэффициент которой  $-\frac{A}{k}$ .

Отсюда можно определить работу выхода.

Для удобства расчетов можно строить зависимость

$$\ln \frac{I_A}{(10^{-3}T)^2} \text{ от } \frac{10000}{T}$$

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 табл. 3.

Таблица 3

№	$U_A$		$U_H = B$		$U_H = B$	
	дел	В	$I_A$		$I_A$	
			дел	мкА	дел	мкА
1						
2						
3						
...						

По данным таблицы 4 строиться график как на рис. 15

Таблица 3

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

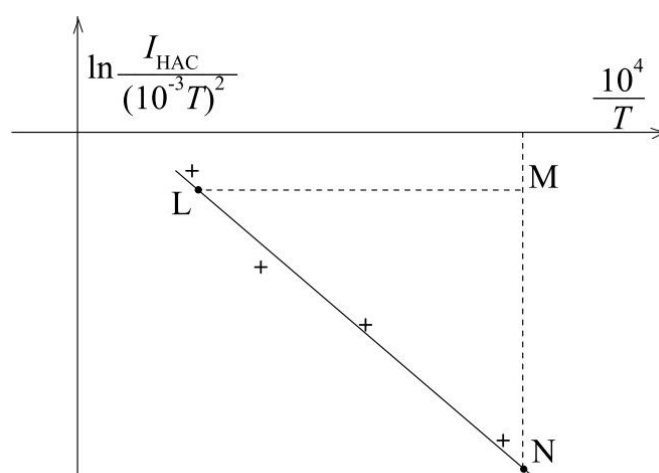


Рис. 15. Приведенный график зависимости тока насыщения диода от приведенной температуры

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