

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2.12

---

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

---

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с одним из методов определения удельного заряда частицы и определить удельный заряд электрона.
2. Изучение поведения заряженной частицы в электрическом и магнитных полях.

#### 2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс физики: Учеб. пособие для студентов вузов. – [В 3-х т.]. – Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1989. – 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – 19-е изд. - Академия, 2012. – 560 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – Академия, 2009. – 720 с.

#### 3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Явления электронно́й эмиссии и разряда в газе позволяют получать потоки электронов и ионов, движущихся в вакууме практически без соударений. Электрические и магнитные поля, воздействуя на движущиеся заряженные частицы, изменяют их скорость и траекторию. В электрическом поле напряженности  $\vec{E}$  на частицу, обладающую зарядом  $q$ , действует сила

$$\vec{F} = q\vec{E}. \quad (1)$$

В магнитном поле на движущуюся заряженную частицу действует сила Лоренца

$$\vec{F}_л = q[\vec{v}, \vec{B}]. \quad (2)$$

где  $\vec{v}$  – скорость движения частицы;  $\vec{B}$  – вектор магнитной индукции.

Уравнение движения частицы в пространстве, где имеются и электрическое, и магнитное поля, согласно второму закону Ньютона имеет следующий вид:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{q}{m}(\vec{E} + [\vec{v}, \vec{B}]). \quad (3)$$

Это уравнение показывает, что движение заряженной частицы в силовых полях зависит от отношения  $q/m$ , которое называется **удельным зарядом** данной частицы. Следовательно, изучая движение различных заряженных частиц в электрическом и магнитном полях, можно определить удельный заряд частицы и тем самым получить сведения о природе частиц.

Удельный заряд электрона можно определить различными методами. Наиболее распространенными из них являются метод магнитной фокусировки и метод магнетрона.

В данной работе для определения удельного заряда электрона используют метод магнетрона.

**Магнетрон** – это двухэлектродная электронная лампа (диод), в которой управление током осуществляют внешним магнитным полем. Это поле создается соленоидом, внутри которого расположена лампа. Накаливаемый катод и холодный анод лампы имеют форму коаксиальных (соосных) цилиндров (рисунок 1).

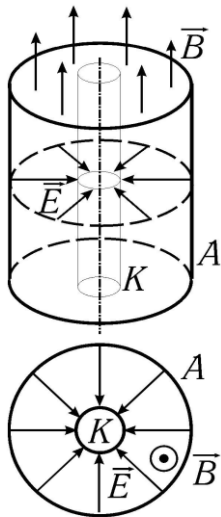


Рисунок 1. Лампа

Линии электрического поля  $\vec{E}$  внутри магнетрона направлены радиально от анода к катоду, а постоянное магнитное поле  $\vec{B}$  направлено вдоль оси катода. Таким образом, магнитное и электрическое поля взаимно перпендикулярны. Напряженность поля  $E$  максимальна у катода. В случае, если катод имеет форму тонкой нити, величина  $E$ , пропорциональная  $1/r$ , быстро уменьшается с ростом расстояния  $r$  от катода. Поэтому изменение скорости электронов до значения, равного  $v$ , происходит, в основном, вблизи катода, а при дальнейшем движении можно считать скорость практически постоянной.

Электрон, ускоренный разностью потенциалов  $U$ , приобрел кинетическую энергию

$$\frac{mv^2}{2} = eU$$

и имеет скорость

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \quad (4)$$

В отсутствие магнитного поля электроны, эмитированные катодом, движутся под действием электрического поля  $\vec{E}$  прямолинейно в радиальных направлениях. При этом в анодной цепи протекает ток, величина которого зависит от анодного напряжения и тока накала катода. При помещении лампы в магнитное поле  $\vec{B}$  на движущиеся электроны действует сила Лоренца. Она перпендикулярна линиям  $\vec{B}$ , т.е. лежит в одной плоскости с вектором скорости электрона  $v$ , нормальна ему и сообщает частице центростремительное ускорение. Согласно второму закону Ньютона

$$evB = \frac{mv^2}{R}. \quad (5)$$

Таким образом, электрон в магнетроне будет двигаться по окружности, радиус которой

$$R = \frac{mv}{eB}. \quad (6)$$

уменьшается с ростом индукции магнитного поля. На рисунке 2 показано, как изменяются траектории движения электрона в цилиндрическом магнетроне по мере увеличения магнитной индукции.

Существует *критическое* значение магнитной индукции  $B_{кр}$ , при котором, как показано на рисунке 2, траектории электронов касаются поверхности анода, а их радиус

$$R = r/2,$$

где  $r$  – радиус анода.

Согласно соотношениям (4) и (6) значение  $B_{кр}$  зависит от скорости электрона  $v$  и соответствующего ей анодного напряжения  $U_a$ :

$$B_{кр} = \frac{2}{r} \sqrt{\frac{2mU_a}{e}}. \quad (7)$$

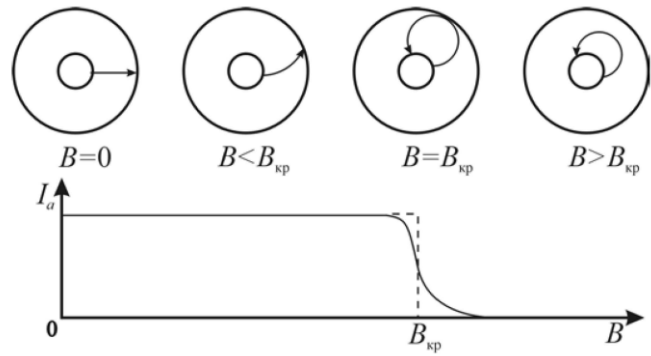


Рисунок 2. Траектория движения электрона при увеличении магнитной индукции

Если величина  $B < B_{кр}$ , то все электроны достигают анода и анодный ток имеет такое же значение, как и в отсутствие магнитного поля (горизонтальный участок графика на рисунке 2). Если  $B > B_{кр}$ , то электроны не долетают до анода и ток через лампу равен нулю. При  $B = B_{кр}$  ток должен резко снижаться (пунктирная линия на рисунке 2), однако наблюдается плавный ход кривой. Это обусловлено рядом причин: неточная коаксиальность катода и анода, краевые эффекты, вылет электронов из катода с различными скоростями и др.

Определив критическое значение индукции магнитного поля  $B_{кр}$  и используя соотношение (7), можно рассчитать удельный заряд электрона по формуле

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{(B_{кр}r)^2}. \quad (8)$$

Индукцию  $B$  вычисляют по формуле для поля короткого соленоида:

$$B = \frac{\mu_0 IN(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)}{2l}, \quad (9)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $I$  – ток, текущий в обмотке;  $N$  – число витков соленоида;  $l$  – длина обмотки;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы, показанные на рисунке 3 при размещении лампы в центре соленоида,

$$\cos \alpha_1 = -\cos \alpha_2 = \frac{l}{\sqrt{l^2 + d^2}},$$

где  $d$  – диаметр соленоида.

Подставляя значения косинусов в формулу (9), получаем критическую величину магнитной индукции

$$B_{кр} = \frac{\mu_0 I_{кр} N}{\sqrt{l^2 + d^2}}, \quad (10)$$

где  $I_{кр}$  – значение тока в соленоиде, соответствующее критическому значению магнитной индукции  $B_{кр}$ .

С учетом выражения (10) расчетная формула (8) для определения удельного заряда электрона принимает следующий вид:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a(l^2 + d^2)}{(\mu_0 r N I_{кр})^2}. \quad (11)$$

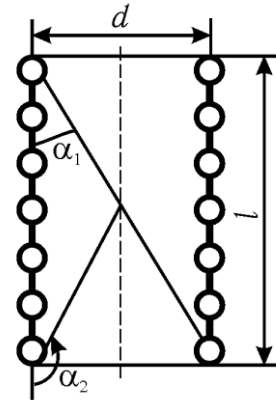


Рисунок 3. Соленоид

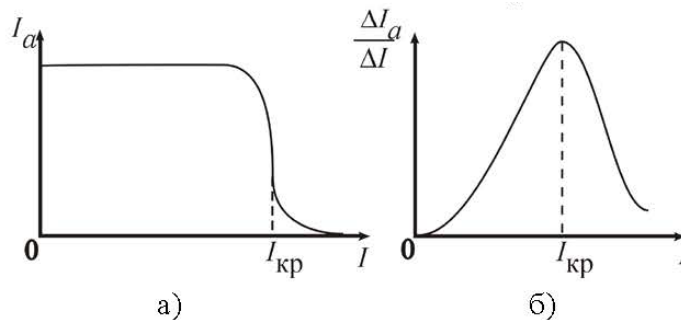


Рисунок 4. Определение критического тока

Для определения критического тока  $I_{кр}$  используют экспериментальную зависимость анодного тока от тока в соленоиде:  $I_a = f(I)$  (рисунок 4а), которая по виду подобна зависимости  $I_a = f(B)$ : при критическом токе в соленоиде наблюдается резкое снижение анодного тока  $I_a$ .

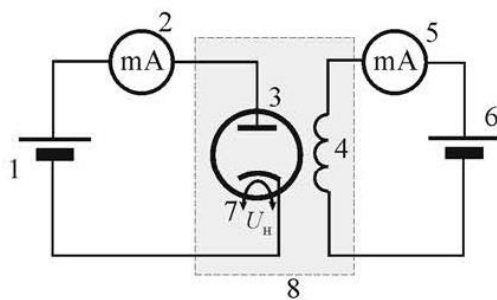
Крутизну кривой  $I_a = f(I)$  показывает отношение приращений анодного тока и тока в соленоиде  $\frac{\Delta I_a}{\Delta I}$ . При этом максимум кривой  $\frac{\Delta I_a}{\Delta I} = f(I)$  (рисунок 4б) соответствует искомому значению  $I_{кр}$ .

#### 4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Регулируемый источник постоянного напряжения.
2. Стабилизированные источники постоянного напряжения.
3. Миниблок «Магнетрон».
4. Мультиметры.

#### 5. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для определения удельного заряда электрона методом магнетрона собирают электрическую цепь, схема которой приведена на рисунке 5, монтажная схема – на рисунке 6.



1 - источник постоянного напряжения «+15 В»;  
 2 - мультиметр для измерения анодного тока (режим  $A \rightleftharpoons 2 \text{ mA}$ , входы COM, mA); 3 - вакуумный диод; 4 - соленоид; 5 - мультиметр для измерения тока соленоида (режим  $A \rightleftharpoons 200 \text{ mA}$ , входы COM, A); 6 - регулируемый источник постоянного напряжения «0...+15 В»; 7 - напряжение накала катода  $U_n$ ; 8 - миниблок «Магнетрон»

Рисунок 5. Электрическая схема

Вакуумный диод 3 подключают к источнику постоянного напряжения «+15 В». Анодный ток лампы  $I_a$  измеряют цифровым мультиметром 2. Напряжение  $U_n$  на нить накала лампы подают от источника постоянного напряжения «-15 В». Диод установлен внутри соленоида так, что ось анода лампы совпадает

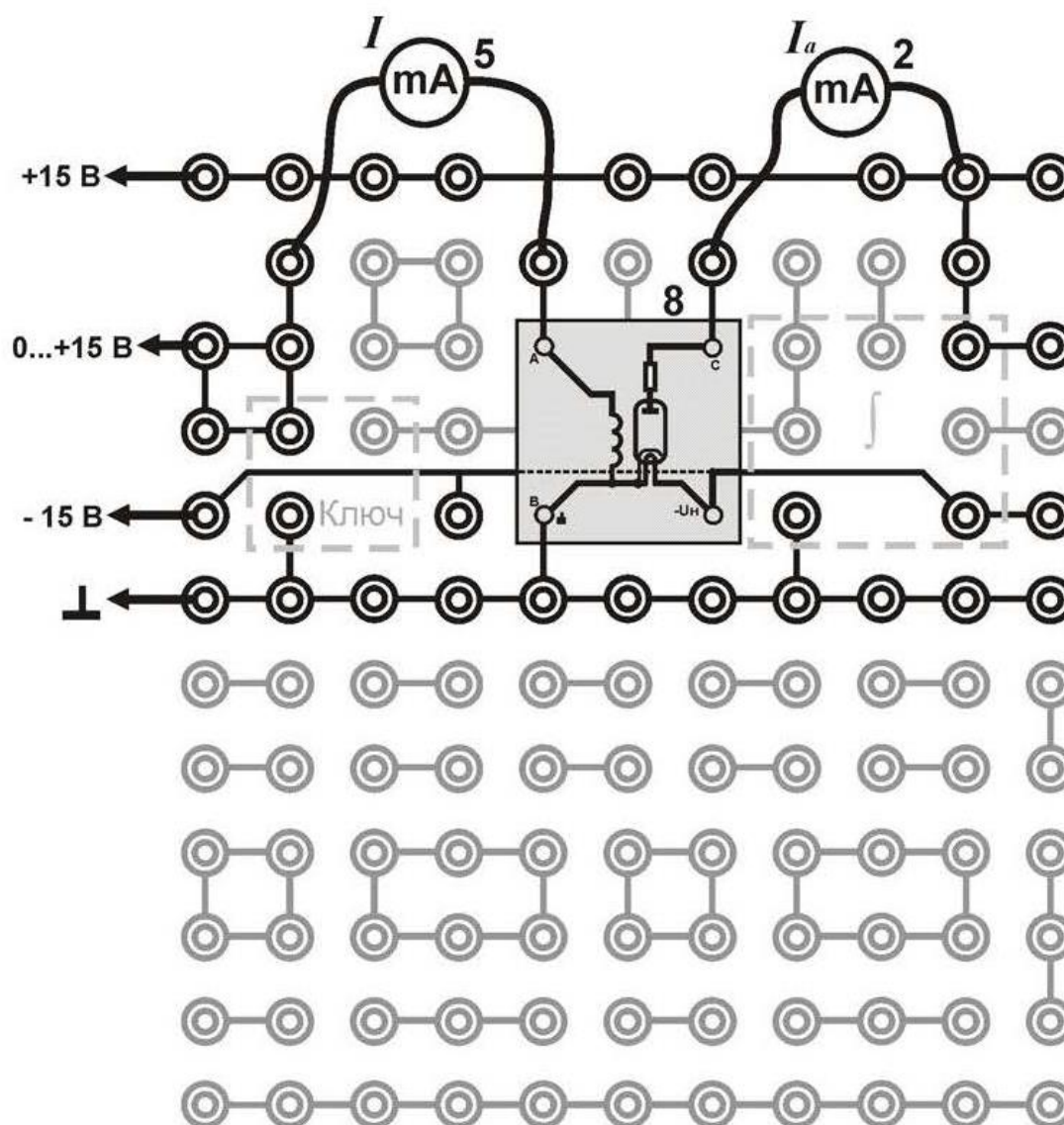


Рисунок 6. Монтажная схема

с осью соленоида. Соленоид 4 создает магнитное поле, индукцию которого регулируют путем изменения тока  $I$  в обмотке с помощью кнопок установки напряжения «0... 15 В». Ток в обмотке соленоида измеряют мультиметром 5.

## 6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Соберите электрическую цепь по монтажной схеме, представленной на рисунке 6.

2. Включите кнопкой «Сеть» питание блока генераторов напряжений. Нажмите кнопку «Исходная установка».

3. Кнопками установки напряжения «0...15 В» установите ток  $I \approx 90$  мА в обмотке соленоида и измерьте по мультиметру 2 полученные значения анодного тока  $I_a$ . Результаты (значения токов  $I$  и  $I_a$ ) запишите в таблицу. Проведите аналогичные измерения увеличивая ток на  $\approx 5$  мА до 185 мА.

4. Выключите кнопками «Сеть» питание блока генераторов напряжения и блока мультиметров.

Таблица

№	$I$ , мА	$I_a$ , мА	$\Delta I$ , мА	$\Delta I_a$ , мА	$\frac{\Delta I_a}{\Delta I}$
1					
2					
3					
...					
...					
20					

Параметры магнетрона:  $d = 37$  мм,  $l = 36$  мм,  $N = 2800$  витков,  $r = 3$  мм,  $U_a = 15$  В.

## 7. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Найдите изменение (убыль) анодного тока  $\Delta I_a = \Delta I_{a_i} - \Delta I_{a_{i+1}}$  и тока в соленоиде  $\Delta I = \Delta I_i - \Delta I_{i+1}$ . Вычислите величину  $\frac{\Delta I_a}{\Delta I}$ . Результаты запишите в таблицу.

2. Постройте на одном листе (на одном поле графика, см. рисунок 4) две зависимости  $I_a = f(I)$  и  $\frac{\Delta I_a}{\Delta I} = f(I)$ .

3. Определите значение критического тока  $I_{кр}$  обмотке соленоида по положению по положению максимума на графике  $\frac{\Delta I_a}{\Delta I} = f(I)$ .

4. По формуле (11) вычислите величину удельного заряда электрона  $\frac{e}{m}$ .

5. Сравните полученное значение с табличным (согласно справочным данным  $\frac{e}{m} = 1,7588047 \cdot 10^{11}$  Кл/кг и оцените относительную погрешность результата измерений по формуле

$$\varepsilon = \frac{\left(\frac{e}{m}\right)_{\text{табл}} - \left(\frac{e}{m}\right)_{\text{эксп}}}{\left(\frac{e}{m}\right)_{\text{табл}}} \cdot 100\%.$$

6. Сделать выводы по работе.

## 8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите поведение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях с выводом параметров траектории частицы.

2. Покажите, как направлены вектора  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  в магнетроне.

3. Выведите расчетную формулу для удельного заряда.

4. Опишите другие способы определения удельного заряда частиц.

5. Запишите выражение для силы Лоренца в векторной форме и укажите, как определяется направление этой силы.

6. Объясните, как изменилась бы форма траектории, если бы заряженная частица имела вдвое большую массу, вдвое больший заряд?