

РАБОТА 6

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ МЕТАЛЛА

Цель работы: изучение термоэлектронной эмиссии и определение работы выхода электронов из металла.

Введение

Явление испускания электронов с поверхности вещества в окружающее пространство называется электронной эмиссией. Электрод электронного прибора, являющийся источником электронной эмиссии, называется катодом или эмиттером.

Для изготовления эмиттеров требуются вещества, в которых достаточно много слабосвязанных электронов. К таким веществам относятся металлы (в 1 см^3 при 20°C около 10^{22} электронов проводимости). Однако при обычных условиях электроны не покидают металл, т.к. на границе металл-вакуум (или газ) существует потенциальный барьер (рис. 6.1). На рис. 6.1 представлено распределение потенциала на границе металл-вакуум. По оси абсцисс – расстояние от поверхности металла (в направлении, перпендикулярном к поверхности), по оси ординат – величина энергии электронов W в соответствующих точках пространства (направление вверх от нуля соответствует отрицательным значениям потенциала).

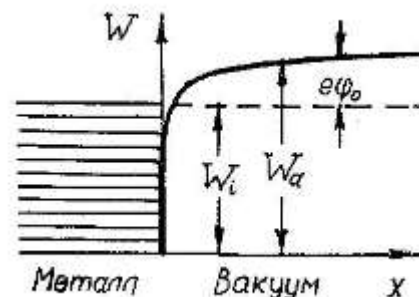


Рис. 6.1. Потенциальный барьер на границе металл-вакуум.

В левой части рисунка (т.е. внутри металла) показаны допустимые энергии электронов, находящихся в междоатомном пространстве (W_j -максимальная их энергия). Для того чтобы электрон покинул металл, его энергия должна быть больше глубины потенциальной ямы W_a .

Распределение электронов по энергиям в металле подчиняется распределению Ферми-Дирака:

$$\frac{dn}{dW} \sim \frac{1}{1 + \exp[(W - W_F)/kT]}$$

Здесь dn - число электронов с энергией в интервале $(W, W + dW)$,

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ - постоянная Больцмана T - термодинамическая температура в

кельвинах.

Из распределения (рис. 6.2) следует, что только незначительная часть электронов в металле обладает энергиями, большими значения W_F — параметра данного материала, называемого энергией уровня Ферми, причем $W_F < W_a$.

В общем случае энергия, необходимая для переноса в бесконечность электрона, находящегося в исходном положении на уровне Ферми в данном интервале, называется работой выхода $A_{\text{вых}} = e\varphi_0$ (e - заряд электрона φ_0 — потенциал выхода).

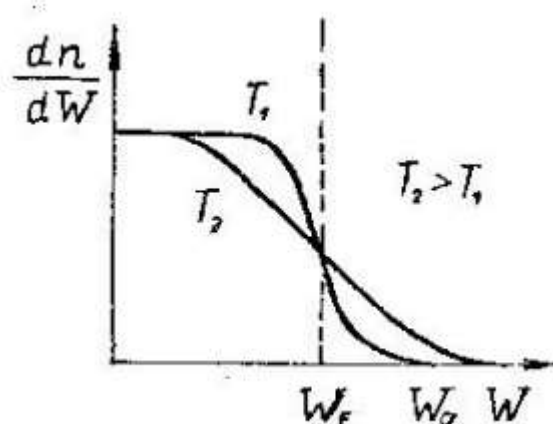


Рис. 6.2. Распределение электронов по энергиям в металле.

В зависимости от того, каким способом сообщается электронам дополнительная энергия для преодоления потенциального барьера (нагревание, облучение, бомбардировка электронами и др.) различают несколько видов электронной эмиссии: термоэлектронную, фотоэлектронную, вторичную и др.

Термоэлектронная эмиссия — испускание электронов с поверхности нагретого тела в окружающее пространство. Для большинства веществ термоэлектронная эмиссия наблюдается при температурах, значительно более высоких, чем комнатная (для получения эмиссии заметной величины большинство металлов необходимо нагревать до температур 2000-2500 К).

При комнатной температуре число электронов, обладающих энергией, которая достаточна для выхода из металла, незначительна (кривая T_1 на рис. 6.2). При нагревании металла количество таких электронов резко возрастает (кривая T_2 на рис. 6.2) и возникает заметная термоэлектронная эмиссия.

Зависимость плотности тока термоэлектронной эмиссии от температуры определяется по формуле Ричардсона-Дэшмена:

$$j = BT^2 e^{-\frac{e\varphi_0}{kT}}, \quad (6.1)$$

где j — плотность тока термоэлектронной эмиссии, A/cm^2 ; T — температура катода, K ; B — постоянная эмиссии, $A/cm^2 \cdot K^2$.

Постоянная $B = \frac{4\pi m e k^2}{h^3} \bar{D}$ (здесь m — масса электрона, h — постоянная Планка, \bar{D} — вероятность преодоления электронами потенциального барьера) содержит универсальные константы и по величине отличается для разных металлов.

Из уравнения (6.1) видно, что ток термоэлектронной эмиссии возрастает с температурой по экспоненте. Кроме того, он зависит от величины работы выхода материала эмиттера и состояния его поверхности. Прибором, с помощью которого изучается термоэлектронная эмиссия, может служить электронная лампа — диод. Прибор имеет коаксиальную цилиндрическую систему электродов: разогреваемый проволочный катод — источник электронов и коллектор электронов — анод. Электроды помещаются в баллон, из которого затем откачивается воздух до давления около $10^{-5} \div 10^{-6}$ Па.

Если катод нагреть до достаточно высокой температуры, с его поверхности начнётся термоэлектронная эмиссия.

Кривая, выражающая зависимость тока термоэлектронной эмиссии от температуры, называется эмиссионной характеристикой. В готовых электронных приборах температуру катода непосредственно невозможно, но можно измерить ток I_H или напряжение U_H накала. Поэтому в качестве эмиссионной характеристики используется кривая, выражающая зависимость $I_3(I_H)$ или $I_3(U_H)$ (рис.6.3). На этом же рисунке показана также и накальная кривая $I_H(U_H)$.

Эмиссионную характеристику снимают при достаточно большом потенциале анода, обеспечивающем попадание всех эмитируемых электронов на анод. В противном случае около катода образуется отрицательный пространственный заряд и часть электронов, вылетающих из катода, возвращаются обратно к катоду.

Кривая, выражающая зависимость тока в анодной цепи I_a от анодного напряжения U_a (напряжение между анодом и катодом) называется анодной характеристикой диода. На рис. 4 показано семейство анодных характеристик диода для нескольких температур катода, задаваемых напряжением накала U_H . Цифрой 1 отмечен режим пространственного заряда (ток в цепи анода I_a меньше тока эмиссии с катода I_3), цифрой 2 — режим насыщения ($I_a = I_3$, так как все эмитируемые с катода электроны попадают на анод). В режиме насыщения анодный ток возрастает лишь незначительно за счёт электронов,

вырываемых из металла электрическим полем (эффект Шотки). В данной работе будем считать, что в режиме насыщения $I_a = I_{a \text{ нас}} = I_3$.

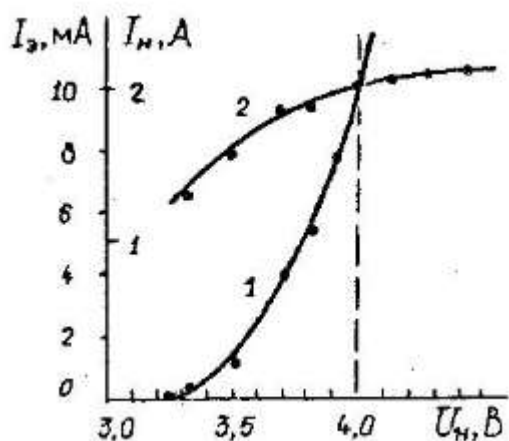


Рис.3. Характеристики термоэлектронного катода: 1 — эмиссионная, 2 — накаливая.

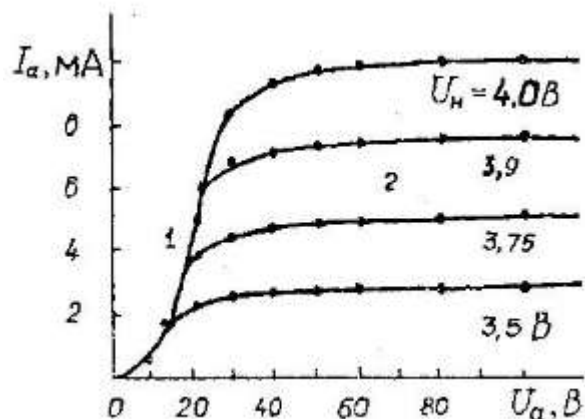


Рис.4. Анодные характеристики диода с вольфрамовым катодом.

Выше было указано, что плотность тока термоэлектронной эмиссии (тока насыщения) зависит от температуры катода T и от работы выхода электронов $A_{\text{вых}}$. Так как ток насыщения $I_{a \text{ нас}} = I_3$ пропорционален плотности тока насыщения, то формулу (6.1) можно переписать в виде:

$$I_3 = B'T^2 e^{-\frac{e\varphi_0}{kT}}. \quad (6.2)$$

Разделив в формуле (2) обе части на T^2 и прологарифмировав полученное выражение, получим:

$$\ln \frac{I_3}{T^2} = \ln B' - \frac{e\varphi_0}{kT}. \quad (6.3)$$

Таким образом, зависимость $\ln \frac{I_3}{T^2}$ от $\frac{1}{T}$ носит линейный характер (график на рис. 6.5 — прямая линия), и по наклону этой прямой к оси абсцисс можно определить работу выхода:

$$e\varphi_0 = -ktg\alpha. \quad (6.4)$$

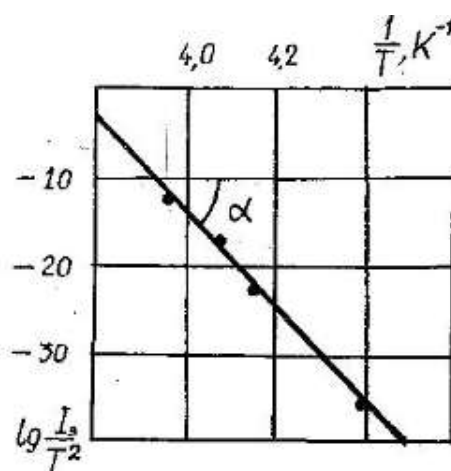


Рис. 6.5. Определение работы выхода электронов из металла

Методика выполнения работы

В работе используется вакуумный диод с вольфрамовым термоэлектронным катодом. Схема включения приборов показана на рис. 6.6. Потенциал и ток анода, а также напряжение и ток накала катода измеряются вольтметрами и амперметрами, показанными на схеме.

При проведении экспериментов следует обратить внимание на то, что максимальное значение напряжения накала U_H не должно превышать в используемом диоде величины 5В.

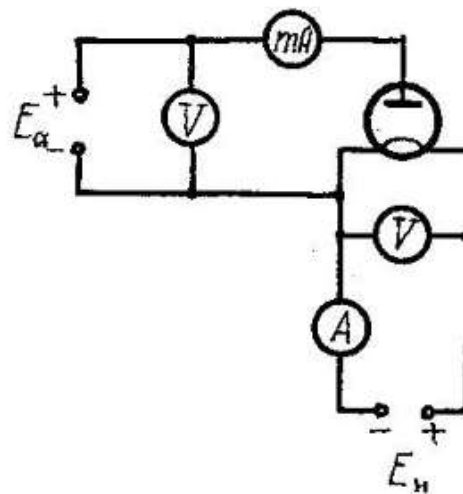


Рис. 6.6 Схема для снятия характеристик катода

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой. Записать паспортные данные используемых электроизмерительных приборов в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Наименование прибора	Заводской номер	Класс точности	Пределы измерений	Цена деления
Вольтметр				
Амперметр				
Вольтметр				
Миллиампер-метр				

2. При отключенном источнике питания анодной цепи снять накальную характеристику $I_H(U_H)$ термоэлектронного катода. Экспериментальные данные занести в табл. 6.2. Значения I_H и U_H берутся с индикаторов источника питания нити накала. После каждого изменения U_H подождите 1 мин., пока не установится значение I_H .

Таблица 6.2

$U_H, В$	0									5
$I_H, А$										

3. Построить график зависимости $I_H(U_H)$.

4. Выставьте значение $U_H = 4 В$. При потенциале анода U_a , соответствующему режиму насыщения (для используемого диода $U_{a\text{нас}} = 65 В$) снять эмиссионную характеристику $I_3(U_H)$ катода. Подождите 4-5 мин. Эмиссионная характеристика начинается не из начала координат (см. рис. 6.3): катод должен разогреться прежде чем начнется эмиссия. После каждого изменения U_H подождите 1-2 мин., пока не установится значение I_3 . Экспериментальные данные занести в табл. 6.3.

Таблица 6.3

$U_H, В$	4								0
$I_3, МА$									

5. Построить график зависимости $I_3(U_H)$.

6. Провести необходимые расчеты для определения работы выхода $A_{\text{вых}} = e\phi_0$, заполнив табл. 6.4. Выбрать величины тока эмиссии, соответствующие напряжениям U_H , равным 3,3 В, 3,5 В, 3,75 В и 4 В.

Таблица 6.4

$I_3, МА$	$R_K, Ом$	$T, К$	$\frac{1}{T^2}, К^{-2}$	$\frac{I_3}{T^2}, \frac{МА}{К^2}$	$\ln \frac{I_3}{T^2}$	$\frac{1}{T}, К^{-1}$

Сопротивление катода R_K определяется по формуле: $R_K = \frac{U_H}{I_H}$.

При расчете температуры катода T используется соотношение:

$$T = C + (T_0 - C) \frac{R_K}{R_0},$$

где C - константа, равная 114 К; T_0 — комнатная температура в кельвинах; R_0 — сопротивление вольфрамового катода при комнатной температуре, $R_0 = 0,20 \text{ Ом}$ при $t = 20^\circ \text{ C}$.

7. Построить график зависимости $\ln \frac{I_s}{T^2} = f\left(\frac{1}{T}\right)$. Определить по графику (см. рис. 6.5) работу выхода электронов из вольфрама в электрон-вольтах, где $k = 0,86 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}$ - постоянная Больцмана; α — угол наклона прямой к оси абсцисс.

8. Сравнить полученное значение работы выхода для вольфрама с табличным значением:

$$A_{\text{вых}} = e\varphi_0 = 4,63 \text{ эВ.}$$

9. Написать заключение.

Контрольные вопросы

1. Что такое электронная эмиссия? Назовите основные виды электронной эмиссии.
2. Что такое уровень Ферми?
3. Что такое работа выхода электрона из металла? В каких единицах она измеряется?
4. Что такое термоэлектронная эмиссия?
5. Напишите уравнение для плотности тока термоэлектронной эмиссии.
6. Нарисуйте эмиссионную характеристику термоэлектронного катода. Почему она начинается не из начала координат?
7. Нарисуйте накальную характеристику термоэлектронного катода. Почему она нелинейна?
8. Нарисуйте анодные характеристики диода для разных температур катода-
9. Расскажите об эффекте Шоттки.
10. Как определяется работа выхода электронов из металла в данной работе?