

Лабораторная работа № 322

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА ИЗ МЕТАЛЛА МЕТОДОМ ПРЯМЫХ РИЧАРДСОНА

Приборы и принадлежности. Лабораторная панель, блок питания накала Б5-70, блок питания анода Б5-70, универсальный вольтметр В7-27.

Введение. Принцип работы большинства электровакуумных приборов основывается на движении потока электронов в вакуумированном пространстве между катодом и анодом. Источником электронов в условиях вакуума является катод. Причины, приводящие к испусканию электронов катодом различны. Можно назвать следующие виды электронной эмиссии:

- 1) термоэлектронная – испускание за счет нагревания катода до высокой температуры,
- 2) внешний фотоэффект – испускание при облучении светом,
- 3) вторичная эмиссия возникает при бомбардировке катода потоком первичных электронов с высокой энергией,
- 4) автоэлектронная эмиссия – «вырывание» электронов электрическим полем высокой напряженности.

Наиболее широко распространена *термоэлектронная* эмиссия, поэтому остановимся подробнее на этом явлении. Она имеет место для тел в твердом и жидком состоянии, температура которых существенно выше комнатной (1000...3000К).

Металлы, имеющие кристаллическое строение, содержат в узлах решетки положительные ионы, а валентные электроны атомов свободно распределены по всему объему образца, их называют также электронами проводимости. Слово «свободно» не следует понимать буквально, так как в действительности электроны взаимодействуют как с ионами, так и с остальными электронами, но равнодействующая всех сил, действующих на отдельный электрон, близка к нулю. В этом приближении электроны проводимости в металлах можно считать идеальным газом, правда, довольно высокой плотности – $10^{28} \dots 10^{29} \text{ м}^{-3}$, в то время как концентрация молекул в газах при нормальных условиях составляет порядка 10^{25} м^{-3} .

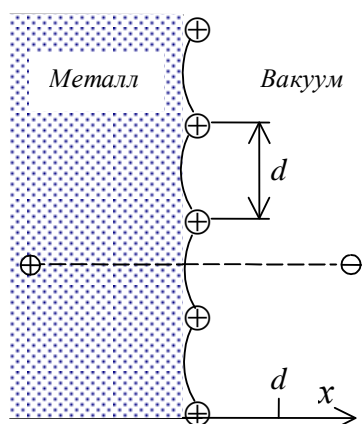


Рис.1

Электроны проводимости, хаотически движущиеся внутри металла, редко выходят за его пределы. Этому препятствует электрическое поле, действующее вблизи поверхности металла и создающее некоторый потенциальный барьер.

Рассмотрим силы, действующие на электрон, оказавшийся недалеко от поверхности со стороны вакуума. Если считать поверхность металла абсолютно гладкой, а металл – хорошо проводящим ток, то появление электрона приводит к наведению в толще металла заряда, являющегося «зеркальным изображением» электрона, т.е. положительного заряда, расположенного зеркально симметрично по отношению к поверхности (рис.1). Сила притяжения, действующая на электрон со стороны зеркального заряда, в СГС следующая:

$$F_1 = \frac{e^2}{4x^2}. \quad (1)$$

Однако при расстояниях $x \sim d$, где d – межатомное расстояние, поверхность металла нельзя считать идеально гладкой, так как она представляет собой ионный слой его кристаллической решетки. Эту близлежащую область можно представить как двойной электрический слой. Возникновение одного связано с явлением термоэлектронной эмиссии, когда около нагретого металла образуется слой «электронной атмосферы», несущей отрицательный пространственный заряд, который препятствует дальнейшей эмиссии электронов. Второй слой – это поверхность металла, которую покинули некоторые электроны, от чего она приобрела положительный поверхностный заряд. Можно считать, что в этой области на электрон действует постоянная сила (как в поле плоского конденсатора).

$$F_2 = \frac{e^2}{4d^2}. \quad (2)$$

Нужно потребовать, чтобы сила, действующая на электрон вблизи поверхности проводника, была непрерывна при переходе из области двойного слоя в более отдаленное пространство (рис.2,*а*). Обе силы F_1 и F_2 направлены в сторону металла.

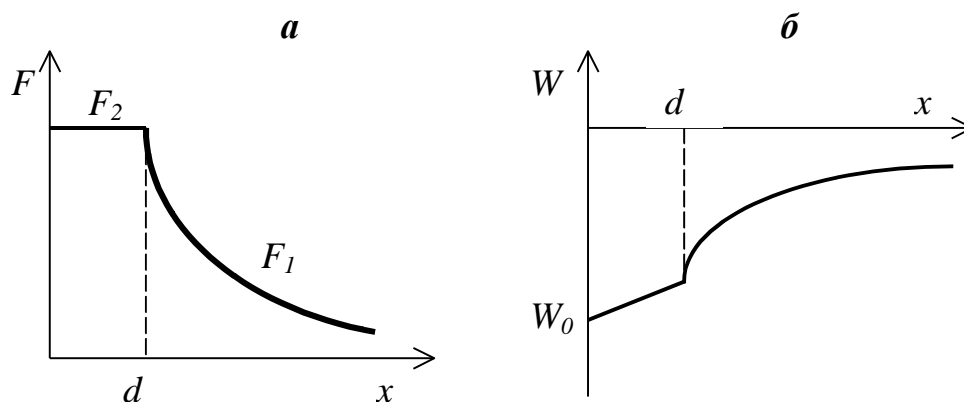


Рис.2

Чтобы перевести электрон из металла в вакуум, нужно совершить положительную работу против этих сил, которая пойдет на увеличение энергии электрона, оказавшегося вне металла.

$$W_0 = \int_0^d F_2 dx + \int_d^{\infty} F_1 dx,$$

$$W_0 = \frac{e^2}{2d}. \quad (3)$$

Таким образом, если принять энергию электрона в вакууме равной нулю, то электрон в металле находится в потенциальной яме глубиной W_0 (рис.2,б). Так как расстояние x , на котором энергия электрона изменяется от W_0 практически до нуля при переходе его из металла в вакуум, невелико и составляет несколько межатомных расстояний, то при макроскопическом рассмотрении можно говорить, что потенциальная энергия электрона на границе металл–вакуум изменяется скачком (кривая KMN на рис.3,а) и форма потенциального барьера прямоугольная.

Согласно классической теории электропроводности при абсолютном нуле температуры потенциальная энергия всех электронов проводимости равна W_0 , а кинетическая равна нулю.

Согласно квантовой теории даже при абсолютном нуле энергия электронов не равна W_0 , электроны распределяются по энергетическим уровням в соответствии с принципом Паули, причем их энергия неодинакова и квантована. Это подтверждается опытами. Наибольшая энергия, которой обладает электрон на самом высоком занятом уровне при абсолютном нуле, называется энергией Ферми¹ – W_F (рис.3,а). Таким образом, чтобы извлечь электрон из металла, нужно затратить меньшую энергию, чем W_0 . Та наименьшая энергия, которую необходимо сообщить электрону, чтобы перевести его из металла в вакуум, называется *работой выхода электрона A* :

$$A = e\varphi = W_0 - W_F, \quad (4)$$

где φ – потенциал выхода электрона.

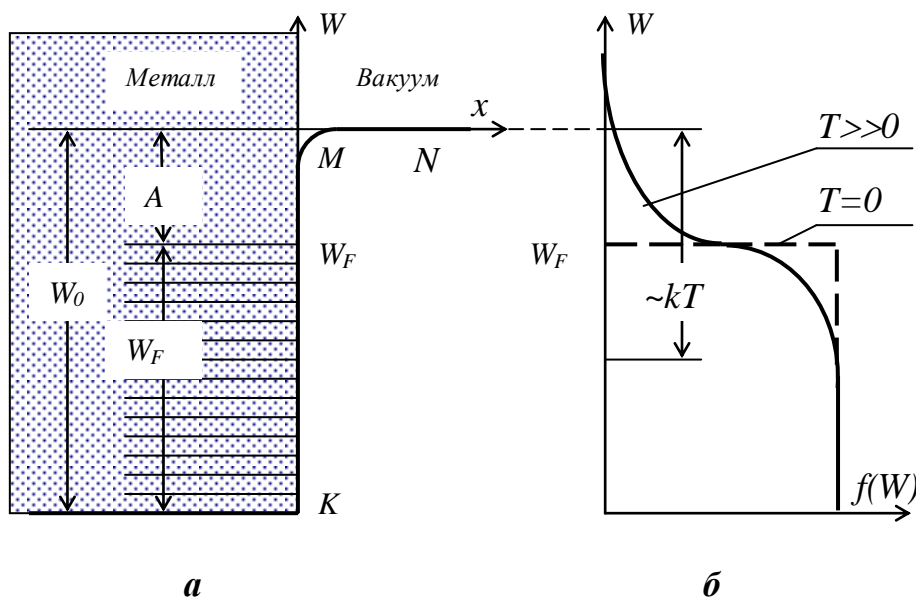


Рис.3

В настоящее время известно несколько методов определения работы выхода электронов, в том числе тот, который предлагается в данной работе – метод «прямых Ричардсона»².

¹Fermi E. (1901-1954) – итальянский физик, последние годы жил и работал в США, лауреат Нобелевской премии 1938 г.

²Richardson O. (1879-1959) – английский физик, лауреат Нобелевской премии 1928 г.

На рис.3,б показана функция распределения электронов проводимости в металле по энергиям. Величина $f(W)$ означает вероятность того, что электрон обладает указанным значением энергии W . При абсолютном нуле

$$\begin{aligned} f(W) &= 1, \text{ если } W < W_F, \\ f(W) &= 0, \text{ если } W > W_F. \end{aligned}$$

Таким образом, при данных условиях ни один электрон не имеет возможности покинуть металл (штриховая линия на рисунке).

Если температура металла высокая, порядка тысячи кельвинов, то появляется отличная от нуля вероятность, что часть электронов приобретает энергию, превышающую потенциальный барьер (сплошная кривая на рис.3,б). Их энергия становится достаточной, чтобы выйти из потенциальной ямы и оказаться вне металла. Чем выше температура, тем количество таких электронов становится все больше и больше. Данная кривая описывается функцией распределения Ферми-Дирака

$$f(W) = \frac{1}{e^{(W-W_F)/kT} + 1}. \quad (5)$$

От количества эмиттированных электронов зависит плотность тока насыщения j_s в вакуумном диоде, которая определяется формулой Ричардсона-Дэшмана:

$$j_s = BT^2 e^{-A/kT}, \quad (6)$$

где B – константа, которая теоретически для всех металлов одинакова, и данные опытов показывают, что она зависит от материала катода не сильно.

Формула (6) предсказывает сильную зависимость тока насыщения от температуры катода. Если ее прологарифмировать, то возникает возможность экспериментального определения работы выхода электронов из металла.

$$\ln(j_s/T^2) = \ln B - \frac{A}{k} \frac{1}{T}. \quad (7)$$

График функции $\ln(j_s/T^2)$ от $1/T$ представляет собой прямую, угловой коэффициент которой связан с работой выхода A .

Описание установки. Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 4. В работе применяется вакуумная электронная лампа ГУ-4 – триод прямого накала с вольфрамовым катодом. В данной работе триод включен по так называемой диодной схеме, где сетка и анод соединены между собой. Лампа укреплена на лабораторной панели, электроды ее соединены с соответствующими клеммами.

Электрическая цепь состоит из двух контуров – накального и анодного, в каждом есть свой источник питания и свои измерительные приборы. В анодный контур входит источник ИП-2 (Б5-48), накал лампы питается от ИП-1 (Б5-70).

Подготовка к измерениям. 1. На источнике питания Б5-70 установите ручку регулировки напряжения “U” – в крайнее левое положение, ручку регулировки тока “I” – в крайнее правое положение, переключатель ВНЕШН-ВНУТР – в положение ВНУТР, переключатель V/A – в положение “A” – на табло будет ток в амперах.

2. У источника Б5-48 на декадном переключателе напряжения выставьте все нули, на переключателе тока установите 0,1 А.

3. На вольтметре В7-27 переключатель пределов установите в положение 1 мА.

Измерения. 1. Соберите электрическую цепь. Это удобнее сделать по блок-схеме (рис.5), так как некоторые измерительные приборы и регуляторы,

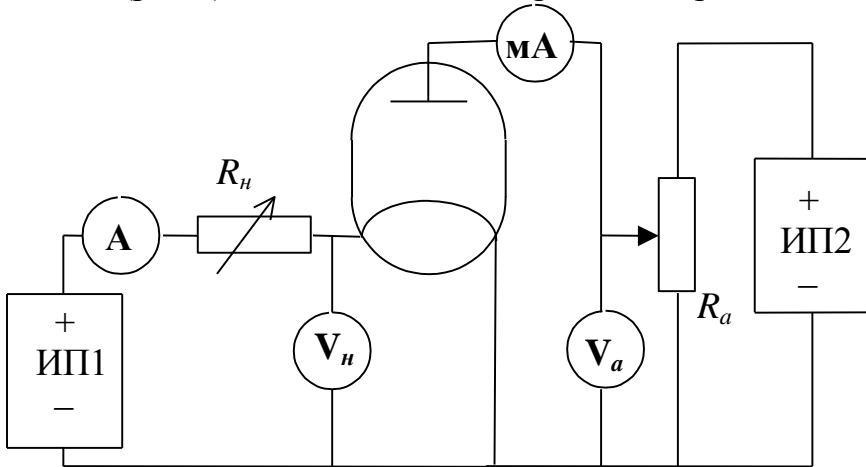


Рис.4

изображенные на принципиальной схеме (рис.4), входят в состав источников питания и заботиться об их присоединении не надо.

2. Предложите преподавателю проверить собранную цепь.

3. Включите блок питания цепи накала ИП1 (левый на рис.5). Поворачивая ручку

регулировки “U”, установите ток накала лампы **1,2 А** по встроенному цифровому измерительному прибору, прогрейте лампу не менее 5 минут.

4. Включите универсальный вольтметр В7-27.

5. Включите второй блок питания ИП2 – источник анодного напряжения. Изменяя напряжение от **1В** до **15В** через **1В**, измерьте анодный ток лампы, который показывает прибор В7-27. Результаты запишите в табл.1.

6. В блоке ИП1 переключатель V/A поставьте в положение “V” и снимите его показания – напряжение на нити накала лампы, впишите его в табл.1.

7. Такие же измерения, как в п. 5-6, проведите при токах накала 1,3 и 1,4 А.

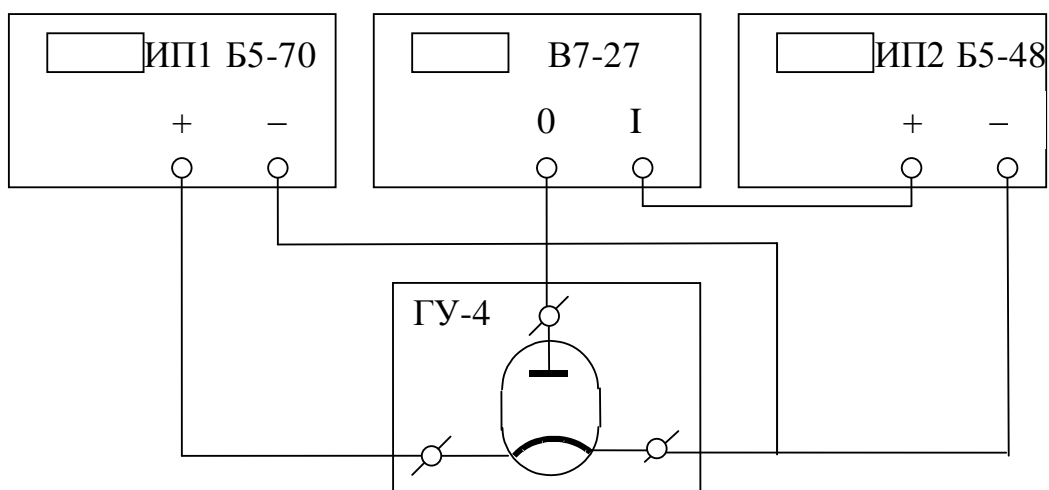


Рис.5

Обработка результатов. 1. Постройте вольт-амперные характеристики лампы (зависимость I_a от U_a) при трех значениях тока накала. Из графиков

Лабораторная работа № 322

определите три значения тока насыщения I_{s1} , I_{s2} , I_{s3} при соответствующих значениях тока накала. Результаты запишите в табл.2.

Таблица 1

$I_{H1}=1,2 \text{ A}$		$I_{H2}=1,3 \text{ A}$		$I_{H3}=1,4 \text{ A}$	
$U_{H1}=$		$U_{H2}=$		$U_{H3}=$	
U_a	I_a	U_a	I_a	U_a	I_a

2. Определите плотность тока насыщения по формуле $j_s=I_s/S$. Площадь поверхности катода S данной лампы **0,157 см²**.

3. По формуле $P=I_H U_H/S$ вычислите плотность потока энергии с катода лампы в единицах Вт/см². Такая энергия расходуется единицей поверхности в единицу времени на тепловое излучение и на эмиссию электронов. Энергией, унесенной в окружающее пространство за счет теплопроводности вакуума и элементами крепления нити, пренебрегают.

Таблица 2

I_H, A	I_s	j_s	P	T	$\ln(j_s/T^2)$	$1/T$

4. Пользуясь данными табл.3, в которой приведена плотность потока энергии с вольфрамового катода в зависимости от его температуры, определите температуру катода при трех мощностях нагрева.

Таблица 3

T, K	$P, \text{Вт/см}^2$	T, K	$P, \text{Вт/см}^2$	T, K	$P, \text{Вт/см}^2$	T, K	$P, \text{Вт/см}^2$
1500	5,52	1900	18,64	2300	47,17	2700	99,54
1600	7,74	2000	23,99	2400	57,68	2800	117,45
1700	10,59	2100	30,46	2500	69,81	2900	137,60
1800	14,18	2200	38,13	2600	83,72	3000	160,30

5. Заполните остальные столбцы табл.2.

6. Постройте график зависимости $\ln(j_s/T^2)$ от $1/T$ (т.н. прямая Ричардсона).

7. Определите по графику угловой коэффициент прямой, который, согласно выражению (7), равен $-A/k$.

8. Найдите работу выхода электрона из вольфрамового катода, выразив ее в эВ. Сравните найденное значение с табличным, приводимом в справочной литературе.

Контрольные вопросы

1. Что называется явлением термоэлектронной эмиссии?
2. Почему поверхность металла представляет для электронов потенциальную яму?
3. Какова должна быть кинетическая энергия электрона внутри металла, чтобы он мог покинуть металл?

4. Что такое уровень Ферми?
5. Дайте определение работы выхода электрона из металла.
6. Почему ток насыщения увеличивается с ростом температуры катода?
7. Объясните качественно ход вольт-амперной характеристики вакуумного диода.
8. Зачем в работе по снятию вольт-амперной характеристики диода измеряется также ток и напряжение накала?
9. Какой экспериментальный прием используется в данной работе с целью определения работы выхода электрона из металла?
10. Если Вы снимали вольт-амперные характеристики вакуумного диода в работе №319, то можно ли по полученным там данным определить работу выхода электрона из катода используемого в ней диода?
11. Известно, что на участке насыщения вольт-амперной характеристики анодный ток не остается постоянным, а несколько возрастает по мере увеличения анодного напряжения (эффект Шоттки). С чем это связано?

Список рекомендуемой литературы

1. Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука, §154-158.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.3. М.: Наука, 1977. §101.
3. Физический практикум. Электричество и оптика. /Под ред. В.И.Ивероновой. М.: Наука, 1968. С.67.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.3. М.: Наука, 1979. §51-52, 61.
5. Методы физических измерений. /Под ред. Р.И.Солоухина. Новосибирск: Наука, 1975. С.134-136.
6. Лабораторный практикум «Электрические свойства вещества. Движение частиц в электрическом поле». /Под ред. В.А.Безуса. М.: МИФИ, 1979.