

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 Δv .

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 Δv 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.

I. 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 1 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.

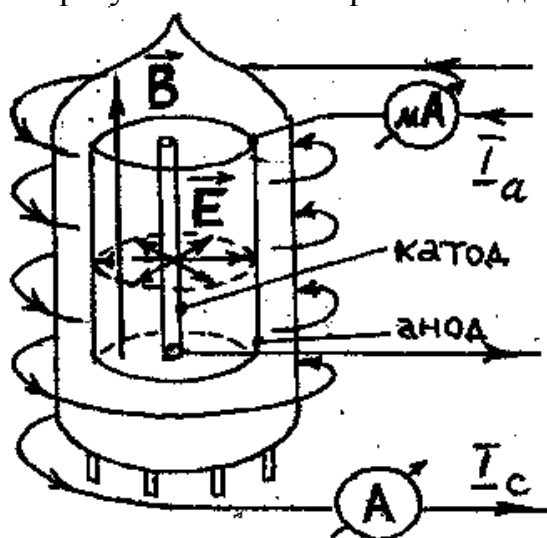
3. По данным табл. 2. и формуле (9) рассчитать величины B , соответствующие различным токам соленоида I_c . Записать результаты в табл. 2.

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 $U_a = 100B$ (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)

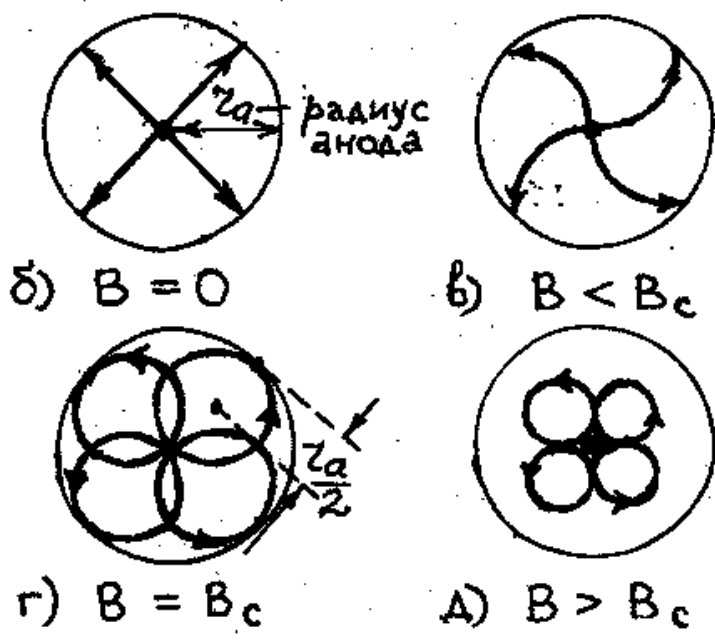


Рис. 1

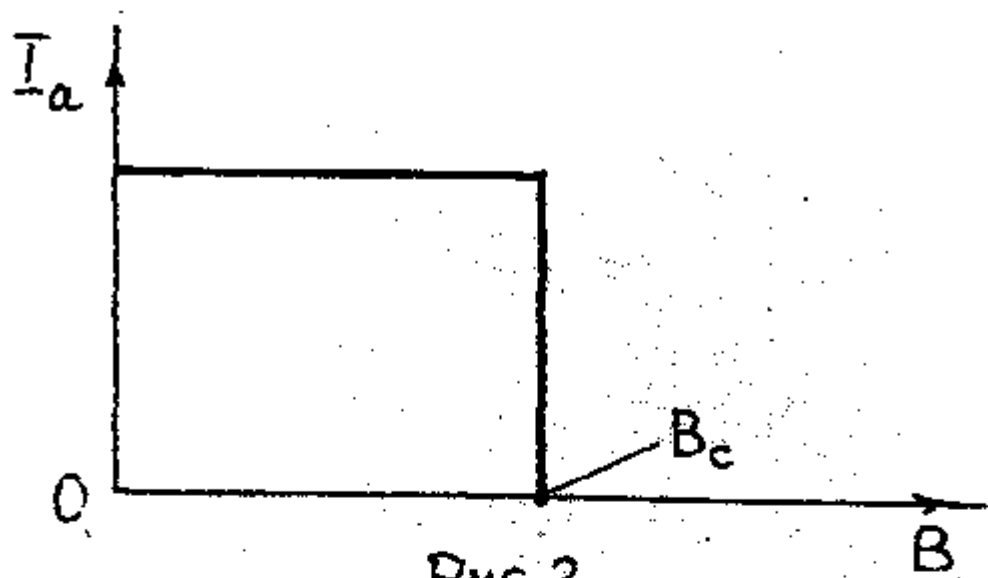


Рис. 2.

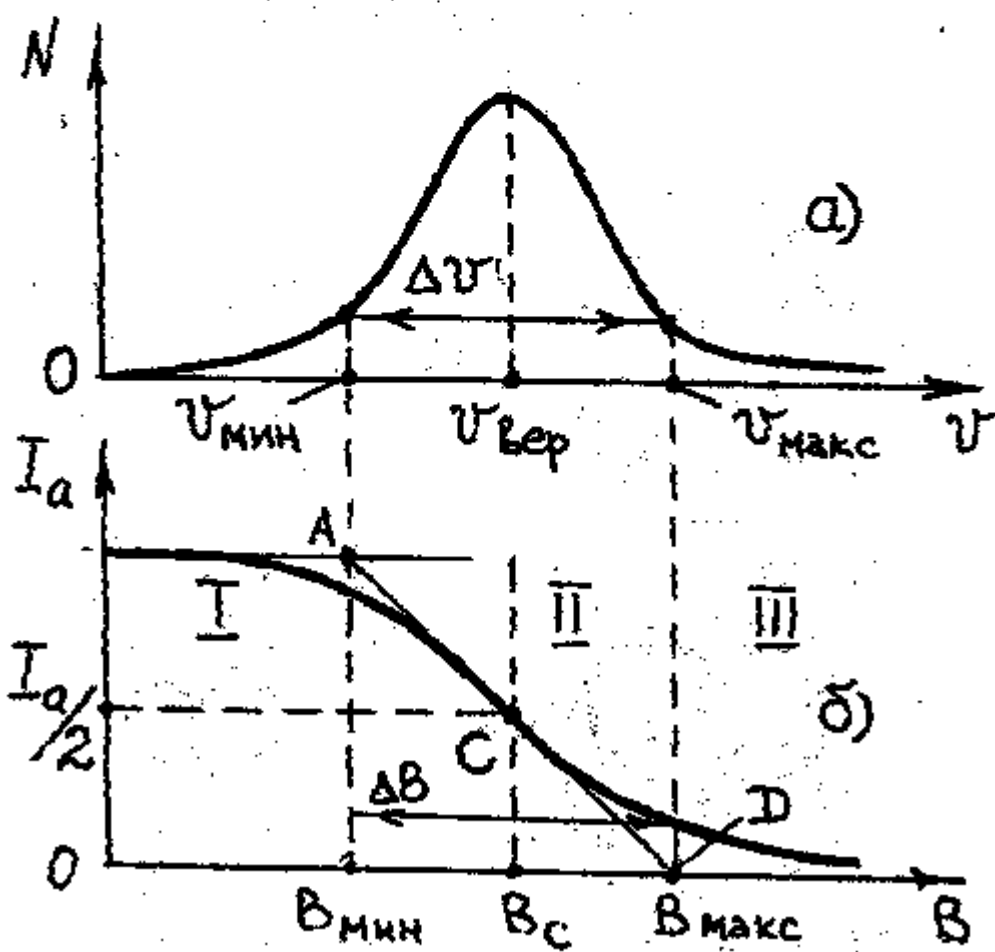
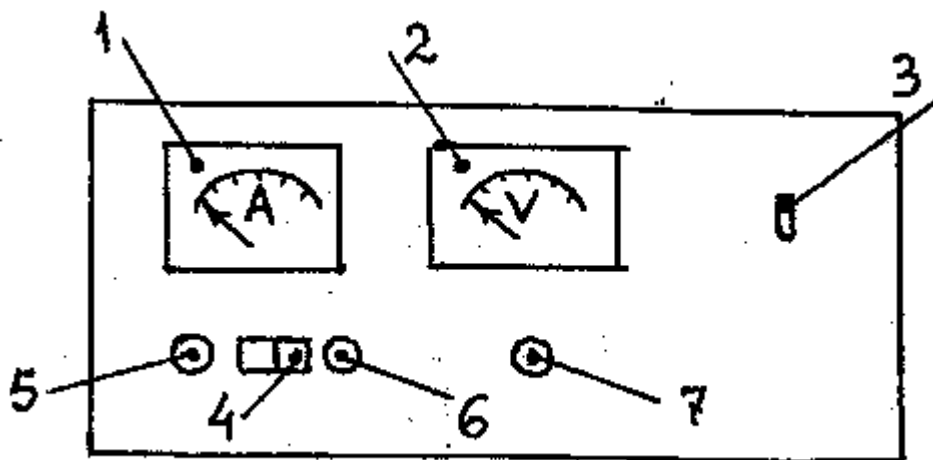
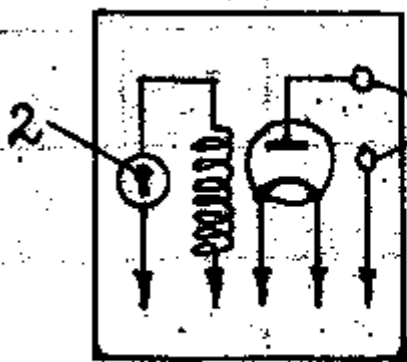


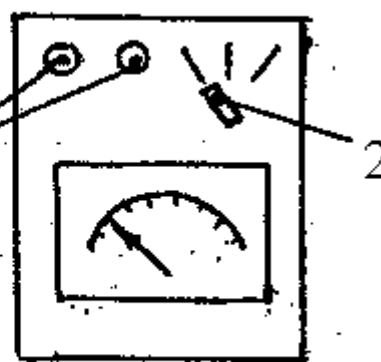
Рис. 3.



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				•••	
$B, Tл$				•••	
$v_{вер}, м/с$					
$\Delta v / v_{вер}$					