

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 68

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ МЕТАЛЛА

1. Цель работы

Целью работы является ознакомление с устройством электронной лампы, явлением термоэлектронной эмиссии и определение работы выхода электронов из материала катода.

2. Краткая теория

2.1. Работа выхода

В соответствии с квантовыми представлениями электроны в металле можно рассматривать находящимися в прямоугольной потенциальной яме, глубина которой E_{po} определяется индивидуальностью материала (рис. 1).

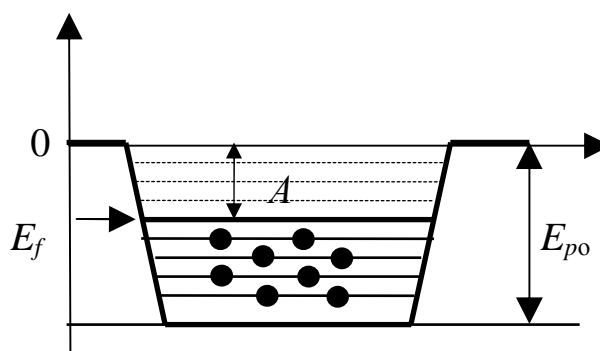


Рис. 1. Заполнение электронами уровней энергии

Электроны в яме имеют дискретные энергетические уровни. Заполнение уровней, согласно принципу минимума энергии, начинается со дна ямы и оканчивается уровнем Ферми, которому соответствует максимальная кинетическая энергия при $T=0$, называется *энергией Ферми* E_f . Для удаления электрона за пределы металла равным электронам нужно сообщить неодинаковую энергию. Электрону, находящемуся на самом нижнем уровне ямы, необходимо сообщить энергию E_{po} ; для электрона, находящегося на уровне Ферми, достаточная энергия $E_{po} - E_f$.

Наименьшая энергия, которую необходимо сообщить электрону для того, чтобы удалить его из твердого или жидкого тела в вакуум, называется работой выхода A :

$$A = E_{\rho 0} - E_f. \quad (1)$$

При температурах, отличных от абсолютного нуля, положение уровня Ферми немного меняется, как и глубина потенциальной ямы. Это приводит к слабой зависимости работы выхода от температуры. Тем не менее, данное выше определение A сохраняют.

Работа выхода очень чувствительна к состоянию поверхности, в частности, к ее чистоте. Подобрав надлежащим образом покрытие, можно сильно понизить работу выхода (табл. 1).

2.2. Термоэлектронная эмиссия

При $T=0$ имеется некоторое количество электронов, способных выйти из металла. При повышении температуры число таких электронов резко возрастает. Испускание электронов нагретым металлом называется *термоэлектронной эмиссией*. Изучение этого явления осуществляется с помощью схемы, основным элементом которой является двухэлектродная электронная лампа диод (рис. 2, а). Она представляет собой хорошо вакуумированный (откачанный) металлический или стеклянный баллон с двумя электродами - катодом К и анодом А.

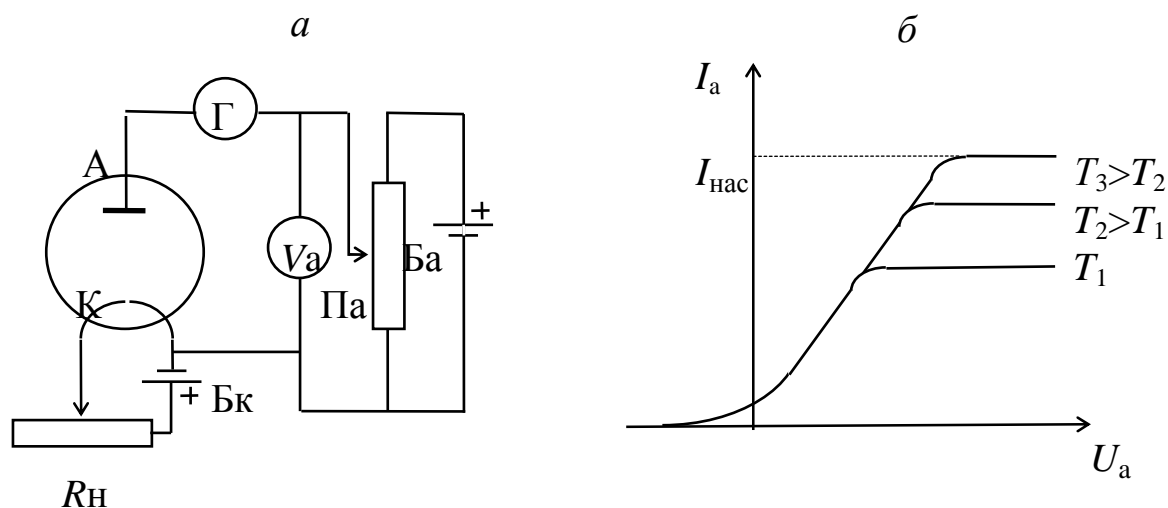


Рис. 2. Двухэлектродная электронная лампа:
 а - схема включения двухэлектродной лампы;
 б - вольтамперные характеристики

Катод нагревается током батареи накала B_k . Температуру катода можно менять, регулируя ток накала реостатом R_k . На электроды лампы подается регулируемое с помощью потенциометра Π_a напряжение от

анодной батареи B_a . Анодное напряжение U_a измеряется вольтметром V_a , анодный ток I_a - гальванометром Γ .

Зависимости анодного тока от анодного напряжения при постоянном напряжении накала (вольтамперные характеристики) представлены на рис. 2, б. Различные кривые соответствуют разным температурам катода.

При $U_a = 0$ вылетевшие из катода электроны образуют вокруг него отрицательный пространственный заряд - электронное облако. Оно отталкивает вылетающие из катода электроны и большую их часть возвращает обратно. Все же небольшому числу электронов удается долететь до анода, обуславливая слабый ток. Чтобы его прекратить, необходимо на анод подать некоторое отрицательное напряжение. Поэтому вольтамперные характеристики диода начинаются не в нуле.

С ростом U_a все большее число электронов отсасывается электрическим полем к аноду (анодный ток растет) и, наконец, при определенном значении U_a электронное облако полностью рассасывается, а все вылетевшие из катода электроны достигают анода. Дальнейший рост U_a не может увеличить силу анодного тока - ток достигает насыщения. Именно ток насыщения $I_{\text{нас}}$ характеризует термоэлектронную эмиссию. Ричардсон (на основе классических представлений) и Дешман (на основе квантовых представлений) получили для тока насыщения практически одинаковую формулу

$$I_{\text{нас}} = B \cdot T^2 \cdot S \cdot \exp\left(-\frac{A}{kT}\right), \quad (2)$$

где B - независимая от рода металла константа, теоретическое значение которой равно $120 \text{ А/см}^2 \text{ К}$;

S - площадь катода;

A - работа выхода;

T, k - абсолютная температура и постоянная Больцмана.

Наблюдаемые значения B (табл. 1) для разных металлов сильно отличаются друг от друга и зачастую весьма далеки от теоретической величины, т. е. значения B являются постоянной лишь в рамках тех приближений которые использовали Ричардсон и Дешман. Удовлетворительное описание экспериментальных зависимостей с помощью формулы Ричардсона - Дешмана достигается только в предположении, что постоянная B - характерная для каждого вещества величина.

Как показывают расчеты, уменьшение A резко повышает эмиссию электронов (при $T = 1160 \text{ К}$, т. е. при $kT = 0,10 \text{ эВ}$ уменьшение A от 3 эВ до 1 эВ приводит к возрастанию $I_{\text{нас}}$ почти в $5 \cdot 10^8$ раз). Поэтому при изготовлении электронных ламп применяются специальные покрытия и способы обработки катодов, приводящие к снижению работы выхода.

В табл. 1 приведены значения B и A для некоторых металлов, найденные из опытов

Таблица 1

Опытные значения A и B для некоторых металлов

Металл	$B, A/\text{см}^2\text{K}$	$A, \text{эВ}$
Цезий	160,0	1,8
Вольфрам	75,0	4,5
Никель	30,0	4,6
Cs на W	3,2	1,4
Ba на W	1,6	1,6
Th на W		2,6

Умножив обе части формулы (2) на множитель 10^4 (для упрощения вычислений) и логарифмируя, получим:

$$\ln(10^4 I_{\text{нас}}) = (\ln B + \ln S + 2 \cdot \ln T + 4 \cdot \ln 10) - \frac{A}{k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (3)$$

Выражение, стоящее в скобках формулы (3), слабо зависит от T по сравнению с последним слагаемым. Обозначив его через постоянную C , имеем:

$$\ln(10^4 I_{\text{нас}}) = C - \frac{A}{k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (4)$$

Это уравнение прямой в координатах $\ln(10^4 I_{\text{нас}})$ и $1/T$. Тангенс угла наклона этой прямой к оси абсцисс определяется коэффициентом при $1/T$, т. е.

$$\text{tg}\varphi = -\frac{A}{k}. \quad (5)$$

Используя дополнительный до 180° угол ψ , окончательно имеем (рис. 3):

$$\text{tg}\psi = \frac{A}{k}. \quad (6)$$

Это уравнение служит для определения работы выхода электронов A по вычисленному из рис. 3 значению $\text{tg}\psi$.

Данные для построения графика рис. 3 получают из измерений при нескольких режимах работы электронной лампы ГУ-4. Значения токов насыщения определяются при различных напряжениях накала и анодном напряжении более 100 В (при этом напряжении реализуется явление насыщения анодного тока).

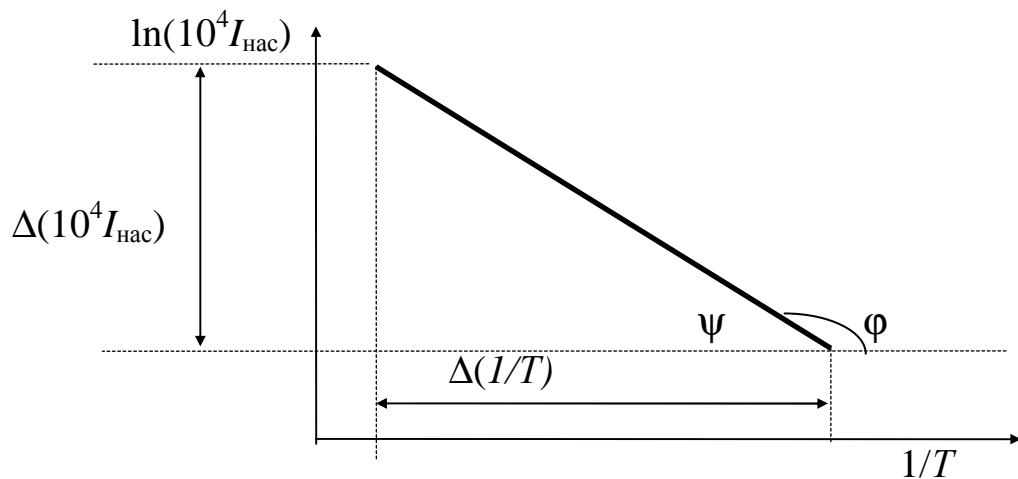


Рис. 3. Зависимость $\ln(10^4 I_{\text{нас}})$ от обратной температуры

Температура катода вычисляется из формулы:

$$R_t = R_0(1 + \alpha \cdot t + \beta \cdot t^2), \quad (7)$$

где $\alpha = 0,0046 \text{ град}^{-1}$;

$\beta = 0,00000195 \text{ град}^{-2}$;

t - температура катода в градусах С;

$R_0 = 0,29 \text{ Ом}$ - сопротивление катода при $0 \text{ }^\circ\text{C}$;

R_t - сопротивление катода при произвольной температуре t .

Его вычисляют по формуле:

$$R_t = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}}, \quad (8)$$

где $U_{\text{н}}$, $I_{\text{н}}$ – напряжение и ток накала катода соответственно.

Решив уравнение (7), получим:

$$T = \sqrt{\frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{1}{\beta} \left(\frac{R_t}{R_0} - 1 \right)} - \frac{\alpha}{2\beta} + 273. \quad (9)$$

3. Выполнение работы

Установка состоит из блока питания нити накала лампы ГУ-4 (БПН), регулируемого источника питания анодной цепи ВС-11 и лабораторной панели с расположенными на ней электроизмерительными приборами (рис. 4).

Цепь накала включает в себя блок питания накала (БПН), вольтметр для измерения напряжения на катоде $V_{\text{н}}$, амперметр для измерения тока накала $A_{\text{н}}$ и реостата $R_{\text{н}}$.

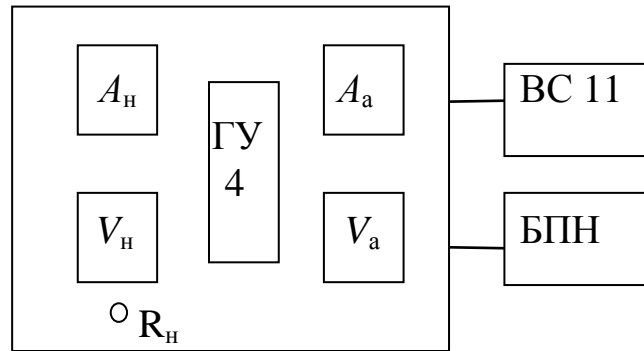


Рис. 4. Блок–схема установки

Анодная цепь состоит из источника питания ВС-11, вольтметра для измерения анодного напряжения V_a , амперметра (миллиамперметра) для измерения анодного тока A_a , потенциометра для регулировки анодного напряжения Π_a . Электрическая схема установки (рис. 5) собрана и в переключениях не нуждается.

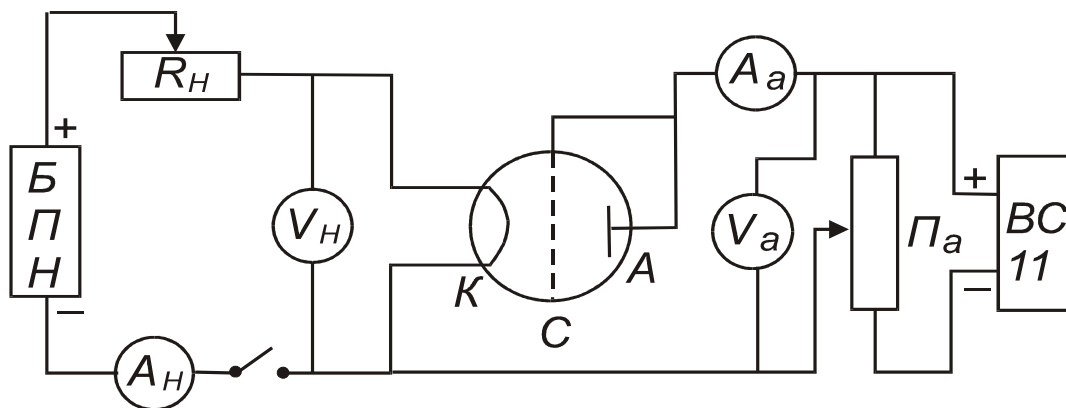


Рис. 5. Электрическая схема установки

3.1. Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с расположением приборов на лабораторном столе.
2. Включите в сеть 220 В источники питания БПН, ВС-11. При этом должны загореться сигнальные лампы. Дайте приборам прогреться в течение 2 - 3 минут.
3. Установите потенциометром Π_a анодное напряжение 100 В. Движок реостата R_n поверните в крайнее левое положение.
4. Медленно поворачивая по часовой стрелке движок реостата R_n , установите по вольтметру V_n напряжение в цепи накала 3 В.
5. Отсчитайте по амперметру A_n значение тока накала I_n по миллиамперметру A_a ток насыщения лампы $I_{нас}$.
6. Изменяя напряжение накала согласно значениям, приведенным в

табл. 2, измерьте соответствующие токи.

7. Запишите все показания в таблицу измерений.

8. Сняв все показания, плавно поверните движок реостата R_n против часовой стрелки до левого крайнего положения и отключите от сети все приборы.

9. $\ln 10^4 I_{\text{нас}}$ и значение $1/T$ рассчитать на ПК, обратившись к преподавателю или воспользоваться графиком, приведенном на рис. 6. Программа для расчета $1/T$ в Excel: $[10000/(\text{КОРЕНЬ}((A1/(B1*0,29)-1))*512820,5+1391190)-1179,5+273)]$. Результаты записать в табл. 2.

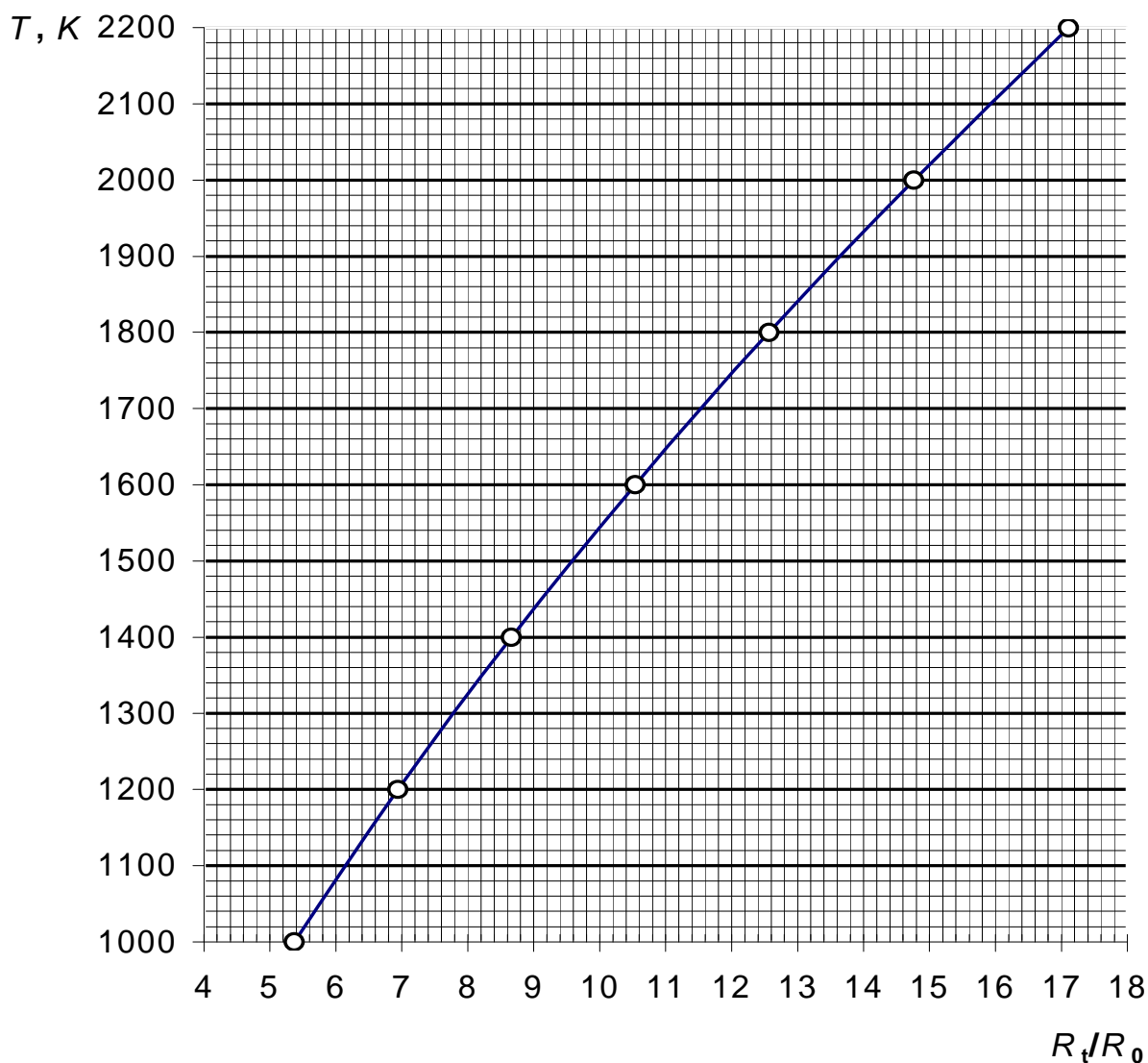


Рис.6. Зависимость температуры от относительного сопротивления

10. По полученным данным построить на миллиметровой бумаге график зависимости $\ln(10^4 I_{\text{нас}}) = f(1/T)$ (см. рис. 3), определить тангенс ψ , равный

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{\Delta(\ln 10^4 I_{\text{нас}})}{\Delta\left(\frac{1}{T}\right)} \quad (10)$$

и вычислить работу выхода A , пользуясь формулой (6). Значение постоянной Больцмана принять равной $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К или $0,862 \cdot 10^{-4}$ эВ/К.

11. Сравнить найденное значение работы выхода электронов с табличным (табл.1), записать окончательный результат и сделать выводы.

Таблица 2

Результаты измерений

Номер опыта	U_n , В	I_n , А	$I_{\text{нас}}$, А	R_t/R_0	T , К	$1/T$, К ⁻¹	$\ln(10^4 I_{\text{нас}})$
1	3,8						
2	4,0						
3	4,2						
4	4,4						
5	4,6						
6	4,8						

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется работой выхода электронов?
2. Что такое термоэлектронная эмиссия?
3. Как выглядят вольтамперные характеристики вакуумного диода?

Объяснить их особенности.

4. Записать и пояснить выражение для тока насыщения диода.
5. Как выглядит расчетная формула для определения работы выхода?
6. Как определяют в данной работе температуру катода?
7. Начертить и объяснить электрическую схему установки.
8. Расскажите о порядке выполнения работы.
9. Как бы вы оценили ошибку, допускаемую при определении работы выхода в данной работе?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Савельев, И. В.* Курс общей физики. Т.3 / И. В. Савельев.- М.: Наука. 1989.- 304 с.
- Овчинников, И. К.* Конспект лекций по законам теплового излучения, физике атома и твердого тела / И. К. Овчинников.- Свердловск: Изд. СГИ, 1973.- 216 с.
- Трофимова Т. И.* Курс физики / Т. И. Трофимова.- М.: Высшая школа, 1994.- 541 с.