

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА К ЕГО МАССЕ (e/m)

Цель работы: определение отношения заряда электрона к его массе двумя способами.

### Описание лабораторной установки

Принципиальная схема установки приведена на рис. 5.1. Основные элементы находятся в лабораторном модуле. Источниками ЭДС служат два источника стабилизированного питания - ИП1 с ЭДС  $E_1$  и ИП2 с ЭДС  $E_2$  типа "Марс", подключаемые к модулю. Величину ЭДС показывают стрелочные вольтметры, расположенные на лицевых панелях источников. С помощью источника  $E_2$  создаётся разность потенциалов между катодом и анодом, а источник  $E_1$  необходим для возбуждения тока в соленоиде, создающем магнитное поле.

На передней панели модуля (рис. 5.2) имеется изображение схемы лабораторной работы, а также расположены гнёзда "РА1" и "РА2" для подключения амперметров, в качестве которых используются мультиметры. Объектом исследования служит магнетрон: соленоид, внутри которого расположена электронная лампа - вакуумный диод с соосными цилиндрическими электродами.

### Определение удельного заряда электрона

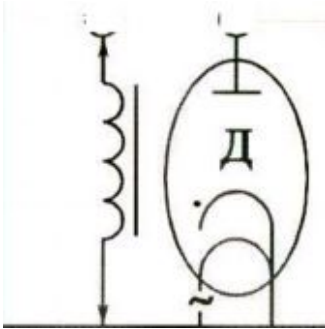


Рис. 5.2

### Теоретические положения и вывод рабочих формул

На заряженную частицу, движущуюся в стационарных электрическом и магнитном полях, действует сила  $\vec{F}$ , равная векторной сумме сил, действующих со стороны магнитного поля  $\vec{F}^m$  (сила Лоренца) и со стороны электрического поля  $\vec{F}^{эл}$  (кулоновская сила). Рассмотрим движение частицы в электрическом и магнитном полях. В электрическом поле на заряженную частицу действует кулоновская сила  $\vec{F}^M = q\vec{E}$ ,

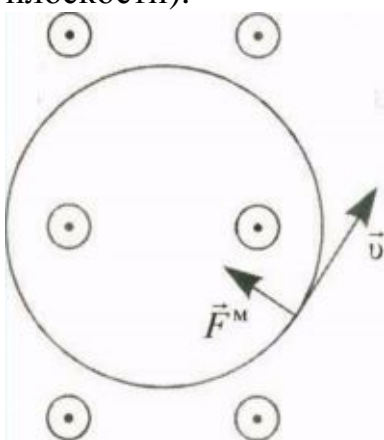
где  $q$  — заряд частицы;  $E$  - напряжённость электрического поля. Изначально покоившаяся положительная частица будет двигаться в электрическом поле вдоль линии напряжённости по направлению вектора  $E$ , а отрицательная - в противоположном направлении.

На движущуюся в магнитном поле заряженную частицу действует сила Лоренца  $\vec{F}^M = q[\vec{v} \times \vec{B}]$

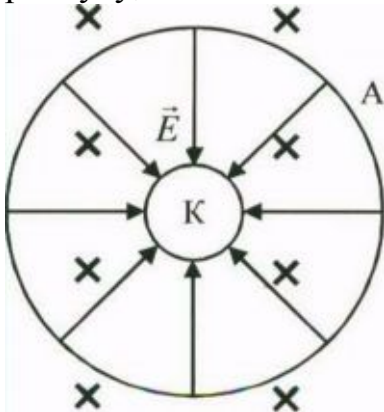
где  $\vec{B}$  — вектор магнитной индукции.

Направление силы Лоренца определяется по правилу левой руки. В однородном магнитном поле заряженная частица движется в общем случае по спирали либо по окружности (в том случае, когда вектор скорости перпендикулярен вектору магнитной индукции). На рис. 5.3 изображена траектория движения электрона в случае, когда  $\vec{v} \perp \vec{B}$ .

При наличии магнитного и электрического полей движение частицы носит сложный характер. В том случае, если электрическое и магнитное поля взаимно перпендикулярны, то траектория частицы лежит в плоскости, перпендикулярной к линиям магнитной индукции (если начальная скорость частицы была равна нулю или же вектор начальной скорости лежал в той же плоскости).



Такое движение осуществляется в магнетронах. Электрическое поле в магнетроне является радиальным, т.е. вектор напряженности  $\vec{E}$  направлен по радиусу, а его величина обратно пропорциональна



радиусу  $\left(\approx \frac{1}{r}\right)$ . Магнитное поле создается длинной катушкой (соленоидом).

Электронная лампа располагается внутри соленоида так, что его ось совпадает с осью симметрии лампы. Конфигурация электрического и магнитного полей в магнетроне представлена на рис.5.4.

При включении накала катода и анодного напряжения электроны, выходящие из катода в результате термоэлектронной эмиссии, движутся к аноду под действием кулоновской силы. При подключении соленоида к источнику тока в нем возникает магнитное поле. Так как магнитное поле оказывает влияние только на направление скорости движения частицы, то траектория электрона будет представлять собой кривую. На рис. 5.5 показан примерный вид траектории электрона при различных значениях магнитной индукции. Траектория 1 представляет собой прямую линию при отсутствии магнитного поля ( $B = 0$ ). При увеличении магнитной индукции (кривые 2,3,4) радиус кривизны траектории уменьшается, и при значении магнитной индукции  $B_{кр}$  электрон

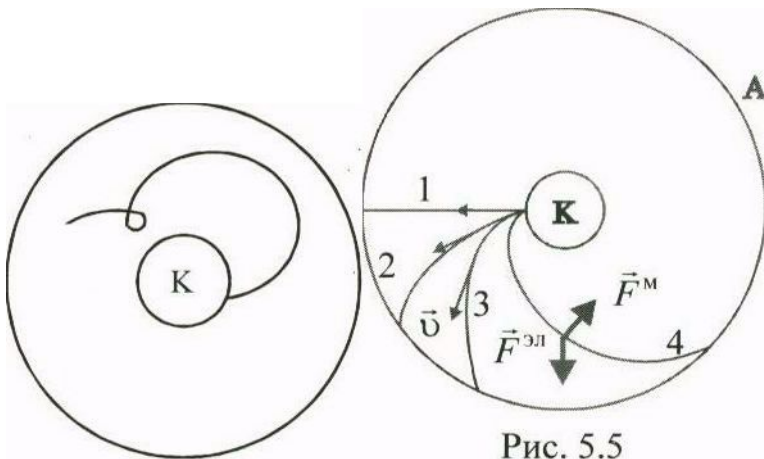
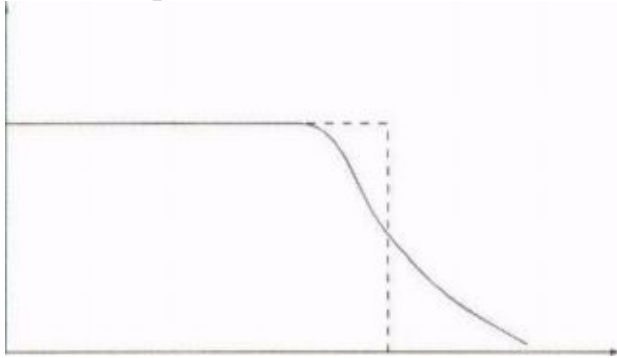


Рис. 5.5

подлетает к аноду по касательной.

Если значение магнитной индукции будет превышать  $B_{кр}$ , то электрон не попадет на анод и будет дрейфовать внутри лампы (рис. 5.6). Анодный ток в цепи лампы в этом случае будет равен нулю. Зависимость анодного тока от магнитной индукции приведена на рис. 5.7. Штриховая линия соответствует условиям, когда начальная скорость электронов равна нулю ( $v_0 = 0$ ). В этом случае при  $B > B_{кр}$  все электроны возвращались бы к катоду, не достигнув анода. Анодный ток  $I_a$  при этом исчезал бы быстро, как это показано на рис. 5.7 штриховой линией. На самом деле электроны, испускаемые накалившимся катодом, имеют отличные от нуля начальные тепловые скорости. Критические условия при этом достигаются для разных электронов при разных значениях  $B$ ,

поэтому анодный ток исчезает не сразу и реальная зависимость  $I_a = f(B)$  имеет вид, изображенный сплошной линией на рис. 5.7.



По мере удаления электрона от катода его скорость будет возрастать (за счет действия кулоновской силы) и радиус кривизны траектории увеличивается. При значении магнитной индукции, равном  $B_{кр}$  радиус кривизны траектории будет равен радиусу анода  $R_a$ , а скорость электрона вблизи анода будет направлена перпендикулярно его радиусу. Используя это обстоятельство, а также законы сохранения энергии и момента импульса, получим выражение для определения удельного заряда электрона.

При выводе уравнения, воспользуемся цилиндрической системой координат: положение электрона характеризуется расстоянием от оси  $r$ , полярным углом  $\Theta$  и смещением вдоль оси  $z$  (рис. 5.8).

Если радиус анода  $R_a$  много меньше его длины, то напряжённость электрического поля в середине цилиндра имеет только радиальную компоненту. Сила, действующая на электрон, в таком поле направлена вдоль радиуса и равна  $F_r^{эл} = eE_r$  (5.1)

где  $e$  – заряд электрона;  $E_r$  – напряженность электрического поля

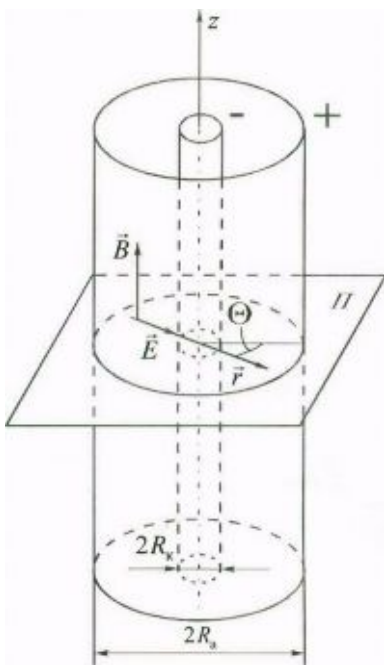


Рис. 5.8

Движение электрона в цилиндрической системе координат (рис, 5.9) можно представить в виде суммы поступательного движения вдоль оси  $z$  со скоростью  $\vec{v}_z$  (аксиальная составляющая) и вдоль радиуса  $r$  со скоростью  $\vec{v}_r$ , (радиальная составляющая), а также вращательного движения вокруг оси  $z$  с угловой скоростью  $\vec{\omega} = \frac{d\theta}{dt}$ . Тангенциальная составляющая скорости  $\vec{v}_\theta$  направлена по окружности радиусом  $r$  с центром, лежащим на оси  $z$ , её модуль может быть вычислен как  $v_\theta = \omega r$ . Векторы  $\vec{v}_z$ ,  $\vec{v}_r$  и  $\vec{v}_\theta$  взаимно перпендикулярны.

Используя составляющие вектора скорости и правило левой руки, можно

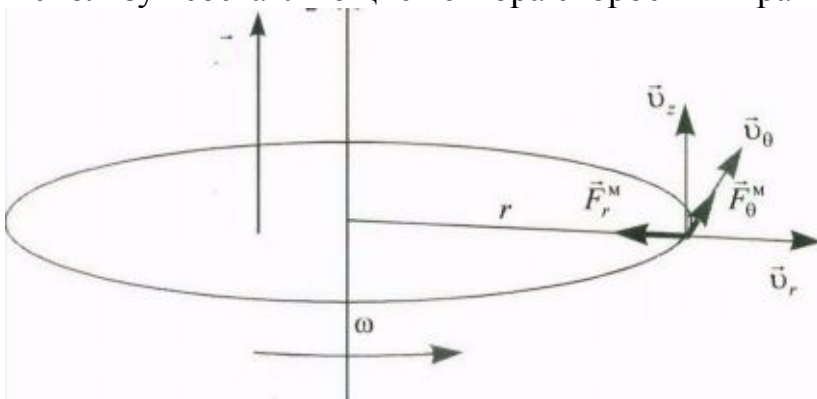


Рис. 5.9

разложить вектор силы Лоренца также на три взаимно перпендикулярные составляющие  $\vec{F}_z^M, \vec{F}_\theta^M$  и  $\vec{F}_r^M$ .

Поскольку магнитное поле направлено вдоль оси  $z$ , проекция силы Лоренца на эту ось  $\vec{F}_z^M$  равна нулю. Принимая указанное на рис. 5.9 направление векторов  $\vec{v}_r$  и  $\vec{v}_\theta$  за положительное, получаем следующие выражения для двух остальных составляющих:

$$\begin{aligned} F_\theta^M &= e v_r B; \\ F_r^M &= -e v_\theta B, \end{aligned} \quad (5.2)$$

где  $\vec{v}_r$  и  $\vec{v}_\theta$  соответствующие составляющие скорости электрона.

Движение электрона в плоскости  $\Pi$ , перпендикулярной оси  $z$ , можно описывать с помощью уравнения динамики вращательного движения относительно оси  $z$

$$\frac{dL_z}{dt} = M_z, \quad (5.3)$$

где  $L_z$  - момент импульса электрона относительно оси  $z$ ;  $M_z$  - проекция момента сил, действующих на электрон, на ось  $z$ .

По определению

$$L_z = m r v_\theta = m r^2 \frac{d\theta}{dt} \quad (5.4)$$

где  $m$  - масса электрона.

Моменты сил  $F_r^M$  и  $F_\theta^M$  относительно оси  $z$  равны нулю, следовательно,

$$M_z = r F_\theta^M = e r B v_r \quad (5.5)$$

С учётом уравнений (5.2), (5.4), (5.5) уравнение (5.3) принимает вид

$$\frac{d}{dt} (m r^2 \dot{\theta}) = e r B \frac{dr}{dt} = \frac{e B}{2} \frac{d(r^2)}{dt} \quad (5.6)$$

Интегрируя уравнение (5.6) и принимая во внимание знак заряда электрона, получаем

$$r^2 \dot{\theta} + C = |e| B \frac{r^2}{2m}, \quad (5.7)$$

где  $C$  - постоянная интегрирования, которую можно найти из начальных условий.

Если принять, что  $R_a \gg R_k$  ( $R_k$  - радиус катода),  $R_k \approx 0$  и начальная скорость электрона равна нулю, то можно считать, что  $C = 0$ . Таким образом, уравнение (5.7) принимает вид

$$r^2 \dot{\theta} = v_\theta = |e| B \frac{r}{2m}, \quad (5.8)$$

При перемещении электрона от катода с потенциалом  $\varphi_k$  до точки с потенциалом  $\varphi$  электрическое поле совершает работу

$$A_{эл} = e(\varphi_k - \varphi)$$

Работа магнитного поля равна нулю, так как движение электрона происходит в плоскости, перпендикулярной линиям магнитной индукции. Кинетическая энергия электрона возрастает за счёт работы электрического

поля, следовательно, если пренебречь начальной кинетической энергией электрона, то с учётом (5.8)

$$e(\varphi_k - \varphi) = \frac{mv^2}{2} = \frac{m}{2}(v_r^2 + v_\theta^2) = \frac{m}{2}\left(\dot{r}^2 + \left(\frac{reB}{2m}\right)^2\right) \quad (5.9)$$

Уравнение (5.9) характеризует движение электрона в пространстве между цилиндрическими коаксиальными электродами.

Величину  $B_{кр}$  можно определить из уравнения (5.9), приняв во внимание, что в этом случае радиальная составляющая скорости электрона при  $r=R_a$  обращается в нуль ( $\dot{r} = 0$ ):

$$B_{кр} = \sqrt{\frac{8Um}{eR_a^2}} \quad (5.10)$$

где  $U$  - разность потенциалов между катодом и анодом.

С другой стороны, критическое значение магнитной индукции можно определить, зная ток в соленоиде  $I_0$ , при котором анодный ток становится равным нулю:

$$B_{кр} = \mu_0 n I_0, \quad (5.11)$$

где  $n$  - число витков на единицу длины соленоида.

Приравнявая правые части (5.10) и (5.11), получаем формулу для определения  $e/m$ :

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{\mu_0^2 n^2 R_a^2 I_0^2} \quad (5.12)$$

При выполнении вычислений принять  $n = 10000 \text{ м}^{-1}$ , а значение  $R_a$  по рекомендации преподавателя.

Рис. 5.10

Величину тока  $I_0$  определим из зависимости  $I_a = f(I_c)$  (рис. 5.10), график которой аналогичен графику  $I_a = f(B)$  (рис. 5.6), поскольку  $B \sim I_a$ . Вычислить критическое значение  $I_0$  можно через значение анодного тока, равное половине максимального  $I_{a \text{ max}}$ .

## Опыт №1

### Определение $e/m$ методом отклонения электронов в магнитном поле

Работа выполняется в следующем порядке:

1. Присоединить кабель с розеткой от блока коммутации к вилке на задней панели модуля.
2. Подключить к сети источники питания ИП1 и ИП2.
3. Подсоединить к гнездам "РА1" в цепи соленоида мультиметр, установив на нем диапазон измерения тока 10 А.

4. Подсоединить к гнездам "РА2" в анодной цепи лампы мультиметр, установив на нем диапазон измерения тока 2 мА.
5. Тумблером "Т" включить накал катода.
6. Установить на источнике ИП2 напряжение  $U_a = 5$  В.
7. Изменяя ЭДС источника ИП1 в интервале 1 - 15 В с шагом в 1 В, снять зависимость  $I_a = f(I_c)$ .
8. Установив напряжение источника ИП2  $U_a = 8$  В, проделать те же измерения, что и в п. 7. Результаты измерений занести в табл. 5.1.
9. Построить зависимость  $I_a = f(I_c)$  для двух значений ускоряющего напряжения и определить графически значения критических токов  $I_{01}$  и  $I_{02}$ .
10. По формуле (5.12) рассчитать отношение  $e/m$  для двух значений  $U_1$  и  $U_2$  и найти его среднее значение.
11. Сравнить полученное значение  $e/m$  с табличными данными.

Таблица 5.1

$U_a = 12$ В		$U_a = 15$ В	
$I_a$ , А	$I_c$ , мА	$I_a$ , А	$I_c$ , мА
...			

### Опыт №2 Определение $e/m$ из вольт-амперной характеристики вакуумного диода

В опыте используется та же самая установка, что и в опыте №1 (рис. 5.1), но отсутствует источник питания ИП1. Вследствие этого магнитное поле в диоде отсутствует и электроны движутся лишь под действием электрического поля.

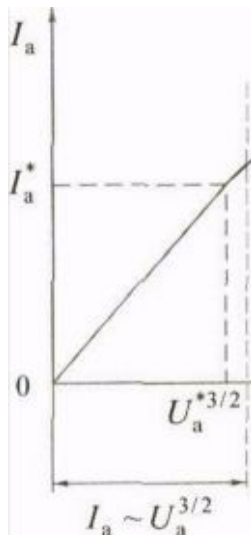


Рис.5.11



Можно показать, что при не очень больших  $U$  существует прямая пропорциональность между  $I_a$  и  $U^{3/2}$  (рис.5.11). В этом интервале для некоторого произвольное значения  $U^*$  можно определить по графику соответствующее значение  $I_a^*$ . Можно показать также, что значение  $e/m$  может быть рассчитано как

$$\frac{e}{m} = \frac{0,0641}{U^{*3}} \left( \frac{I_a^* R_a}{\varepsilon_0^2 l} \right), \quad (5.13)$$

где  $l$  - длина катода и анода.

Порядок выполнения работы следующий:

1. Присоединить кабель с розеткой от блока коммутации к вилке на задней панели модуля.
2. Подключить к сети источник питания ИП1 и блок коммутации.
3. Подсоединить к гнездам "РА2" в анодной цепи лампы мультиметр, установив на нем диапазон измерения тока 2 мА.
4. Тумблером "Т" включить накал катода.
5. Изменяя значение анодного напряжения от 0 до 15В через 1 В, снять вольт-амперную характеристику диода  $I_a = f(U_a)$ .
6. Результаты измерений записать в табл. 5.2.
7. Построить вольт-амперную характеристику вакуумного диода в виде графика  $I_a = f(U^{3/2})$
8. Выделить участок вольт-амперной характеристики, на котором приблизительно выполняется закон  $I_a \sim U^{3/2}$  (см. рис. 5.7).
9. Из вольт-амперной характеристики определить в выделенном интервале значения  $U^*$  и  $I_a^*$ .
10. По формуле 5.13 рассчитать отношение  $e/m$ , используя указанные преподавателем значения  $R_a$  и  $l$ .
11. Результаты вычислений записать в табл. 5-3.
12. Сравнить полученное значение  $e/m$  с табличными данными.

Таблица 5.2

$U, \text{В}$	$I_a, \text{мА}$
0	
1	
...	
15	

Таблица 5.3

$U^*, \text{В}$	$I_a^*, \text{мА}$	$e/m$
...		

### Контрольные вопросы

1. Сформулировать правило левой руки для определения направления силы Лоренца.
2. Какими свойствами обладают линии магнитной индукции?
3. Как определяется направление силы, действующей на заряд в электрическом поле?
4. Какой физический смысл имеет критическое значение магнитной индукции  $B_{кр}$  ?
5. Как определяется направление силы, действующей на заряд, движущийся в скрещенных электрическом и магнитном полях?

### РАБОТА № 5

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Состав работы:

- лабораторный модуль \_\_\_\_\_ 1 шт.
- источник питания типа "Марс" \_\_\_\_\_ 2 шт.
- микроультиметр типа "MAS 830B" \_\_\_\_\_ 2 шт.
- полка \_\_\_\_\_ 1 шт.

Параметры работы:

- число витков на единицу длины соленоида ,в/м \_\_\_\_\_
- диаметр анода, мм. \_\_\_\_\_ 10
- напряжение накала, В \_\_\_\_\_ 3 — 5.