

Министерство образования и науки
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра общей физики

М. Н. Перунова

ИЗУЧЕНИЕ ВАКУУМНОГО ДИОДА

Методические указания
к лабораторной работе № 17

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования «Оренбургский государственный
университет» для студентов всех инженерно-технических направлений
подготовки

Оренбург
2011

УДК 537 (07)

ББК 22.33 я 7

П 27

Рецензент – кандидат технических наук, доцент Ф.Г. Узенбаев

Перунова, М. Н.

П 27 Изучение вакуумного диода: методические указания к лабораторной работе № 17 / М. Н. Перунова; Оренбургский гос. ун-т – Оренбург: ОГУ, 2011. – 18 с.

Методические указания включают подробное теоретическое изложение вопросов, связанных с протеканием тока через вакуумный диод (работа выхода электронов из металла, вид и особенности вольтамперной характеристики вакуумного диода), описание экспериментальной установки и методики проведения эксперимента. Дано подробное описание методики обработки результатов эксперимента.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторной работы № 17 «Изучение вакуумного диода» по дисциплине «Физика» для студентов для студентов всех инженерно-технических направлений подготовки.

УДК 537 (07)

ББК 22.33 я 7

© Перунова М. Н., 2011

© ОГУ, 2011

Лабораторная работа № 17. Изучение вакуумного диода

Цель работы:

- 1 Ознакомиться с теорией термоэлектронной эмиссии принципом действия вакуумного диода.
- 2 Снять вольтамперную характеристику (ВАХ) вакуумного диода.
- 3 Используя ВАХ диода, определить удельный заряд электрона.

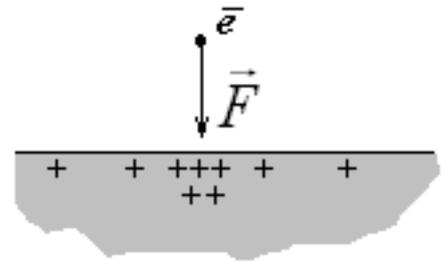
Теория вопроса

1 Работа выхода электронов из металла

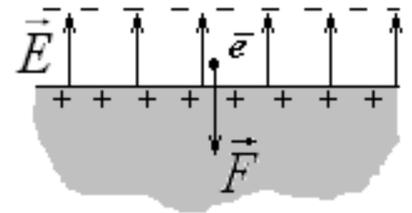
Носителями тока в вакуумных приборах, как правило, являются электроны. Электроны присутствуют в любом теле, однако, проще всего их извлечь из металла. В диэлектриках электроны связаны, они входят в состав атомов. Поэтому для извлечения электронов из диэлектрика их нужно предварительно оторвать от атомов – для этого требуется дополнительно затратить энергию. В металлах же имеются электроны проводимости, уже оторвавшиеся от атомов. Электроны проводимости в металле участвуют в тепловом движении.

Процесс вырывания электронов с поверхности металла называется *электронной эмиссией*. Как показывает опыт, свободные электроны при обычных температурах практически не могут выходить из металла. Для того, чтобы электрон смог покинуть кристаллическую решетку металла и стать свободным, ему необходимо сообщать энергию, называемую *работой выхода*. Это означает, что в поверхностном слое металла существует электрическое поле, препятствующее выходу электронов с поверхности металла в вакуум. Укажем две основные причины возникновения поля на границе металл-вакуум:

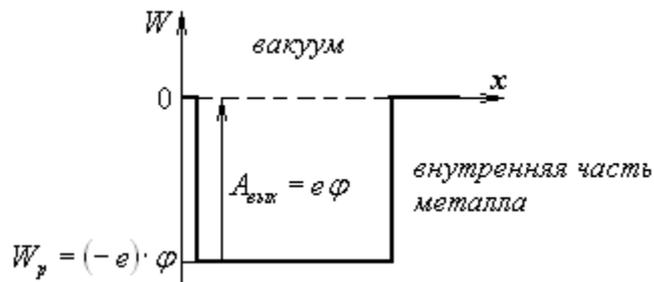
- Если при тепловом движении электрон вылетит с поверхности металла, то он индуцирует на поверхности последнего заряд противоположного знака. Возникает сила притяжения между вылетевшим электроном и поверхностью металла (притяжение электрона и его «зеркального изображения»). Эта сила стремится вернуть электрон обратно в металл.



- Электроны, вылетев с поверхности металла, могут удаляться от нее на небольшие расстояния (порядка атомных). Над поверхностью металла образуется электронная атмосфера, плотность которой быстро убывает при удалении от металла. Так как электронное облако заряжено отрицательно, то под ним у поверхности остается слой положительно заряженных ионов. В результате образуется двойной электрический слой, поле которого подобно полю плоского конденсатора. Этот двойной электрический слой не создает поля во внешнем пространстве, зато на преодоление электрического поля внутри самого двойного слоя электрону требуется энергия.



Если потенциал вакуума принять равным нулю, то потенциал внутренней части металла будет положительным (см. рисунок – силовая линия всегда указывает в сторону уменьшения потенциала). Потенциальная энергия электрона внутри металла оказывается отрицательной $W_p = -e\phi$. Таким образом, электроны проводимости в металле можно считать заключенным в «потенциальную яму», для выхода из которой электрону требуется преодолеть потенциальный барьер, то есть совершить работу выхода.



Рисунок

1 – Работа

выхода электрона из кристалла металла

Для большинства металлов работа выхода колеблется в пределах 1 – 5 эВ.

Таблица 1 – Работа выхода электрона из некоторых металлов

Металл	Работа выхода, эВ	Металл	Работа выхода, эВ
Вольфрам	4,5	Цинк	3,74
Торий	3,41	Натрий	2,27
Платина	5,29	Барий	2,29
Железо	4,36	Цезий	1,89

2 Виды электронной эмиссии

В зависимости от того, каким способом электрону сообщается энергия, необходимая для вылета из металла, различают различные виды электронной эмиссии.

Фотоэлектронная эмиссия (внешний фотоэффект) – электрон получает энергию $h\nu$ от кванта света. Если эта энергия превосходит величину работы выхода $A_{\text{вых}}$, то электрон вылетает с поверхности металла.

Вторичная электронная эмиссия – электроны получают энергию от быстрых частиц (электронов, ионов и т.д.), бомбардирующих поверхность металла.

Автоэлектронная эмиссия – электроны вырываются с поверхности металла под действием сильного электрического поля. **Внешнее электрическое поле не сообщает электронам энергии!** Внешнее сильное поле уменьшает высоту и ширину потенциального барьера, который необходимо преодолеть электрону. В этой ситуации в металле обязательно окажутся такие электроны проводимости, кинетическая энергия которых превосходит высоту потенциального барьера, такие электроны смогут вырваться с поверхности металла.

Термоэлектронная эмиссия состоит в испускании электронов нагретым телом. Это явление можно рассматривать как испарение электронов из металла. При нагревании металла увеличивается количество свободных электронов, кинетическая энергия которых превосходит высоту потенциального барьера (работу выхода). Эти электроны будут вырваться с поверхности металла – «испаряться».

Количество электронов, испускаемых единицей площади поверхности в единицу времени n , зависит от температуры поверхности и величины работы выхода:

$$n = \frac{4\pi mk^2}{h^3} \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{A_{\text{вых}}}{kT}},$$

где k - постоянная Больцмана;

h - постоянная Планка;

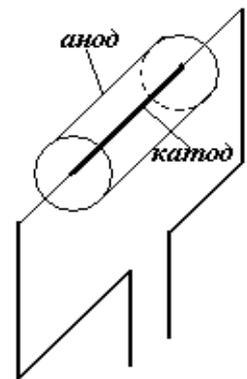
T - абсолютная температура, К.

Для тугоплавких металлов W, Mo, Pt работа выхода велика. Получить большое количество термоэлектронов из таких металлов можно только при очень высоких температурах накала – порядка 2300 К – 2600 К.

На практике весьма существенно снизить температуру накала катода, так как при этом уменьшаются затраты энергии на накал катода и увеличиваются сроки службы вакуумной лампы. В так называемых «сложных катодах» поверхность металла покрывается слоем оксидов щелочноземельных металлов (BaO , SrO , CaO). После этого катод активизируется пропусканием тока при температуре порядка 1000 °С. В результате этого на поверхности катода образуется моноатомный слой ионов бария, стронция или кальция, который сильно понижает работу выхода (смотри таблицу 1). Уменьшение работы выхода позволяет уменьшить температуру рабочей поверхности, испускающей электроны, до 800 °С – 900 °С.

3 Ток термоэлектронной эмиссии. Вакуумный диод

На использовании термоэлектронной эмиссии основано действие электронных ламп. Электронная лампа состоит из стеклянного или металлического баллона, из которого тщательно удален воздух. Внутри баллона помещается несколько электродов, один из которых (катод) выполняется в виде металлической проволоки, накаливаемой током для получения термоэлектронов. В двухэлектродной лампе (диоде) катод располагается внутри другого металлического электрода – анода, имеющего цилиндрическую форму.



Работает диод в схеме следующим образом. К концам нити накала (катода) от источника подводится напряжение накала. Ток, протекающий

через катод, нагревает его. В результате этого с катода начинают испаряться электроны, и вокруг катода образуется электронное облако.

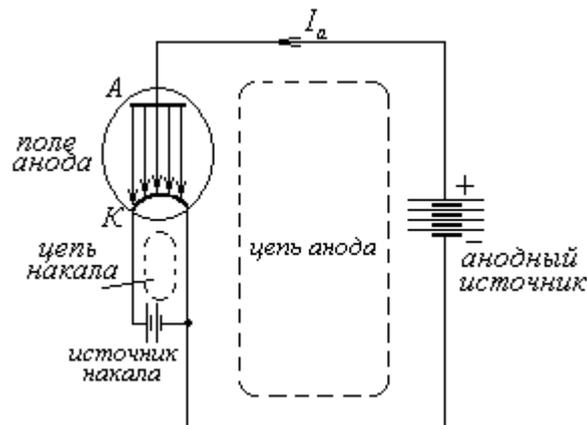


Рисунок 2 – Электрическая цепь, содержащая диод

Если к промежутку анод – катод приложено напряжение U_a , то электрическое поле направляет термоэлектроны к аноду. Поток электронов от катода к аноду замыкает цепь анодного источника, в результате чего в цепи появляется электрический ток, называемый *анодным током*.

ВАХ диода, снятые при различных температурах катода, выглядят следующим образом.

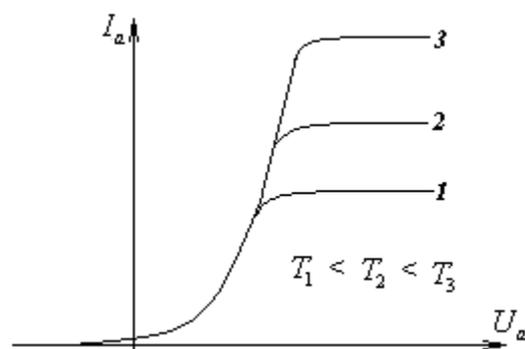
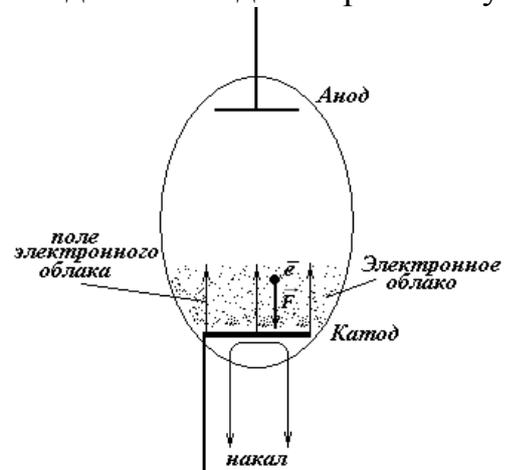


Рисунок 3 – ВАХ диода

Объясним особенности зависимости анодного тока от напряжения между анодом и катодом.

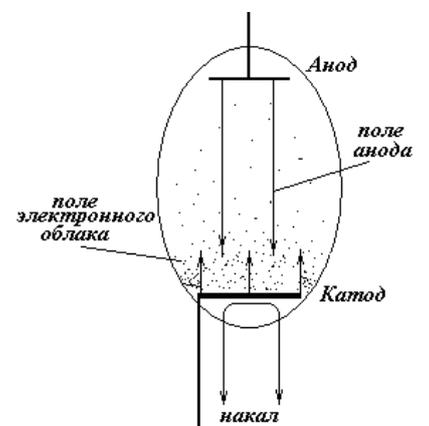
- При отсутствии напряжения между анодом и катодом через лампу течет незначительный ток. Почему?

Дело в том, что с поверхности нагретого катода испаряются электроны, и над его поверхностью появляется электронное облако. Катод, потеряв часть электронов, приобретает положительный заряд. Между отрицательным электронным облаком и положительным катодом появляется электрическое поле.



Нетрудно видеть, что это электрическое поле является тормозящим для продолжающих испаряться с поверхности катода электронов. Оно тормозит и возвращает большинство термоэлектронов обратно на катод. В конечном итоге между катодом и электронным облаком над ним устанавливается динамическое равновесие – количество электронов, вылетающих с катода, будет компенсироваться количеством электронов, возвращаемых на катод. Преодолеть это тормозящее поле электронного облака могут лишь те термоэлектроны, у которых достаточно большая кинетическая энергия. Такие электроны достигают анода, создавая небольшой ток.

- Приложим к аноду положительный (по отношению к катоду) потенциал. Напряженность поля анода направлена против напряженности поля электронного облака. Поэтому вблизи катода электрическое поле анода, накладываясь на поле электронного облака, ослабляет его. Это приводит к тому, что увеличивается количество электронов, способных



преодолеть тормозящее действие электронного облака и долететь до анода. В цепи анода появляется заметный ток.

При увеличении анодного напряжения тормозящее поле вблизи катода ослабляется еще больше, и ток термоэлектронов растет. Однако это возрастание идет не пропорционально U_a , так что для вакуумного диода закон Ома не выполняется.

Ленгмюр и Богуславский теоретически получили зависимость анодного тока от напряжения между анодом и катодом. Она имеет вид:

$$I_a = kU_a^{\frac{3}{2}}.$$

Закон носит имя Богуславского – Ленгмюра или «законом трех вторых».

Коэффициент пропорциональности C зависит от формы катода и анода. Например, для плоских электродов

$$k = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \frac{S}{d^2} \sqrt{\frac{2e}{m}},$$

где S - площадь электродов;

d - расстояние между катодом и анодом;

$\frac{e}{m}$ - удельный заряд электрона;

ε_0 - электрическая постоянная.

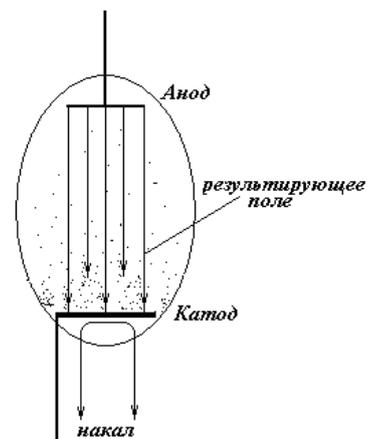
Независимо от формы электродов коэффициент пропорциональности k всегда прямо пропорционален квадратному корню из удельного заряда

электрона $k \sim \sqrt{\frac{e}{m}}$. Тогда $\frac{e}{m} \sim k^2$ или $\frac{e}{m} = \alpha k^2$. Для диода 1Ц11П коэффициент $\alpha = 6,2 \pm 0,1 \cdot 10^{21} \text{ В}^3\text{с}^2/\text{кг} \cdot \text{Кл}$.

Нелинейность зависимости тока от напряжения обусловлена тем, что пространственный заряд, обусловленный наличием в вакуумном баллоне движущихся электронов, «искажает» электрическое поле анода и изменяет характер распределения потенциала между катодом и анодом.

На практике точного совпадения с законом «трех вторых» не наблюдается. При малых напряжениях закон «трех вторых» дает заниженное значение термоэлектронного тока, так как при выводе законе не учитывался разброс тепловых скоростей электронов. При больших напряжениях наблюдается отклонение от закона «трех вторых», потому что эмиссионная способность катода не бесконечно велика. При больших напряжениях ток в конце концов достигает насыщения, закон перестает работать.

- При увеличении напряжения между анодом и катодом напряженность поля анода растет. Когда напряженность поля анода станет равной напряженности поля электронного облака, результирующее поле вблизи катода станет равным нулю. Тормозящее поле исчезает. Все испаряющиеся с поверхности катода термоэлектроны теперь беспрепятственно достигают анода. Анодный ток достигает насыщения. Дальнейшее увеличение анодного напряжения не приводит к увеличению тока, ибо все электроны, вылетевшие с катода, достигают анода.



Плотность тока насыщения может быть легко найдена, если количество электронов, испаряющихся ежесекундно с единицы площади (см. пункт 3 описания), умножить на заряд электрона:

$$j_{нас} = n \cdot e = \frac{4\pi mk^2 e}{h^3} \cdot T^2 \cdot e \frac{A_{вых}}{kT}.$$

Эта зависимость носит название закона Ричардсона – Дэшмена. Нетрудно видеть, что увеличение температуры катоды приводит к увеличению тока насыщения.

Экспериментальная часть

Изучение экспериментальной установки

Для исследования зависимости тока, текущего через диод, от напряжения между анодом и катодом собирают цепь:

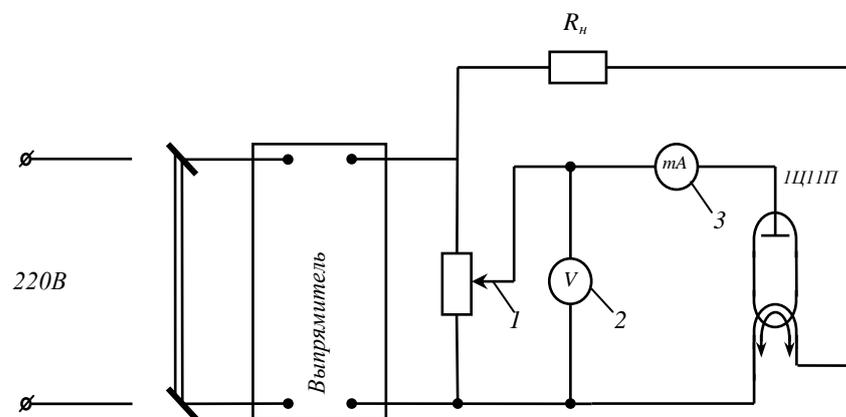


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки по изучению вакуумного диода

При помощи потенциометра 1 меняют напряжение, подаваемое на лампу. Вольтметр 2 измеряет напряжение между анодом и катодом, амперметр 3 фиксирует ток, текущий через лампу.

Установка уже собрана в металлическом корпусе.

- Тумблер 4 «ВКЛ / ВЫКЛ»;
- Рукоятка 1 потенциометра, при помощи которой изменяют напряжение, подаваемое на лампу;
- Вольтметр 2;
- Амперметр 3;
- Вакуумная лампа – диод 1Ц11П.

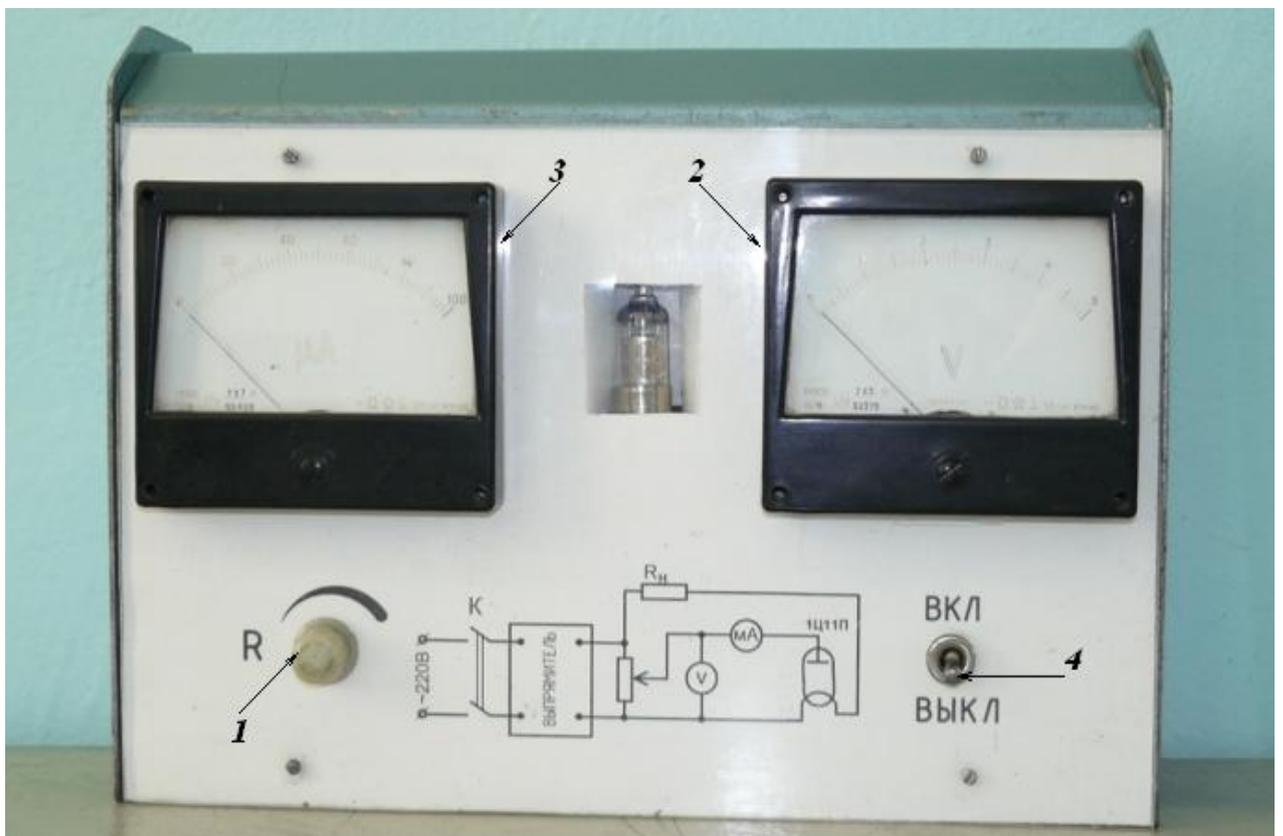


Рисунок 5 – Внешний вид экспериментальной установки

2 Исследование зависимости силы тока, текущего через диод, от напряжения

- Приготовьте таблицу

Номер опыта	$U, \text{В}$	$U^{3/2}, \text{В}^{3/2}$	I, mA
1	0,5		
2	1		
3	1,5		
....		
9	5		
10	4,8		
11	4,3		
...	...		
17	1,3		

- Включите установку в сеть и тумблер 4 в положение «ВКЛ».

Регулятор 1 переведите в крайнее левое положение – в этом случае напряжение между анодом и катодом отсутствует.

Подождите 2 минуты!

За это время катод вакуумной лампы прогреется и диод будет готов к работе.

- При помощи рукоятки 1 плавно увеличивайте напряжение, подаваемое на лампу от 0,5 В до 4,5 – 5 В (чтобы не зашкаливал амперметр) с шагом в 0,5 В. Показания вольтметра и амперметра заносите в таблицу.

- Продолжите измерения, уменьшая напряжение на лампе от 4,8 В с тем же шагом 0,5 В. Результаты занесите в таблицу.
- По результатам измерений постройте ВАХ диода на миллиметровой бумаге. **Сделайте вывод** о том, является ли вакуумный диод линейным элементом и можно ли применять закон Ома к участку цепи, содержащему вакуумный диод.
- Для проверки закона «трех вторых» постройте на миллиметровой бумаге зависимость силы тока I от напряжения в степени три вторых $U^{3/2}$. **Сделайте вывод.**

3 Расчет удельного заряда электрона

Удельный заряд электрона равен

$$\frac{e}{m} = \alpha k^2.$$

(смотри с. 9 данного описания), где k – угловой коэффициент графика зависимости силы тока I от напряжения в степени три вторых $U^{3/2}$.

Для определения углового коэффициенты прямой k экспериментальный график $I = I U^{3/2}$ мысленно нужно разделить на четыре части. Выбрать любую точку прямой из последней (крайней правой) части графика. Для этой точки определить значения тока I напряжения в степени три вторых $U^{3/2}$. По найденным значениям рассчитайте угловой коэффициент

$$k = \frac{I}{U^{3/2}}.$$

Для диода 1Ц11П коэффициент $\alpha = 6,2 \pm 0,1 \cdot 10^{21} \text{ В}^3 \text{ с}^2 / \text{кг} \cdot \text{Кл}$.

Определив k и зная α , рассчитайте удельный заряд электрона по формуле $\frac{e}{m} = \alpha k^2$.

Рассчитайте погрешность вычисления удельного заряда электрона.

Поскольку удельный заряд электрона рассчитывается как произведение степенных функций

$$\frac{e}{m} = \alpha \cdot k^2 = \alpha \cdot \left(\frac{I}{U^{3/2}} \right)^2 = \alpha \cdot I^2 \cdot U^{-3},$$

относительная погрешность вычисления находится следующим образом

$$\varepsilon_{\frac{e}{m}} = \sqrt{\varepsilon_{\alpha}^2 + 2\varepsilon_I^2 + 3\varepsilon_U^2}$$

Шаг 1 Находим относительную погрешность коэффициента α :

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\Delta\alpha}{\alpha}.$$

Шаг 2 Определяем класс точности и предел измерения амперметра. По найденным значениям рассчитывает абсолютную погрешность измерения силы тока

$$\Delta I = \text{класс точности} \times \text{предел измерения прибора}$$

Относительная погрешность силы тока

$$\varepsilon_I = \frac{\Delta I}{I},$$

где I - значение, определенное по графику при расчете коэффициента k .

Шаг 3 Определяем класс точности и предел измерения вольтметра. По найденным значениям рассчитывает абсолютную погрешность измерения напряжения.

$$\Delta U = \text{класс точности} \times \text{предел измерения прибора}$$

Относительная погрешность измерения напряжения

$$\varepsilon_U = \frac{\Delta U}{U},$$

где U - значение, определенное по графику при расчете коэффициента k .

Шаг 4 Рассчитываем относительную погрешность вычисления удельного заряда

$$\varepsilon_{\frac{e}{m}} = \sqrt{\varepsilon_{\alpha}^2 + 2\varepsilon_I^2 + 3\varepsilon_U^2}$$

Шаг 5 Рассчитываем абсолютную погрешность вычисления удельного заряда электрона.

$$\Delta\left(\frac{e}{m}\right) = \varepsilon_{\frac{e}{m}} \cdot \frac{e}{m}$$

Шаг 6 Записываем окончательный результат и сравниваем его с табличным значением.

Табличное значение удельного заряда электрона $\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое работа выхода электрона из металла?
- 2 Почему электрону необходимо сообщить энергию для вылета из металла? Какими способами можно сообщать электрону энергию для выхода из металла?
- 3 От чего зависит количество термоэлектронов, вылетающих с поверхности металла в единицу времени?
- 4 Как устроен вакуумный диод?
- 5 Как выглядит ВАХ вакуумного диода? Объясните зависимость тока от напряжения на отдельных участках ВАХ.
- 6 Закон Богуславского – Ленгмюра. Как в данной работе проверялась справедливость закона Богуславского Ленгмюра?

7 Что называют удельным зарядом частицы? Как определить удельный заряд электрона, зная зависимость тока от напряжения для вакуумного диода?

Список использованных источников

1 Калашников, С.Г. Электричество: учебное пособие / С.Г. Калашников. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 624 с. – ISBN 5-9211-0312-1.

2 Телеснин, Р.В. Курс физики. Электричество / Р.В.Телеснин, В.Ф. Яковлев – М.: Просвещение, 1970.- 488 с.

3 Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский.- М.: Высшая школа, 2000.- 718 с.

4 Иродов, И.Е. Электромагнетизм. Основные законы / И.Е. Иродов. – М.: Лаборатория Базовых знаний, 2001. – 352 с.