

Федеральное Государственное Бюджетное
Образовательное Учреждение Высшего Образования
Мытищинский Филиал Московский Государственный Технический
Университет им. Н.Э. Баумана

Н. П. Полуэктов, И. И. Усатов

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ
Учебно-методическое пособие

Москва

Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана

2023

УДК 537.58

ББК. 22.3

Факультет «Космический»

Кафедра «Высшая математика и физика»

Рекомендовано Научно-методическим советом

МГТУ им. Н.Э.Баумана в качестве учебно-методического пособия

Рецензент: канд. физ.-мат.наук, доцент О. В. Русаков

Полуэктов, Н.П. Изучение явления термоэлектронной эмиссии: учебно-методическое пособие / Н.П. Полуэктов, И.И. Усатов: Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. – 20 с.: ил.

В работе рассмотрены основные законы термоэлектронной эмиссии, описана лабораторная установка, изложена методика измерений вольтамперных характеристик (ВАХ) вакуумного диода.

Данное учебно-методическое пособие предназначено для обеспечения лекционного курса, практических занятий и семинаров по дисциплине. Данный материал входит в модуль «Электричество и электромагнетизм» в раздел лабораторные работы «Законы постоянного и переменного электрического тока. Токи в проводниках, полупроводниках, газах. Эмиссионные явления». Предназначено для студентов всех технических специальностей Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (уровень бакалавриата и специалитета), изучающих дисциплину «Физика».

УДК 537.852

ББК. 22.3

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

© Оформление. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
1. Теоретическая часть	6
1.1. Работа выхода электронов из металла.	6
1.2. Термоэлектронная эмиссия и ее применение.	9
2. Экспериментальная часть.	13
2.1. Описание экспериментальной установки.	13
2.2. Порядок выполнения работы.	15
2.3. Задание 1. Определение работы выхода электрона из вольфрама на основе формулы Ричардсона-Дэшмана.	15
2.4. Задание 2. Проверка закона Богуславского-Ленгмюра.	18
3. Контрольные вопросы.	19
4. Форма отчета о работе.	19
Литература.	20

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебно-методическое пособие посвящено экспериментальному исследованию явления термоэлектронной эмиссии и ее применению в вакуумных диодах.

Целью данной лабораторной работы является изучение особенностей вольтамперных характеристик (ВАХ) вакуумных диодов.

Для выполнения лабораторной работы необходимо изучить следующий теоретический материал:

1. Основы физики термоэлектронной эмиссии.
2. Законы движения электронов в электрическом поле.
3. Принцип работы вакуумных диодов.
4. Параметры вакуумных диодов.

Цель лабораторной работы:

1. Научить студента работе на экспериментальной установке.
2. Изучить особенности вольтамперных характеристик вакуумных диодов.
3. Определить работу выхода электрона из металла и постоянную формулы Ричардсона-Дэшмана.
4. Провести проверку закона Богуславского-Ленгмюра.

Задачи лабораторной работы:

1. Создать у студентов навыки ведения лабораторного журнала, построения графиков, обработки экспериментальных результатов.
2. Научить составлять отчет по выполненной работе.
3. Закрепить теоретические знания по явлению термоэлектронной эмиссии и ее применению в устройствах.

Описание работы составлено так, чтобы ясное представление о существе изучаемых явлений и применяемом методе измерений могли себе

составить как те студенты, которые уже прослушали этот материал на лекциях, так и те, которые только приступают к изучению соответствующего раздела физики. Учебный материал содержит необходимую информацию для организации самостоятельной работы студента при выполнении лабораторной работы.

1. Теоретическая часть

1.1. Работа выхода электронов из металла

В металле большое число свободных электронов. Это электроны, находящиеся на внешней орбите (валентные электроны), которые под действием электрического поля соседних атомов в кристаллической решетке металла отрываются от атомов. Практически каждый атом металла отдает валентный электрон. Вследствие этого металлы обладают высокой электропроводностью. Свободные электроны совершают тепловое движение, обладают кинетической энергией, их движение подобно молекулам идеального газа. Средняя квадратичная скорость электронов даже при комнатной температуре ($T=300\text{ К}$) большая:

$$V_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}} \approx 10^5 \text{ м / с}, \quad (1)$$

где $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постоянная Больцмана. Этой скорости соответствует средняя кинетическая энергия:

$$E = \frac{3}{2} kT = 6.2 \cdot 10^{-21} \text{ Дж} \approx 0.04 \text{ эВ}, \quad (2)$$

Здесь использована формула перевода размерности энергии из Джоулей в электронвольты (эВ), которая используется в атомной физике:

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ джоуля (Дж)}.$$

При обычных температурах этой энергии недостаточно, чтобы покинуть пределы металла, так как они испытывают кулоновское взаимодействие с положительно заряженными ионами, находящимися в узлах кристаллической решетки.

Для выхода электрона из металла необходимо совершить работу против этих сил, которая называется **работой выхода электронов**.

Возникновение работы выхода происходит по двум причинам.

1. При попытке электрона покинуть металл на его поверхности появляется наведенный (индуцированный) положительный заряд. Между

электроном и металлом возникает сила притяжения F , направленная к металлу, препятствующая выходу электрона и проявляющаяся вне кристалла (рис. 1). Работа против силы притяжения к положительно заряженному телу и составляет **основную часть работы выхода**.

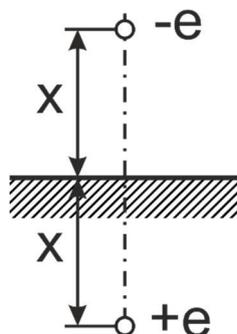


Рис.1. Возникновение на поверхности кристалла положительного заряда вылетевшим электроном

2. Существование двойного электрического слоя вблизи поверхности любого тела (рис. 2). Отдельные электроны, имеющие скорость большую средней скорости могут на короткое время покидают поверхность металла, и удаляться от него на несколько межатомных расстояний. Но затем они останавливаются под действием некомпенсированного заряда положительно заряженных ионов и поворачивают обратно. В результате металл оказывается окруженным тонким облаком электронов (рис. 2).

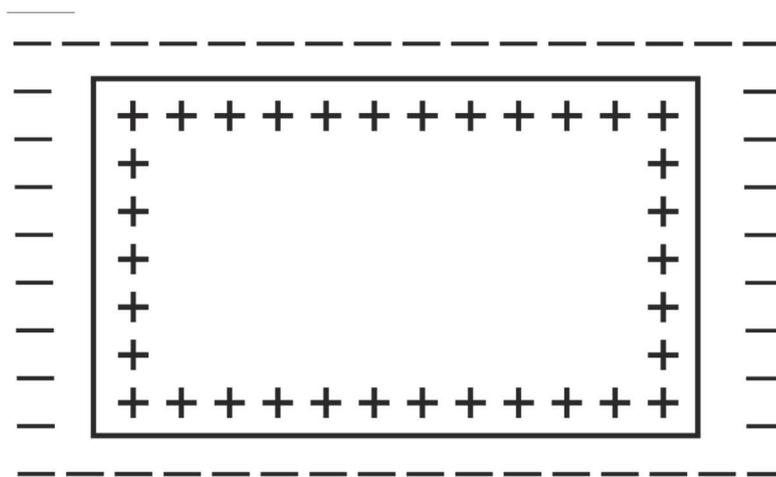


Рис. 2. Двойной электрический слой на границе металл-воздух

Толщина двойного слоя составляет порядка нескольких межатомных расстояний ($10^{-10} \dots 10^{-9}$ м). Электрическое поле двойного слоя создает

энергетический барьер для электронов. Работа по преодолению этого барьера, является второй составляющей работы выхода. За областью двойного слоя вне кристалла на электроны действует только кулоновская сила притяжения, о которой говорилось выше.

При переходе через поверхность в воздух потенциал электрона возрастает по сравнению с потенциалом внутри металла на некоторую величину φ , которую называют **поверхностной разностью потенциалов**. Она связана с работой выхода следующим соотношением:

$$A = e\varphi, \quad (3)$$

где e – модуль заряда электрона. Для удаления электрона из объема металла за его пределы кинетическая энергия электрона должна превышать работу выхода:

$$\frac{m_e V^2}{2} > A, \quad (4)$$

где m_e – масса электрона, V – его скорость.

При выполнении условия (2) наблюдается явление электронной эмиссии, т. е. испускание электронов с поверхности металла. Для наблюдения электронной эмиссии необходимо сообщить электронам энергию.

Различают четыре вида эмиссии в зависимости от способа сообщения энергии:

1. Термоэлектронная эмиссия – испускание электронов нагретыми металлами. С повышением температуры число электронов, кинетическая энергия теплового движения которых больше работы выхода, резко увеличивается и термоэлектронная эмиссия возрастает.

2. Фотоэлектронная эмиссия. Эмиссия электронов из металла под действием излучения. В этом случае электрон получает дополнительную энергию за счет энергии фотона: $E = h\nu$, где h – постоянная Планка, ν – частота падающего излучения.

3. Вторичная электронная эмиссия – испускание электронов при бомбардировке поверхности извне пучком электронов или других частиц.

4. Автоэлектронная эмиссия – эмиссия электронов из поверхности металла под действием сильного внешнего электрического поля. В различных электронных приборах применяются все виды эмиссии, но чаще всего используется наиболее управляемая термоэлектронная эмиссия.

Работа выхода является характеристикой поверхности тела. Например, для снижения работы выхода поверхность вольфрама покрывают тонким слоем тория, цезия, бария или окислов некоторых металлов (активированные катоды). Толщина слоя составляет несколько десятков тысяч межатомных расстояний.

1.2. Термоэлектронная эмиссия и ее применение

Исследование закономерностей термоэлектронной эмиссии можно провести с помощью двухэлектродной лампы (электровакуумного диода), представляющего собой стеклянный или металлический баллон, из которого откачан воздух до давления 10^{-5} Па. При таком давлении электроны свободно пролетают расстояние от катода к аноду, не сталкиваясь с атомами остаточного газа. Внутри находятся два электрода – катод (К) и анод (А). Катодом служит нить из тугоплавкого металла (обычно вольфрама), нагреваемая (накаливаемая) электрическим током. Часто используются катоды косвенного накала. В них катод нагревается от отдельной нити накала, по которой пропускают ток. Вывод катода в таких диодах электрически изолирован от выводов нити накала. Нагретый катод испускает (эмиттирует) электроны – имеет место термоэлектронная эмиссия. Анод чаще всего имеет форму металлического цилиндра, окружающего катод. Излученные катодом электроны движутся к аноду, создавая ток в вакууме. Включим диод в электрическую цепь, как показано на рисунке 3. В этой схеме ток источника E_1 нагревает катод до высокой (более 1000°C) температуры. Источник E_2 создает разность потенциалов между катодом и анодом, измеряемую вольтметром V . Анодное напряжение считается

положительным, если потенциал анода выше потенциала катода. Ток в анодной цепи измеряется миллиамперметром (mA).

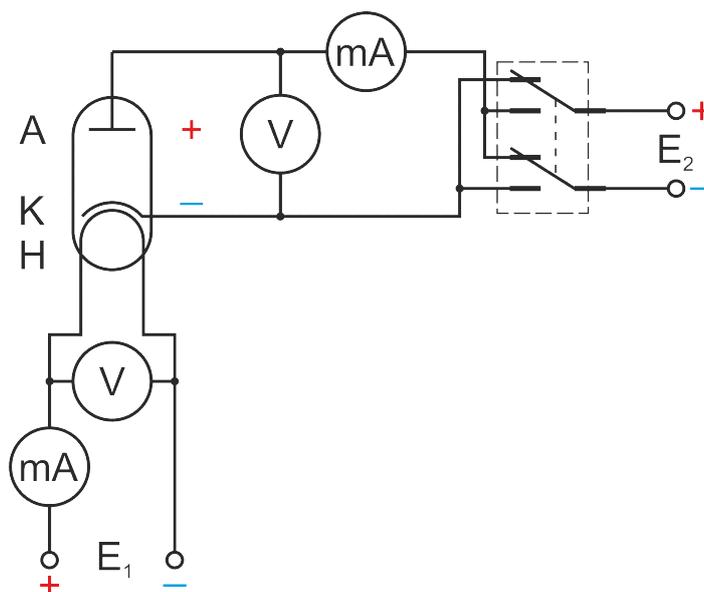


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Обычно при постоянной температуре накаленного катода определяют зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения U_a . Данная зависимость называется вольт-амперной характеристикой (ВАХ) диода. Она представлена на рисунке 4.

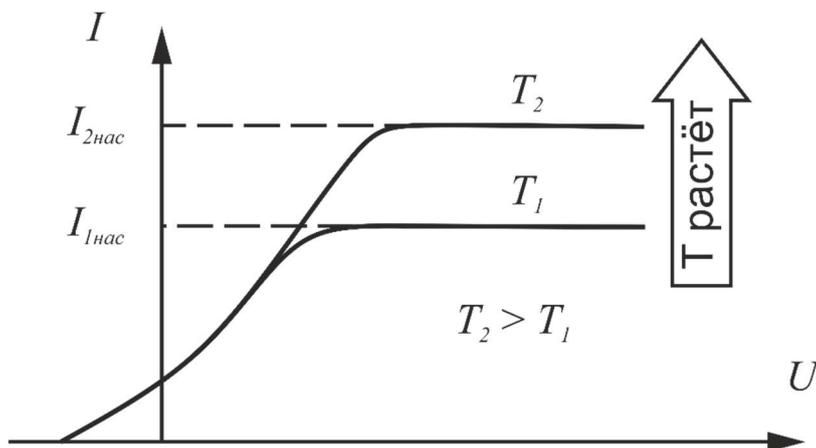


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика электровакуумного диода

Как видно, ВАХ электровакуумного диода является нелинейной (т. е. I_a не является прямо пропорциональной функцией анодного напряжения U_a). Следовательно, для электровакуумного диода закон Ома не выполняется.

При $U_a = 0$ анодный ток $I_a = I_0$ мал, но отличен от нуля. Вылетевшие в результате термоэлектронной эмиссии из катода электроны образуют вокруг него отрицательный пространственный заряд – электронное облако, которое отталкивает вылетающие из катода электроны и возвращает большинство из них обратно к катоду. Образование электронного облака над поверхностью раскаленного металла представляет собой явление, аналогичное испарению жидкости. Но все же небольшое число электронов обладают энергией, достаточной для преодоления как работы выхода, так и отталкивающего действия электронного облака. Такие электроны достигают анода даже без приложения электрического поля между анодом и катодом. Именно они и создают ток I_0 .

На участке ВАХ, где $U_a < U_s$ анодный ток I_a резко возрастает (см. рис.4). Этот участок вольтамперной характеристики описывается **законом трех вторых**, полученным теоретически Богуславским и Ленгмюром:

$$I_a = CU_a^{3/2}, \quad (5)$$

где C – коэффициент, зависящий от формы электродов и их взаимного расположения.

Теоретически закон степени $3/2$ получен в предположении, что все участки катода имеют одинаковую температуру, а электрическое поле в пространстве катод-анод однородно. Последнее можно обеспечить при простейших конфигурациях электродов: две бесконечные плоскости; длинные осевая нить – катод и окружающий её цилиндр – анод; точечный катод и сферический анод. В реальных конструкциях эти условия не выполняются, показатель степени в (5) лежит в пределах от 1.1 до 1.5.

На данном участке ВАХ основная масса электронного облака быстро уменьшается. Дальнейшее увеличение анодного напряжения приводит к слабому росту анодного тока вследствие плавного уменьшения оставшейся массы электронного облака. Этот рост еще больше замедляется, и при некотором значении анодного напряжения ток достигает значения I_n , называемого **током насыщения**, который существенно

медленнее изменяется при дальнейшем росте анодного напряжения. Это означает, что электронное облако полностью рассосалось и не оказывает никакого тормозящего действия на электроны, эмитированные с катода. Поэтому они все достигают анода, а дальнейшее увеличение напряжения не может привести к увеличению силы тока. Плотность термоэмиссионного тока насыщения j_s описывается уравнением Ричардсона-Дэшмана:

$$j_s = \frac{I_n}{S_K} = C_1 T^2 e^{-\frac{A}{kT}}, \quad (6)$$

где A – работа выхода электрона из металла, C_1 – эмиссионная постоянная, T – абсолютная температура, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана. Постоянные C_1 и A характеризуют металл, из которого изготовлен катод, и не зависят от других факторов. Для вольфрама $A = 4.54$ эВ.

Как отмечалось выше, при использовании активированных катодов, удается снизить работу выхода и получить необходимую величину тока насыщения при значительно более низких температурах катода, что приводит к значительному увеличению срока его работы. При рабочих температурах работа выхода оксидного катода сравнительно мала и лежит в пределах 1–2.5 эВ. Это явление используется в приборах, в которых необходимо получить поток электронов в вакуумных электронных лампах, электронно-лучевых трубках, рентгеновских трубках, электронных микроскопах и т. д.

С увеличением температуры катода увеличивается число эмитированных в единицу времени электронов и ток насыщения возрастает. При этом увеличивается и значение анодного напряжения, при котором наступает насыщение (см. рис.4). Дальнейший рост анодного напряжения приводит сначала к слабому, а потом всё большему увеличению анодного тока. Такое поведение объясняется эффектом Шоттки – уменьшением работы выхода катода под действием электрического поля.

При отрицательном напряжении (потенциал катода выше потенциала анода) ток в анодной цепи быстро уменьшается и в дальнейшем прекращается, т. е. вакуумный диод обладает односторонней проводимостью, что позволяет применять его в качестве выпрямителя.

Закон (5) отличается от закона Ома, в котором ток линейно (в первой степени) зависит от напряжения. Механизм движения свободного электрона в металле отличается от движения в вакууме. В законе Ома свободный электрон металла ускоряется электрическим полем на длине свободного пробега. Далее он сталкивается с ионами решетки и останавливается, отдавая им накопленную кинетическую энергию. Затем этот процесс повторяется. В результате электрон движется со средней скоростью направленного движения (ток), которая прямо пропорциональна приложенному напряжению.

2. Экспериментальная часть

2.1. Описание экспериментальной установки

В лабораторной работе использована лампа 6Х2П. Эта лампа, как и подавляющее большинство других, имеет эффективный оксидный катод. Катод лампы 6Х2П имеет небольшую длину, поэтому неравномерность его нагрева из-за дополнительного охлаждения концов за счёт отвода тепла, по держателям выражена достаточно резко. Константы термоэмиссии такого катода зависят от степени активировки и от температуры. В режиме насыщения у поверхности катода возникает ускоряющее поле и проявляется эффект Шоттки, так как за счёт шероховатости поверхности оксидного катода напряженность электрического поля увеличивается.

Схема включения лампы приведена на рисунке 3. Фото установки показано на рисунке 5, где:

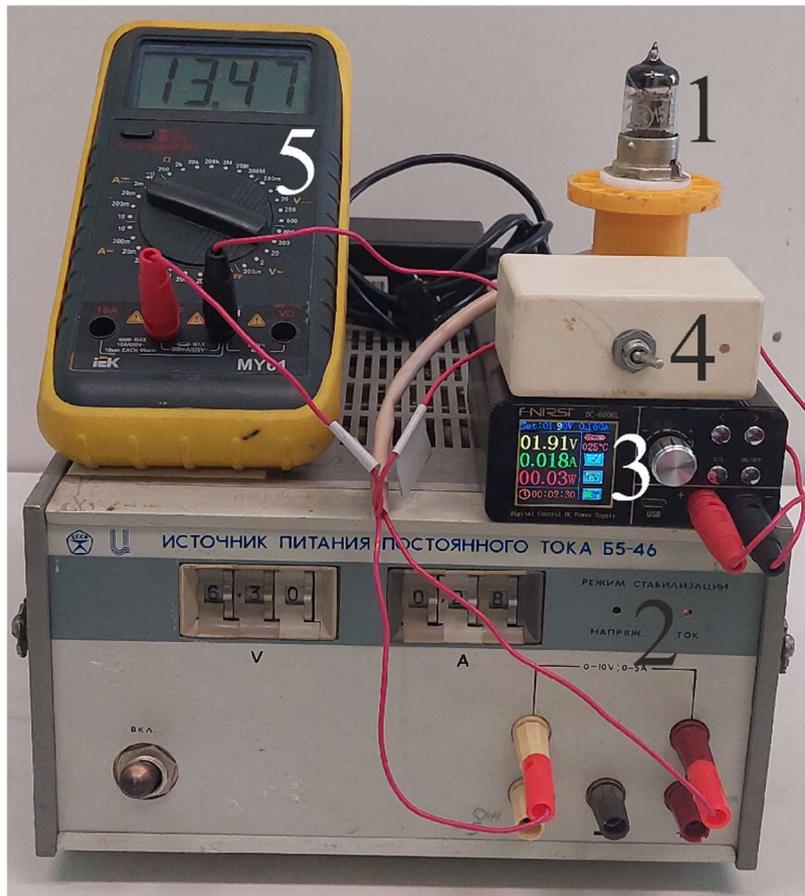


Рис.5. Лабораторная установка

1. Двойной диод 6Х2П.
2. Источник питания накала катода Б5-46, имеющий встроенные измерители тока и напряжения.
3. Источник питания анода лампы FNIRSIDC-6006L.
4. Переключатель направления тока.
5. Мультиметр IEKMY61 для измерения анодного тока.

Температура катода рассчитывается по току накала в интервале температур 850-1200 К по формуле:

$$T = 114 + 2200 \cdot \sqrt{I_n}, \quad (7)$$

2.2. Порядок выполнения работы

1. Установить регуляторы тока и напряжения накала на источнике Б5-46 в положение 0.24 А и 6.3 В соответственно. После этого включить источник. Дать прогреться лампе в течение 2–3 мин.
2. Включить источник fNIRSI и тумблерами установить напряжение в диапазоне $U_a = 2.2 - 2.4$ В.
3. Провести измерения анодного тока I_a , изменяя анодное напряжение U_a от -0.7 до +1 В с интервалом 0.1 В, от 1 до 13В с интервалом 1 В. Для изменения полярности использовать переключатель. Результаты занести в таблицу 1.
4. Построить вольт-амперную характеристику $I_a(U_a)$.
5. Проверить, что при $U_a = 12$ В ток выходит на насыщение.

Таблица 1

n	$X=U_a, \text{ В}$	$Y=I_a, \text{ мА}$
1	-0.7	
2	-0.65	
3	-6	
4	-0.55	
14	-0.5	
15	0	
16	0.5	
17	1	
35	12	

2.3. Задание 1. Определение работы выхода электрона из вольфрама на основе формулы Ричардсона-Дэшмана и постоянной в этой формуле

Преобразуем формулу (6), умножив ее на площадь катода S_k и разделив на T^2 :

$$\frac{I_s}{T^2} = C_1 S_k e^{-\frac{A}{kT}}, \quad (8)$$

Прологарифмируем обе части:

$$\ln \frac{I_s}{T^2} = \ln C_1 S_k - \frac{A}{kT}, \quad (9)$$

Представим последнее равенство в виде уравнения прямой $y=A+Bx$, где

$$y = \ln \frac{I_s}{T^2}; \quad x = \frac{1}{T}; \quad A = \ln C_1 S_k; \quad B = \frac{A}{k}, \quad (10)$$

Порядок выполнения задания 1

1. Установить на источнике fNIRSI значение анодного напряжения $U_a = 12$ В, на источнике Б5-46 напряжение накала $U_H = 6.3$ В, ток накала $I_H = 0.21$ А и записать их. В этом случае при исследуемых температурах катода анодный ток всегда достигает тока насыщения I_s .

2. Не меняя U_a и U_H , увеличивая ток накала от 0.21 А до 0.26 А с шагом 0.01 А, измерить ток насыщения I_s . Результаты занести в таблицу 2. Температуру катода T определять по формуле (7).

Таблица 2

n	$I_H, \text{ А}$	$I_s, \text{ мА}$	$T, \text{ К}$	$X = \frac{1}{T}$	$Y = \ln \frac{I_s}{T^2}$
1	0.21				
2	0.21				
3	0.22				
4	0.23				
5	0.24				
6	0.25				
7	0.26				

Обработка экспериментальных данных

Обработку результатов провести в программе Excel.

1. Построить точечную диаграмму зависимости $y = \ln \frac{I_S}{T^2}$ от $x = \frac{1}{T}$.
2. Построить линию тренда с выводом уравнения прямой. Из полученного значения тангенса наклона B , используя формулу (10), определить среднюю величину работы выхода:

$$\langle A \rangle = kB, \quad k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж / К} \quad (11)$$

3. Для выражения работы выхода в эВ, полученное значение разделить на $1.6 \cdot 10^{-19}$ Дж/эВ.
4. Для нахождения погрешности измерения построить таблицу 3.

Таблица 3

$x = \frac{1}{T}$	$y = \ln \frac{I_S}{T^2}$	x^2	y^2	xy

5. Далее находим средние значения каждого столбца.

$\langle x \rangle$	$\langle y \rangle$	$\langle x^2 \rangle$	$\langle y^2 \rangle$	$\langle xy \rangle$

6. Определить значение тангенса наклона прямой (коэффициент B) по формуле:

$$B = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}, \quad (12)$$

Это значение B , полученное аналитически, должно совпасть со значением B на графике.

7. Вычислить погрешность тангенса угла наклона B – величину S_B :

$$S_B = \frac{1}{\sqrt{n-2}} \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} - B^2}, \quad (13)$$

8. Записать окончательный результат для работы выхода электрона из вольфрама с учетом погрешности измерений в виде:

$$A = \langle A \rangle \pm \frac{S_B}{B} \langle A \rangle, \quad (14)$$

2.4. Задание 2. Проверка закона Богуславского-Ленгмюра

Взять логарифм от обеих частей формулы (5) и представить ее в виде уравнения прямой линии $y=A+Bx$ следующим образом:

$$\lg I_a = A + B \lg U_a, \quad (15)$$

где $x = \lg U_a$, $y = \lg I_a$, B – показатель степени при анодном напряжении. В области значений U_a , где анодный ток I_a меньше тока насыщения, угловой коэффициент должен быть близким к $3/2$, что и требуется проверить.

Порядок выполнения задания 2

1. Установить ток накала катода в интервале 0.24 -0.28 А и записать его. Дать прогреться лампе в течение 2–3 мин.
2. Провести измерения анодного тока I_a , изменяя анодное напряжение U_a от -0.7 до +1 В с интервалом 0.1 В, от 1 до 13В с интервалом 1 В. Для изменения полярности использовать переключатель. Результаты занести в таблицу 4.

Таблица 4

n	U_a , В	I_a , мА	$X=\lg U_a$	$Y=\lg I_a$
1	-0.7			
2	-0.6			
14	-0.5			

15	0			
16	0.5			
17	1			
35	12			

1. Построить точечную диаграмму зависимости $y = \lg U_a$ от $x = \lg I_a$.
2. На графике выбрать участок от $2 < \lg U_a < 5$. Построить линию тренда с выводом уравнения прямой. Полученное значение тангенса наклона B сравнить с $3/2$.
3. Обработку экспериментальных данных с вычислением среднего значения коэффициента B и его погрешности графическим и аналитическим методами согласно пунктам 3-9 задания 1.

3. Контрольные вопросы

1. Что такое электронная эмиссия? Назовите основные виды электронной эмиссии.
2. Выполняется ли закон Ома для тока термоэлектронной эмиссии? Объясните ход вольт-амперной характеристики вакуумного диода.
3. Нарисуйте эмиссионную характеристику термоэлектронного катода. почему она начинается не из начала координат?
4. Как формулируются основные законы явления термоэлектронной эмиссии – закон «трех-вторых» и Ричардсона-Дэшмана?
5. В основу принципа действия каких устройств положено явление термоэлектронной эмиссии?

4. Форма отчета о работе

Отчет по выполненной лабораторной работе должен содержать следующее:

1. Титульный лист лабораторной работы согласно образцу.
2. Конспект теоретической части работы.

3. Методику эксперимента и краткое описание лабораторной установки.
4. Заполненные таблицы с экспериментальными данными.
5. Обработку экспериментальных данных согласно методическим указаниям в данной работе. В случае обработки данных эксперимента в *Excel* – распечатку скриншота и файл с результатами обработки.
6. Выводы по выполненной работе.

Литература

Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: Учеб. пособие для втузов. – М.: Высш. шк. 2015. - 608с.: ил.

Трофимова Т.И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – 5-е изд. испр. – М.: Высш. шк. 2015. - 542 с.: ил.

Савельев, И. В. Курс общей физики: в 3 т. / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1987. – Т. 3. – С. 208–215.

Савельев, И. В. Курс физики: в 3 т. / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1989. – Т. 3. – С. 116–118.