

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

**ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ
МАГНЕТРОНА**

*Методические указания к лабораторной работе № 28 по курсу
«Физика» для студентов высших учебных заведений*

Екатеринбург
УрФУ
2015

УДК 53.082.07

Составители: А. Ф. Ермаков, Ю. Г. Карпов, В. С. Черняев,
А. Н. Филанович

Научный редактор – проф. д.ф.-м.н. Ф.А. Сидоренко

Измерение удельного заряда электрона методом магнетрона:
методические указания к лабораторной работе № 28 по физике / сост.
А. Ф. Ермаков, Ю. Г. Карпов, В. С. Черняев, А. Н. Филанович. –
Екатеринбург : УрФУ, 2015. – 13 с.

В данных методических указаниях изложен метод измерения удельного заряда электрона методом магнетрона, основанном на особенностях движения заряженной частицы в скрещенных электрическом и магнитном полях. Указания предназначены для студентов всех специальностей всех форм обучения.

Подготовлено кафедрой физики

©Уральский федеральный
университет, 2015

Измерение удельного заряда электрона методом магнетрона

Движение электронов в магнетроне

Целью эксперимента является опытное определение удельного заряда электрона методом магнетрона.

Удельный заряд частицы – это отношение ее заряда q к массе m .

Простейший магнетрон представляет собой двухэлектродную электронную лампу, состоящую из цилиндрического анода и расположенного на его оси катода (рис. 2.10). Лампа помещается в однородное магнитное поле, направленное по ее оси. В данной работе магнитное поле создается соленоидом. Магнитная индукция B изменяется за счет изменения тока I_c в соленоиде. В результате будут изменяться траектории электронов и анодный ток I_a магнетрона.

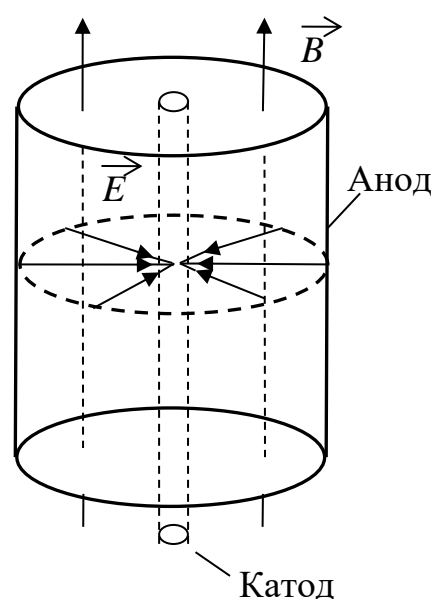


Рис. 1. Схематическая конструкция магнетрона

Удельный заряд $\frac{e}{m}$ электрона

оценивается по экспериментально наблюдаемой зависимости $I_a = f(I_c)$. На электрон, движущийся от катода к аноду, действуют две силы: одна – со стороны электрического поля

$$\vec{F}_э = e\vec{F}, \quad (1)$$

другая – со стороны магнитного поля

$$\vec{F}_M = e[\vec{v}\vec{B}]. \quad (2)$$

Первая направлена вдоль радиуса от катода к аноду, вторая – перпендикулярно к векторам скорости и магнитной индукции.

На рис. 3 показаны траектории электронов при различных значениях магнитной индукции B . По мере ее увеличения траектория

электрона все более искривляется, и при некотором критическом значении магнитной индукции $\bar{B}_{кр}$ электроны не достигают анода, анодный ток в этот момент резко уменьшается.

Изображенную на рис. 3, *а* и *б*, зависимость силы I_a анодного тока от магнитной индукции B называют сбросовой характеристикой магнетрона. График *а* соответствует идеальной, *б* реальной характеристикам.

Идеальная характеристика получилась бы при одинаковых скоростях движения электронов в строго однородном поле. Реально

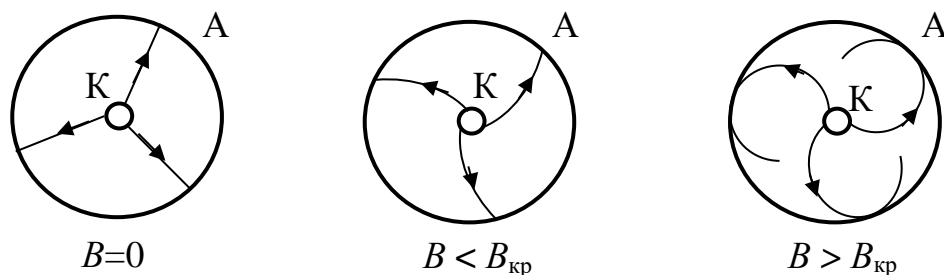


Рис. 2. Влияние магнитного поля на траекторию движения электрона (вектор \bar{B} направлен к читателю)

падение анодного тока происходит не скачком, а достаточно плавно.

Если
от

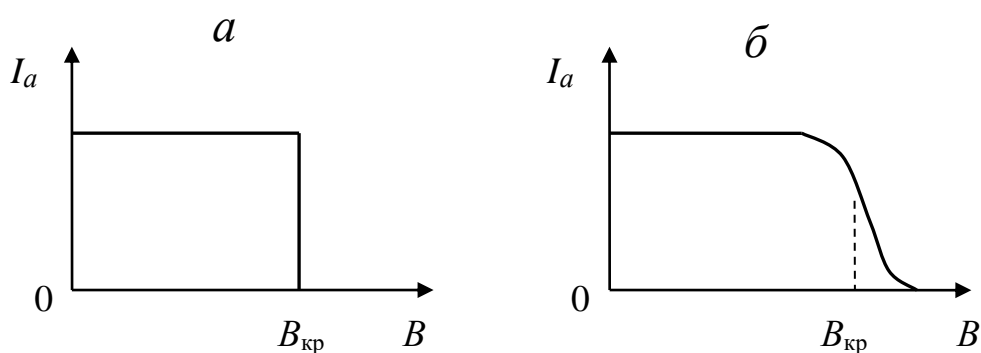


Рис. 3. Примерный вид идеальной (*а*) и реальной (*б*) сбросовых характеристик магнетрона

экспериментально полученной зависимости $I_a = f(I_c)$ взять

производную $\frac{dI_a}{dI_c}$, а затем построить график $\frac{dI_a}{dI_c} = f(I_c)$, то он окажется с максимумом для некоторого значения тока в соленоиде $I_{кр}$, которое можно использовать в качестве расчетного для определения удельного заряда электрона.

Если радиус r_k катода лампы мал по сравнению с радиусом R_a анода $\left(\frac{r_k}{R} \ll 1\right)$, то электрон ускоряется в основном в пространстве вблизи катода, так как напряженность электрического поля отличается от нуля практически только вблизи катода. Вследствие этого $v = \text{const}$ и траектория электрона близка к окружности, а диаметр критической траектории можно считать равным радиусу анода

$$2r_{кр} = R_a. \quad (3)$$

Вывод расчетной формулы

Сила, действующая на электрон со стороны магнитного поля, сообщает ему нормальное ускорение. По второму закону Ньютона,

$$F_M = ma_n \quad \text{или} \quad |e|vB_p = \frac{mv^2}{r_{кр}}, \quad (4)$$

откуда

$$r_{кр} = \frac{mv}{|e|B_{кр}}. \quad (5)$$

С другой стороны, известно, что

$$\frac{mv^2}{2} = eU_a, \quad (6)$$

где U_a – разность потенциалов между катодом и анодом.

Исключая v из формул (4) и (5) и используя формулу (6), получим формулу для удельного заряда электрона

$$\left(\frac{e}{m}\right) = \frac{8|U_a|}{R_a^2 B_{кр}^2}. \quad (7)$$

Строгий вывод приводит к более сложному выражению для $\frac{e}{m}$, однако при $\frac{r_k}{R_a} \ll 1$ оно преобразуется к выражению (7). Магнитное поле соленоида конечной длины без сердечника рассчитывается по формуле (см. прил.):

$$B = \frac{\mu_0 N I_c}{\sqrt{D^2 + L^2}}, \quad (8)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; N – число витков соленоида; L – его длина; D – диаметр; I_c – ток в соленоиде. Формула для расчета удельного заряда электрона принимает окончательный вид

$$\left(\frac{e}{m}\right) = \frac{8|U_a|(L^2 + D^2)}{R_a^2 \mu_0^2 I_{кр}^2 N^2}. \quad (9)$$

Схема электрической цепи магнетрона

Электрическая цепь магнетрона (рис. 4) состоит из двух частей – цепи соленоида (а) и цепи диода (б), в которых: А – амперметр для измерения силы тока в соленоиде; μA – микроамперметр для измерения силы анодного тока; П1 – регулятор тока.

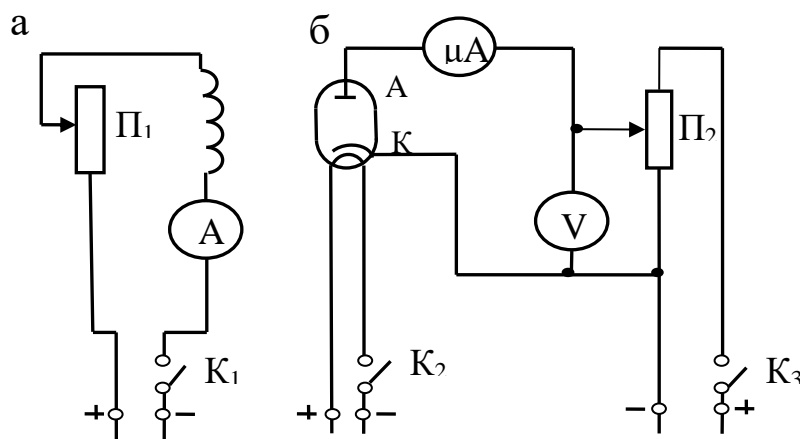


Рис. 4. Принципиальная схема электрической цепи установки

Все элементы электрической цепи размещены в корпусе с прозрачным верхом (рис. 5). Электрические сигналы от амперметра и микроамперметра с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) преобразуются в цифровой формат и поступают на USB-вход компьютера, где отображаются на экране монитора показаниями соответствующих виртуальных приборов.

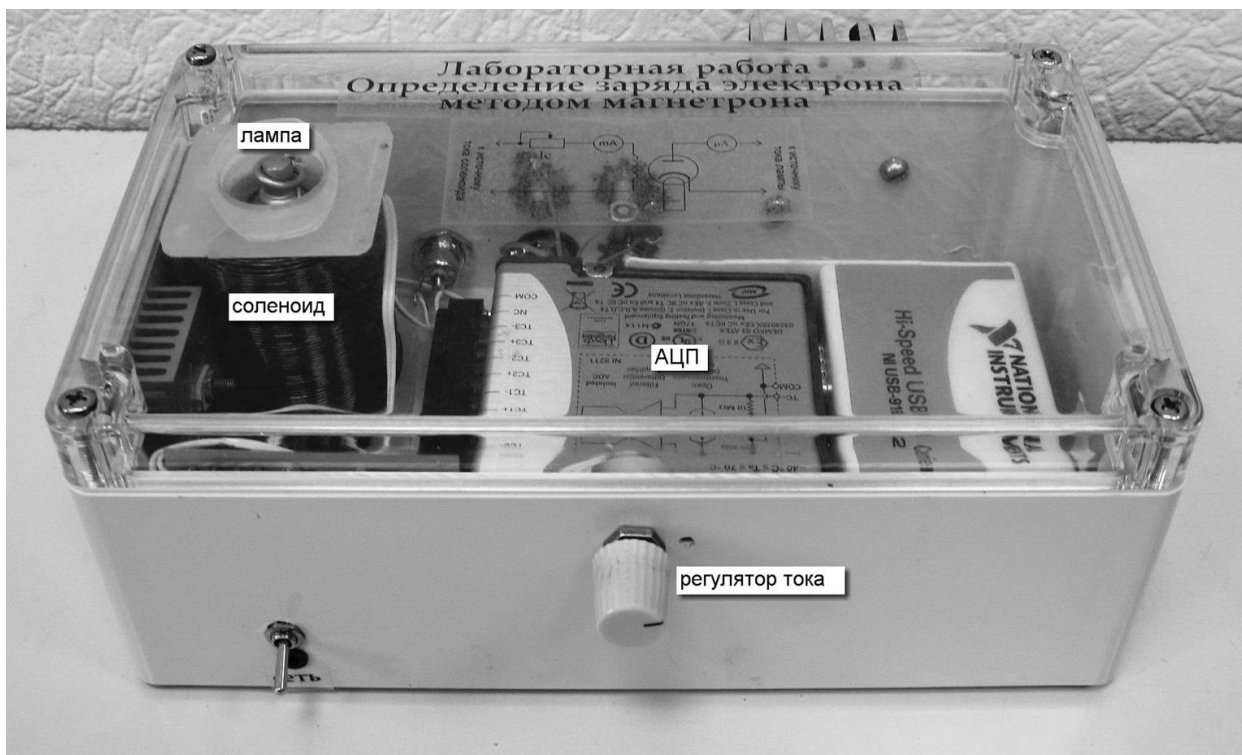


Рис. 5. Внешний вид установки

3. Порядок выполнения работы

1. Включить установку. Включить системный блок компьютера, выбрать на экране монитора ярлык с названием **Работа № 28**, подвести к нему курсор и щелкнуть левой клавишей мыши. На экране появится заставка с названием работы. Перейти на вкладку **ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ**.

2. После перехода на вкладку **ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ** на экране появится рабочая панель виртуального прибора данной установки (рис. 6.)

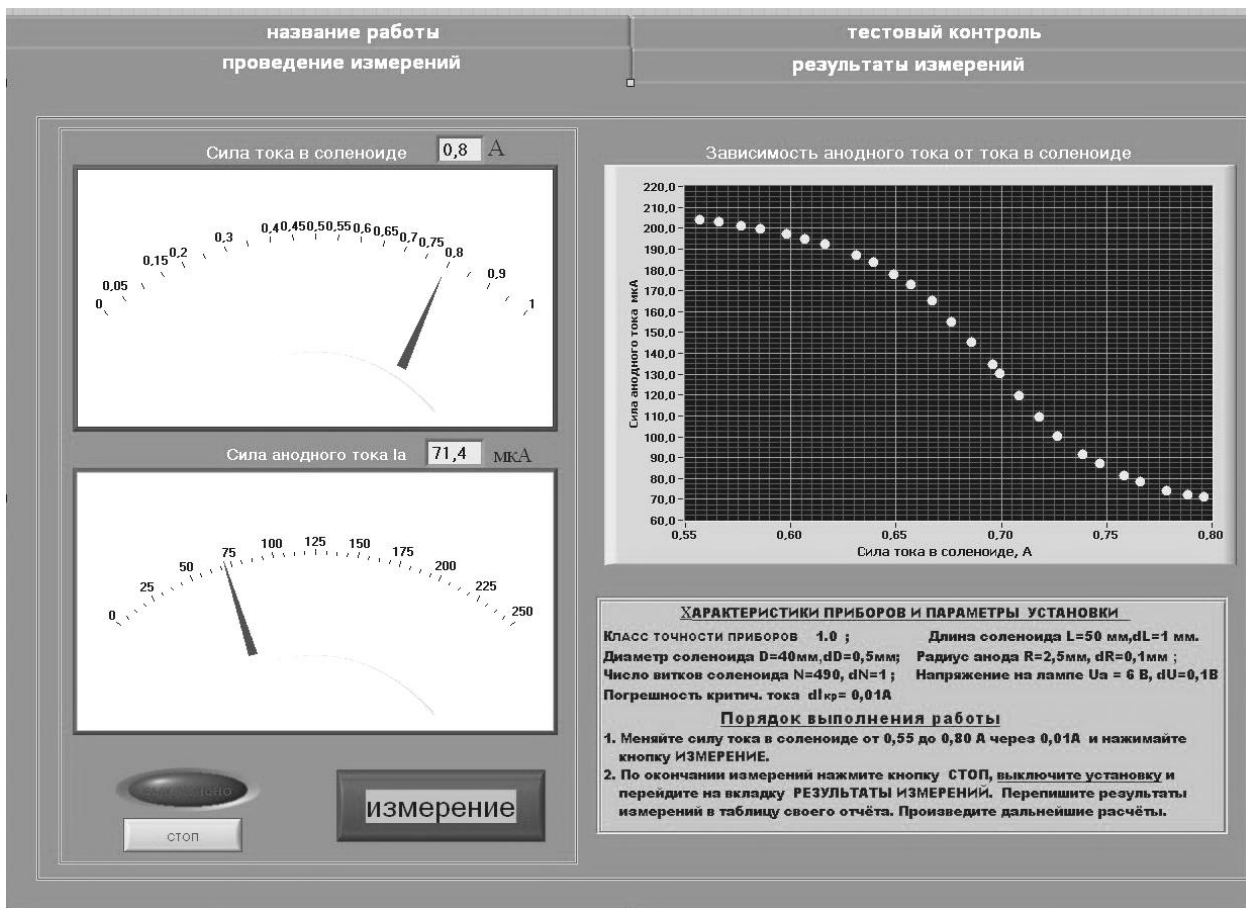


Рис. 6. Вид вкладки ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ на экране монитора

3. Внимательно прочитайте инструкцию по проведению измерений и переписать в отчет характеристики установки.

4. Вращая ручку потенциометра I_c на установке, последовательно устанавливая значение тока в соленоиде в рекомендуемом диапазоне через 0,01–0,02 А и при каждом значении тока нажимать, щелкая мышью, клавишу **Измерение**. На экране появится график $I_a = f(I_c)$.

5. По окончании измерений нажать клавишу **Стоп**, выключить установку и перейти на вкладку **Обработка результатов измерений**. На экране появится заполненная таблица результатов измерений, а также график $dI_a/dI_c = f(I_c)$.

6. Переписать результаты измерений в свой отчет, определить значение критического тока соленоида $I_{c,кр}$. *Критический ток соленоида соответствует максимуму производной dI_a/dI_c* . Закрывать программу измерений.

7. По формуле (9) рассчитать значение удельного заряда электрона, используя указанные параметры установки.

8. Рассчитать погрешности измерений, закончить оформление отчета и сдать его на проверку.

9. При работе на установке без использования компьютера после включения установки потенциометром увеличивать силу тока в соленоиде, записывать его значения и соответствующие ему значения силы анодного тока в таблицу П.1 отчета. Значения сил тока отсчитывать по стрелочным приборам на стенде установки. Заполнить таблицу П.2 и по ее данным построить график $\Delta I_a / \Delta I_c$, по графику определить значение $I_{кр}$ и рассчитать удельный заряд электрона по формуле (9). Рассчитать погрешности измерений, закончить оформление отчета и сдать его на проверку. В выводах следует сравнить полученное значение удельного заряда электрона с табличным и при различии результатов более чем на 10% определить фактор, который мог повлиять на точность Ваших результатов.

Контрольные вопросы

1. В каком случае траектория электрона, движущегося в однородном магнитном поле, представляет собой окружность?

2. При каких условиях траектория электрона, движущегося в скрещенных электрическом и магнитном полях, будет прямолинейной?

3. Почему с увеличением силы тока в соленоиде сила анодного тока в лампе будет уменьшаться?

4. Какое магнитное поле магнетрона называют критическим?

5. Каким образом определяется в данной работе величина критического тока в соленоиде?

6. Получить расчетную формулу для определения удельного заряда электрона по методу магнетрона.

ПРИЛОЖЕНИЕ

УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра физики

О Т Ч Е Т

по лабораторной работе №28

**«Определение удельного заряда электрона
методом магнетрона»**

Студент(ка) _____

Группа _____

Преподаватель _____

Дата _____

1. Расчетная формула для определения удельного заряда электрона с пояснениями смысла величин, входящих в нее.

$$\left(\frac{|e|}{m}\right) = \frac{8U_a(L^2 + D^2)}{R_a^2 \mu_0^2 I_{\text{с.кр.}}^2 N^2},$$

где U_a _____

L _____

R_a _____

μ_0 _____

$I_{\text{с.кр.}}$ _____

N _____

2. Средства измерений и их характеристики.

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления шкалы	Класс точности	Предел основной погрешности, $\Theta_{\text{осн.}}$
Микроамперметр				
Амперметр				

Магнетрон

а) **соленоид** : диаметр $D =$ _____ , длина $L =$ _____ ,

число витков $N =$ _____ ;

погрешность диаметра $\Delta_D =$ _____ ,

погрешность длины $\Delta_L =$ _____ ;

погрешность количества витков $\Delta_N =$ _____ .

б) **Эл. лампа** (диод):

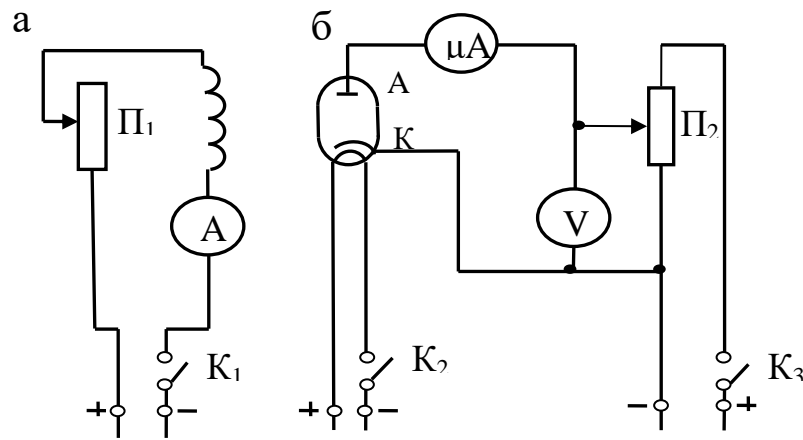
напряжение анода $U_a =$ _____ , радиус анода $R_a =$ _____ ;

погрешность напряжения $\Delta_{U_a} = \theta_{\text{осн.}} =$ _____ ,

погрешность радиуса анода $\Delta_R =$ _____ ,

погрешность критического тока в соленоиде $\Delta I_{c,кр} =$.

3. Схема электрической цепи



4. Результаты измерений

№	I_c, A	$I_a, мкА$	$ \Delta I_a , мкА$	$\Delta I_c, A$	$ \Delta I_a / \Delta I_c$	$\langle I_c \rangle = \frac{I_{c1} + I_{c2}}{2}, A$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						

Примечание. При использовании компьютерной программы для обработки результатов измерений, четвертый, пятый и седьмой столбцы таблицы не заполняются.

5. Графики зависимости $I_a = f(I_c)$ $\frac{|\Delta I_a|}{\Delta I_c} = f(I_c)$ прилагаются.

6. Удельный заряд электрона (привести расчет)

$$\left(\frac{|e|}{m}\right) = \frac{8U_a(L^2 + D^2)}{R_a^2 \mu_0^2 I_{c.кр.}^2 N^2} = \dots \quad \text{Кл/кг.}$$

7. Оценка границ погрешностей результата измерения

$$\gamma = \frac{\Delta\left(\frac{|e|}{m}\right)}{\frac{|e|}{m}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_a}{U_a}\right)^2 + \left[2 \frac{L \cdot \Delta L}{L^2 + D^2}\right]^2 + \left[2 \frac{D \cdot \Delta D}{L^2 + D^2}\right]^2 + \left[2 \frac{\Delta R_a}{R_a}\right]^2 + \left[2 \frac{\Delta I_{c.кр.}}{I_{c.кр.}}\right]^2},$$

$\gamma = \dots$

8. Граница абсолютной погрешности

$$\Delta\left(\frac{|e|}{m}\right) = \gamma \cdot \left(\frac{|e|}{m}\right) = \dots \quad \text{Кл/кг.}$$

9. Окончательный результат

$$\left(\frac{|e|}{m}\right) = (\dots \pm \dots) \quad \text{Кл/кг.}$$

10. Выводы

