

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 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 [1; 2]: силы, действующие на заряженную частицу в электрическом и магнитном полях и соответствующие уравнения движения частицы; соотношение между работой, совершаемой электрическим полем и изменением кинетической энергии частицы. Ознакомьтесь с методом управления траекториями электронов в магнетроне и способом опытного определения удельного заряда электрона  $e/m$ . Подготовьте ответы на вопросы к допуску.

### 3. Краткая теория

На частицу с зарядом  $q$ , движущуюся со скоростью  $\vec{v}$  во внешнем магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ , действует сила Лоренца:

$$\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}] ; F_L = qvB \sin \alpha , \quad (1)$$

где  $[\vec{v}, \vec{B}]$  – векторное произведение;

$\alpha$  – угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

Для частиц с положительным зарядом действует правило левой руки: если ладонь расположить навстречу вектору  $\vec{B}$ , а четыре пальца направить в сторону  $\vec{v}$ , то отогнутый большой палец покажет направление силы  $\vec{F}_L$ . Для частиц с отрицательным зарядом направление вектора противоположно.

Важно отметить, что сила Лоренца не совершает механической работы, так как вектор  $\vec{F}_L$  всегда перпендикулярен вектору скорости частицы  $\vec{v}$ .

Если магнитное поле однородно и вектор  $\vec{v}$  перпендикулярен  $\vec{B}$  ( $\alpha = 90^\circ$ ), то заряженная частица описывает окружность, радиус которой, согласно уравнению движения

$$F_L = ma , \quad qvB = \frac{mv^2}{R} ,$$

равен

$$R = \frac{mv}{qB} . \quad (2)$$

Если в пространстве, кроме магнитного поля, существует электрическое поле с напряжённостью  $\vec{E}$ , то на заряженную частицу действует результирующая сила

$$\vec{F}_L = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}] . \quad (3)$$

Равенство (3) определяет полное выражение для силы Лоренца и его иногда называют формулой Лоренца [1; 3].

В отличие от магнитного поля, электрическое поле совершает над заряженной частицей механическую работу. Например, электрон с нулевой начальной скоростью под воздействием ускоряющего напряжения  $U$  получает кинетическую энергию  $T$ , равную

$$T = \frac{mv^2}{2} = eU , \quad (4)$$

где  $m$  – масса электрона;  
 $e$  – заряд электрона.

#### ***4. Описание установки и методика проведения эксперимента***

Магнетроном называют устройство, в котором свободные электроны движутся в вакууме под воздействием электрического и магнитного полей. В нашем случае магнетрон (рис.1) представляет собой вакуумную лампу с анодом и катодом цилиндрической формы, имеющими общую ось. Электрическое поле создаётся источником постоянного напряжения, подключаемым между анодом и катодом. Нагреваемый до высоких температур катод вследствие термоэлектронной эмиссии испускает электроны. Ускоряемые электрическим полем, они образуют анодный ток  $I_a$ , измеряемый миллиамперметром. Электрическое поле в лампе обладает цилиндрической симметрией, при этом величина напряжённости поля обратно пропорциональна расстоянию  $r$  от общей оси катода и анода  $E \sim 1/r$ .

Для создания магнитного поля используется катушка (соленоид) с постоянным током. Внутри этого соленоида помещается лампа. Величина индукции магнитного поля  $B$  пропорциональна силе тока через соленоид  $I_c$ , измеряемой амперметром. Магнитное поле в лампе однородно, при этом векторы  $\vec{B}$  перпендикулярны векторам  $\vec{E}$ .

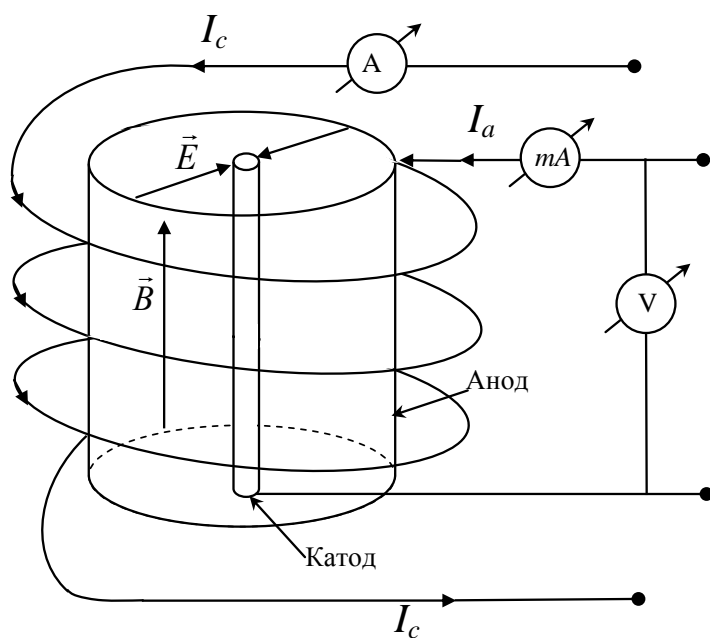


Рис. 1

Рассмотрим, каким образом магнитное поле воздействует на форму траекторий электронов и величину анодного тока. Допустим, что анодное напряжение задано и остаётся постоянным. При  $B=0$  (рис. 2, а) электроны, ускоряемые электрическим полем, движутся к аноду по прямым радиальным траекториям. В слабом магнитном поле (рис. 2, б) силы Лоренца незначи-

тельно искривляют траектории электронов, при этом все они достигают анода

и анодный ток  $I_a$  остаётся неизменным. При некоторой критической величине индукции  $B_c$  (рис. 2, в) траектории искривляются настолько, что электроны лишь касаются поверхности анода и при  $B > B_c$  анодный ток прекращается. Дальнейший рост величины  $B$  увеличивает кривизну траекторий и анодный ток  $I_a$  продолжает отсутствовать (рис. 2, г).

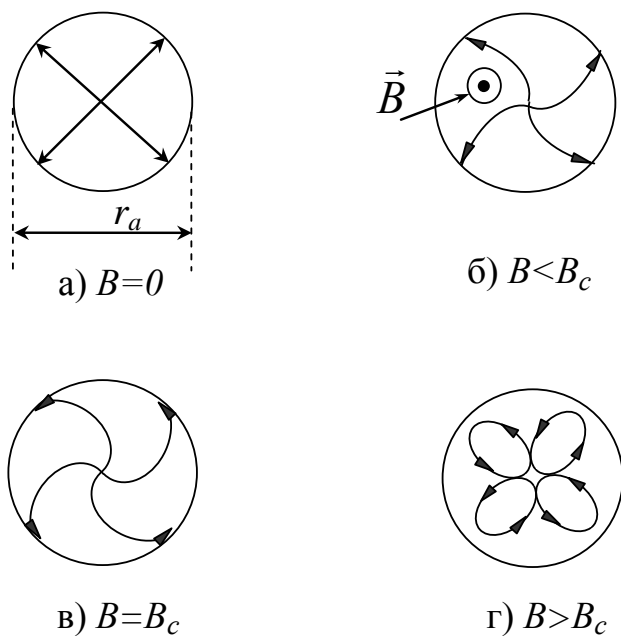


Рис. 2

Соответствующая ступенчатая зависимость  $I_a(B)$  показана сплошной линией на рис. 3. В эксперименте вместо резкого падения анодного тока  $I_a$  наблюдается его плавное снижение (пунктирная линия на рис. 3). Это связано с тем, что электроны, приближающиеся к аноду, имеют некоторое распределение

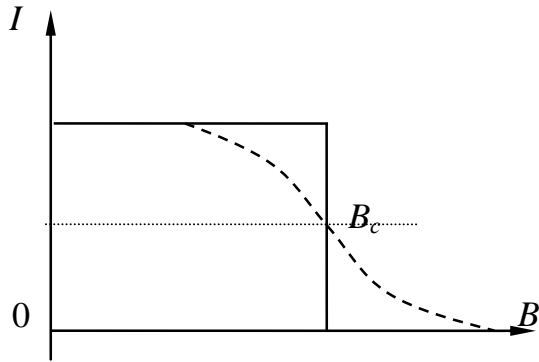


Рис. 3

по скоростям. При этом медленные электроны не достигают анода при  $B < B_c$ , а более быстрые – при  $B > B_c$ . Если считать участок спада кривой  $I_a(B)$  приближённо симметричным, то значение  $B_c$  можно оценивать по точке, где ток  $I_a$  падает вдвое по отношению к начальной величине при  $B=0$  (рис. 3).

Установим теперь количественные соотношения между параметрами траекторий электронов и характеристиками электрического и магнитного полей.

Как показано в работе [4], если радиус катода  $r_k$  значительно меньше радиуса анода  $r_a$ , то при  $B = B_c$  участок траектории вблизи анода можно приближённо считать дугой окружности с радиусом

$$R = \frac{r_a}{2}. \quad (5)$$

Это объясняется тем, что электроны ускоряются электрическим полем в основном вблизи катода. Далее электрическое поле резко ослабевает ( $E \sim 1/r$ ), и, приближаясь к аноду, электроны движутся с почти постоянной скоростью под воздействием преобладающей силы Лоренца.

Приравнивая правые части равенств (2) и (5) и полагая  $B = B_c$ , найдём скорость электронов вблизи анода:

$$v = \frac{eBr_a}{2m}, \quad (6)$$

где  $e$  – заряд;

$m$  – масса электрона.

Подставляя затем величину  $v$  в формулу (4) при  $U = U_a$ , находим выражение для критической индукции магнитного поля:

$$B_c^2 = \frac{8mU_a}{er_a^2}. \quad (7)$$

Согласно формуле (7) экспериментальный график  $B_c^2(U_a)$  должен иметь вид прямой линии, проходящей через начало координат и по коэффициенту его наклона  $a$  можно определить искомое отношение  $e/m$ :

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

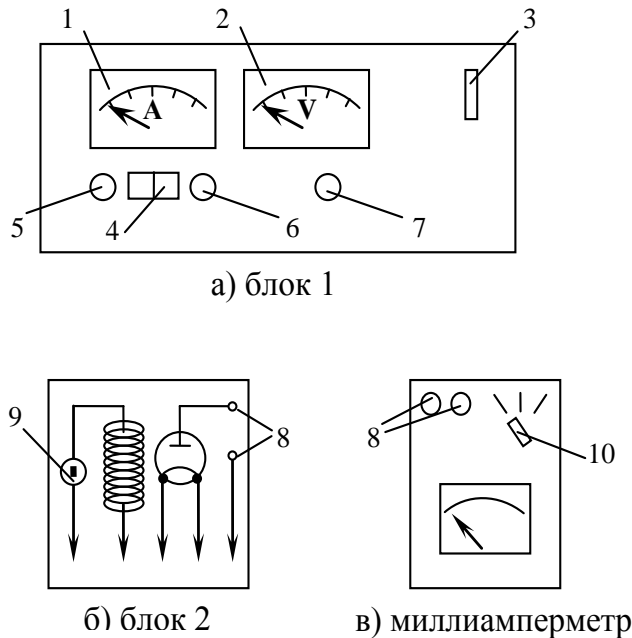


Рис. 4

Из формулы (8) следует, что если пренебречь погрешностью величины радиуса анода  $r_a$ , то для относительных погрешностей величин  $a$  и  $e/m$  справедливо равенство:

$$\frac{\Delta e/m}{e/m} = \frac{\Delta a}{a}, \quad (9)$$

где  $\Delta$  - обозначают соответствующие стандартные погрешности.

Поясним теперь устройство лабораторного стенда (рис. 4). Стенд состоит из двух блоков и миллиамперметра. Блок 1 (рис. 4, а) – источник питания, обеспечивающий необходимые напряжения и токи в лампе и соленоиде. В блоке 1 имеются амперметр 1 для измерения тока соленоида  $I_c$  и вольтметр 2, измеряющий анодное напряжение  $U_a$ . Блок 2 (рис. 4, б) содержит лампу, помещённую внутрь соленоида. На передней панели блока 2 (рис. 4, б) находятся

гнезда 8 для подключения миллиамперметра и выключатель магнитного поля 9. Величина индукции магнитного поля  $B$  пропорциональна току соленоида  $I_c$ :

$$B = bI_c, \quad (10)$$

величина коэффициента  $b$  указана на стенде.

Анодный ток лампы  $I_a$  измеряется миллиамперметром с переключателем пределов измерения 10 на рис. 4, в.

### **5. Порядок выполнения работы**

5.1. Подготовка установки к работе (выполняет лаборант):

1. Привести элементы регулировки и управления на блоках 1 и 2 в исходное положение: в блоке 1 установить регуляторы напряжения накала лампы 5, тока соленоида 6 и анодного напряжения 7 в крайние левые положения, выключатель амперметра 4 – в нажатое положение. В блоке 2 – перевести выключатель 9 в нижнее положение. Переключатель пределов шкалы миллиамперметра 10 установить в центральное положение.

2. Включить блок 1 в сеть (ручка 3). Перевести регулятор 5 в крайнее правое положение. Прогреть установку в течение 3-5 мин.

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

1. При выключенном магнитном поле (выключатель 9 на блоке 2 в нижнем положении), вращая регулятор 7, установить по вольтметру 2 на блоке 1 анодное напряжение  $U_{a1}$  (диапазон анодных напряжений для вашей бригады, указан в табл. 2). Подобрать предел измерения переключателем 10 на панели миллиамперметра (рис. 4, в), измерить анодный ток лампы  $I_{a1}$ . Записать результат в табл. 1.

2. Включить магнитное поле, переведя выключатель 9 на блоке 2 в верхнее положение. Не изменяя анодного напряжения  $U_{a1}$ , медленно вращая регулятор 6 на блоке 1 по часовой стрелке, установить такой ток соленоида  $I_c$ , при котором анодный ток уменьшается вдвое, по сравнению с величиной  $I_{a1}$ . Записать величину  $I_c$  в табл. 1.

3. Провести однократные измерения  $I_a$  и  $I_c$ , аналогично пунктам 1 и 2 для других анодных напряжений  $U_a$ , указанных в табл. 2.

Таблица 1

$U_a, В$						
$I_a, мА$						
$I_c, А$						
$B_c, Тл$						
$B_c^2, Тл^2$						
$e/m$						

Таблица 2

Номер бригады	$U_{a1}$	$U_{a2}$	$U_{a3}$	$U_{a4}$	$U_{a5}$
1,3	40	50	60	70	80
2,4	45	55	65	75	85

### **6. Обработка результатов измерений и оформление отчёта**

1. По формуле (10) и табличным значениям токов соленоида  $I_c$  определить величины критической индукции магнитного поля  $B_{ci}$  и квадраты этих величин  $B_{ci}^2$ . Данные занести в табл.1.

2. Открыть папку «Обработка результатов ЛР», расположенную на рабочем столе лабораторного компьютера; выбрать файл для графической обработки данных методом наименьших квадратов (МНК) под названием «Расчёт  $y = ax$  МНК». Внести в таблицу файла величины  $B_c^2$  и  $U_a$  из табл. 1. Приняв стандартную погрешность величины  $a$  равной её среднеквадратической погрешности  $\Delta a = \sigma_a$ , записать результат компьютерного расчёта  $a$  в стандартной форме в нижнюю строку табл. 1. Построить в тетради график зависимости  $B_c^2(U_a)$ , аналогичный полученному на экране компьютера, с указанием всех экспериментальных точек.

Примечание. 1. При записи результатов необходимо округлять величины погрешностей до одной-двух значащих цифр. Последние цифры значений величин должны быть того же разряда, что и в их погрешности.

2. Полагая  $\Delta a = \sigma_a$ , считаем доверительную вероятность результата, равной  $P=0,68$ .

3. По формуле (9), используя найденные величины  $a$  и  $\Delta a$ , рассчитать относительную погрешность опытного значения  $e/m$  в % и записать результат в нижнюю строку табл.1.

4. Сравнить опытное значение отношения  $e/m$  с табличной величиной  $e/m = 1,76 \cdot 10^{11}$  Кл/кг и сделать выводы по результатам эксперимента.

### **7. Вопросы для допуска к лабораторной работе**

1. Какие силы действуют на заряженную частицу, движущуюся со скоростью  $v$  в электрическом и магнитном полях? Покажите на рис. 2, б векторы сил, действующих на электрон, движущийся от катода к аноду в магнетроне.

2. Запишите уравнение движения электрона, равномерно вращающегося в магнитном поле с вектором индукции, перпендикулярном вектору скорости электрона. Как рассчитать радиус вращения электрона?

3. Как определить скорость электрона, прошедшего ускоряющее напряжение  $U$ , если известна его начальная скорость  $v_0$ ? Может ли сила Лоренца увеличить кинетическую энергию электрона?

4. Каким образом создаются электрическое и магнитное поля в магнетроне? Являются ли эти поля однородными? Как направлены векторы напряжённости электрического поля и индукции магнитного поля по отношению к вектору скорости электрона?

5. Почему с увеличением индукции магнитного поля анодный ток в магнетроне начинает падать? Как по показаниям миллиамперметра можно судить о форме траекторий электронов? Каким образом, измеряя анодный ток, определить критическую индукцию магнитного поля  $B_c$ ?

6. Какие предположения используются при получении теоретической зависимости критической индукции магнитного поля  $B_c$  от анодного напряжения  $U_a$ ?

7. На основе какого экспериментального графика определяется значение удельного заряда электрона? Каким образом оценивается относительная погрешность этой величины?



**8. Литература**

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Издательский центр «Академия», 2007.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. – СПб: Лань, 2008. – Т. 2.
3. Платунов Е.С., Самолётов В.А., Буравой С.Е. Физика: словарь-справочник. – СПб.: Питер, 2005.
4. Шимони К. Физическая электроника. – М.: Энергия, 1977.

**СОДЕРЖАНИЕ**

1. Цель работы.....	3
2. Подготовка к работе.....	3
3. Краткая теория.....	3
4. Описание установки и методика проведения эксперимента.....	4
5. Порядок выполнения работы.....	8
6. Обработка результатов измерений и оформление отчёта.....	9
7. Вопросы для допуска к лабораторной работе.....	10
8. Литература.....	11