

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

А.И. Аксенов
А.А. Шмидт

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

Методические указания по выполнению лабораторной работы
для студентов технических направлений подготовки

Томск 2024

УДК 621.385
ББК 32.851
А42

Рецензент:

Климов А.С., профессор кафедры физики, доктор технических наук

Аксенов, Александр Иванович

А42 Исследование термоэлектронной эмиссии: методические указания по выполнению лабораторной работы для студентов технических направлений подготовки / А.И. Аксенов, А.А. Шмидт. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024. – 16 с.

Представлены методические указания по выполнению лабораторной работы «Исследование термоэлектронной эмиссии» для студентов технических направлений подготовки

Одобрено на заседании каф. ЭП, протокол № 05-24 от 08.05.2024 г.

УДК 621.385
ББК 32.851

© Аксенов А.И., Шмидт А.А. 2024
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024

Оглавление

1	Введение.....	4
2	Теоретическая часть.....	4
2.1	Природа сил, удерживающих электроны в твердом теле	4
2.2	Уравнение термоэлектронной эмиссии металлов.....	5
2.3	Метод прямой Ричардсона.....	8
2.4	Методика измерений	9
3	Описание экспериментальной установки	11
4	Порядок выполнения работы	13
5	Контрольные вопросы	14
6	Содержание отчета.....	15
7	Список рекомендуемой литературы.....	15
	Приложение 1 (справочное) Зависимость температуры единичного вольфрамового катода от тока накала.....	16

1 Введение

Целью работы является экспериментальное исследование зависимости тока эмиссии от температуры катода и напряженности электрического поля, применение метода прямых Ричардсона и Шоттки для измерения констант термоэмиссии в отсутствие и при наличии нормального к эмитирующей поверхности внешнего электрического поля.

Термоэлектронной эмиссией называется явление выхода (эмиссии) электронов из нагретых тел. Это явление широко используется в вакуумных и газонаполненных электронных приборах, в промышленных и исследовательских установках с использованием электронных и ионных пучков.

Первоначально для изготовления катодов использовали чистые металлы (главным образом вольфрам). В настоящее время наряду с вольфрамовыми катодами применяются более эффективные пленочные и полупроводниковые катоды, однако физические процессы в этих катодах сложнее, чем в чистых металлах. В связи с этим целесообразно исследовать термоэлектронную эмиссию из металлического катода.

В каждом кубическом метре металла содержится около 10^{29} свободных электронов, находящихся в хаотическом движении и, следовательно, непрерывно подходящих к границе металла. И все же, из холодного металла практически нет эмиссии электронов. Объясняется это тем, что на электроны, стремящиеся покинуть металл, действуют силы, препятствующие их вылету.

2 Теоретическая часть

2.1 Природа сил, удерживающих электроны в твердом теле

На электроны, выходящие из металла, действует на границе металл-вакуум тормозящая электрическая сила, величина которой зависит от расстояния между электроном и поверхностью металла. На достаточно больших расстояниях x от катода она может рассматриваться как сила зеркального отображения и в соответствии с законом Кулона определяется из соотношения

$$F_{30} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{4x^2}, \quad (2.1)$$

e – заряд электрона;

x – расстояние от поверхности катода до точки, в которой находится электрон;

ϵ_0 – электрическая постоянная.

Эта формула справедлива, однако, лишь при расстояниях x , заметно превышающих межатомные расстояния в металле, когда его поверхность можно считать однородной.

На расстоянии порядка постоянной кристаллической решетки d закон изменения силы должен быть иным. Электроны проводимости металла даже при нулевой температуре в соответствии с принципом Паули обладают энергией хаотического (но не теплового) движения порядка 10 эВ. Суммарное давление электронной подсистемы металла на его поверхность огромно (10^8 Па). Под действием этого давления электроны как бы вытесняются из геометрических границ металлического образца. Таким образом, над граничным слоем узлов кристаллической решетки образуется тончайший, порядка постоянной решетки, слой электронов. Непосредственно под поверхностью металлов возникает положительно заряженный слой. Другими словами, на границе металла образуется двойной электрический слой толщиной d . Шоттки предложил рассматривать его как плоский конденсатор с расстоянием d между обкладками. В этом случае напряженность электрического поля в интервале расстояний от нуля до d может считаться постоянной. Делая предположение о непрерывности силы F при выходе из двойного слоя Шоттки, получим выражение для этой силы в пределах двойного слоя в виде:

$$F_{\partial c} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{4d^2}. \quad (2.2)$$

На рисунке 2.1 а представлена зависимость силы F от расстояния x над поверхностью металла (кривая 1).

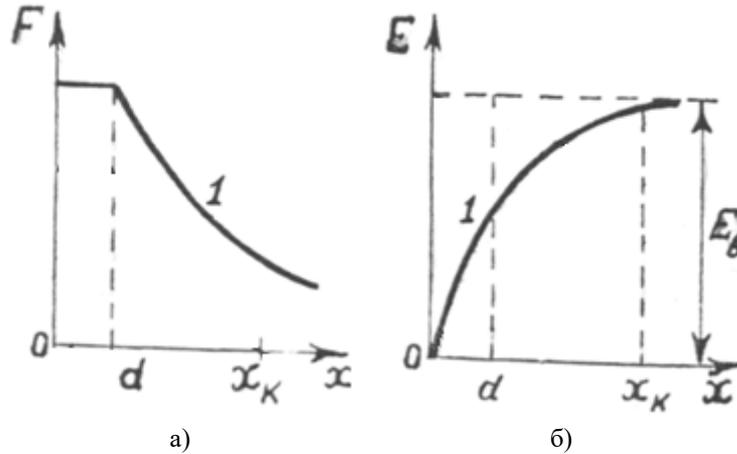


Рисунок 2.1 – Зависимость силы и энергии связи электрона от расстояния над поверхностью металла

Работа, которую должен совершить электрон, чтобы удалиться на некоторое расстояние x от поверхности металла, равна

$$E = \int_0^x F dx. \quad (2.3)$$

График этой работы или, что тоже самое, изменение потенциальной энергии электрона при удалении от поверхности металла, показано кривой 1 (см. рисунок 2.1 б). Теоретически электрон оказывается свободным только при удалении от поверхности на бесконечно большое расстояние, где сила убывает до нуля. Работа, которую электрон должен при этом совершать, называется полной работой выхода. Она находится так:

$$E_B = \int_0^{\infty} F dx. \quad (2.4)$$

Величина E_B характеризует полную высоту потенциального барьера на границе твердого тела.

Преодолеть потенциальный барьер на границе твердого тела смогут лишь те электроны, у которых скорость v_x в направлении оси x , перпендикулярной к поверхности металла, удовлетворяет условию:

$$\frac{mv_x^2}{2} \geq E_B. \quad (2.5)$$

Эти электроны и составляют ток эмиссии.

2.2 Уравнение термоэлектронной эмиссии металлов.

Электроны в металле пребывают в непрерывном беспорядочном движении. Их распределение по энергиям описывается полной функцией распределения Ферми-Дирака:

$$dn(E) = \frac{4\pi(2m)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \cdot \frac{E^{\frac{1}{2}} dE}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1}, \quad (2.6)$$

где E – энергия электронов в кристалле;

$dn(E)$ – концентрация электронов металла с энергиями в пределах от E до $E + dE$;

m – масса электрона;

T – температура;

k – постоянная Больцмана;
 h – постоянная Планка;
 E_F – энергия Ферми.

Распределение электронов по энергиям в металле при $T = 0$ К показано на рисунке 2.2 (кривая 1). При $T = 0$ К наибольшая энергия электронов в металле равна E_F .

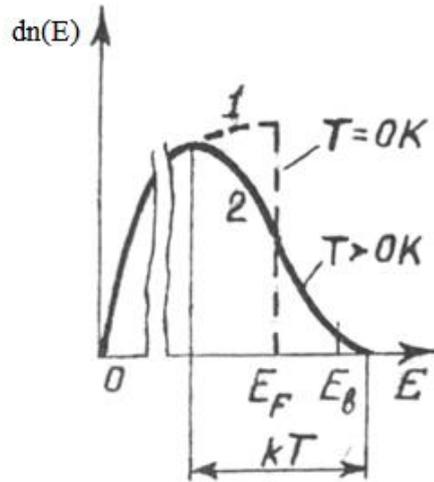


Рисунок 2.2 – Распределение электронов по энергиям:
 E_F – энергия Ферми, E_B – внешняя работа выхода.

Из рисунка видно, что при $T = 0$ К ни один из электронов металла не имеет энергии, достаточной для совершения работы выхода.

Распределение электронов по энергиям при $T > 0$ К показано кривой 2 (см. рисунок 2.2). Эта кривая свидетельствует о том, что при этой температуре в металле имеются электроны с энергиями $E > E_B$. Среди этой последней группы электронов имеются, очевидно, и такие электроны, у которых скорость v_x в направлении оси x , перпендикулярной к поверхности металла, такова, что для них:

$$E_x \geq E_B, \quad E_x = \frac{mv_x^2}{2}.$$

Расчет плотности термоэлектронного тока j с поверхности металла приводит к следующему выражению:

$$j = \frac{4\pi emk^2}{h^3} \cdot T^2 e^{-\frac{E_B - E_F}{kT}} \quad (2.7)$$

или

$$j = A_0 T^2 e^{-\frac{e\phi}{kT}}, \quad (2.8)$$

где $A_0 = \frac{4\pi emk^2}{h^3} = 120,4 \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^2}$ – константа, одинаковая для всех металлов;

$e\phi = E_B - E_F$ – термодинамическая (эффективная) работа выхода, определяемая расстоянием от уровня Ферми до вершины потенциального барьера;

e – заряд электрона.

Соотношения (2.7) и (2.8) называются формулой Ричардсона-Дешмана. Из этой формулы видно, что плотность термоэлектронного тока определяется температурой излучающей поверхности и работой выхода. Так как обе эти величины стоят в показателе экспоненты, то зависимость тока от них оказывается очень сильной. Так, повышение

температуры вольфрамового катода с 1000 К до 2500 К вызывает увеличение тока эмиссии примерно в 10^{16} раз. Уменьшение работы выхода на 3 эВ вызывает увеличение плотности тока при $T=1000$ К примерно в 10^{14} раз. Предэкспоненциальный множитель в (2.7) называют константой Ричардсона. Как следует из выражения (2.8), константа Ричардсона не должна зависеть от природы металла. В действительности же у разных металлов она различна, что связано с различной степенью прозрачности D их потенциальных барьеров для потенциальных волн, преломляющихся при вылете электронов из металла в вакуум.

С учетом сказанного

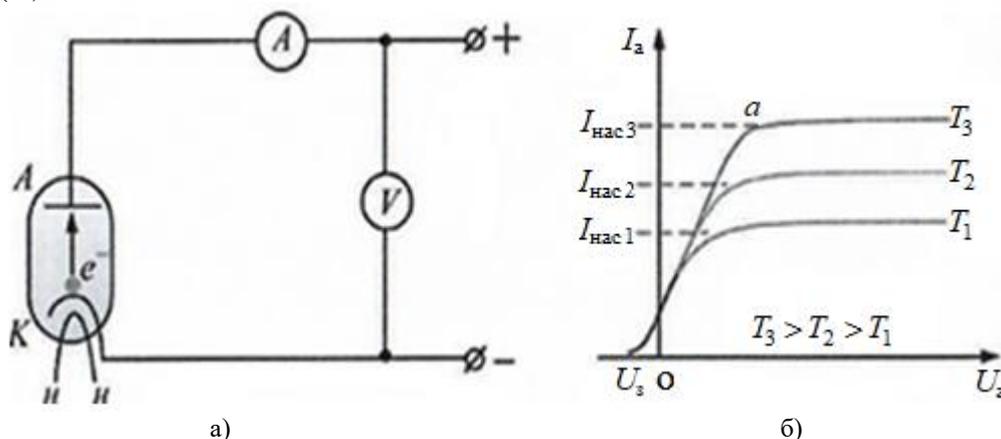
$$j = A_0 \bar{D} T^2 e^{-\frac{e\phi}{kT}} = AT^2 e^{-\frac{e\phi}{kT}}, \quad (2.9)$$

где \bar{D} – среднее значение коэффициента прозрачности барьера для вылетающих электронов, $A = A_0 \bar{D}$.

Следует отметить, что входящие в уравнение (2.8) константы A и $e\phi$ нельзя точно рассчитать на основе физических соотношений и поэтому они определяются экспериментально. Одним из методов их определения является метод прямой Ричардсона.

В данной работе для наблюдения термоэлектронной эмиссии используется вакуумная лампа. Вакуумная электронная лампа, имеющая два электрода (вакуумный диод): один – катод (К) в виде проволоки из тугоплавкого металла, нагреваемой током до высокой температуры, другой – анод (А) – холодный, на котором собираются испущенные катодом электроны.

На рисунке 2.3 а изображена схема включения вакуумного диода. Ток в цепи появляется только в том случае, если положительный полюс источника соединен с анодом (А), а отрицательный – с катодом (К). Это подтверждает, что катод испускает отрицательные частицы, электроны. Сила термоэлектронного тока в диоде, измеряемая с помощью амперметра (А), зависит от величины потенциала анода относительно катода, измеряемого вольтметром (V).



а) Рисунок 2.3 – Схема включения вакуумного диода (а)
 б) Вольтамперные характеристики вакуумного диода (б)

Возрастающий участок кривой « oa » на рисунке 2.3 б, соответствующий малым анодным напряжениям, характерен тем, что на анод приходят не все эмитируемые катодом электроны, а только часть их, тем большая, чем больше анодное напряжение U_a . Точка « a » (при данной температуре катода T_3) характерна тем, что все эмитируемые катодом электроны попадают на анод, т.е. анодный ток I_a равен току эмиссии катода. При изменении температуры катода меняется положение точки « a ». Справа от точки « a » лежит участок «насыщения», где ток мало меняется при увеличении анодного напряжения U_a . Возрастание тока на этом участке вызвано увеличением эмиссии катода под действием появляющегося

около катода при больших U_a положительного электрического поля (эффект Шоттки).

При увеличении температуры катода увеличивается и значение тока анода, при котором достигается насыщение. Одновременно увеличивается и анодное напряжение, при котором устанавливается ток насыщения $I_{\text{нас}}$.

Для определения тока эмиссии I_3 (тока насыщения) надо определить анодный ток, соответствующий точке перегиба «а» вольтамперной характеристики вакуумного диода.

Таким образом, вольтамперная характеристика диода оказывается нелинейной, т.е. диод является примером проводника, не подчиняющегося закону Ома. Это объясняется тем, что при термоэлектронной эмиссии у поверхности катода создается довольно большая плотность электронов. Они создают общий отрицательный заряд, и электроны, вылетающие с малой скоростью, не могут его преодолеть. С увеличением анодного напряжения концентрация электронов в облаке пространственного заряда уменьшается. Поэтому и тормозящее действие пространственного заряда становится меньше, а анодный ток растет быстрее, чем в прямой зависимости от анодного напряжения.

По мере роста анодного напряжения все больше электронов, вылетевших из катода, попадает на анод. При определенном значении U_a все вылетевшие из катода за единицу времени электроны достигают анода. Дальнейший рост анодного напряжения не может увеличить силу анодного тока, поскольку достигается насыщение.

Таким образом, для определения тока эмиссии I_3 необходимо определить анодный ток, соответствующий точке перегиба «а» вольтамперной характеристики вакуумного диода.

2.3 Метод прямой Ричардсона.

Максимальный термоэлектронный ток (ток термоэлектронной эмиссии), возможный при данной температуре катода, называется *током насыщения*. *Плотность тока насыщения*, т.е. сила тока насыщения на каждую единицу поверхности катода, характеризует эмиссионную способность катода, которая зависит от природы катода и его температуры.

Плотность тока насыщения может быть вычислена по формуле Ричардсона-Дешмана:

$$j_{\text{нас}} = AT^2 e^{-\frac{e\phi}{kT}} \quad (2.10)$$

Если уравнение (2.10) поделить на T^2 и затем прологарифмировать левую и правую части уравнения, то получится выражение

$$\ln \frac{j_{\text{нас}}}{T^2} = \ln A - \frac{e\phi}{k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (2.11)$$

Это выражение показывает, что $\ln \frac{j_{\text{нас}}}{T^2}$ является функцией от $\frac{1}{T}$:

$$\ln \frac{j_{\text{нас}}}{T^2} = f\left(\frac{1}{T}\right). \quad (2.12)$$

График зависимости (рисунок 2.4) $\ln \frac{j_{\text{нас}}}{T^2}$ от $\frac{1}{T}$ является прямой линией (прямая Ричардсона) с угловым коэффициентом $\text{tg } \alpha = \frac{e\phi}{k}$.

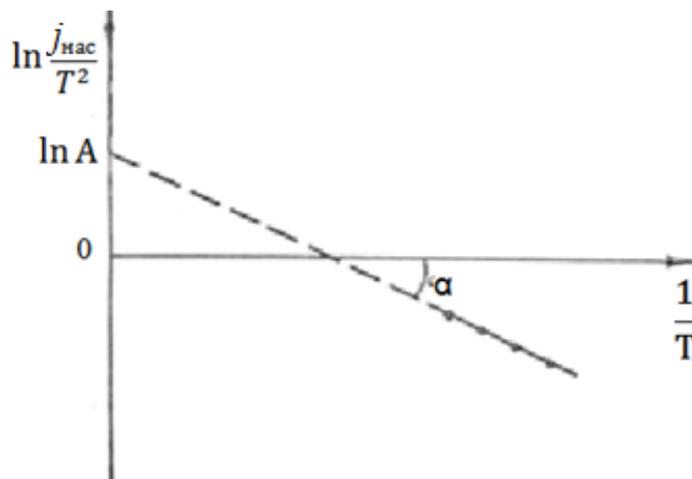


Рисунок 2.4 – Прямая Ричардсона.

Отрезок, отсекаемый на оси ординат, представляет собой $\ln A$, а угол наклона к оси абсцисс зависит от работы выхода:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\ln \frac{j_{\text{нас}1}}{T_1^2} - \ln \frac{j_{\text{нас}2}}{T_2^2}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} = \frac{e\varphi}{k}, \quad (2.13)$$

где T_1 и T_2 любые две температуры на интервале температур, в котором проводится исследование зависимости (2.11).

Таким образом, построение прямой Ричардсона позволяет определить константы термоэлектронной эмиссии катода A и $e\varphi$. Термодинамическая работа выхода, измеряемая в электрон-вольтах, связана с потенциалом выхода φ , измеряемым в вольтах, соотношением $e\varphi$, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона.

Поэтому

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{e\varphi}{k} = 11600\varphi; \quad \varphi = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{11600}. \quad (2.14)$$

2.4 Методика измерений

Для построения прямой Ричардсона надо экспериментальным путем определить плотность тока эмиссии при нескольких температурах катода из исследуемого металла. При этом встречается ряд трудностей при измерении как плотности тока эмиссии, так и температуры катода.

Температура катода может быть измерена с помощью оптического пирометра. При этом надо учитывать, что реальный катод представляет собой не абсолютно черное, а серое тело, и вводить поправочный коэффициент в данные пирометрирования.

Температура катода может быть определена расчетным путем по изменению электрического сопротивления катода с изменением его температуры. Неточность этого метода состоит в том, что температурный коэффициент α в уравнении

$$R_T = R_0(1 + \alpha T) \quad (2.15)$$

строго говоря, не является постоянным коэффициентом, а изменяется с температурой.

Кроме того, концы катода всегда имеют температуру более низкую, чем средняя часть из-за охлаждения вводами. Следовательно, рассчитывается средняя температура катода, заниженная по сравнению с температурой средней рабочей части.

В данной работе используются два метода измерения температуры катода.

Первый метод. Температура катода определяется по ее зависимости от удельной мощности, подводимой к нити накала (метод прямых Ричардсона).

Из него следует, что для определения работы выхода электрона из металла необходимо знать несколько значений температуры катода T и соответствующие им плотности тока насыщения $j_{\text{нас}}$. Токи насыщения можно определить из вольт-амперных характеристик диода при различных токах накала; температуры накала катода определяются путем расчета мощности, расходуемой на нагревание катода.

Мощность, потребляемая катодом, равна

$$P = I_{\text{н}} \cdot U_{\text{н}}, \quad (2.16)$$

где $I_{\text{н}}$ – ток накала; $U_{\text{н}}$ – напряжение накала.

В используемой в лабораторной установке лампе 3Ц18П применяется катодный узел, состоящий из двух вольфрамовых проволок диаметром $d = 0,09$ мм и эффективной длиной $l = 13$ мм, каждая.

Удельная мощность всего катодного узла рассчитывается по формуле

$$P_{\text{уд}} = \frac{P}{S_{\text{катода}}} = \frac{I_{\text{н}} \cdot U_{\text{н}}}{2\pi l d}, \quad (2.17)$$

где $P_{\text{уд}}$ – удельная мощность, Вт/м²;

$I_{\text{н}}$ – ток накала, А;

$U_{\text{н}}$ – напряжение накала, В;

l – длина катода, м;

d – диаметр катода, м.

Для некоторых металлов были экспериментально определены температуры накала от потребляемой мощности, приходящейся на единицу площади катода $P/S_{\text{катода}}$.

Значения температуры вольфрамового катода в зависимости от отношения $P/S_{\text{катода}}$ приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

T , К	$P/S_{\text{катода}}$, Вт/см ²	T , К	$P/S_{\text{катода}}$, Вт/см ²
1500	17,33	2300	148,2
1600	24,32	2400	181,2
1700	32,28	2500	219,3
1800	44,54	2600	263,0
1900	54,45	2700	312,7
2000	75,37	2800	368,9
2100	95,69	2900	432,4
2200	119,8	3000	503,5

Через окно можно наблюдать, что катод начинает светиться при напряжении накала около 0,88 В. Яркость, а следовательно, и температура накала катода зависит от подводимой к нему мощности.

На основе данных таблицы 2.1 можно рассчитать температуру катода. Соседние точки плотности мощности нужно аппроксимировать отрезками.

Важно, как можно более точно определять температуру накала, так как это сильно влияет на конечный результат (в расчетах квадрат температуры находится в знаменателе формулы (2.11)).

Таким образом, по вольтамперным характеристикам диода находят токи насыщения для нескольких токов накала и рассчитывают плотность тока насыщения, а температуры катода определяют по потребляемой мощности.

Применяя метод прямых Ричардсона, по формулам (2.13), (2.14) определяют работу выхода.

Вторым методом, по которому можно косвенным путем определить температуру нити накала, является метод единичного катода. Его физическая сущность аналогична методу предыдущему, однако расчеты несколько упрощены.

Единичным катодом называется металлический катод, однородный по составу и физическим свойствам, диаметром в 1 см и длиной в 1 см. Параметры такого излучателя для различных металлов просчитаны и сведены в таблицы. Просчитана, в том числе, и зависимость температуры от тока накала единичного катода $T_k = f(I'_n)$.

Температуру катода в работе можно определить, если ток накала катода пересчитать на ток накала единичного катода по формуле:

$$I'_n = \frac{I_n}{d^{3/2}}, \quad (2.18)$$

где I'_n – ток накала единичного катода, А;

I_n – ток накала исследуемого катода, А;

d – диаметр исследуемого катода, см.

Температуру катода T_k находим по графику $T_k = f(I'_n)$ (приложение 1).

3 Описание экспериментальной установки

Внешний вид лабораторной установки представлен на рисунке 3.1.

На левой боковой поверхности моноблока расположены сетевой разъем с предохранителем и выключатель «Сеть».

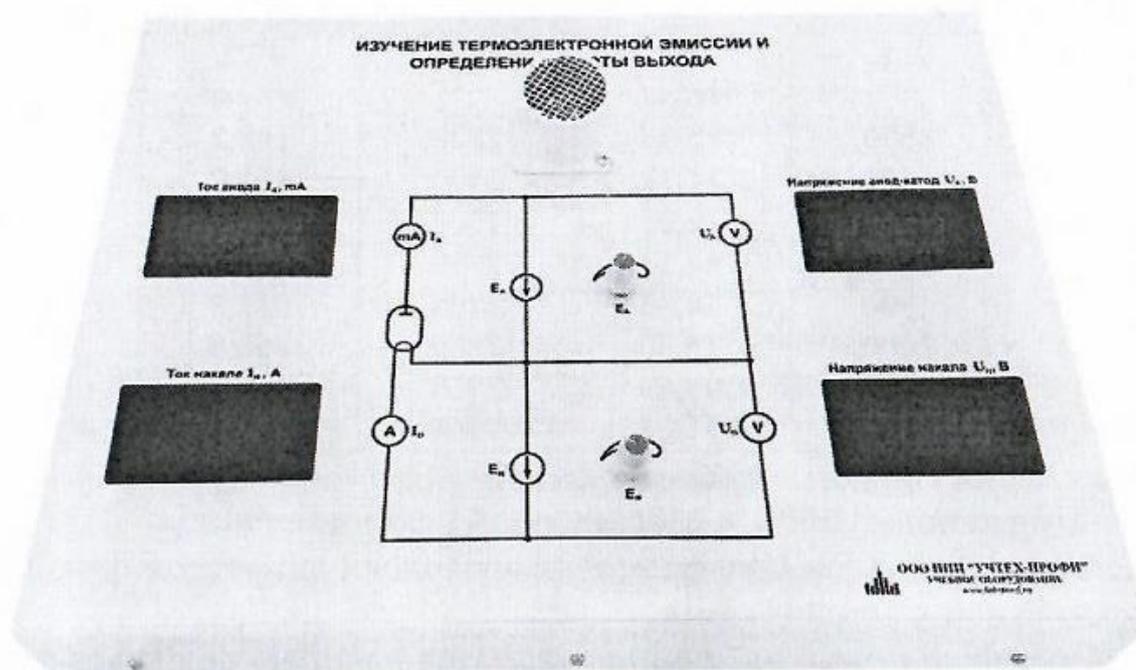


Рисунок 3.1 – Лабораторная установка «Изучение термоэлектронной эмиссии»

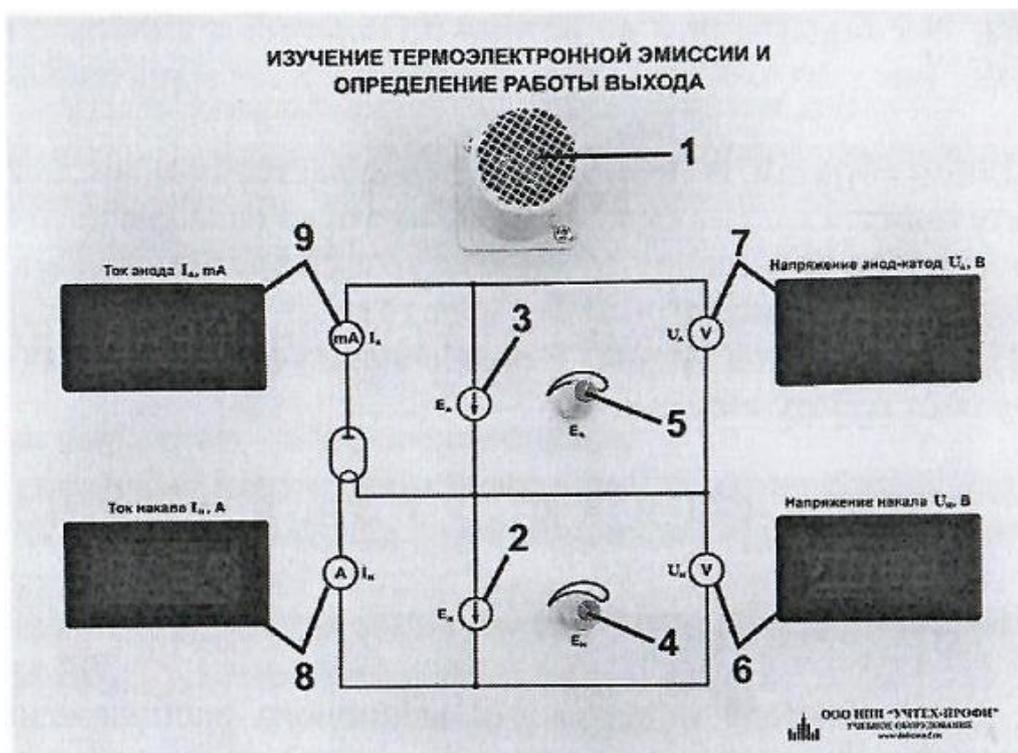


Рисунок 3.2 – Лицевая панель моноблока Лабораторная установка «Изучение термоэлектронной эмиссии»

Моноблок содержит:

1. Электровакуумный диод ЗЦ18П (1).
2. Регулируемый источник постоянного напряжения для накала лампы E_n (2) с регулятором напряжения (4).
3. Регулируемый источник постоянного напряжения для анодной цепи лампы E_a (3) с регулятором напряжения (5).
4. Вольтметр, для измерения напряжения накала лампы U_n (6).
5. Вольтметр, для измерения напряжения на аноде лампы U_a (7).
6. Амперметр, для измерения тока накала лампы I_n (8).
7. Миллиамперметр, для измерения тока анодной цепи лампы I_a (9).
8. На лицевой панели изображена – функциональная схема проведения измерений вольтамперной характеристики вакуумного диода, исследования зависимости тока насыщения термоэмиссии от температуры катода и определение работы выхода электрона.
9. Параметры электровакуумного диода ЗЦ18П:
 - Катод вольфрамовый.
 - Рабочее напряжение накала от 3 до 4 В.
 - Рабочее анодное напряжение не более 60 В.
 - Рабочая температура баллона до 120 °С.

Меры предосторожности при выполнении работы

Кабель питания моноблока должен быть подключен к сетевой розетке (220 В) с защитным проводником.

В процессе проведения эксперимента электровакуумная лампа нагревается. При продолжительной работе температура металлического кожуха лампы на лицевой панели моноблока может достигать 50 °С.

ВНИМАНИЕ: Не касайтесь металлического кожуха лампы и корпуса моноблока вблизи кожуха в процессе проведения эксперимента!

Лабораторная установка допускает непрерывную работу в течение одного часа. После одного часа работы необходимо отключить стенд не менее чем на 15 минут.

4 Порядок выполнения работы

На рисунке 4.1 представлена схема для снятия ВАХ.

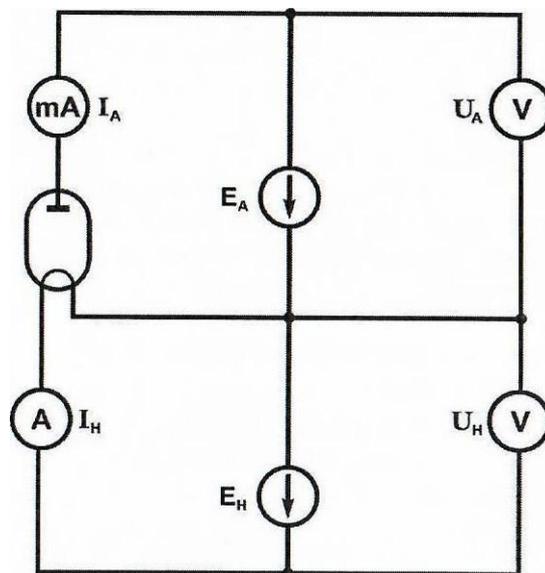


Рисунок 4.1 – Схема для снятия ВАХ

1. Выведите в крайнее левое положение ручки регуляторов напряжений E_A и E_H .
2. Включите моноблок кнопкой «Сеть» на левой боковой поверхности корпуса.
3. Снимите вольтамперные характеристики лампы для напряжений накала (U_H : 3 В; 3,2 В; 3,4 В; 3,6 В; 3,8 В; 4 В)

Данные занесите в таблицу 4.1.

При установке нового значения напряжения накала необходимо дать время на стабилизацию температурного режима не менее одной минуты.

Проведите измерения анодного тока I_a до получения тока насыщения.

Таблица 4.1

$I_H =$ $U_H = 3 \text{ В}$		$I_H =$ $U_H = 3,2 \text{ В}$		$I_H =$ $U_H = \dots$		$I_H =$ $U_H = 4 \text{ В}$	
$U_a, \text{ В}$	$I_a, \text{ мА}$	$U_a, \text{ В}$	$I_a, \text{ мА}$	$U_a, \text{ В}$	$I_a, \text{ мА}$	$U_a, \text{ В}$	$I_a, \text{ мА}$
0							
3							
5							
10							
20							
....							
60							

4. Выключите моноблок кнопкой «Сеть» на левой боковой поверхности корпуса.
5. Используя данные таблицы 4.1, постройте на одном графике вольтамперные характеристики лампы для разных напряжений накала.
6. По формуле $P = I_H \cdot U_H$ вычислите мощность P , потребляемую катодом для каждой

серии измерений (каждого напряжения накала).

7. Рассчитайте площадь катода по формуле $S_{\text{катода}} = 2\pi dl$.

8. Рассчитайте плотность тока насыщения $j_{\text{нас}}$.

9. Разделите мощность P , потребляемую катодом, на площадь катода $S_{\text{катода}}$ и по таблице 2.1 определите температуру накала T , соответствующую каждому из шести напряжений накала.

10. Для каждой серии измерений (напряжения накала) заполните таблицу 4.2.

Таблица 4.2

№ п/п	$I_{\text{н}}, \text{А}$	$U_{\text{н}}, \text{В}$	$P/S_{\text{катода}}$ Вт/см^2	$T, \text{К}$	$1/T, \text{К}^{-1}$	$j_{\text{нас}}, \text{А/м}^2$	$j_{\text{нас}}/T^2$	$\ln(j_{\text{нас}}/T^2)$
1								
2								
3								
4								
5								

11. Используя данные таблицы 4.2, постройте график зависимости $\ln \frac{j_{\text{нас}}}{T^2} = f\left(\frac{1}{T}\right)$.

12. Рассчитайте работу выхода электронов из вольфрама по формуле (2.14), используя измерения при крайних значениях напряжения накала $U_{\text{н}} = 4 \text{ В}$ и $U_{\text{н}} = 3 \text{ В}$ в джоулях (Дж) и в электрон-вольтах (эВ).

13. Сравните полученное значение со справочными данными для вольфрама (4,5 эВ). Рассчитайте погрешность измерения работы выхода электронов из металлов.

14. Для каждого тока накала по формуле 2.18 рассчитать ток единичного катода $I'_{\text{н}}$.

15. По графику $T_{\text{к}} = f(I'_{\text{н}})$ (приложение 1) определите температуру катода.

5 Контрольные вопросы

1. Каковы причины возникновения потенциального барьера в поверхностном слое металла?
2. Что называют работой выхода электрона из металла?
3. Какое явление называется термоэлектронной эмиссией?
4. По какому закону изменяется анодный ток в электронной лампе? Выполняется ли при этом закон Ома?
5. Что называется током насыщения? От каких параметров зависит его величина?
6. Какой вид имеет график зависимости тока насыщения от температуры?
7. В чем заключается метод прямых Ричардсона?
8. Каким методом определяют температуру накала в зависимости от потребляемой мощности?
9. Перечислите причины, которые могут приводить к испусканию электронов из металла.
10. В чем состоит различие холодной и термоэлектронной эмиссий электронов из металлов?
11. Какова напряженность электрического поля, способного вырывать электроны из металла?
12. Какая из эмиссий является наиболее управляемой?
13. Назовите источник энергии, благодаря которому электроны переходят в более

- высокоэнергетическую зону и покидают металл.
14. В каком случае к электронам, находящимся вблизи поверхности металла, можно применить классическую статистику Больцмана?
 15. Можно ли применить к электронам в металле классическое распределение электронов по скоростям (распределение Максвелла)?
 16. Повышение температуры вольфрама от 2000 до 3000 °С приводит к увеличению плотности тока электронной эмиссии в миллионы раз. С чем это связано?
 17. Дайте понятие явления взрывной эмиссии, используя литературные источники.
 18. При повышении температуры накала вольфрамовых нитей резко уменьшается срок их службы. Как можно повысить срок эксплуатации нити накала лампы?
 19. По литературным источникам найдите информацию об электронных пушках и расскажите о их применении.
 20. С какой целью металл покрывают, например, тонким слоем окиси кальция?
 21. В чем отличие поверхностного заряда от пространственного заряда?
 22. В чем состоит отличие статистики Ферми от классической статистики?
 23. Расчеты показывают, что электрон в металле может пройти расстояние равное 30 Å, что превышает расстояние между узлами кристаллической решетки. Чем это можно объяснить?
 24. Сравните плотность токов насыщения в вакууме с величиной токов в металлических проводниках.
 25. Иногда по тонкому проводнику удается пропустить ток (100÷200) А. Объясните, когда это возможно

6 Содержание отчета.

Отчет должен содержать:

1. титульный лист;
2. введение;
3. описание установки; методики эксперимента;
4. основные расчетные формулы;
5. результаты работы и их анализ;
6. выводы;

7 Список рекомендуемой литературы

1. Соболев В.Д. Физические основы электронной техники. – М.: Высш. школа, 1979. – 448 с.
2. Фридрихов С.А., Мовнин С.М. Физические основы электронной техники. – М.: Высшая школа, 1982. – 608 с.
3. Сушков А.Д. Вакуумная электроника. Физико-технические основы: учебное пособие / А. Д. Сушков. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 464 с.
4. Щука, А. А. Электроника в 4 ч. Часть 1. Вакуумная и плазменная электроника: учебник для вузов / А. А. Щука, А. С. Сигов; под редакцией А. С. Сигова. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2024. — 172 с.

Приложение 1

(справочное)

Зависимость температуры единичного вольфрамового катода от тока накала

