

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

М.А. Бутюгин, С.М. Новиков

ФИЗИКА

ПОСОБИЕ

по выполнению лабораторной работы КС-5

**«ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ
ЭМИССИИ ИЗ МЕТАЛЛОВ»**

*для студентов II курса
всех специальностей
дневного и заочного обучения*

Москва 2008

ББК 53
Б93

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доц. В.А. Курочкин.

Бутюгин М.А., Новиков С.М.

Физика. Пособие по выполнению лабораторной работы КС-5. Изучение термоэлектронной эмиссии из металлов. – М.: МГТУ ГА, 2008.- 12 с.

Данное пособие издается в соответствии с учебным планом для студентов 2 курса всех специальностей дневного обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 24.04.08 г. и методического совета 20.05.08 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА КС – 5 ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ ИЗ МЕТАЛЛОВ

1. Цель работы

Изучение явления термоэлектронной эмиссии, экспериментальное изучение вольт-амперной характеристики диода, исследование зависимости плотности тока насыщения термоэмиссии от температуры катода и определение работы выхода электрона из вольфрама методом прямых Ричардсона.

2. Подготовка к работе

Изучите теоретический материал по лекциям или учебнику [1–3]: модель свободных электронов в металле, энергия Ферми, работа выхода, термоэлектронная эмиссия, вакуумный диод, вольт-амперная характеристика диода. Прочитайте также разделы 3 и 4 методического описания. Ознакомьтесь с конструкцией лабораторного стенда, порядком проведения измерений и обработки их результатов по методическому описанию. Подготовьте проект отчета по лабораторной работе. Потренируйтесь отвечать на вопросы из раздела 7 данного описания и обучающего теста (на сайте кафедры физики или CD).

3. Краткая теория

Согласно модели свободных электронов валентные электроны атомов могут свободно перемещаться в пределах металла, обуславливая его электропроводность, и по этой причине их называют электронами проводимости. В этой модели считается, что электроны не взаимодействуют посредством кулоновских сил.

Отдельные электроны проводимости, двигаясь внутри металла с большими скоростями, могут пересекать поверхность металла. Вылетевший из металла электрон удаляется от поверхности до тех пор, пока кулоновское взаимодействие с избыточным положительным зарядом, возникшим на месте, которое покинул электрон, не заставит его вернуться обратно. Таким образом, вблизи поверхности идет непрерывный процесс «испарения» и возврата электронов (рис. 1). Поэтому металл оказывается окутанным облаком электронов, образующих совместно с поверхностным слоем положительных ионов двойной электрический слой, подобно плоскому конденсатору. Поле двойного слоя препятствует выходу электронов из металла. Таким образом, потенциальная энергия свобод-

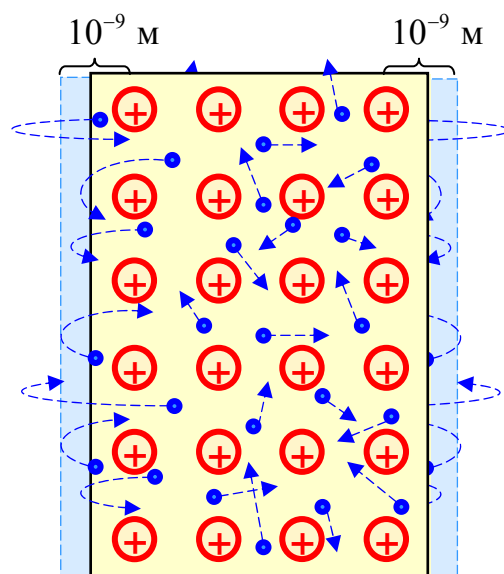


Рис. 1

выходу электронов из металла. Таким образом, потенциальная энергия свобод-

ных электронов внутри металла меньше, чем вне металла на величину, равную E_{p0} . Если принять, что потенциальная энергия свободных электронов в металле равна нулю, то на энергетической диаграмме они будут расположены в потенциальной яме глубиной E_{p0} (рис. 2).

Из решения уравнения Шрёдингера для электрона, находящегося в такой яме, следует, что его энергия может иметь только дискретные значения (энергетические уровни). Электроны, как частицы с полуцелым спином, подчиняются принципу Паули, согласно которому каждый энергетический уровень заселяется не более чем двумя электронами с противоположными спинами. Поэтому, при температуре $T = 0$ К электроны располагаются попарно на самых низких уровнях (сплошные линии на рис. 2). Энергетический уровень, отделяющий заполненные уровни от пустых при $T = 0$ К, называется *энергией Ферми* и обозначается E_F . На рис. 2 ему соответствует граница между сплошными и пунктирными линиями.

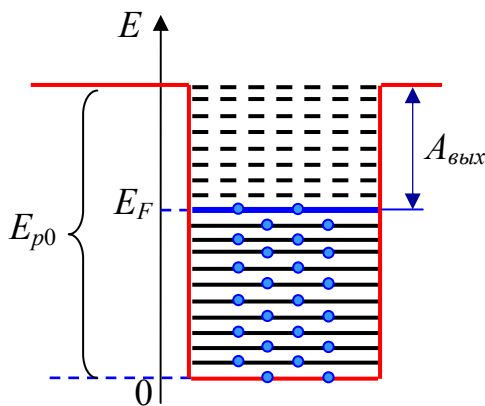


Рис. 2

Электронам, находящимся в потенциальной яме на разных уровнях энергии, для выхода за пределы металла необходимо сообщить разную энергию. Минимальная энергия, необходимая для удаления электрона из металла при $T = 0$ К,

$$A_{\text{вых}} = E_{p0} - E_F \quad (1)$$

называется *работой выхода электрона* из металла в вакуум.

При температуре $T > 0$ К у электронов с энергией близкой к значению энергии Ферми появляется дополнительная энергия теплового движения и резкая граница между заполненными и незаполненными электронами уровнями энергии исчезает. При тепловом равновесии среднее число электронов $\langle N_n \rangle$, находящихся на уровне с энергией E_n , определяется распределением Ферми-Дирака:

$$\langle N_n \rangle = \frac{2}{e^{\frac{E_n - E_F}{kT}} + 1} \quad (2)$$

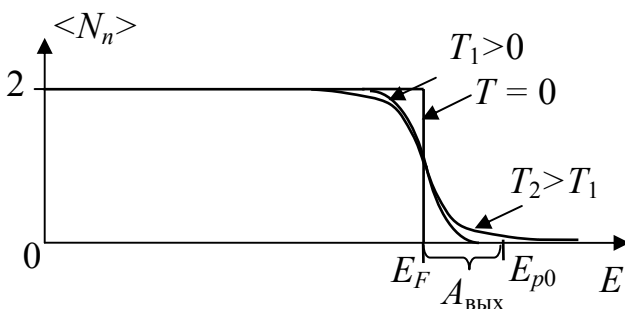


Рис. 3

На рис. 3 приведены графики этого распределения для трех температур: $T = 0$, $T_1 > 0$ и $T_2 > T_1$. В отличие от рис. 2 на нем ось энергии горизонтальна. Чем выше температура, тем более полого идет ниспадающий участок кривой при $E > E_F$. Поэтому,

при комнатной температуре слишком малое количество электронов способно преодолеть работу выхода и выйти из металла. При повышении температуры количество таких электронов становится вполне заметным. Такое испускание электронов нагретым металлом называется *термоэлектронной эмиссией*.

4. Методика проведения эксперимента и описание установки

Исследование термоэлектронной эмиссии можно осуществлять с помощью двухэлектродной лампы, называемой вакуумным диодом, содержащей два электрода – накаливаемый ток катод и холодный анод (электрод, собирающий вылетевшие с анода электроны). Конструктивно электроды могут быть выполнены разными способами. В простейшем случае катод имеет форму прямой нити, анод – коаксиального с ней цилиндра. На рис. 4 изображена принципиальная схема включения такого диода. Катод К нагревается током, создаваемым батареей накала B_n . Величину тока накала измеряют амперметром A_n и изменяют с помощью переменного сопротивления R . Между катодом К и анодом А с помощью анодной батареи B_a создается напряжение, регулируемое потенциометром П. Величина этого напряжения измеряется вольтметром V . Миллиамперметр mA предназначен для измерения силы тока через диод

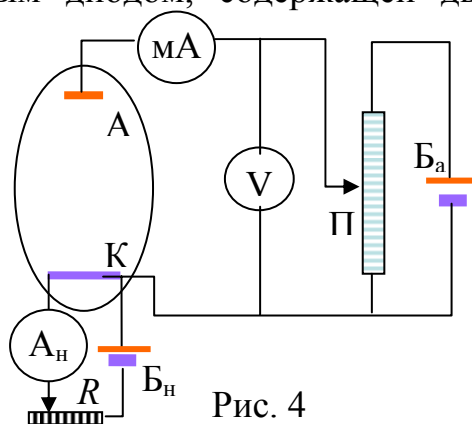


Рис. 4

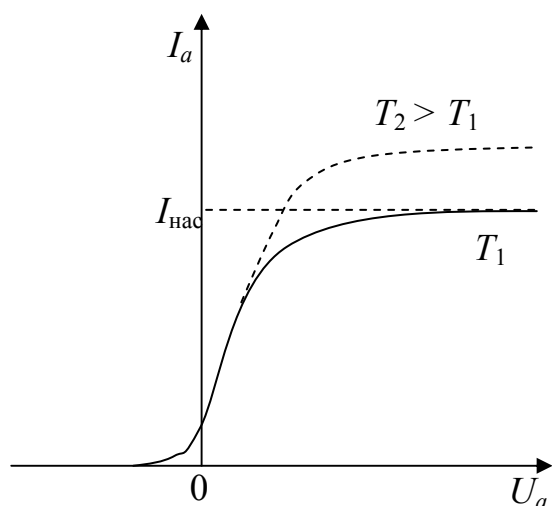


Рис. 5

(анодного тока). При постоянном токе накала катода кривая зависимости силы тока в диоде I_a от анодного напряжения U_a имеет вид, показанный на рис. 5. Эта кривая называется вольт-амперной характеристикой диода. Различные кривые на рис. 5 соответствуют разным температурам катода. Когда потенциал анода равен нулю, сила тока мала, она определяется лишь самыми быстрыми термоэлектронами, способными достигнуть анода. Чтобы полностью прекратить попадание на анод электронов, т.е. сделать анодный ток равным нулю, необходимо приложить между анодом и катодом некоторое отрицательное напряжение.

При увеличении положительного потенциала анода сила тока возрастает и затем достигает насыщения $I_{нас}$, т.е. почти перестает зависеть от анодного напряжения. В этом случае все вылетевшие с катода электроны достигают анода. При увеличении температуры катода увеличивается количество вылетающих из катода электронов и, соответственно увеличивается значение тока, при котором достигается **насыщение**. Одновременно увеличивается и то анодное напряжение, при котором устанавливается ток насыщения. Таким образом, вольт-амперная характеристика диода оказывается нелинейной, т.е. закон Ома не выполняется.

Плотность тока насыщения $j_{нас}$ пропорциональна числу покидающих металл электронов, энергия которых превышает энергию Ферми более чем на ве-

личину работы выхода ($E_n - E_F \geq A_{\text{ВЫХ}}$). Используя квантовые представления, из распределения (2) можно получить **формулу Ричардсона – Дешимана**:

$$j_{\text{нас}} = \alpha T^2 e^{-\frac{A_{\text{ВЫХ}}}{kT}}, \quad (4)$$

где α – некоторая постоянная для конкретного металла величина, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К = $0,8617 \cdot 10^{-4}$ эВ/К – постоянная Больцмана. Плотность тока насыщения характеризует эмиссионную способность катода, которая зависит от природы материала катода, состояния его поверхности и температуры.

Измеряя на опыте зависимость тока насыщения от температуры, можно определить работу выхода электронов для данного металла. В лабораторной работе для ее расчета используется метод прямых Ричардсона. Для этого формула (4) логарифмируется и записывается в виде:

$$\ln \frac{j_{\text{нас}}}{T^2} = -\frac{A_{\text{ВЫХ}}}{k} \cdot \frac{1}{T} + \ln \alpha. \quad (5)$$

Это уравнение аналогично математической записи уравнения прямой линии $y = ax + b$, где $y = \ln \frac{j_{\text{нас}}}{T^2}$, $x = \frac{1}{T}$, $a = -\frac{A_{\text{ВЫХ}}}{k}$, $b = \ln \alpha$. График зависимости

$\ln \frac{j_{\text{нас}}}{T^2}$ от $\frac{1}{T}$ является прямой линией с угловым коэффициентом $a = -A_{\text{ВЫХ}}/k$.

Определив его, можно рассчитать работу выхода:

$$A_{\text{ВЫХ}} = -k \cdot a. \quad (6)$$

Измерив по графику координату b точки пересечения прямой с осью ординат, можно рассчитать постоянную α .

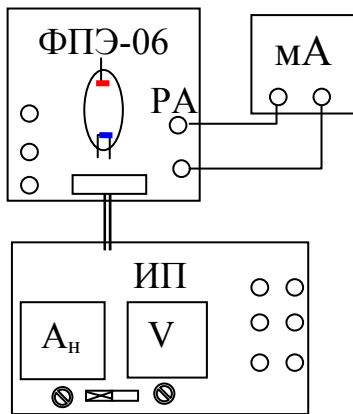


Рис. 6

Для построения графика необходимо знать плотность тока насыщения j_n и температуру катода T . Их измерение осуществляется на установке, схема которой приведена на рис. 6. В качестве диода в работе используется радиолампа с вольфрамовым катодом прямого накала, расположенная в кассете ФПЭ-06. Нагрев катода осуществляется постоянным током.

Амперметр A_n на панели источника питания ИП служит для контроля тока накала катода I_n , **максимальное значение которого не должно превышать 1,7 А**. Плавная регулировка тока накала осуществляется ручкой, расположенной под амперметром A_n .

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

Для измерения анодного тока I_a используется миллиамперметр mA , который подключается к кассете ФПЭ-06 к клеммам РА. Он работает в режиме с пределом измерения 15 мА. По результатам измерений строится вольт-амперная характеристика диода, и по ней определяется плотность тока насыщения.

Для используемой в лабораторной работе лампы была экспериментально определена зависимость температуры катода от тока накала I_n . График этой зависимости приведен на рис. 7. Измерив ток накала катода I_n , по этому графику можно определить температуру катода.

5. Порядок выполнения работы

5.1. Внимание! Подключение установки к электрической сети осуществляет лаборант. Красный провод от миллиамперметра подключается к верхней клемме РА. Левая клавиша переключения пределов измерения между ручками регулировки на источнике питания ИП должна быть в нажатом состоянии.

5.2. Плавно поворачивая ручку, расположенную на панели источника питания под амперметром A_n (рис. 6), установите ток накала $I_n = 1,70$ А. С помощью ручки, расположенной непосредственно под вольтметром V , установите значение анодного напряжения $U_a = 10$ В. На некоторых источниках питания этого сделать не удастся. В этом случае необходимо установить минимально возможное напряжение. Измерьте по шкале миллиамперметра мА соответствующее значение анодного тока I_a и запишите его в таблицу 1. Увеличивая анодное напряжение до 80 В с шагом в 10 В, измерьте и запишите соответствующие значения анодного тока в таблицу 1.

5.3. Проведите аналогичные измерения анодного тока (пункт 5.2) еще для пяти значений тока накала в интервале от 1,70 до 1,45 А (в таблице 1 приведены рекомендованные значения тока накала). Результаты запишите в таблицу 1.

6. Обработка результатов измерений и оформление отчёта

6.1. Для каждого значения тока накала I_n в таблице 1 постройте вольт-амперную характеристику (рис. 5) и определите соответствующее значение тока насыщения $I_{нас}$. Запишите результаты в таблицу 2.

Замечание: если измерения проводились, начиная с минимально возможного для источника питания анодного напряжения, то удастся построить только правую часть вольт-амперной характеристики, соответствующую току насыщения (особенно при низких температурах).

6.2. По градуировочному графику (рис. 7) определите температуру катода для каждого значения тока накала. Результаты запишите в таблицу 2.

6.3. Последующие расчеты результатов эксперимента осуществляются методом наименьших квадратов на компьютере, используя программу Microsoft Excel. Для этого необходимо открыть папку «Обработка результатов ЛР», расположенную на рабочем столе лабораторного компьютера, выбрать файл «Расчет ЛР КС 5» и руководствоваться приведенными в файле пояснениями.

6.3.1. Приняв в качестве погрешностей определения величин a и b соответствующие стандартные погрешности (т.е. $\Delta a = \sigma_a$ и $\Delta b = \sigma_b$) запишите результаты расчетов в таблицу 3 в стандартной форме $a \pm \Delta a$, $b \pm \Delta b$, $A_{\text{ВЫХ}} \pm \Delta_{\text{АВЫХ}}$ и $\alpha \pm \Delta\alpha$.

Замечание. Последнее означает, что мы принимаем величину доверительной вероятности (надежности измерения) $P = 0,68$ (68%), а коэффициент Стьюдента $t_{P,n} = 1,0$ при $n = 6$ (для упрощения, вместо табличного значения $t_{P,n} = 1,2$).

При записи результатов необходимо округлять величины погрешностей до одной–двух значащих цифр. Последние цифры значений величин должны быть того же разряда, что и в их погрешности.

6.3.2. Перерисуйте с экрана монитора в отчет график зависимости $\ln \frac{j_{\text{нас}}}{T^2}$ от $\frac{1}{T}$. **Внимание! Запрещается прикладывать для этого листы бумаги к экрану жидкокристаллического монитора. Это приводит к его порче.**

6.4. В случае отсутствия возможности произвести расчеты на компьютере оцените величину работы выхода электрона из вольфрама графическим методом. Для этого:

6.4.1. Рассчитайте величины $1/T$. Результаты запишите в таблицу 2.

6.4.2. Для каждого значения тока насыщения рассчитайте плотность катодного тока насыщения по формуле $j_{\text{нас}} = I_{\text{нас}} / S_{\text{к}}$, отношение $\frac{j_{\text{нас}}}{T^2}$ и

$\ln \frac{j_{\text{нас}}}{T^2}$. Для применяемой в лабораторной работе лампы площадь поверхности катода принять равной $S_{\text{к}} = 27,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Все полученные результаты запишите в таблицу 2.

6.4.3. По экспериментальным точкам постройте график зависимости $\ln \frac{j_{\text{нас}}}{T^2}$ от $\frac{1}{T}$.

6.4.4. Определите по графику угловой коэффициент полученной прямой и произведите оценочный расчет работы выхода по формуле (6). Результаты запишите в таблицу 3 (в эВ).

6.5. По полученным результатам эксперимента сделайте выводы.

Таблица 1

№	I_H , А	U_a , В	10	20	30	40	50	60	70	80
1	1,70	I_a , мА								
2	1,65	I_a , мА								
3	1,60	I_a , мА								
4	1,55	I_a , мА								
5	1,50	I_a , мА								
6	1,45	I_a , мА								

Таблица 2

№	I_H , А	$I_{нас}$, мА	T , К	$\frac{1}{T}$, К ⁻¹	$j_{нас}$, А/м ²	$\frac{j_{нас}}{T^2}$	$\ln \frac{j_{нас}}{T^2}$
1	1,70						
2	1,65						
3	1,60						
4	1,55						
5	1,50						
6	1,45						

Таблица 3

	Метод наименьших квадратов	Графический метод
Коэффициент наклона	$a = \dots \pm \dots$ К	$a_{гр} = \dots$ К
у-пересечение	$b = \dots \pm \dots$	$b_{гр} = \dots$
Работа выхода электрона из вольфрама	$A_{вых} = \dots \pm \dots$ эВ	$A_{вых,гр} = \dots$ эВ
Постоянная α	$\alpha = \dots \pm \dots$ А/м ² ·К	$\alpha_{гр} = \dots$ А/м ² ·К

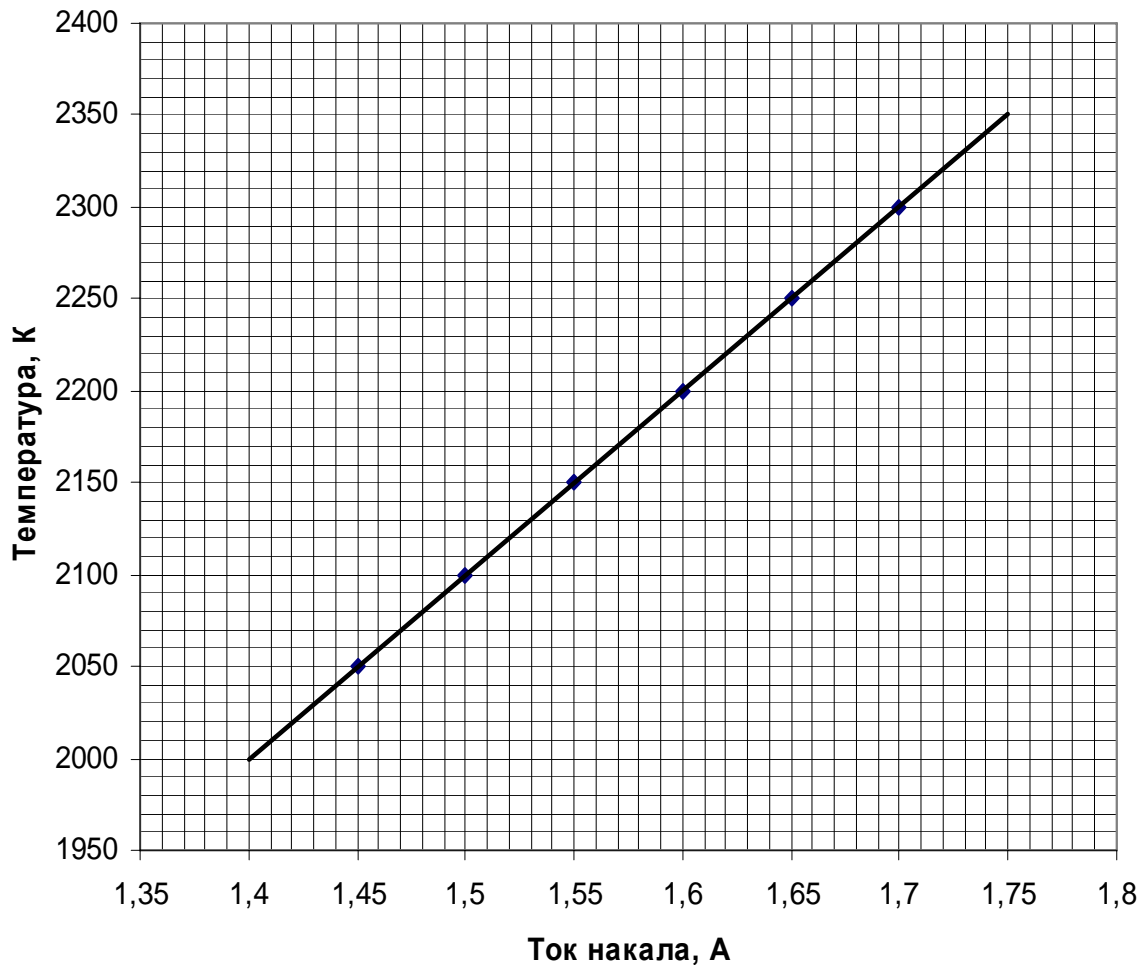


Рис. 7

7. Вопросы для допуска к лабораторной работе

- 7.1. Поясните модель свободных электронов.
- 7.2. Какова природа сил, удерживающих электрон в металле?
- 7.3. Какова причина образования двойного электрического слоя?
- 7.4. В чем заключается явление термоэлектронной эмиссии.
- 7.5. Дайте определение работы выхода электрона.
- 7.6. Поясните понятие энергии Ферми.
- 7.7. Нарисуйте график распределения Ферми-Дирака при высоких температурах.
- 7.8. Поясните устройство вакуумного диода.
- 7.9. Нарисуйте и поясните характер вольтамперных характеристик диода.
- 7.10. Что такое ток насыщения и как он зависит от температуры катода?
- 7.11. Поясните схему подключения диода к источникам питания и измерительным приборам в данной лабораторной работе.
- 7.12. Поясните, почему анодный ток диода достигает насыщения.

8. Литература

- 8.1. Савельев И.В. Курс общей физики. Кн. 5, гл. 8, 9. М.: Наука, 1998 г.
- 8.2. Савельев И.В. Курс физики. Т. 3, гл. 7, 8. М.: Наука, 1989 г.
- 8.3. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 1990 г.

Редактор Т.Д. Неведомская

Подписано в печать 05.09.08 г.

Печать офсетная
0,54 усл.печ.л.

Формат 60x84/16
Заказ № 641/881

0,69 уч.-изд. л.
Тираж 250 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20
Редакционно-издательский отдел
125493 Москва, ул. Пулковская, д.6а

© Московский государственный
технический университет ГА, 2008