



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Физика»

Виртуальный практикум

Лабораторная работа № 20-В

«Определение удельного заряда
электрона с помощью магнетрона»

по дисциплине

«Физика»

Авторы

Жданова Т. П.,

Кудря А. П.,

Лемешко Г. Ф.,

Лещева О. А.

Ростов-на-Дону, 2021

Аннотация

Настоящая лабораторная работа посвящена нахождению удельного заряда при проведении виртуального эксперимента.

Методические указания предназначены для самостоятельной работы студентов всех форм обучения, изучающих физику, при подготовке и проведении учебного виртуального эксперимента, особенно при дистанционном обучении.

Авторы

к.ф.-м.н., доцент	кафедры	«Физика»
Жданова Т.П.,		
ст. преподаватель	кафедры	«Физика»
Кудря А.П.,		
к.ф.-м.н., профессор	кафедры	«Физика»
Лемешко Г.Ф.,		
ст. преподаватель	кафедры	«Физика»
Лещёва О.А.		

Оглавление

Краткая теория	4
Описание экспериментальной установки	8
Подготовка к работе	9
Выполнение работы	9
Задание 1. Определение удельного заряда электрона..	9
Задание 2. Исследовать зависимость силы тока магнетрона от величины магнитной индукции	11
Контрольные вопросы	12
Список литературы	12

Цель работы: определить удельный заряд электрона методом магнетрона.

Оборудование: компьютер с программным обеспечением модели магнетрона.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Движение электрона в электрическом и магнитном полях

а) На электрон зарядом e , движущийся в электрическом поле напряжённостью \vec{E} , действует сила $\vec{F}_Э = e \cdot \vec{E}$. Направление силы совпадает с направлением напряжённости поля для положительного заряда и противоположно для отрицательного. $\vec{F}_Э = e \cdot \vec{E}$.

б) На электрон зарядом e , движущийся в магнитном поле индукцией \vec{B} со скоростью \vec{v} , действует сила Лоренца:

$$\vec{F} = e[\vec{v} \vec{B}] \text{ или в скалярном виде } F = e \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

где α - угол между векторами \vec{B} и \vec{v} . Направление силы Лоренца определяется по правилу левой руки для положительного заряда. Очевидно, что сила Лоренца действует только на движущиеся заряды.

Проанализируем выражение (1).

1) Если заряд движется вдоль магнитных силовых линий, т.е. $\alpha = 0^\circ$ ($\alpha = 180^\circ$), $\vec{F} = 0$.

2) Если скорость \vec{v} заряда перпендикулярна вектору магнитной индукции \vec{B} , то он будет двигаться по окружности радиуса R с нормальным ускорением $a_n = \frac{v^2}{R}$. Применив второй закон Ньютона,

получим

$$q \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{R}. \quad (2)$$

В этом случае сила направлена к центру окружности.

Из выражения (2) можно получить радиус окружности, по которой движется заряд $R = \frac{m \cdot v}{qB}$ и период вращения $T = \frac{2\pi m}{qB}$,

который не зависит от скорости частицы.

Магнетрон

Магнетроном называют электровакуумные СВЧ приборы, в которых движение электронов происходит в скрещенных электрическом и магнитном полях. В данном виртуальном эксперименте роль магнетрона выполняет вакуумированная лампа-диод, в которой роль катода выполняет нить накала, покрытая тонким слоем вещества (окислы щелочноземельных металлов), имеющего малую работу выхода электронов. При пропускании через нить накала постоянного тока она нагревается и в результате термоэлектронной эмиссии интенсивно излучает электроны. Анод представляет собой полый цилиндр, радиус которого r_A во много раз превышает радиус катода r_K (рис.1а). Катод установлен вдоль оси анода. Между анодом и катодом создается электрическое поле, потенциал которого с расстоянием от оси анода изменяется по закону:

$$\varphi = \ln\left(\frac{r}{r_k}\right) / \ln\left(\frac{r_A}{r_k}\right). \quad (3)$$

Так как радиус катода во много раз меньше радиуса анода, то относительно катода зависимость потенциала электрического поля от расстояния, в соответствии с уравнением (3), будет иметь вид, изображенный на рисунке 1б. Это означает, что термоэлектроны практически приобретают максимальную скорость в области катода, под действием силы $\vec{F}_3 = e \cdot \vec{E}$. В отсутствие магнитного поля ($F_M = 0$) все электроны будут двигаться вдоль радиальных направлений.

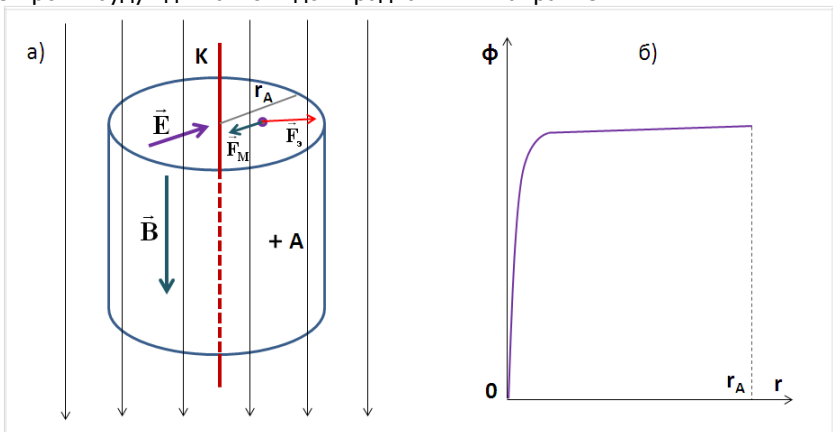


Рис. 1

За счет работы электрического поля кинетическая энергия каждого электрона, согласно закону сохранения энергии, будет увеличиваться:

ФИЗИКА

$$eU = \frac{m\nu^2}{2} - \frac{m\nu_0^2}{2}, \quad (4)$$

где: ν_0 – скорость электрона, вышедшего из катода; m – масса электрона; U – разность потенциалов между катодом и анодом; ν – максимальная скорость электрона у анода.

По величине силы тока I , протекающего через магнетрон, можно оценить количество электронов, покидающих катод, в результате термоэлектронной эмиссии, за одну секунду ($t=1\text{с}$):

$$N = \frac{I \cdot t}{e}, \quad (5)$$

где e – заряд электрона.

Если включить однородное магнитное поле, линии магнитной индукции которого параллельны катоду (рис 1а), т.е. то $\vec{\nu} \perp \vec{B}$, то сила Лоренца не изменяет модуль вектора скорости, а изменяет его направление, то есть сообщает электрону нормальное ускорение. Согласно второму закону Ньютона

$$e\nu B = \frac{m \cdot \nu^2}{R}, \quad (6)$$

где: R – радиус траектории электрона.

При увеличении магнитной индукции радиус траектории будет уменьшаться и при некотором значении магнитной индукции, называемой критической $B_{кр}$, станет равным половине радиуса анода, $R = r_A / 2$ (рис.2). В этом случае электрон будет описывать окружность и не попадет на анод. Из уравнения (6) следует, что скорость электрона у анода при критическом значении магнитной индукции равна

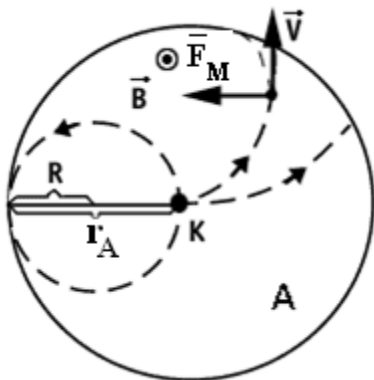


Рис.2

$$\nu_{кр} = \frac{e}{m} \cdot \frac{r_A}{2} B_{кр}, \quad (7)$$

где: $\frac{e}{m}$ – удельный заряд электрона,

r_A - радиус анода ($r_A = 10 \text{ см.}$).

ФИЗИКА

Если бы все электроны вылетали из катода с одинаковой скоростью, то при значении магнитной индукции $B \geq B_{кр}$ электроны не попадали бы на анод и анодный ток уменьшался скачком до нуля (кривая 1 на рис. 3). В реальном магнетроне, вследствие некоторого разброса начальных скоростей U_0 электронов, покидающих катод, анодный ток уменьшается не скачком, а по сложному закону (кривая 2 на рис. 3).

Из этой зависимости следует, что используя формулу (7), можно определить минимальную U_{min} и максимальную U_{max} скорости электронов у поверхности анода, то есть:

$$U_{min} = \frac{e}{m} \cdot \frac{r_A}{2} B_{min};$$

$$U_{max} = \frac{e}{m} \cdot \frac{r_A}{2} B_{max}.$$

(8)

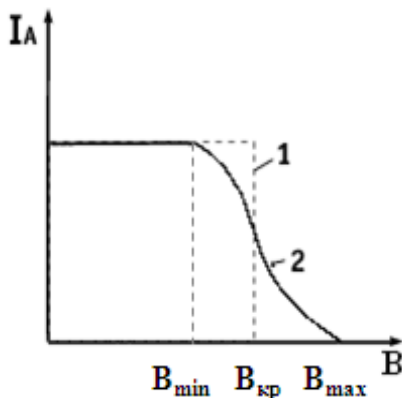


Рис. 3

В уравнениях (8) B_{min} и B_{max} - минимальная и максимальная величины магнитной индукции, при которых электроны, соответственно с минимальной и максимальной скоростями движутся по круговым траекториям.

Зная минимальную и максимальную скорости электронов у поверхности анода, из формулы (2) можно установить интервал скоростей электронов, покидающих катод:

$$v_{0_{min}} = \sqrt{v_{min}^2 - 2eU / m};$$

$$v_{0_{max}} = \sqrt{v_{max}^2 - 2eU / m}. \quad (9)$$

Следует иметь ввиду, что реальный катод излучает электроны, скорости которых подчиняются распределению Максвелла, а в виртуальном эксперименте генератор случайных чисел RND генерирует скорости электронов в установленном интервале.

О программе

Программа позволяет в хорошем приближении определить удельный заряд электрона, а также выводит на монитор анимацию движения электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях магнетрона.

Разработана студентами факультета «Вычислительная техника и информатика» Ковалевым Вячеславом и Прокопенко Александром.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В данном виртуальном эксперименте схема питания диода приведена на рисунке 4. Ускоряющее напряжение подается на анод диода от делителя напряжения R и контролируется вольтметром V .

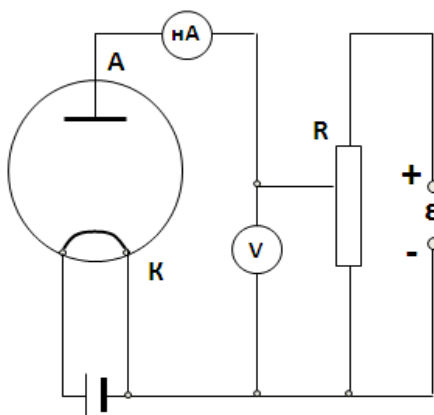


Рис.4

Величину тока измеряют наноамперметром nA . Диод расположен между полюсами электромагнита, создающего однородное магнитное поле.

На рабочей панели виртуального эксперимента (рис.5) находятся: а) регулятор напряжения и показания вольтметра; наноамперметр; регулятор величины индукции магнитного поля; окно, в котором изображены сечение диода и направление вектора магнитной индукции. В окне, в

процессе эксперимента, иллюстрируется характер движения электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях.

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

1. Откройте папку «Magnetron» и файл «demonstration. exe».
2. В закладке «Теория» познакомьтесь с краткой теорией метода определения удельного заряда электрона и руководством по пользованию экспериментальной установкой.
3. Закройте информационное окно и выйдите с помощью закладки «Опыт» в рабочую панель (рис.5).

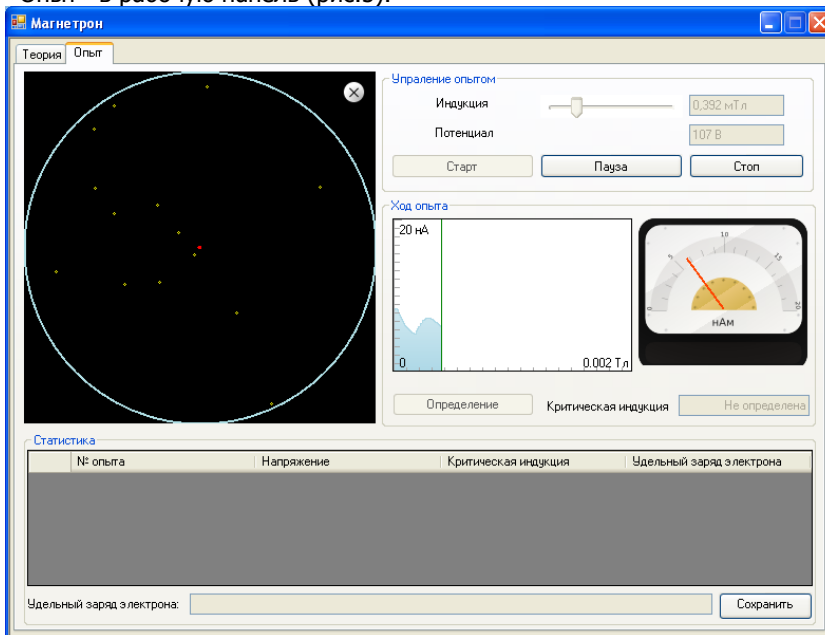


Рис.5

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Задание 1. Определение удельного заряда электрона

1. Клавишей "Старт" откройте окно начальных настроек.
2. Регулятором «Потенциал» установите ускоряющее анодное напряжение из интервала 50-300 В.
3. Нажать клавишу «Перейти к моделированию» и дождаться стабилизации показаний наноамперметра.

ФИЗИКА

4. Клавишей «Определение» запустить автоматический режим измерения удельного заряда электрона.

5. По окончании измерений нажать клавишу «Стоп» и на вопрос «Сохранить результат этого опыта?», нажать клавишу «Да». В окне «Статистика» отобразятся результаты эксперимента.

6. Опыт повторить для пяти напряжений. Результаты занести в таблицу. Значения округлять до тысячных.

№ п/п	$U, В$	$B_{кр}, мТл$	$\frac{e}{m}, Кл/кг$	$\Delta\left(\frac{e}{m}\right), Кл/кг$	$\delta, \%$
1					
2					
3					
4					
5					
СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ					

7. Рассчитать среднее значение $\langle \frac{e}{m} \rangle$, абсолютную погрешность отдельного измерения $\Delta\left(\frac{e}{m}\right)$, средние абсолютную $\langle \Delta\frac{e}{m} \rangle$ и относительную погрешность $\delta = \frac{\langle \Delta(e/m) \rangle}{\langle e/m \rangle} 100\%$.

8. Результат представить в виде $\frac{e}{m} = \langle \frac{e}{m} \rangle \pm \langle \Delta\frac{e}{m} \rangle$.

9. Посчитать теоретическое значение $\frac{e}{m}$, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19} Кл$ - заряд электрона, $m = 9,1 \cdot 10^{-31} кг$ - масса электрона. Значения округлять до тысячных.

10. Сравнить с экспериментальными данными.

Задание 2. Исследовать зависимость силы тока магнетрона от величины магнитной индукции

1. Клавишей "Старт" откройте окно начальных настроек.
2. Регулятором «Потенциал» установите какое-либо ускоряющее анодное напряжение, использованное в задании 1.
3. Нажать клавишу «Перейти к моделированию» и дождаться стабилизации показаний наноамперметра.
4. Вручную изменять индукцию магнитного поля, перемещая ползунок "Индукция", до тех пор, пока показания наноамперметра не станут уменьшаться до нуля. Установите интервал магнитной индукции, соответствующий максимальному и минимальному току в магнетроне $B_{min} \leq B \leq B_{max}$.
5. В установленном интервале изменять магнитную индукцию с шагом 0,01 или 0,005 мТл и измерять показания наноамперметра.
6. Результаты измерений занесите в таблицу 2.

Таблица 2

№, п/п									
$B_{кр}$, мТл									
I , нА									

7. Построить график зависимости $I(B)$. По графику оценить критическое значение магнитной индукции и сравнить ее с величиной, полученной в задании 1 для одного и того же анодного напряжения. Оцените погрешность измерения.
8. По максимальному анодному току, по формуле (5), оцените количество термоэлектронов, покидающих катод за 1 секунду.
9. Установите интервал скоростей электронов, соответствующих интервалу магнитных индукций $B_{min} \leq B \leq B_{max}$, по формулам (8).
10. По формулам (9) вычислить интервал скоростей термоэлектронов, вылетающих из катода.
11. По выполненной работе сделать вывод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимают под удельным зарядом электрона?
2. Какие силы действуют на электрон со стороны электрического и магнитного полей? Каков характер движения электрона под действием этих сил?
3. Как из второго закона Ньютона определить удельный заряд электрона? Какие данные при этом потребуются?
4. Что понимают под критической индукцией магнитного поля?
5. Как определить скорость электронов у анода?
6. Как определить интервал начальных скоростей электронов, покидающих катод?
7. Как устроен магнетрон? Приведите схему питания магнетрона.
8. Какие основные узлы установки отображены на панели виртуального эксперимента? Какие функции они выполняют?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев И.В. Курс физики. Т2. М.: Наука. 2006. §§ 32,37,42.
2. Трофимова Т. И. Курс физики. М.: Высшая школа. 2019. §§ 104, 105, 114, 115.
3. Физический энциклопедический словарь. Главный редактор Прохоров А.М., Советская энциклопедия, М. 1983.