

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА ИЗ МЕТАЛЛА

САМАРА 2012

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА ИЗ МЕТАЛЛА

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний к лабораторной работе № 2-4*

САМАРА
Издательство СГАУ
2012

УДК 53(075)
ББК 22.313

Составители: *Н.М.Рогачев, А.И. Мусеев*

Рецензент Н.Д. Семкин, доктор технических наук, профессор

Определение работы выхода электрона из металла: Метод. указания к лаб. работе № 2-4/ *Сост. Н.М. Рогачев, А.И. Мусеев.* – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 24 с.

Приводятся понятие термоэлектронной эмиссии и методика определения работы выхода электрона из металла.

Приводятся схема и описание экспериментальной установки, порядок выполнения работы и обработки опытных данных, контрольные вопросы и перечень рекомендуемой литературы.

УДК 53(075)
ББК 22.313

Лабораторная работа № 2-4

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА
ЭЛЕКТРОНА ИЗ МЕТАЛЛА**



Цель работы: построение и изучение вольтамперной характеристики вакуумного диода; исследование зависимости плотности тока насыщения от температуры катода и определение работы выхода электрона из металла методом прямых Ричардсона.

Приборы и принадлежности: модуль ФПЭ-06 с вакуумным диодом 4Ц14С, источник питания ИП, вольтметр, миллиамперметр.

1. ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

Электрические свойства металлов в значительной степени определяются состоянием *электронов проводимости*, способных перемещаться в металле. При температуре, близкой комнатной, свободные электроны удерживаются внутри металла. На границе металл-вакуум существует *потенциальный барьер*, препятствующий электронам покидать металл. Наименьшая энергия, которую необходимо сообщить электрону, чтобы удалить его из твердого или жидкого тела в вакуум, называется *работой выхода*.

Распределение энергии электрона E для металла изображено на рис.1.

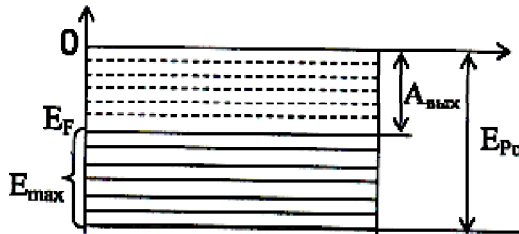


Рис. 1

Штрихами на рисунке показаны незанятые энергетические уровни при температуре 0 К , сплошными горизонтальными линиями – энергетические уровни электронов. При абсолютном нуле температур значения кинетической энергии электронов проводимости заключены в пределах от нуля до энергии E_{\max} , совпадающей с уровнем Ферми E_F .

Уровень Ферми E_F – это максимальная энергия, которую могут иметь электроны при абсолютном нуле температуры.

Для удаления за пределы металла разным электронам нужно сообщать различную энергию. Так, например, электрону, находящему-

ся на самом нижнем уровне зоны проводимости, необходимо сообщить энергию E_{p0} . Следовательно, работа выхода электрона из металла определяется выражением:

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

При комнатной температуре практически все свободные электроны находятся в пределах проводника и имеется лишь небольшое количество электронов, энергия которых достаточна для преодоления потенциального барьера и выхода из металла. Если электронам сообщить дополнительную энергию, то часть электронов получит возможность покинуть металл, т.е. наблюдается испускание электронов. Явление, заключающееся в испускании электронов металлами при сообщении им энергии, необходимой для преодоления работы выхода, называется *электронной эмиссией*, а тела испускающие электроны, называются эмиттерами.

В зависимости от механизма приобретения электронами эмиттера энергии, достаточной для совершения работы выхода различают следующие виды электронной эмиссии:

а) термоэлектронная эмиссия – испускание электронов нагретыми телами;

б) фотоэлектронная эмиссия, или внешний фотоэффект, - испускание электронов под действием электромагнитного излучения;

в) вторичная электронная эмиссия – испускание вторичных электронов в результате бомбардировки эмиттера первичными электронами;

г) ионно–электронная эмиссия – испускание электронов в результате бомбардировки эмиттера ионами;

д) автоэлектронная эмиссия – испускание электронов проводящими твердыми и жидкими телами под действием очень сильного внешнего электрического поля у их поверхности.

Для исследования термоэлектронной эмиссии используют вакуумную лампу *диод*, имеющую два электрода: накаливаемый током *катод* и холодный *анод*. Если диод включить в цепь (рис.2), то при накаливании нити катода 2 от батареи B_n и подачи на анод 1 положительного (относительно катода) напряжения от источника B_a в лампе возникает электрический ток.

Изменяя сопротивление в цепи, можно получить зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения U_a , которая называется *вольтамперной характеристикой* лампы. На рис. 3 показаны вольтамперные характеристики диода при различных температурах катода.

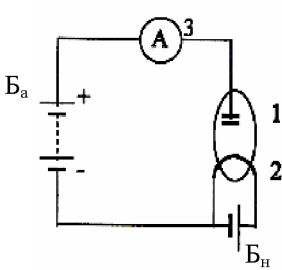


Рис. 2

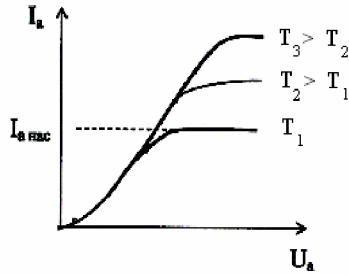


Рис. 3

Как показано на рис. 3, зависимость тока от напряжения не является линейной. Когда потенциал анода равен нулю, сила тока мала, она определяется лишь самыми быстрыми термоэлектронами, способными после выхода из металла достигнуть анода. При увеличении положительного потенциала анода сила тока в лампе возрастает и затем достигает насыщения $I_{нас}$, т.е. почти перестает зависеть от анодного напряжения. Это объясняется тем, что почти все электроны, вылетающие из катода, достигают анода. При увеличении температуры катода увеличивается значение тока насыщения. Одновременно увеличивается и то анодное напряжение, при котором устанавливается ток насыщения. Вольтамперная характеристика диода

не является линейной, т.е. не подчиняется закону Ома. Это объясняется тем, что в результате термоэлектронной эмиссии у поверхности катода образуется большая плотность электронов, которые создают общий отрицательный заряд, и, электроны, вылетающие из металла с небольшой скоростью, не могут его преодолеть. С увеличением анодного напряжения концентрация электронов в облаке пространственного заряда уменьшается, тормозящее действие его становится меньше, и анодный ток начинает возрастать быстрее, чем при прямолинейной зависимости.

Формула зависимости тока I диода от анодного напряжения U имеет вид:

$$I=AU^{3/2}, \quad (2)$$

где коэффициент A зависит от формы и размеров электродов. Эта формула носит название «закона трех вторых» Богуславского-Ленгмюра. Число электронов в металле, способных преодолеть потенциальный барьер на поверхности и выйти в вакуум, быстро увеличивается с повышением температуры. Поэтому и плотность тока насыщения J_n сильно зависит от температуры T . Эта зависимость выражается законом Ричардсона-Дешмана:

$$J_n = BT^2 \exp[-A_{\text{вых}}/(kT)], \quad (3)$$

где $A_{\text{вых}}$ – работа выхода электрона из металла; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; B – эмиссионная постоянная, равная для вольфрама $6,02 \cdot 10^5$ А/(м²К). Плотность тока насыщения характеризует эмиссионную способность катода, которая зависит от природы катода и его температуры. Измеряя на опыте зависимость тока насыщения от температуры, можно определить работу выхода электронов для данного металла.

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для экспериментального определения работы выхода используется логарифмическая форма записи закона Ричардсона-Дешмана:

$$\ln J_n / T^2 = \ln B - A_{\text{вых}} / (kT). \quad (4)$$

График зависимости $\ln J_n / T^2$ от $1/T$ является прямой линией с угловым коэффициентом $\alpha = A_{\text{вых}} / k$. Определив угловой коэффициент α угла наклона прямой к оси абсцисс из графика, можно рассчитать работу выхода электрона:

$$A_{\text{вых}} = k\alpha. \quad (5)$$

Наиболее точное значение α можно получить, используя метод наименьших квадратов. Пусть имеются экспериментальные точки $\ln J_{1n} / T_1^2, \ln J_{2n} / T_2^2, \dots$ полученные при значениях аргументов $1/T_1, 1/T_2, \dots$. Аппроксимируем данную экспериментальную зависимость функцией $\ln J_{0n} / T_0^2 - \ln J_n / T^2 = \alpha / T$ (рис.4).

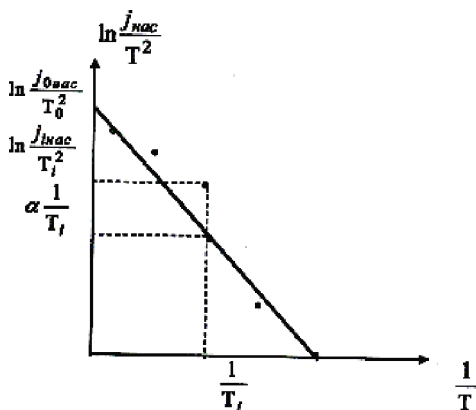


Рис. 4

Тогда при тех же значениях аргумента будем иметь значения функций α/T_1 , α/T_2 и т.д. Сумма квадратов отклонений экспериментальных точек от их теоретических значений равна:

$$\Xi(\alpha) = \Sigma[(\ln J_{0n}/T_0^2 - \ln J_{in}/T_i^2) - \alpha/T_i]^2. \quad (6)$$

Определим значение α , при котором производная функции (6) обращается в нуль:

$$\Xi'(\alpha) = \Sigma - 2[(\ln J_{0n}/T_0^2 - \ln J_{in}/T_i^2 - \alpha/T_i)]/T_i, \quad (7)$$

$$\Sigma(\ln J_{0n}/T_0^2 - \ln J_{in}/T_i^2)/T_i - \alpha \Sigma 1/T_i^2 = 0. \quad (8)$$

Тогда:

$$\alpha = \Sigma [(\ln J_{0n}/T_0^2 - \ln J_{in}/T_i^2)1/T_i] / \Sigma 1/T_i^2. \quad (9)$$

Для построения графика надо знать плотность анодного тока насыщения J_n и температуру катода T . Подводимая к катоду мощность расходуется в вакуумной лампе в основном на тепловое излучение. Для вольфрама была экспериментально определена зависимость температуры катода T от относительного сопротивления $\varepsilon = R/R_{293}$. Эта зависимость, полученная А.И.Моисеевым, справедлива для температурного диапазона (1800 – 2600)К и имеет вид:

$$T = 335 + 165 \varepsilon. \quad (10)$$

Погрешность определения температуры катода при этом не превышает 1,5%.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Структурная схема установки представлена на рис. 5.

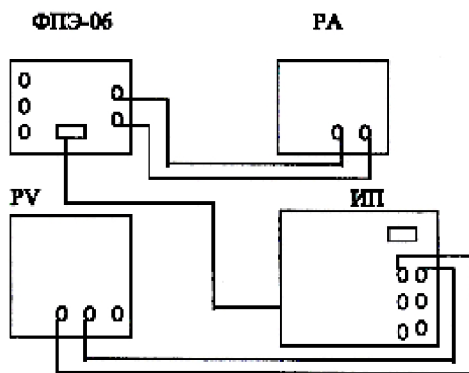


Рис. 5

В модуле ФПЭ-06 установлен вакуумный диод 4Ц14С с вольфрамовым катодом прямого накала. Накал катода осуществляется постоянным током. С модуля источника питания ИП на лампу-диод подается напряжение накала катода (2,5-4,5) В. Амперметр и вольтметр (рис. 6) в цепи накала служат для определения мощности, расходуемой на нагрев катода, что необходимо для определения его температуры. С блока источника питания ИП на лампу подается также анодное напряжение $U_a = (12-100)$ В. Регулировка тока накала и анодного напряжения осуществляется ручками, расположенными на передней панели модуля ИП.

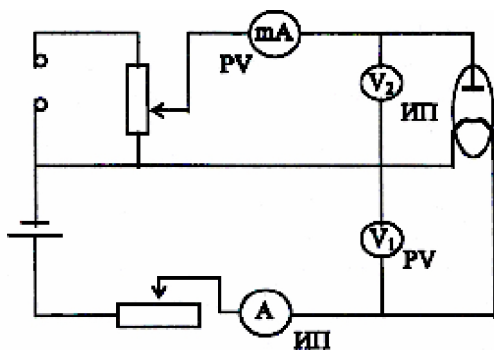


Рис. 6

Модуль блока ФПЭ-06 подключается к модулю ИП соединительным кабелем. Амперметр на панели модуля ИП служит для контроля тока накала, максимальное значение которого не должно превышать 2,2 А. Плавная регулировка тока накала осуществляется ручкой 1, расположенной на панели модуля ИП. Для измерения напряжения накала к верхним клеммам источника питания ИП подключается вольтметр V_1 . Вольтметр V_2 на панели источника питания ИП измеряет анодное напряжение. Анодный ток измеряется миллиамперметром, подключенным к клеммам РА модуля ФПЭ-06.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Установите напряжение накала $U_H = 3,5$ В и измерьте ток накала I_H . Значения U_H и I_H занесите в табл. 1. Увеличивая анодное напряжение ручкой I , через каждые 10 В запишите значения анодного напряжения U_a и анодного тока I_a в табл. 1. Увеличение анодного напряжения проводите до тех пор, пока не будет достигнуто насыщение, т.е. анодный ток практически перестанет расти.

2. Нарисуйте табл. 1 для следующих значений напряжения накала: 3,5; 3,6 В; 3,7 В; 3,8 В; 3,9 В; 4,0 В. Повторите пункт 1 для указанных значений напряжений накала.

Таблица 1

$U_H = 3,5$ В; $I_H = \dots \dots$ МА.											
U_a В											
I_a МА											
$U_H = 3,6$ В; $I_H = \dots \dots$ МА.											
U_a В											
I_a МА											
$U_H = 3,7$ В; $I_H = \dots \dots$ МА.											
U_a В											
I_a МА											
$U_H = 3,8$ В; $I_H = \dots \dots$ МА.											
U_a В											
I_a МА											
$U_H = 3,9$ В; $I_H = \dots \dots$ МА.											
U_a В											
I_a МА											
$U_H = 4,0$ В; $I_H = \dots \dots$ МА.											
U_a В											
I_a МА											

5. ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

1. Для каждого значения напряжения нити накала постройте вольтамперную характеристику и определите ток насыщения.
2. Для всех значений напряжений U_n рассчитайте сопротивление катода $R=U_n/I_n$ и занесите его значение в табл. 2.
3. Вычислите отношение ϵ измеренного сопротивления R к его значению при комнатной температуре R_{293} : $\epsilon = R/R_{293}$ и результат занесите в табл. 2.
4. По формуле (10) рассчитайте температуру катода T .

Таблица 2

№ п/п	$I_{нас}$, мА	I_n , А	U_n , В	R , Ом	ϵ	T , К	$1/T$, $1/К$	$J_{нас}$, мА/м ²	$J_{нас}/T^2$	$\ln J_{нас}/T^2$
1										
2										
...										
7										

5. Рассчитайте плотность анодного тока насыщения $J_{нас}/T_2$ и полученные данные занесите в табл. 2. Для лампы 4Ц14С площадь катода $S=0,11\text{см}^2$.
6. Постройте график зависимости $\ln J_{нас}/T_2$ от $1/T$.
7. Определите угловой коэффициент α наклона прямой к оси абсцисс, используя выражение (9).
8. Определите работу выхода электрона из вольфрама по формуле (5).

При комнатной температуре практически все свободные электроны находятся в пределах проводника и имеется лишь небольшое количество электронов, энергия которых достаточна для преодоления потенциального барьера и выхода из металла. Если электронам сообщить дополнительную энергию, то часть электронов получит возможность покинуть металл, т.е. наблюдается испускание электронов металлами при сообщении им энергии, необходимой для преодоления работы выхода, называется электронной.

6. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Рассчитайте абсолютную погрешность измерения работы выхода электрона из вольфрама $\Delta A = \kappa \Delta \alpha$, считая, что погрешность оценки коэффициента α , полученного методом наименьших квадратов (9), согласно теории вероятностей, определяется по формуле:

$$\Delta \alpha = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[\left(\ln \frac{j_{0nac}}{T_0^2} - \ln \frac{j_{inac}}{T_i^2} \right) - \alpha \frac{1}{T_i} \right]^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i^2}}} \quad (11)$$

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление термоэлектронной эмиссии? Назовите другие виды эмиссии электронов.
2. Что называется работой выхода электрона?
3. Запишите формулы Богуславского-Ленгмюра и Ричардсона-Дешмана.
4. Какие типы катодов применяются в двухэлектродных лампах?
5. Какова природа сил, удерживающих электрон в металле?
6. Нарисуйте и объясните вольтамперные характеристики диода.
7. Что такое ток насыщения и как он зависит от температуры?
5. Объясните физическую природу закона трех вторых.
6. Что такое энергия Ферми?

8. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Телеснин, Р.В. Курс физики. Электричество / Р.В. Телеснин, В.Ф. Яковлев – М.: «Учпедгиз», 1960.
2. Калашников, С.Г. Электричество / С.Г. Калашников. – М.: «Наука», 1985.
3. Практикум по физике / Под ред.Ф.А. Николаева. – М.: «Высшая школа», 1991.
4. Практические рекомендации по обработке результатов измерений: метод. указания / Сост.: Л.П. Муркин, Н.В.Мышкина. – Самара: СГАУ.1982.

Учебное издание

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА ИЗ МЕТАЛЛА

*Методические указания
к лабораторной работе № 2-4*

Составители: ***Николай Михайлович Рогачев,
Александр Иванович Моисеев.***

Редактор И.И. Спиридонова
Вёрстка И.И. Спиридонова

Подписано в печать 02.011.2012. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ . Арт. Д1(16)/2012.

Самарский государственный аэрокосмический университет.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.