

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»**

**ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА**

**Методические указания к лабораторной работе № 35
по дисциплине «Физика»**

Уфа 2013

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

Кафедра физики

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Методические указания к лабораторной работе № 35
по дисциплине «Физика»

Уфа 2013

Составители: В. Р. Строкина, Р. А. Халфин

УДК 537.58

ББК

Изучение явления термоэлектронной эмиссии и определение удельного заряда электрона: Методические указания к лабораторной работе № 35 по дисциплине «Физика» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост.: В. Р. Строкина, Р. А. Халфин – Уфа, 2013. – 16 с.

Знакомят студентов с явлением термоэлектронной эмиссии. Исследуется термоэлектронная эмиссия в двухэлектродной лампе. Строятся экспериментальные зависимости анодного тока от анодного напряжения, используя которые студенты определяют удельный заряд электрона.

Предназначены для студентов технических вузов, изучающих дисциплину «Физика» по разделу «Электричество и магнетизм» на всех направлениях бакалавров и специалистов.

Табл. 2. Ил. 5. Библ.: 2 назв.

Рецензенты: канд. физ.-мат. наук, доц. Трофимова Е. В.,
канд. тех. наук, доц. Крайнова Т. М.

Уфимский государственный
авиационный технический университет, 2013

Содержание

Введение	4
1. Цели работы	5
2. Задачи.....	5
3. Теоретическая часть	5
3.1. Работа выхода электронов из металла.....	5
3.2. Явление термоэлектронной эмиссии.....	7
4. Экспериментальная часть.....	9
4.1. Экспериментальная установка и принцип ее работы.....	10
5. Требования по технике безопасности	12
6. Задания	12
7. Методика выполнения заданий	13
8. Контрольные вопросы	15
9. Требования к содержанию и оформлению отчета	15
10. Критерии результативности выполнения лабораторной работы .	16
Список литературы	16

Лабораторная работа № 35

Изучение явления термоэлектронной эмиссии и определение удельного заряда электрона

Введение

Если сообщить электронам в металлах энергию, необходимую для преодоления работы выхода, то часть электронов может покинуть металл, в результате чего наблюдается явление испускания электронов, или электронная эмиссия. В зависимости от способа сообщения электронам энергии различают термоэлектронную, фотоэлектронную, вторичную электронную и автоэлектронную эмиссии.

Явление термоэлектронной эмиссии используется в приборах, в которых необходимо получить поток электронов в вакууме, например в электронных лампах, рентгеновских трубках, электронных микроскопах и т.д.

В результате выполнения данной лабораторной работы формируются следующие **компетенции**:

- способность демонстрировать базовые знания в области общенаучных дисциплин и готовность использовать основные законы в профессиональной деятельности;

- способность проводить эксперименты по заданной методике, обрабатывать результаты, оценивать их погрешность и достоверность.

Перечисленные компетенции формируются через **умения**:

- работать с измерительными приборами;
- рассчитывать физические величины по экспериментальным данным;

- анализировать результаты опыта;

- оформлять отчет;

а также **владения**:

- теоретическим материалом;

- навыками измерения физических величин по приборам;

- технологией обработки экспериментальных данных.

1. Цели работы

1. Изучение явления термоэлектронной эмиссии.
2. Снятие вольт-амперной характеристики вакуумного диода при различных температурах накала катода.
3. Определение удельного заряда электрона.

2. Задачи

1. Усвоение важнейшего физического явления – явления термоэлектронной эмиссии.
2. Овладение одним из методов исследования явления термоэлектронной эмиссии.
3. Приобретение навыков проведения измерений и умения обработки результатов исследования.
4. Определение удельного заряда электрона.

3. Теоретическая часть

3.1. Работа выхода электронов из металла

В металлах имеются электроны проводимости, образующие электронный газ и совершающие тепловое движение. Вблизи поверхности существуют силы, действующие на электроны и направленные внутрь металла, поэтому электроны проводимости удерживаются в металле. Чтобы электрон мог выйти из металла за его пределы, должна быть совершена определенная работа A против этих сил, которая получила название работы выхода электрона из металла. Эта работа, естественно, различна для разных металлов.

В настоящее время можно указать две наиболее вероятные причины происхождения работы выхода. Одна из них объясняется индукционным действием удаляемого электрона на металл. Электрон, вылетевший из металла, вызывает на поверхности металла положительный индуцированный заряд, отчего между электроном и металлом возникает сила притяжения, препятствующая удалению электрона.

Вторая причина заключается в следующем. Электроны проводимости, совершая беспорядочное тепловое движение, способны пересекать поверхность металла и удаляться от нее на малое расстояние. У поверхности металла существует электронное облако, постоянно обменивающееся электронами с металлом, так что электроны облака и металла находятся в динамическом равновесии между собой. Заметная концентрация электронов в облаке

наблюдается лишь на расстояниях от поверхности металла порядка нескольких межатомных расстояний (10^{-10} - 10^{-9}) м. На поверхности металла имеется избыток положительных зарядов – ионов. Эти заряды и электронное облако образуют тонкий двойной электрический слой. Такой двойной слой не создает электрического поля во внешнем пространстве, но препятствует вылету электронов из металла.

Потенциальная энергия электрона внутри металла постоянна и равна

$$W_p = -e\phi, \quad (3.1)$$

где e – заряд электрона, ϕ – потенциал электрического поля внутри металла.

При переходе электрона через поверхностный электронный слой потенциальная энергия быстро уменьшается на величину работы выхода и становится вне металла равной нулю. Распределение энергии электрона внутри металла можно представить в виде потенциальной ямы.

Приближенная картина изменения потенциальной энергии электрона отображена на рис. 3.1.

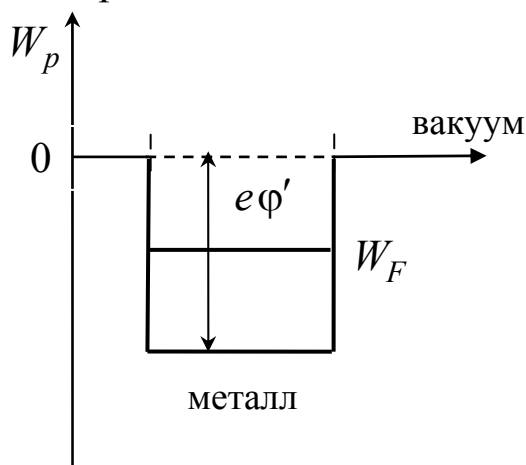


Рис. 3.1

В рассмотренной выше трактовке работа выхода электрона равна глубине потенциальной ямы, т.е.

$$A_{\text{вых}} = e\phi'. \quad (3.2)$$

Этот результат соответствует классической электронной теории металлов, в которой предполагается, что скорость электронов в металле подчиняется закону распределения Максвелла и при температуре абсолютного нуля равна нулю. Однако в действительности электроны проводимости подчиняются квантовой

статистике Ферми-Дирака, согласно которой при абсолютном нуле скорость электронов и соответственно их энергия отлична от нуля. Максимальное значение энергии, которой обладают электроны при абсолютном нуле, называется энергией Ферми W_F . Квантовая теория проводимости металлов, основанная на статистике Ферми-Дирака, дает иную трактовку работы выхода. Работа выхода электрона из металла равна разности высоты потенциального барьера $e\phi'$ и энергии Ферми.

$$A_{\text{вых}} = e\phi' - W_F. \quad (3.3)$$

где ϕ' – среднее значение потенциала электрического поля внутри металла.

3.2. Явление термоэлектронной эмиссии

Явление термоэлектронной эмиссии – это испускание электронов нагретыми металлами. Концентрация свободных электронов в металлах достаточно высока, поэтому даже при средних температурах вследствие распределения электронов по скоростям (по энергиям) некоторые электроны обладают энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера на границе металла. С повышением температуры число электронов, кинетическая энергия теплового движения которых больше работы выхода, растет, и явление термоэлектронной эмиссии становится заметным.

Исследование закономерностей термоэлектронной эмиссии можно провести с помощью двухэлектродной лампы – вакуумного диода, представляющего собой откачанный баллон, содержащий два электрода: катод К и анод А. В простейшем случае катодом служит нить из тугоплавкого металла (например, вольфрама), накаливаемая электрическим током. Нагрев катода до температуры (1100÷2000) К приводит к испусканию электронов с его поверхности. Анод чаще всего имеет форму металлического цилиндра, окружающего катод. Если диод включить в цепь, как показано на рис. 4.2, то при накаливании катода и подаче на анод положительного напряжения (относительно катода) в анодной цепи диода возникает ток.

В вакуумной электронной лампе электрическое поле, действующее на каждый электрон, складывается из внешнего поля, создаваемого разностью потенциалов между электродами, и поля, создаваемого всеми остальными электронами, образующими пространственный заряд. Благодаря пространственному заряду, при

малых анодных напряжениях анодный ток может быть значительно меньше возможного тока эмиссии катода и постепенно увеличивается при повышении анодного напряжения.

На рис. 3.2 представлены вольт-амперные характеристики для двух температур накала катода.

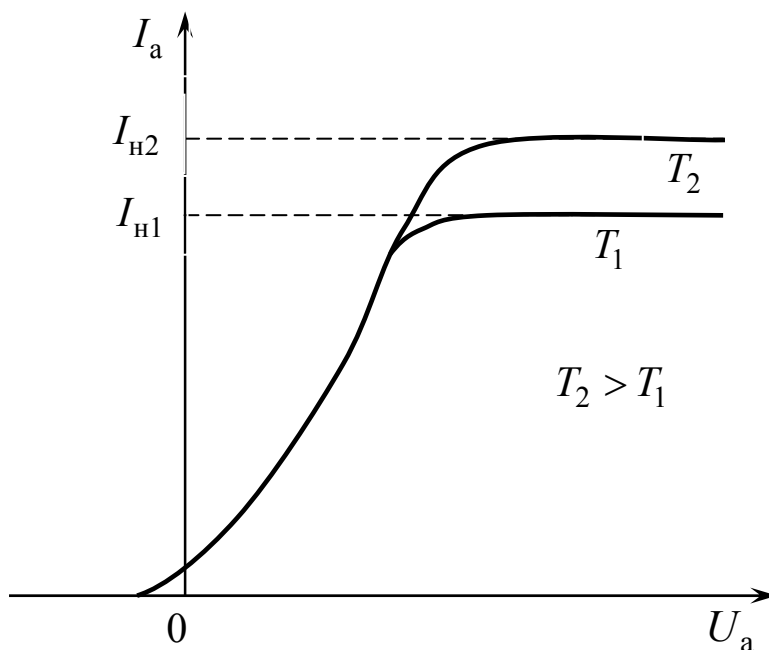


Рис. 3.2

Зависимость термоэлектронного тока I_a от анодного напряжения в области малых положительных значений U_a не подчиняется закону Ома, а описывается законом трех вторых, установленным русским физиком С.А. Богуславским и американским физиком И. Лэнгмюром

$$I_a = B \cdot U_a^{3/2}, \quad (3.4)$$

где B – коэффициент, зависящий от форм и размеров электродов, а также их взаимного расположения.

Следует отметить, что формула (3.4) не является точной, так как закон Богуславского-Лэнгмюра выведен в предположении, что:

- 1) начальные скорости электронов, эмитируемых катодом, пренебрежимо малы;
- 2) анодный ток далек от насыщения;
- 3) пространственный заряд создает такое распределение потенциала между катодом и анодом, что непосредственно у поверхности катода напряженность электрического поля не равна нулю.

При увеличении анодного напряжения ток возрастает до

некоторого максимального значения $I_{\text{н}}$, называемого током насыщения.

Насыщение анодного тока наступает тогда, когда все электроны, испускаемые катодом в единицу времени, попадают на анод. Поэтому при дальнейшем увеличении анодного напряжения анодный ток уже не может увеличиваться. Таким образом, величина тока насыщения определяется эмиссионной способностью катода.

Плотность тока насыщения определяется формулой Ричардсона-Дэшмана, выведенной на основе квантовой статистики

$$I_{\text{н}} = C \cdot T^2 e^{-A/(kT)}, \quad (3.5)$$

где C – постоянная, теоретически одинаковая для всех материалов, однако на опыте получаются различные значения; A – работа выхода электрона; T – термодинамическая температура; k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

Благодаря экспоненциальному множителю плотность термоэлектронного тока чрезвычайно сильно зависит от работы выхода и температуры катода. Например, при повышении температуры вольфрама от 2000 до 2500 К плотность тока эмиссии возрастает почти в 200 раз.

4. Экспериментальная часть

По форме и размерам электродов лампы можно определить коэффициент B в формуле (3.4). Если катод и анод представляют собой коаксиальные цилиндрические электроды, то, как показывает расчет, закон Богославского-Лэнгмюра имеет вид

$$I_{\text{а}} = \frac{8\sqrt{2} \cdot \pi \epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{l}{r \beta^2} U_{\text{а}}^{3/2}, \quad (4.1)$$

где e/m – удельный заряд электрона (отношение величины заряда к его массе); r – радиус анода; l – длина катода; β^2 – коэффициент, зависящий от отношения радиусов анода и катода, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

По вольт-амперным характеристикам диода определяется удельный заряд электрона, поэтому удобнее строить график зависимости анодного тока от анодного напряжения в степени три вторых. На рис. 4.1 представлена зависимость анодного тока $I_{\text{а}}$ от анодного напряжения $U^{3/2}$.

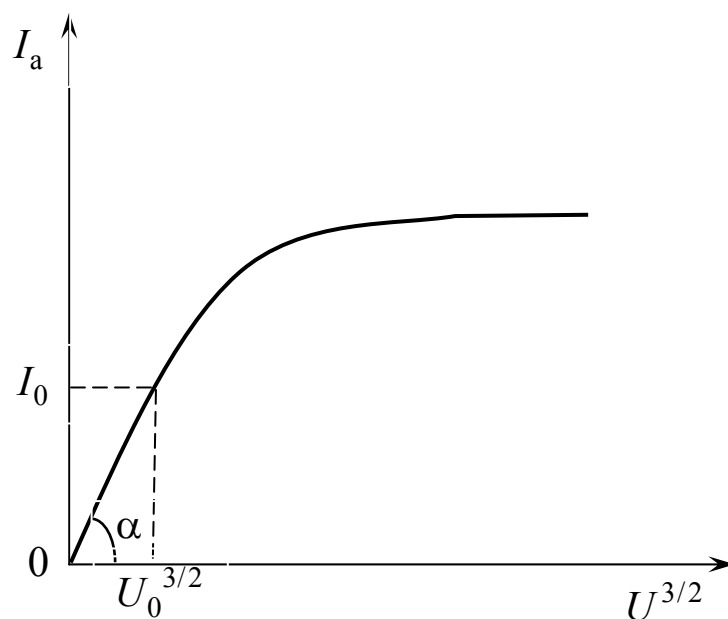


Рис. 4.1

Угловым коэффициентом полученной прямой в случае коаксиальных цилиндрических электродов равен

$$\alpha = \frac{8\sqrt{2} \cdot \pi \epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{l}{r \beta^2}. \quad (4.2)$$

Отсюда можно рассчитать удельный заряд электрона e/m

$$\frac{e}{m} = \left(\frac{9r\beta^2}{8\sqrt{2}l\pi\epsilon_0} \alpha \right)^2. \quad (4.3)$$

4.1. Экспериментальная установка и принцип ее работы

В лабораторной установке используются измерительные приборы:

- 1) источник питания (ИП) с напряжением 2,5 В и источник постоянного тока Б5-50 с напряжением до 220 В;
- 2) цифровой вольтметр В7-40/4;
- 3) электронная лампа 2Ц2С.

Электрическая схема лабораторной установки приведена на рис. 4.2.

Блок-схема установки для изучения явления термоэлектронной эмиссии приведена на рис. 4.3.

Лампа типа 2Ц2С с подогревным оксидным катодом подключена к источнику постоянного тока Б5-50. Анодное напряжение U_a подается от источника постоянного тока Б5-50. Величина напряжения регулируется ступенчато, вращением трех

дисков с прорезями в окошечке с тремя различными цифровыми значениями от 60 до 220 В. Анодный ток лампы I_a численным значением до 47 мА устанавливается в источнике постоянного тока Б5-50. (Не изменяется во время эксперимента).

Источник постоянного тока Б5-50 используется для питания цепи анода (60-220 В), а модуль источника питания ИП используется для питания цепи накала катода напряжением 2,5 В.

Ток накала измеряется стрелочным амперметром на модуле источника питания ИП.

При изучении зависимости плотности тока эмиссии от температуры анодное напряжение должно быть достаточным для получения тока насыщения.

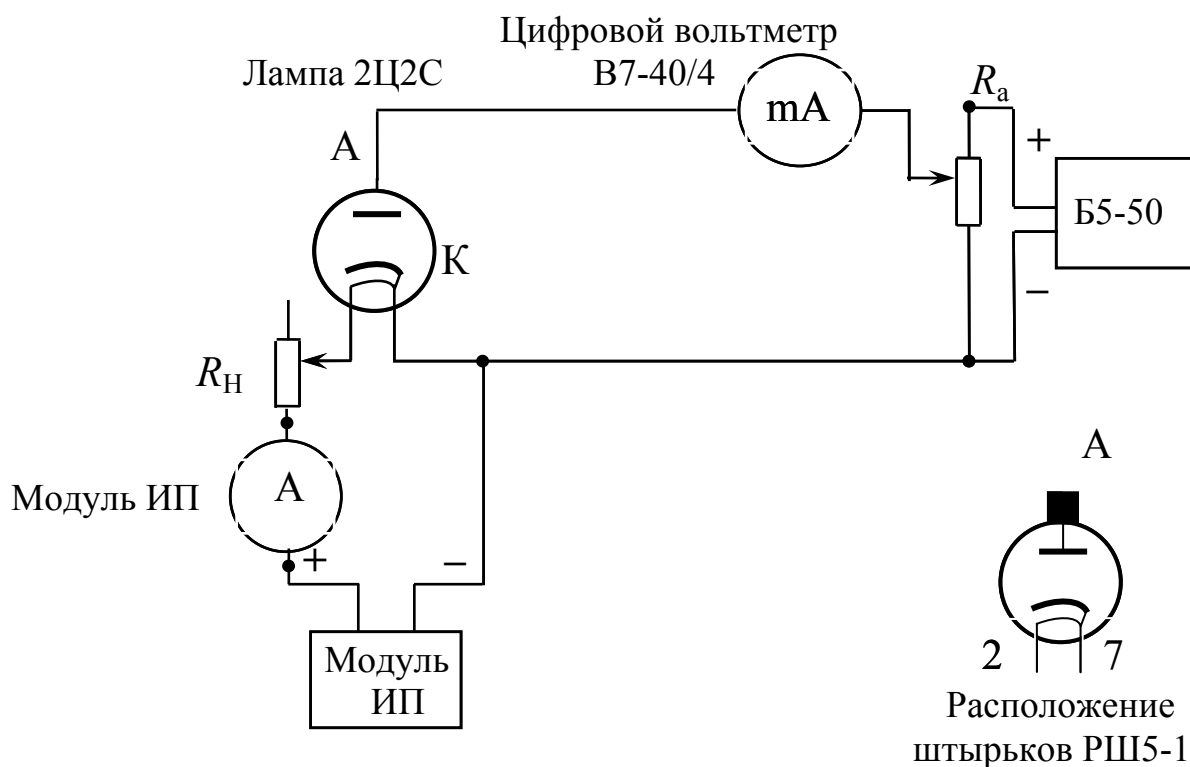


Рис. 4.2

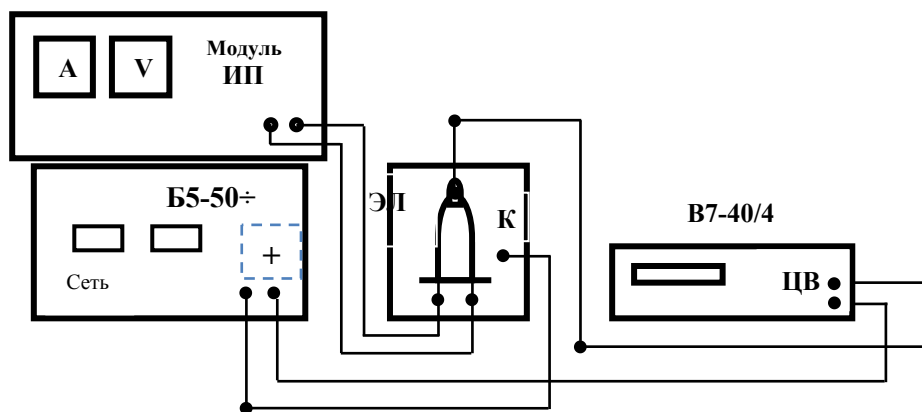


Рис. 4.3

ЦВ – цифровой вольтметр;

Б5-50 – источник постоянного напряжения до 220 В;

ИП – модуль источника питания для цепи накала с напряжением до 2,5 В;

ЭЛ – электронная лампа; К – катод

5. Требования по технике безопасности

1. Прежде, чем приступить к работе, необходимо внимательно ознакомиться с заданием и лабораторным оборудованием.

2. Необходимо проверить заземление лабораторной установки и исправность изоляции токоведущих проводов. При обнаружении неисправности следует немедленно сообщить об этом преподавателю.

Не разбирать лабораторную установку!

3. Не оставлять включенной в электрическую сеть лабораторную установку без присмотра.

4. Не загромождать рабочее место посторонними предметами (одежда, сумки и т.д.).

5. По окончании выполнения измерений необходимо лабораторную установку отключить от сети.

6. Задания

1. Выполнить измерения анодного тока в лампе при изменении напряжения на аноде лампы с 60 В до 220 В при токах накала 1,6 А; 1,5 А; 1,4 А.

2. Построить графики зависимости I_a от U_a и I_a от $U^{3/2}$.

3. Вычислить удельный заряд электрона.

4. Определить абсолютную и относительную погрешность измерений удельного заряда электрона.

7. Методика выполнения заданий

1. Проверить схему электрических соединений лабораторной установки по рис. 4.3 и наличие заземления приборов.

2. Включить тумблеры приборного стенда для подачи напряжения 220 В в розетки.

3. Включить тумблер «Сеть» подачи напряжения на цифровом вольтметре В7-40/4.

4. Нажать на цифровом вольтметре В7-40/4 клавишу автоматического выбора пределов измерения «АВП».

5. При измерении тока анода цифровым вольтметром В7-40/4 необходимо подключить соответствующие соединительные провода к клеммам «I» (измерение тока) и переключить «Род работы» на измерение постоянного тока нажатием на клавишу «-I».

6. Проверить подключение нити накала лампы 2Ц2С соответствующими соединительными проводами к клеммам постоянного напряжения 2,5 В на модуле источника питания ИП.

7. Проверить подключение катода лампы 2Ц2С соответствующим соединительным проводом к источнику постоянного тока Б5-50.

8. Проверить подключение анода лампы 2Ц2С соответствующими соединительными проводами к клеммам постоянного напряжения (60-220) В на источнике постоянного тока Б5-50.

9. Перед включением источника постоянного тока Б5-50 необходимо проверить, что ступенчатым вращением во всех трех барабанах в трех окошечках установлено цифровое значение 060.

10. С помощью потенциометра «I» получить в показаниях стрелочного прибора модуля источника питания ИП ток накала, равный 1,6 (А).

11. Вращая ступенчато три диска в окошечке с цифровыми значениями на источнике постоянного тока Б5-50, изменять анодное напряжение с шагом 20 (В) и занести эти значения в табл. 1. Переход от 80 В к 100 В или от 180 В к 200 В осуществляется следующим образом:

- при достижении величины напряжения значением 80 В или 180 В необходимо, вращая ступенчато два диска с левой стороны, уменьшить напряжение до 10 В, затем вращая ступенчато с левой стороны первый диск, набрать значение напряжения 110 В или 210 В, а затем, вращая второй диск с левой стороны, ступенчато уменьшить напряжение до 100 В или 200 В.

12. Повторить п.п. 9, 10, 11 для тока накала лампы 1,5 А и 1,4 А.

13. Построить на миллиметровой бумаге зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения U_a для $I_H = 1,5$ А.

14. Построить три зависимости (для трех значений тока накала) анодного тока от анодного напряжения, возведенного в степень $3/2$ (три рисунка на одной координатной плоскости). При построении этого графика рекомендуется использовать экспериментальные данные, относящиеся к меньшим температурам катода (но в области, где закон трех вторых еще выполняется).

15. Определить по полученным зависимостям $I = f(U^{3/2})$ угловые коэффициенты. Для этого на каждом рисунке выделить линейный участок от начала координат до начала изгиба кривой (рис. 4.1) и определить коэффициент α как отношение $I / U^{3/2}$.

16. Вычислить по формуле $\frac{e}{m} = \left(\frac{9r\beta^2}{8\sqrt{2}l\pi\epsilon_0} \alpha \right)^2$ величину

удельного заряда электрона для трех значений α .

В работе используется лампа 2Ц2С. Длина катода $l = 9$ мм, радиус анода $r = 9,5$ мм. Отношение радиусов анода и катода приблизительно равно $\beta = 0,98$.

Таблица 1

1) Ток накала, $I_{H1} = 1,6$ А										
Анодное напряжение, U_a , В	60	80	100	120	140	160	180	200	210	220
Анодное напряжение, $U_a^{3/2}$										
Анодный ток, I_a , (А)										
2) Ток накала, $I_{H1} = 1,5$ А										
Анодное напряжение, U_a , В	60	80	100	120	140	160	180	200	210	220
Анодный ток, I_a , А										
3) Ток накала, $I_{H2} = 1,4$ А										
Анодное напряжение, U_a , В	60	80	100	120	140	160	180	200	210	220
Анодный ток, I_a , А										

Таблица 2

α	$l, \text{ м}$	$r, \text{ м}$	β	$\frac{e}{m}$	$\Delta\left(\frac{e}{m}\right)$	$\frac{\Delta\frac{e}{m}}{\frac{e}{m}}$

17. Найти среднее значение удельного заряда электрона и сравнить с табличным значением.

18. Вычислить относительную и абсолютную погрешность измерений.

19. Результат измерения удельного заряда (e/m) необходимо записать в виде

$$\frac{e}{m} = \left(\frac{e}{m_{\text{ср}}} \pm \Delta\left(\frac{e}{m}\right)_{\text{ср}} \right) \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}.$$

8. Контрольные вопросы

1. Какое физическое явление называется термоэлектронной эмиссией?
2. Какие силы удерживают электрон в металле? Что такое работа выхода электрона из металла?
3. Как устроен диод и где он применяется?
4. Как выглядят вольтамперные характеристики диода? Почему при нулевой разности потенциала между электродами анодный ток не равен нулю?
5. Что такое ток насыщения? Чему равна плотность тока насыщения?
6. Какой участок вольтамперной характеристики диода подчиняется закону Богуславского-Ленгмюра? Что это за закон?
7. Почему закон Богуславского-Ленгмюра не является точным?

9. Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Ф.И.О., номер группы студента, выполнившего работу.
2. Номер, название и цель работы.
3. Краткую теорию метода определения удельного заряда электрона.

4. Блок схему установки.

5. Таблицу с результатами измерений и вычислений $\frac{e}{m}$. Расчеты

определения $\frac{e}{m}$ должны быть приведены в отчете.

6. Графики на миллиметровой бумаге, если выполнены не на компьютере.

7. Формулы и расчеты абсолютной и относительной погрешности измерений.

8. Выводы.

10. Критерии результативности выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- усвоил основные понятия явления термоэлектронной эмиссии;
- выполнил экспериментальную часть работы;
- правильно выполнил вычисления и получил достоверные конечные результаты;
- определил абсолютную и относительную погрешности измерений;
- составил отчет, соответствующий предъявленным к нему требованиям;
- сформулировал выводы о проделанной работе;
- грамотно ответил на все контрольные вопросы.

Список литературы

1. *Детлаф А. А., Яворский В.М.* Курс физики, – М.: Высшая школа, 2009.
2. *Трофимова Т. И.* Курс физики, – М.: Academia, 2012.

Составители: СТРОКИНА Венера Рамазановна,
ХАЛФИН Раис Ахуньянович

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Методические указания
к лабораторной работе № 35 по дисциплине «Физика»

Подписано в печать 2013. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,1. Уч-изд.л. 0,9. Тираж 100 экз. Заказ №
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»
Редакционно-издательский комплекс УГАТУ
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12