

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

ЦЕЛЬ: ознакомиться с одним из методов определения удельного заряда частицы и определить удельный заряд электрона.

ОБОРУДОВАНИЕ: регулируемый источник постоянного напряжения, стабилизированные источники постоянного напряжения, миниблок «Магнетрон», мультиметры.

Введение

Явления электронной 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 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 v - скорость движения частицы; B - вектор магнитной индукции.

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

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{Q}{m}(\vec{E} + [\vec{v}, \vec{B}])$$

Это уравнение показывает, что движение заряженной частицы в силовых полях зависит от отношения $\frac{Q}{m}$, 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.

Метод измерений

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

холодный анод лампы имеют форму коаксиальных (соосных) цилиндров (см. рис. 1).

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 \vec{E} максимальна у катода. В случае, если катод имеет форму тонкой нити, величина \vec{E} , пропорциональная $\frac{1}{r}$, быстро уменьшается с ростом расстояния r от катода. Поэтому изменение

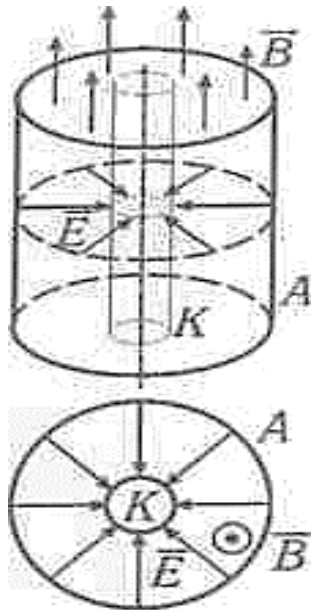


Рис. 1.

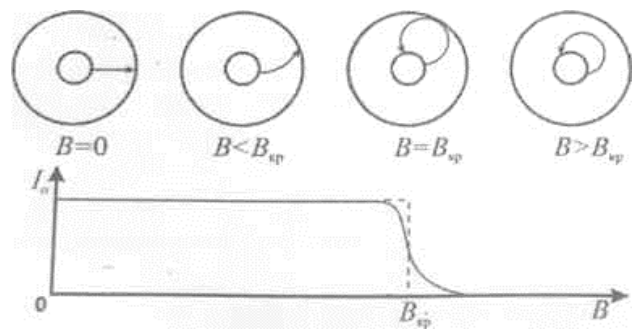


Рис. 2. Траектория движения электрона при увеличении магнитной индукции

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

$$v = \sqrt{2Uelm} \quad (4)$$

В отсутствие магнитного поля электроны, эмитированные катодом, движутся под действием электрического поля 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 B на движущиеся электроны действует сила Лоренца. Она перпендикулярна линиям B , т.е. лежит в одной плоскости с вектором скорости электрона v , нормальна ему и сообщает частице центростремительное ускорение. Согласно второму закону Ньютона

$$evB = mv^2/R. \quad (5)$$

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

$$R = mvleB \quad (6)$$

уменьшается с ростом индукции магнитного поля.

На рис. 2 показано, как изменяются траектории движения электрона в цилиндрическом магнетроне по мере увеличения магнитной индукции.

Существует *критическое* значение магнитной индукции $\vec{B}_{кр}$, при котором, как показано на рис. 2, траектории электронов касаются поверхности анода, а их радиус $R = r/2$, где r - радиус анода. Согласно соотношениям (4) и (6) значение зависит от скорости электрона v и соответствующего ей анодного напряжения U_a :

$$U_a = \frac{2}{r} \sqrt{\frac{2mU_a}{e}} \quad (7)$$

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 рис. 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 графике рис. 2). однако наблюдается плавный ход кривой. Это обусловлено рядом причин: неточная коаксиальность катода и анода, краевые эффекты. вылет электронов из катода с различными скоростями

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м и др.

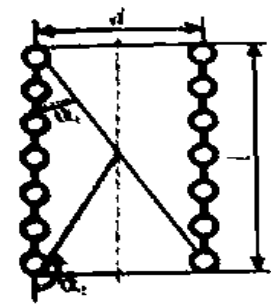


Рис. 3. Соленоид

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

$$B = \mu_0 IN(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)/2l \quad (9)$$

где, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м- магнитная постоянная, I - ток текущий в обмотке, N - число витков соленоида, l - длина обмотки, α_1 и α_2 - углы показанные на рис 3 при размещении лампы в центре соленоида:

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

где, d - диаметр соленоида. Подставляя значения косинусов в формулу (9) получаем критическую величину магнитной индукции:

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

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:

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

Для определения критического тока используют экспериментальную зависимость анодного тока от тока в соленоиде: $I_a = f(I)$ (рис. 4 а), 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 $f(I) = \frac{\Delta I_a}{\Delta I}$ (рис. 4 б) соответствует искомому значению $I_{кр}$.

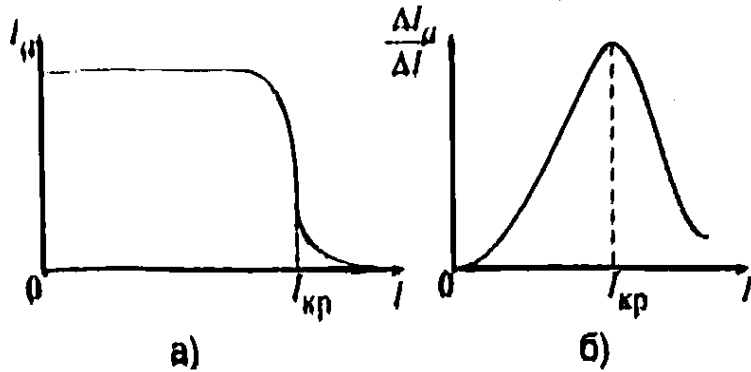


Рис. 4. Определение критического тока

Описание установки

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

Вакуумный диод 3 подключают к источнику постоянного напряжения «+15 В».

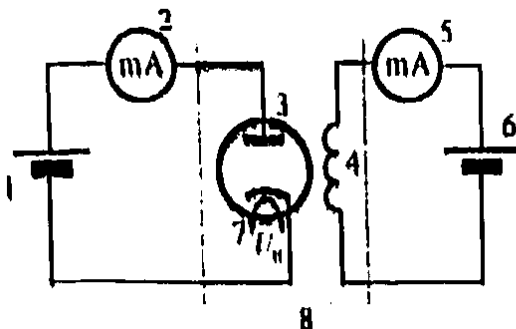


Рис. 5. Электрическая схема:

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

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

Порядок выполнения работы

Выполнение измерений

1. Соберите электрическую цепь по монтажной схеме, представленной на рис. 6.
2. Включите кнопкой «Сеть» питание блока генераторов напряжений. Нажмите кнопку «Исходная установка».
3. Кнопками установки напряжения «0...15 В» установите ток $I \approx 90\text{ мА}$ 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 $\approx 2,5\text{ мА}$ до 200мА.

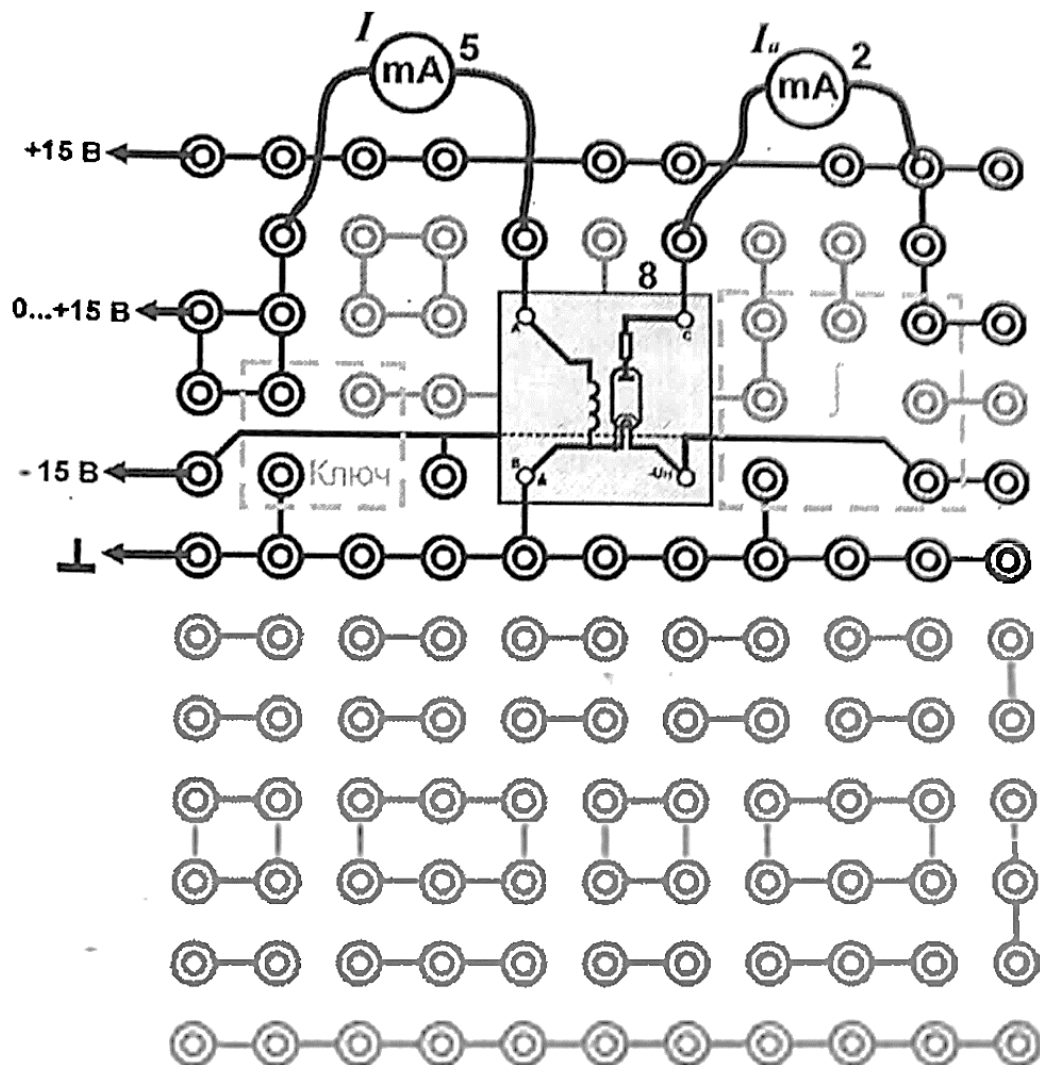


рис 6 монтажная схема: 2,5,8- см рис 5

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

Таблица

Параметры магнетрона: $d = 37 \text{ мм}; N = 2800; l = 36 \text{ мм}; r = 3 \text{ мм}; U_a = 15 \text{ В}$					
№	$I, \text{ мА}$	$I_a, \text{ мА}$	$\Delta I, \text{ мА}$	$\Delta I_a, \text{ мА}$	$\Delta I_a / \Delta I$
1	90				
2					
3					
·	·				
·	·				
·	·				
45					

Обработка результатов измерений

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

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

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

4. По формуле (11) вычислите величину удельного заряда электрона .

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

$$\delta = \frac{\left(\frac{e}{m}\right)_{\text{таб}} - \left(\frac{e}{m}\right)_{\text{экс}}}{\left(\frac{e}{m}\right)_{\text{таб}}} \cdot 100\%$$

6. В выводе сделайте анализ использованного метода определения удельного заряда электрона: укажите возможные источники систематических и случайных погрешностей, пути их устранения или снижения.

Контрольные вопросы

1. Запишите формулы для сил $\vec{F}_э$ и $\vec{F}_м$ действующих на заряженную частицу в электрическом и магнитном полях.
2. Какие параметры (скорость \vec{v} , $|\vec{v}|$, ускорения \vec{a} , \vec{a}_n , \vec{a}_τ , радиус кривизны траектории) изменяются при движении заряженной частицы:
 - а) под некоторым углом к силовой линии электростатического поля,
 - б) под действием силы Лоренца?
3. Какие уравнения необходимо использовать для определения:
 - а) скорости заряженной частицы, приобретенной в электрическом поле,
 - б) радиуса кривизны траектории электрона в магнитном поле?
4. Покажите на рисунке направление сил $\vec{F}_э$ и $\vec{F}_м$ действующих в магнетроне на электрон. Движущийся от катода к аноду
5. Как и почему изменяются при этом движении модули сил $\vec{F}_э$ и $\vec{F}_м$?
6. От чего зависят вектор и модуль скорости движения электрона в магнетроне ?
7. Покажите на рисунке направление векторов \vec{E} и \vec{B} в магнетроне.
8. От чего зависят форма траектории электрона в магнетроне и значение критической индукции $B_{кр}$?
9. Покажите на рисунке форму траектории электрона в магнетроне при различных значениях магнитной индукции ($B < B_{кр}$, $B = B_{кр}$, $B > B_{кр}$)
10. Укажите назначение в электрической цепи мультиметров?
11. От каких величин зависит значение анодного тока I_a , магнетрона?
12. Как зависит величина анодного тока I_a , магнетрона:
 - а) от тока накала катода I ,
 - б) от анодного напряжения U_a)
 - в) от тока в обмотке соленоида I
 - г) от числа витков соленоида N ?
13. Какие уравнения используют при выводе расчетной формулы для определения удельного заряда электроиона - e/m ?
14. Объясните форму и укажите назначение графиков $I_a = f(I)$ и $f(I) = \frac{\Delta I_a}{\Delta I}$.
15. Укажите способ определения критического тока $I_{кр}$ по этим графикам.

Литература:

1. Детлаф А.А., Яворский В.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 1989. - §23.1. §23.3.
2. Калашников (С,Г. Электричество. М.: Науки. 1977. §§ 178,179,182.

