

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет

Кафедра общей физики

Филянин Юрий Евгеньевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение работы выхода электронов из торированного
вольфрамового катода**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19312

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. Иванов Иван Анатольевич
Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

аспирант Матвеев Антон Сергеевич
Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин
Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Целью работы являлось определение работы выхода электронов из торированного вольфрамового катода. Для этой цели была собрана схема, с помощью которой была получена ВАХ диода при различных токах накала. Построены прямые Ричардсона. На основании полученных данных вычислена работа выхода электронов.

Ключевые слова: вакуумный диод, ВАХ, прямая Ричардсона.

Оглавление

Введение	4
Экспериментальная установка	6
Методика измерений.....	7
Обработка экспериментальных данных.....	8
Заключение	9
Список литературы	9

Введение

Диод является простейшим вакуумным прибором, состоящим из двух электродов: катода и анода. В случае прямого термокатода (коим является используемый в работе диод 2ДЗБ), катодом служит нить накала. При пропускании тока по катоду последний нагревается и испускает электроны в пространство между электродами. Этот процесс (выход электронов под действием повышенной температуры) называют термоэлектронной эмиссией. Используемый в работе диод 2ДЗБ имеет цилиндрическую систему электродов и прямонакальный катод с нитью накала из торированного карбидированного вольфрама.

Согласно классической модели Шоттки, работа выхода, совершаемая электроном в процессе эмиссии обусловлена двумя силами. Во-первых, это так называемая двойная сила, обусловленная выходом электронного облака за границу металла. Ее можно представить как плоский конденсатор с отрицательно заряженной внешней пластиной. Тогда силу можно принять постоянной $F_0 = eE$, где e – заряд электрона, а E – поле, значение которого зависит от металла и плотности электронного облака. Во-вторых, после выхода электрона из двойного слоя, на него начинает действовать сила, которую можно представить как силу изображения этого электрона, $F_{im} = -e^2/4x^2$ (здесь и дальше формулы приведены в СГС), где x – расстояние от границы металла. Из непрерывности силы (ввиду непрерывности поля) следует, что $F_0 = -e^2/4x_0^2$, где x_0 – расстояние от границы металла до границы электронного облака. Работу выхода можно получить интегрируя силу по координате, от нуля до бесконечности:

$$W_p = - \int_0^{\infty} F dx = \frac{e^2}{4x_0} + \frac{e^2}{4x_0} = \frac{e^2}{2x_0}$$

Эту работу, вычисленную из классических соображений, называют полной работой выхода. Однако экспериментально получаемые значения оказываются

значительно ниже. Эта разница между теорией и экспериментом объясняется квантовой механикой. Даже при нулевой температуре все электроны не могут иметь одинаковую (нулевую) энергию ввиду запрета Паули. Распределение электронов по энергиям описывается

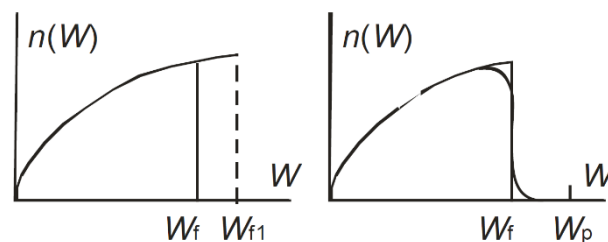


Рис. 1. Распределение плотности электронов по энергиям [1]

статистикой Ферми – Дирака. Пример такого распределения приведен на рисунке 1. Рисунок слева соответствует нулевой температуре. В распределении выделена максимальная энергия электронов W_f , называемая уровнем Ферми или химическим потенциалом идеального электронного газа. Она зависит от плотности электронного газа n как $W_f \sim n^{3/2}$ и определяется металлом. Для всех металлов энергия Ферми имеет один и тот же порядок – несколько электронвольт. W_{f1} соответствует металлу с другим (более высоким) уровнем Ферми. Примерное распределение при ненулевой температуре показано на рисунке справа. Большинство высокоэнергетических электронов имеют энергию близкую к энергии Ферми. Поскольку металл покидают именно высокоэнергетические электроны, то эффективную работу выхода можно принять за разность между полной работой и энергией Ферми:

$$W_a = W_p - W_f$$

Диод имеет несколько режимов работы, в зависимости от напряжения между электродами. В работе используется так называемый режим токов насыщения. В этом режиме напряжение между анодом и катодом (далее – анодное напряжение, потенциал катода примем за ноль) достаточно велико чтобы потенциал в пространстве между катодом и анодом монотонно убывал. Тогда любой вылетевший электрон достигнет анода, а ток анода должен быть равен току эмиссии. Зависимость тока эмиссии от температуры катода описывается формулой

$$j_{\text{э}} = AT^2 \exp\left(-\frac{\varphi}{kT}\right), \quad (1)$$

где φ – работа выхода, T – температура катода, k – постоянная Больцмана, A – константа (равная $\frac{4\pi mk^2 e}{h^3}$, m – масса электрона, h – постоянная Планка).

Однако работа выхода уменьшается ввиду проникновения поля анода в катод. Это явление называется эффектом Шоттки и описывается формулой

$$j_{\text{а}} = j_{\text{э}} \exp\left(\frac{e^{3/2} E_{\text{к}}^{1/2}}{kT}\right), \quad (2)$$

где $j_{\text{а}}$ – ток анода, $j_{\text{э}}$ – ток эмиссии, T – температура катода, $E_{\text{к}}$ – напряженность поля анода на катоде ($\frac{U_{\text{а}}}{r_{\text{к}} \ln \frac{r_{\text{а}}}{r_{\text{к}}}}$ для цилиндрического диода, где $r_{\text{к}}$ и $r_{\text{а}}$ – радиусы катода и анода).

Целью работы являлось определение работы выхода электронов из торированного вольфрамового катода методом. Для расчета работы выхода были сняты ВАХ диода при различных токах накала.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка приведена на рисунке ниже.

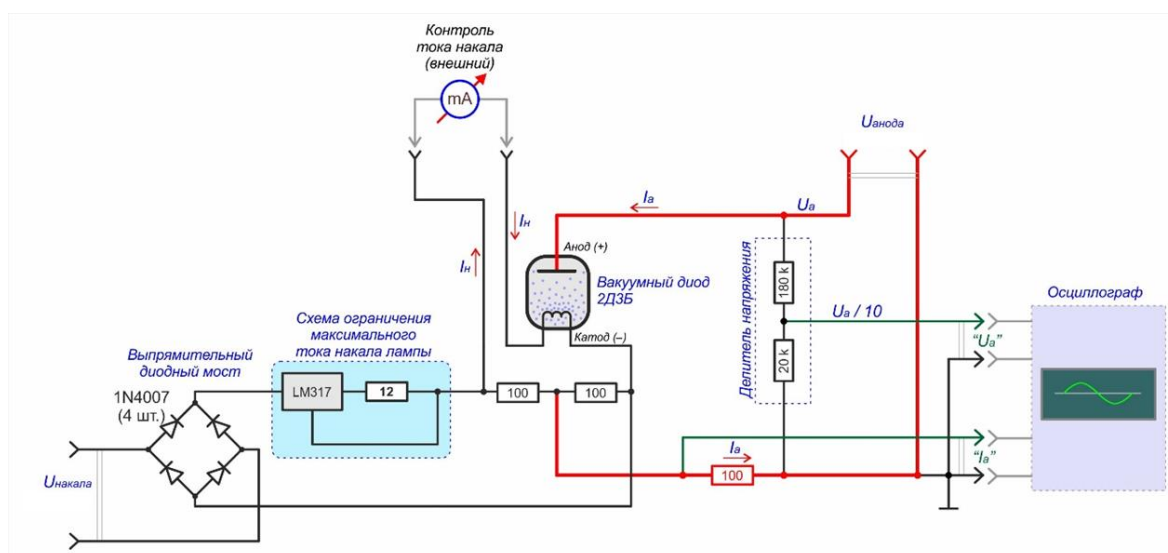


Рис 2. Экспериментальная установка [2]

В начале каждого эксперимента устанавливается напряжение накала генератором ГЗ-109. Напряжение накала является переменным и проходит через

выпрямитель. Ток накала измеряется микроамперметром GDM-8135. На вход Y (U_y) осциллографа (АКИП-7220А) подается падение напряжения на резисторе, по которому течет ток равный анодному. Напряжение на разных концах катода различны. Для уменьшения сопутствующей погрешности система подключается через искусственную среднюю точку катода. На вход X (U_x) осциллографа через делитель напряжения подается напряжение одна десятая напряжения катод-анод.

Методика измерений

По данным осциллографа получены вольтамперные характеристики диода при разных токах накала. Ток анода рассчитан как $I_a = U_y / 100 \text{ Ом}$, напряжение анода как $U_a = 10U_x$. На рисунке 3 показана вольтамперная характеристика при токе накала в 99,94 мА.

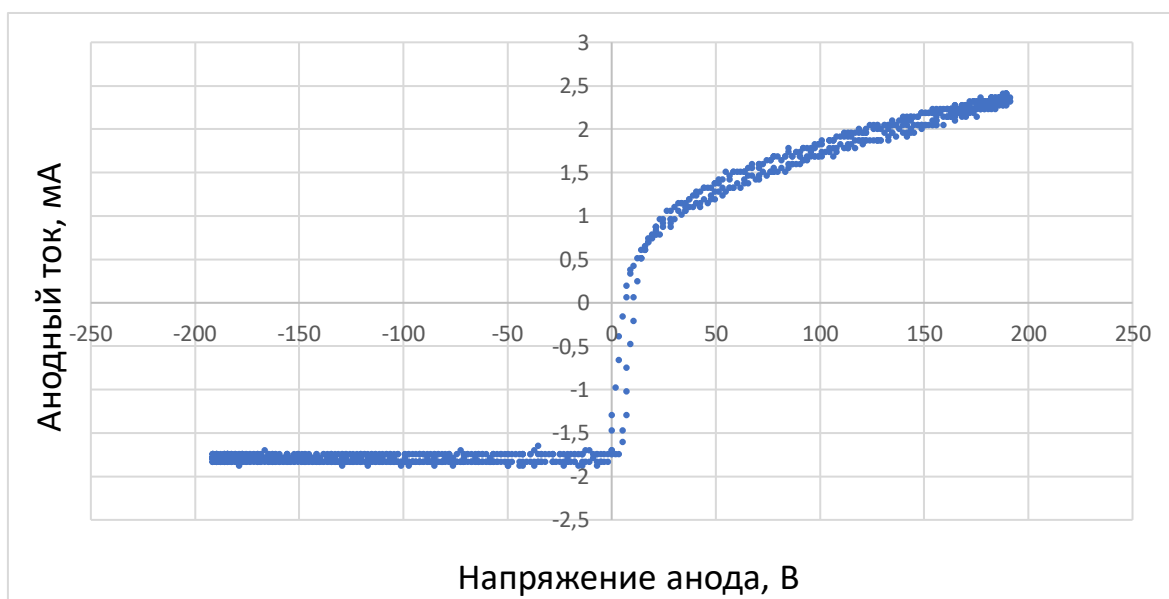


Рис. 3. Вольтамперная характеристика диода при токе накала 99,94 А

По графику видно, что точки не совпадают и получается две кривые. Это можно объяснить тем, что при высоком напряжении имеется большой анодный ток. Из-за этого понижается температура катода, так как в первую очередь вылетают электроны с энергией выше средней. В дальнейшем ток анода будет определяться как среднее от токов при данном напряжении.

Обработка экспериментальных данных

По графику оценено напряжение, при котором диод переходит в режим насыщения (~50 В). Фиксируя напряжение анода, можно получить зависимость тока анода от тока накала. Для трех напряжений анода (около 75 В, 113 В, 150 В) построены зависимости $-\ln \frac{j_a}{kT}$ от $\frac{1}{kT}$ (рисунок 4).

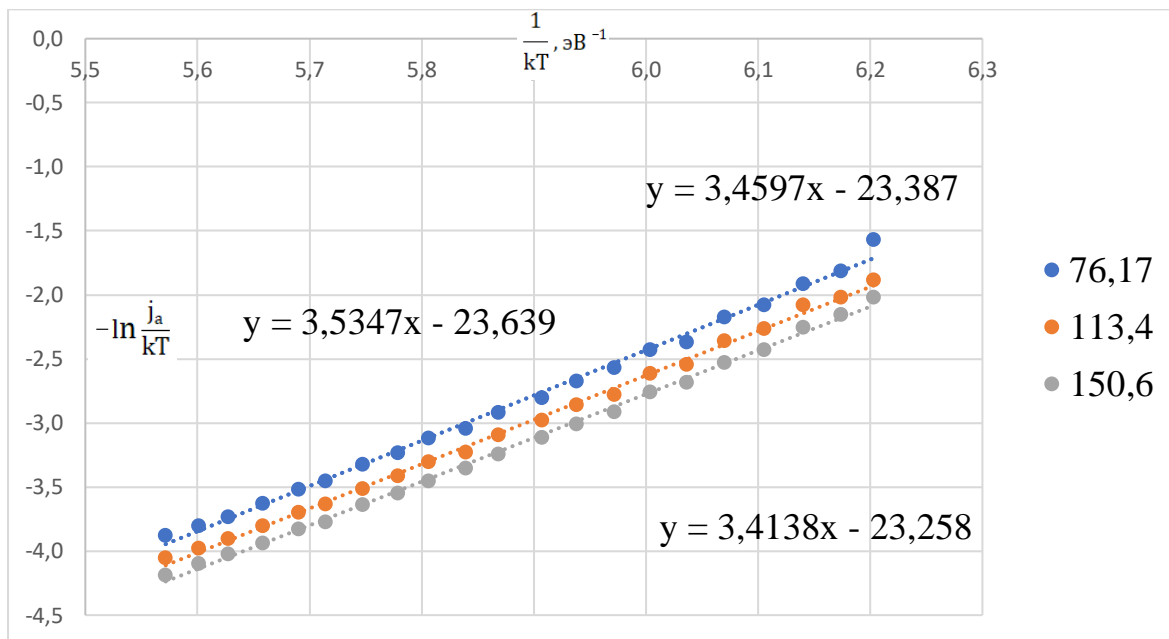


Рис. 4. Прямые Ричардсона

Данные зависимости были аппроксимированы прямыми, называемые прямыми Ричардсона. Величина под логарифмом имеет размерность, но для определения работы выхода достаточно знать угол наклона, а единицы измерения влияют лишь на некоторую добавку. По формуле (1) работу выхода (без учета эффекта Шоттки) можно определить как $\frac{\Delta y}{\Delta x}$, то есть коэффициент наклона. С учетом эффекта Шоттки, реальная работа выхода на больше. Итоговые значения представлены в таблице.

Ua, В	76,17	113,4	150,6
A, эВ (без эффекта Шоттки)	3,53	3,46	3,41
Эффект Шоттки, эВ	0,029	0,036	0,041
A, эВ (с учетом эффекта Шоттки)	3,58	3,50	3,46

Таблица. Работа выхода

Заключение

В ходе выполнения работы ознакомились с теорией по теме вакуумных диодов: принцип работы, основные явления, прямые Ричардсона и эффект Шоттки. Были получены ВАХ диода при различных токах накала. Найдена работа выхода электронов из торированного вольфрама.

Список литературы

1. В. Т. Астрелин, П. П. Дейчули, А. А. Краснов, В. В. Кубарев, Л. Н. Смирных, Ю. В. Шестаков, ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ВАКУУМНОМ ДИОДЕ, Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2008
2. https://elmag.nsu.ru/doku.php?id=lab2:описание_установки