

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

### 1. Цель работы

Изучение динамики движения заряженных частиц в электрическом и магнитном полях, опытное определение отношения заряда электрона к его массе  $e/m$ .

### 2. Подготовка к работе

Изучите теоретический материал по учебнику [1]: сила, действующая на заряд в электрическом поле, сила Лоренца, движение заряженной частицы в однородном магнитном поле, способы определения заряда и массы электрона. Ознакомьтесь с устройством лабораторного стенда и методом определения отношения  $e/m$ . Подготовьте ответы на вопросы к допуску.

### 3. Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Какие силы действуют на электрон, двигающийся со скоростью  $\vec{v}$  в электрическом  $\vec{E}$  и магнитном  $\vec{B}$  полях? Изобразите векторы этих сил в системе отсчёта (x,y,z) для случая, когда векторы  $\vec{v}$ ,  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  направлены соответственно по осям x, y, z.

2. Запишите уравнение движения электрона, равномерно вращающегося в магнитном поле, перпендикулярном вектору скорости. Получите формулу (3) на основе соотношений (1) и (2).

3. Объясните, почему с ростом магнитного поля анодный ток лампы начинает падать? Какой вид имеет траектория электронов при критическом значении индукции магнитного поля  $B_c$ ?

4. Каким образом связана критическая индукция магнитного поля  $B_c$  с анодным напряжением лампы? Как экспериментально определяется значение  $B_c$ ?

5. Поясните суть метода определения величины  $e/m$ , применяемого в лабораторной работе. Из какого экспериментального графика находится эта величина?

## 4. Литература

И. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1998 г.

## 5. Методика проведения эксперимента и описание установки

Величина  $e/m$  в лабораторной работе определяется методом анализа траекторий электронов в электрическом и магнитном полях.

Для реализации метода используется электронная вакуумная лампа с анодом цилиндрической формы (рис.1 а). Катод лампы, накаливаемый до высоких температур, испускает электроны вследствие явления термоэлектронной эмиссии. Под действием ускоряющего электрического поля электроны движутся от катода к аноду. Электроны, достигающие анода, образуют анодный ток лампы  $I_a$ , который измеряется миллиамперметром.

Для создания внешнего магнитного поля  $\vec{B}$  лампа помещается внутрь катушки с током - соленоида, так что вектор индукции  $\vec{B}$  параллелен оси анода лампы.

На рис.1 б-д показано, каким образом изменяется форма траекторий электронов при постепенном увеличении индукции магнитного поля  $B$  (вид сверху, вдоль оси анода). Соответствующая зависимость анодного тока  $I_a$  от  $B$  приведена на рис.2.

Если магнитное поле отсутствует ( $B = 0$ ), то электроны движутся по прямым радиальным линиям (рис.1. б). В присутствии магнитного поля на электроны действует сила Лоренца  $\vec{F}_L$ , направленная перпендикулярно векторам скорости  $\vec{v}$  и магнитного поля  $\vec{B}$ . Эта сила сообщает электронам центростремительное ускорение  $\vec{a}_c$  и они начинают двигаться по окружностям с радиусом  $R$ , определяемым из уравнения движения

$$F_L = evB = ma_c = \frac{mv^2}{R}. \quad (1)$$

При слабых магнитных полях искривление траекторий незначительно и почти не влияет на величину анодного тока (рис.1 в, горизонтальный участок  $I_a = \text{const}$  на рис. 2). Увеличивая  $B$ , можно достичь критического значения  $B_c$ , при котором траектории электронов касаются поверхности анода и радиус траекторий становится равным  $R = r_a/2$  (рис. 1 г). Наконец, при  $B > B_c$  радиус траекторий электронов уменьшается настолько, что они перестают достигать анода (рис. 1 д) и анодный ток должен спадать до нуля (рис. 2).

Найдём соотношение между анодным напряжением  $U_a$ , радиусом анода  $r_a$  и критическим магнитным полем  $B_c$ , предполагая, что все электроны имеют одинаковую скорость  $v$ .

Кинетическая энергия, приобретаемая электронами в лампе, равна работе электрического поля, то есть

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

Принимая  $B = B_c$  и  $R = r_a/2$  (рис. 1 г), из равенства (1) получаем

$$B_c = \frac{2m}{e} \cdot \frac{v}{r_a} \quad (3)$$

или, с учетом (2)

$$B_c^2 = 8 \left( \frac{m}{e} \right)^2 \cdot \frac{U_a}{r_a^2} \quad (4)$$

Согласно (4) зависимость  $B_c^2$  от  $U_a$  имеет вид прямой линии с наклоном

$$\frac{\Delta(B_c^2)}{\Delta U_a} = A = \frac{8m}{er_a^2} \quad (5)$$

Находя величину  $A$  из экспериментального графика  $B_c^2(U_a)$  можно определить искомое значение отношения заряда к массе электрона

$$\frac{e}{m} = \frac{8}{Ar_a^2}. \quad (6)$$

Следует, однако, учитывать, что реальная зависимость  $I_a(B)$ , в отличие от идеальной, ступенчатой (рис. 2), имеет вид плавно спадающей кривой (рис. 3 б). Это связано с тем, что электроны, вылетающие из нагретого катода, имеют распределение по скоростям с максимумом в окрестности вероятнейшей скорости  $v_{вер}$  (рис. 3 а).

Согласно равенству (3) критическое магнитное поле  $B_c$  пропорционально скорости электронов  $v$ , поэтому относительно медленные электроны начинают покидать анод уже при слабых магнитных полях. Это приводит к незначительному снижению анодного тока (область I на рис. 3 б). Далее, с ростом  $B$  на анод перестаёт поступать основная часть электронов со скоростями, близкими к  $v_{вер}$ , поэтому здесь наблюдается наиболее быстрый спад величины  $I_a$  (область II на рис. 3 б). Наконец, при дальнейшем увеличении  $B$  в анодном токе перестают участвовать наиболее быстрые электроны. Таких электронов, как и очень медленных, относительно немного, поэтому спад анодного тока здесь снова замедляется (область III на рис. 3 б).

Рассмотрим теперь, каким образом на основе экспериментальной кривой  $I_a(B)$  можно, во-первых, определить значение  $B_c$ , входящее в расчётные формулы (4), (6) и, во-вторых, оценить величину разброса электронов по скоростям  $\Delta v$ .

Если считать форму кривой  $I_a(B)$  приближённо симметричной, то вели-

чина  $B_c$  определяется, как значение  $B$ , при котором начальный анодный ток  $I_a$  (при  $B = 0$ ) снижается вдвое, то есть до  $I_a/2$  (точка  $C$  на рис. 3 б). Далее, из рис. 3 следует, что разброс скоростей электронов  $\Delta v$  относительно значения  $v_{вер}$  соответствует ширине участка спада на кривой  $I_a(B)$ . Это даёт возможность приближённо оценить относительный разброс скоростей электронов  $\Delta v/v_{вер}$  с помощью следующей графической процедуры. Через найденную точку  $C$  проводится касательная к кривой  $I_a(B)$ , которая пересекает прямую  $I_a = const$  и ось абсцисс в точках  $A$  и  $D$ . Соответствующие минимальное ( $B_{мин}$ ) и максимальное значения индукции магнитного поля с учётом формулы (3) можно связать с минимальной ( $v_{мин}$ ) и максимальной ( $v_{макс}$ ) скоростями электронов

$$B_{макс} = av_{макс}; B_{мин} = av_{мин}, \quad (7)$$

где введено обозначение  $a = 2m/er_a$ . Тогда, учитывая (7), получаем

$$\frac{B_{макс} - B_{мин}}{B_c} = \frac{v_{макс} - v_{мин}}{v_{вер}} = \frac{\Delta B}{B_c} = \frac{\Delta v}{v_{вер}}. \quad (8)$$

Поясним теперь устройство лабораторного стенда. Стенд состоит из двух электронных блоков и миллиамперметра для измерения анодного тока лампы (рис. 4). Блок 1 содержит лампу, помещённую внутрь соленоида. Блок 2 - источник питания, с которого на лампу подаются напряжение накала нити катода и анодное напряжение; в блоке 2 находятся вольтметр, измеряющий анодное напряжение лампы, и амперметр для измерения тока соленоида  $I_c$ . Расположение элементов регулировки и управления на передних панелях блоков 1 и 2 показано на рис. 4.

Величина индукции магнитного поля  $B$  внутри соленоида прямо пропорциональна току  $I_c$ , пропускаемому через соленоид:

$$B = vI_c,$$

величина коэффициента пропорциональности  $v$  приведена на стенде.

## 6. Порядок выполнения работы

### 6.1. Подготовка установки к работе.

1. Привести элементы регулировки и управления на передних панелях стендов 1 и 2 в исходное положение. В блоке 1: регулятор напряжения накала лампы 5 - в крайнее правое положение, регулятор тока соленоида 6 - в крайнее левое положение, регулятор анодного напряжения лампы 7 - в крайнее левое положение, выключатель амперметра 4 - в нажатое положение. В блоке 2: выключатель магнитного поля 2 - в выключенное положение. Переключатель шкалы миллиамперметра 2 - в крайнее левое положение.

2. Включить блок I в сеть (выполняет лаборант). Прогреть установку в течение 10 - 15 мин.

6.2.Измерение зависимости критической индукции магнитного поля  $B_c$  от анодного напряжения  $U_a$ .

1.При выключенном магнитном поле (ключ 2 на блоке 2 – рис. 4 - разомкнут) установить по вольтметру на блоке I анодное напряжение лампы равным  $U_{a1} = 40B$ . Измерить миллиамперметром ток анода  $I_{a1}$  и записать полученное значение в табл.1.

2. Включить магнитное поле (ключ 2 на блоке 2 замкнут). Не изменяя величины анодного напряжения, регулятором 6 на блоке I установить по амперметру такой ток соленоида  $I_{c1}$ , при котором анодный ток уменьшается вдвое по сравнению с величиной  $I_{a1}$ . Записать полученное показание амперметра  $I_{c1}$  в табл.1.

3.Провести измерения, аналогичные пунктам I и 2, при других значениях анодного напряжения в диапазоне до 115 В с шагом 15 В. Данные занести в табл.1.

6.3.Измерение относительного разброса скоростей электронов.

1.При выключенном магнитном поле (ключ 2 на блоке 2 разомкнут, регулятор тока соленоида 6 на блоке I в крайнем левом положении) установить анодное напряжение лампы  $U_a = 100B$ . Измерить анодный ток  $I_{a1}$ , записать полученное значение в табл. 2.

2.Включить магнитное поле (ключ 2 на блоке 2 замкнут) и провести измерения анодных токов в диапазоне токов соленоида до 2,4 А с шагом 0,2 А, Данные занести в табл.2.

## 7. Оформление отчёта

1.Используя формулу (9) по данным табл.1 рассчитать значения критической индукции магнитного поля  $B_c$  для различных значений анодного напряжения  $U_a$ . Рассчитать также величины  $B_c^2$ . Результаты записать в табл.1.

2.Построить график зависимости  $B_c^2(U_a)$  и по его наклону с помощью формул (5), (6) рассчитать отношение заряда к массе электрона  $e/m$ . Полученное значение  $e/m$  записать в табл.1. Сравнить это значение с табличным, относительное отклонение измеренного значения от табличного выразить в процентах.

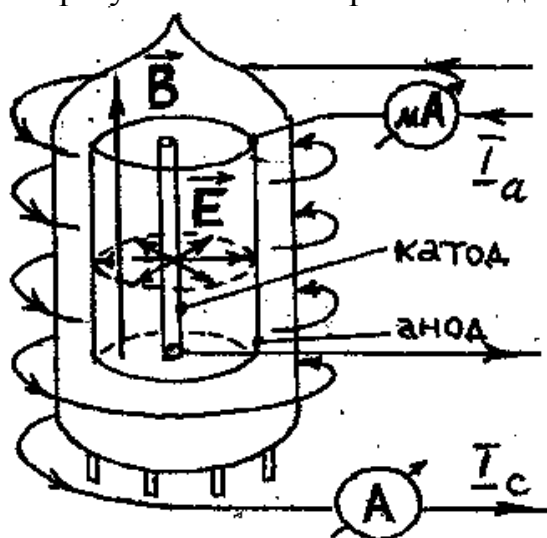
3.По данным табл.2. и формуле (9) рассчитать величины  $B$ , соответствующие различным токам соленоида  $I_c$ . Записать результаты в табл.2.

4.Построить график зависимости  $I_a(B)$  по данным табл.2. Способом, описанным на стр. 18 (см. также рис. 3), определить максимальное ( $B_{\text{макс}}$ ) и

минимальное ( $B_{мин}$ ) значения индукции магнитного поля, соответствующие границам участка спада кривой  $I_a(B)$ .

5. По формуле (3) и значению  $B_c$  для напряжения  $U_a = 100V$  (см. табл. I.) найти вероятнейшую скорость электронов при этом напряжении  $v_{вер} = \frac{B_c e r_a}{2m}$ . Пользуясь соотношением (8) определить относительный разброс скоростей электронов  $\frac{\Delta v}{v_{вер}}$ . Полученные данные записать в табл. 2.

6. По полученным результатам эксперимента сделать выводы.



а)

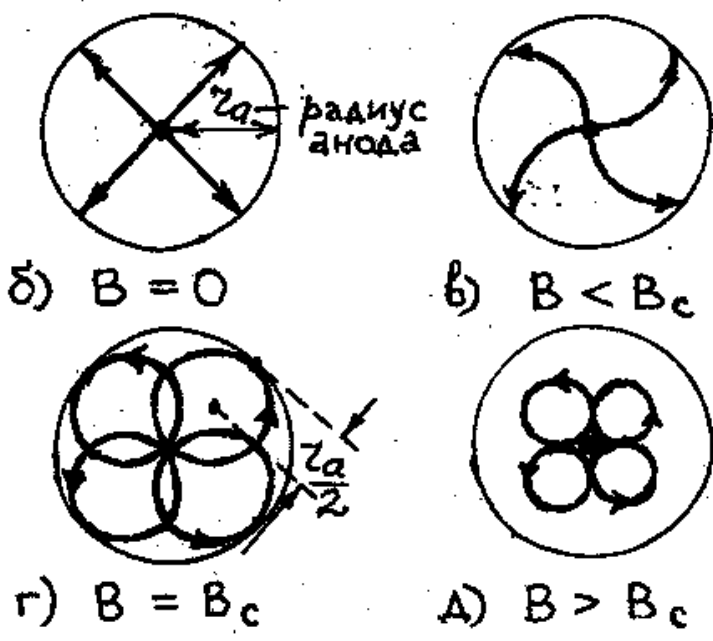


Рис. 1

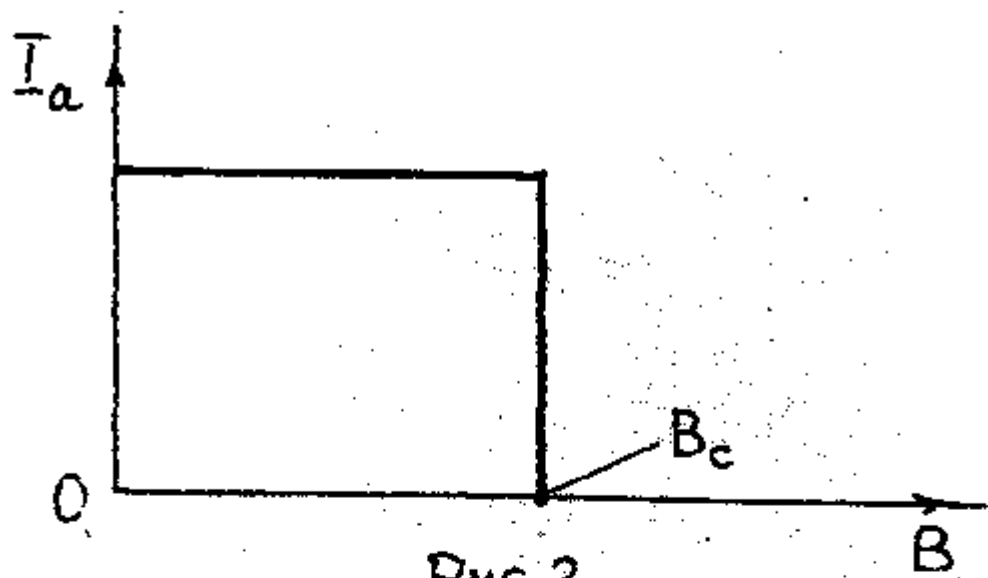


Рис. 2.

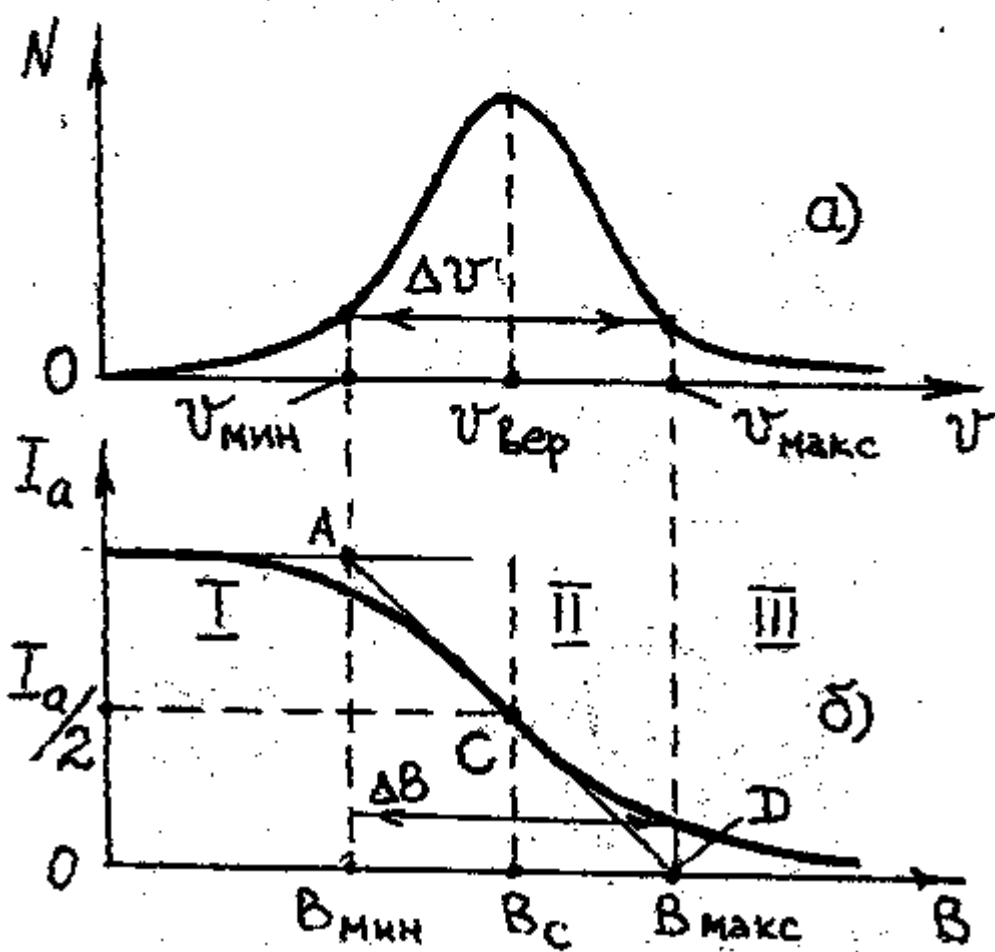
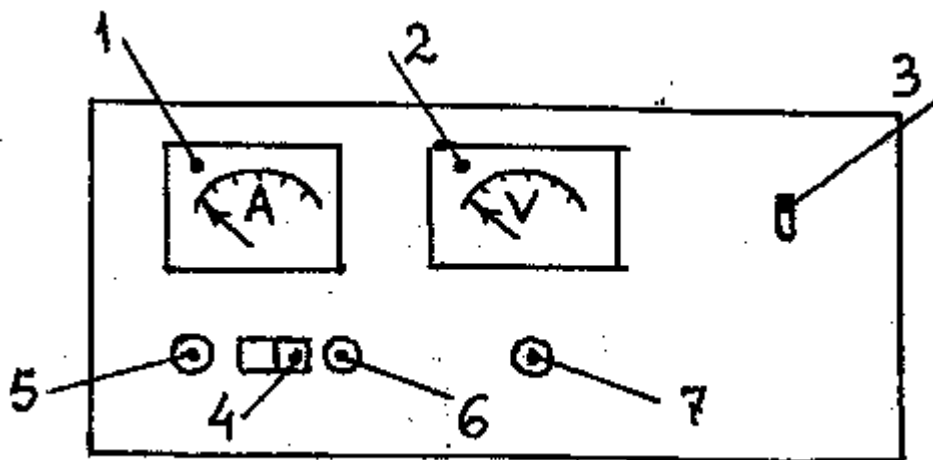
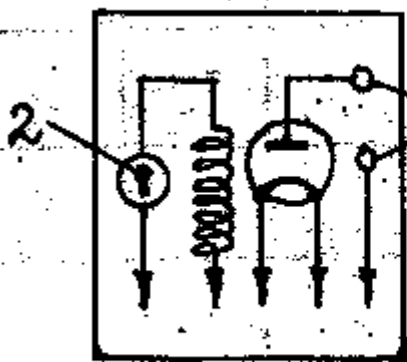


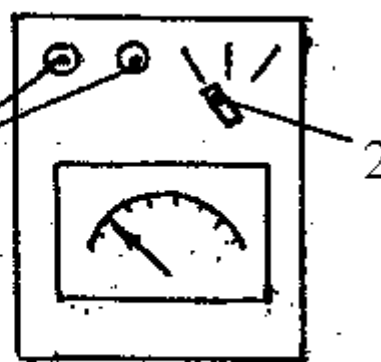
Рис. 3.



а) блок 1



б) блок 2



в) миллиамперметр

Рис. 4

Блок 1 – источник питания

- 1 – амперметр для измерения тока соленоида
- 2 – вольтметр, измеряющий анодное напряжение
- 3 – выключатель сети
- 4 – выключатель амперметра
- 5 – регулятор напряжения накала лампы
- 6 – регулятор тока соленоида
- 7 – регулятор анодного напряжения лампы

Блок 2 – лампа и соленоид

- 1 – гнезда подключения миллиамперметра
- 2 – выключатель магнитного поля

Миллиамперметр

- 1 – гнезда подключения к анодной цепи лампы
- 2 – переключатель пределов шкалы



Таблица 1

$U_a, В$						
$I_a, mA$						
$I_c, A$						
$B_c, Tл$						
$B_c^2, Tл^2$						
$e/m$						

Таблица 2

$I_a, mA$				• • •	
$I_c, A$				• • •	
$B, Tл$				• • •	
$v_{вер}, м/с$					
$\Delta v / v_{вер}$					