

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.09

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Цель работы

Целью данной работы является изучение движения элементарных частиц в электрическом и магнитном полях, экспериментальное определение удельного заряда электрона с помощью магнетрона.

Краткая теория

Электрон является носителем элементарного отрицательного заряда e ($e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл). Отношение его заряда к массе e/m называется **удельным зарядом электрона**. Удельный заряд может быть экспериментально определён различными методами. Все они основаны на поведении электрона в электрическом и магнитном полях.

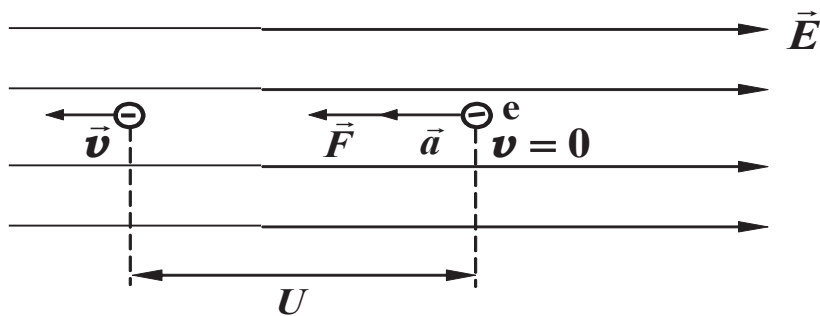


Рис. 4. Движение электрона в однородном электрическом поле

В электрическом поле напряжённостью \vec{E} (рис .4) на электрон действует сила

$$\vec{F} = e \cdot \vec{E}, \quad (2.9.1)$$

которая сообщает электрону ускорение \vec{a} и направлена против поля.

Под действием этой силы электрон, пройдя расстояние между точками с разностью потенциалов U , приобретает кинетическую энергию

$$\frac{mv^2}{2} = eU. \quad (2.9.2)$$

Движение электрона в однородном магнитном поле происходит под действием силы Лоренца

$$\vec{F} = e \cdot [\vec{v} \times \vec{B}], \quad (2.9.3)$$

где \vec{v} – вектор скорости электрона; \vec{B} – вектор индукции магнитного поля; e – заряд электрона.

Сила Лоренца \vec{F} перпендикулярна как скорости электрона, так и направлению магнитного поля. Она не меняет модуля скорости и кинетической энергии частицы.

Модуль силы Лоренца

$$F = e \cdot v \cdot B \sin \alpha, \quad (2.9.4)$$

где α – угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

Сила Лоренца сообщает электрону нормальное (центростремительное) ускорение и вызывает движение его по окружности радиуса R , если угол α составляет 90° (рис. 5). Таким образом, по второму закону Ньютона:

$$e \cdot v \cdot B = \frac{mv^2}{R}, \quad (2.9.5)$$

откуда радиус окружности

$$R = \frac{v}{(e/m) \cdot B}. \quad (2.9.6)$$

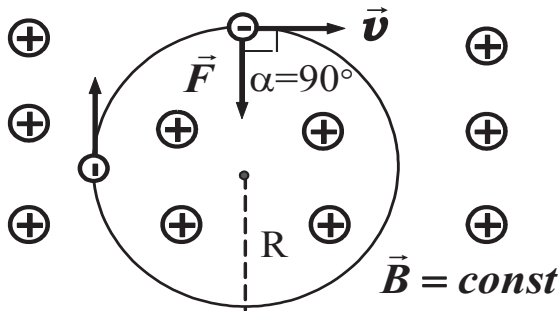


Рис. 5. Движение электрона в однородном магнитном поле

Из формулы (2.9.6) видно, что радиус окружности зависит от удельного заряда e/m . Этот факт и положен в основу метода определения удельного заряда с помощью магнетрона.

Магнетрон представляет собой высоковакуумную электронную трубку, имеющую прямую металлическую нить (катод), расположенную по оси цилиндрического анода.

Для нашей работы магнетрон с успехом можно заменить обычной электронной лампой с цилиндрическим анодом, на оси которого расположен катод (рис. 6, а). Лампа помещается внутри длинного соленоида, при помощи которого параллельно оси создаётся магнитное поле напряжённостью \vec{B} .

Катод нагревается электрическим током и испускает электроны, которые под действием электрического поля движутся к аноду.

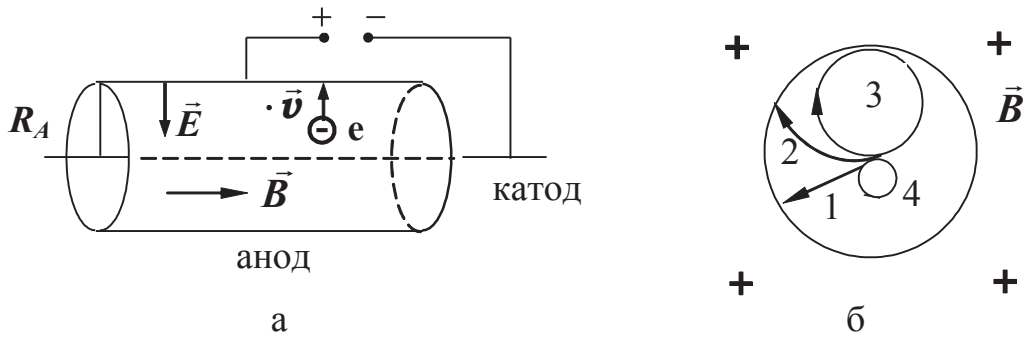


Рис. 6. Схема магнетрона

Когда магнитное поле отсутствует, электроны движутся по радиусам цилиндрического анода (рис. 6 б, линия 1).

Если включить магнитное поле, траектория движения искривляется, и тем больше, чем сильнее поле (рис. 6, б, линия 2). Все электроны достигают анода, и величина анодного тока в цепи практически не изменяется до определённого момента, когда при дальнейшем увеличении магнитного поля радиус траектории всё больше уменьшается и при некотором критическом значении $B_{кр}$, электроны, не достигнув анода, вернутся обратно к катоду (рис. 6, б, линия 3).

При выполнении условия $B > B_{кр}$ электроны уже не будут попадать на анод, и ток станет равен нулю (рис. 6, б, линия 4).

На рис. 7 приведен график зависимости анодного тока I_A от индукции магнитного поля B при некотором анодном напряжении U_A (сбросовая характеристика магнетрона).

Если бы все электроны, вылетающие из катода, имели одну и ту же скорость, анодный ток I_A спадал бы до нуля точно при критическом значении $B_{кр}$ индукции магнитного поля (рис. 7, штриховая линия). Однако скорости вылетевших электронов разные, поэтому уменьшение тока происходит на довольно

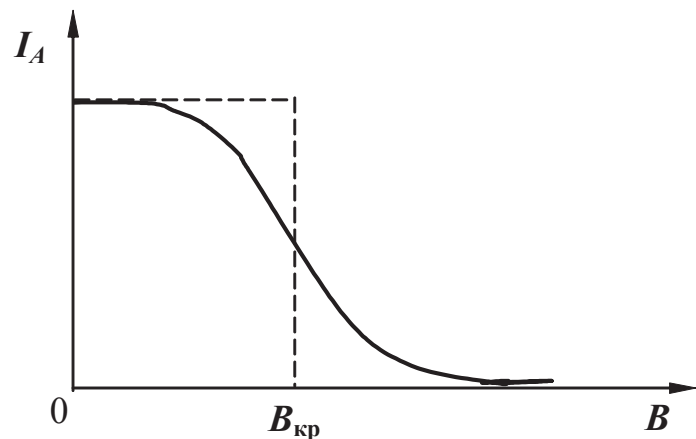


Рис. 7. Сбросовая характеристика магнетрона

протяжённом участке вблизи $B_{кр}$ (рис. 7, сплошная линия).

Критическое значение индукции магнитного поля является некоторой функцией анодного напряжения U_A . Эту зависимость легко установить, если предположить, что скорость электрона при его движении в магнетроне остаётся постоянной по модулю. При $B = B_{кр}$, радиус окружности, по которой движется электрон, равен $R_A/2$, где R_A – радиус анода. Подставляя его в уравнение (2.9.6), получим:

$$\frac{R_A}{2} = \frac{v}{(e/m) \cdot B}. \quad (2.9.7)$$

Решая совместно уравнения (2.9.2) и (2.9.7), получим формулу для расчёта удельного заряда электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \cdot U_A}{R_A^2 \cdot B_{кр}^2}, \quad (2.9.8)$$

где U_A — разность потенциалов между катодом и анодом.

Индукция магнитного поля в соленоиде может быть рассчитана по закону Био - Савара - Лапласа или по теореме о циркуляции индукции магнитного поля по замкнутому контуру

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N}{\ell} \cdot I_{сол}, \quad (2.9.9)$$

где ℓ – длина соленоида; N – число витков соленоида; $I_{сол}$ — сила тока, протекающего через соленоид (сила намагничивающего тока); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Критическому значению индукции магнитного поля $B_{кр}$ соответствует критическое значение силы тока $I_{кр}$. Учитывая это и подставляя (2.9.7) в (2.9.8), получим

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \cdot U_A \cdot \ell^2}{R_A^2 \cdot \mu_0^2 \cdot N^2 \cdot I_{кр}^2}. \quad (2.9.10)$$

При выводе (2.9.10) предполагалось, что электрическое и магнитное поля действуют на электрон по очереди, сначала он в электрическом поле разгоняется до скорости v , а затем с этой постоянной скоростью движется в магнитном поле.

В рассматриваемом случае электрон движется в скрещенных магнитном и электрическом полях и одновременно испытывает действие сил со стороны обоих полей. Вследствие этого, скорость электрона не постоянна (она возрастает по мере приближения к

аноду), а траектория его движения отличается от круговой. Данное обстоятельство позволяет утверждать, что формула (2.9.10) не точна. Тем не менее, как следует из результатов точного анализа рассматриваемой задачи, эта формула в целом удовлетворительно описывает физику процессов и с точностью до коэффициента пропорциональности является правильной.

Окончательная расчётная формула имеет вид:

$$\frac{e}{m} = A \cdot \frac{8 \cdot U_A \cdot \ell^2}{R_A^2 \cdot \mu_0^2 \cdot N^2 \cdot I_{кр}^2}, \quad (2.9.11)$$

где $\ell = 0,1 \text{ м}$; $N = 1000$ витков; $R_A = 5 \text{ мм}$; A – коэффициент, учитывающий отличие реальной траектории движения электрона в скрещенных электрическом и магнитном полях от окружности. Для нашей экспериментальной установки $A=1,3$.

Тщательные измерения удельного заряда и известное из опытов Милликена (1909 г.) значение величины заряда электрона позволили определить его массу и установить зависимость массы от скорости.

В принципе теми же методами определяются массы атомов и молекул. Соответствующие приборы для определения масс атомов и молекул (точнее, их ионов) носят название масс-спектрографов. Для примера можно рассмотреть принципиальное устройство одного из масс-спектрографов (рис. 8).

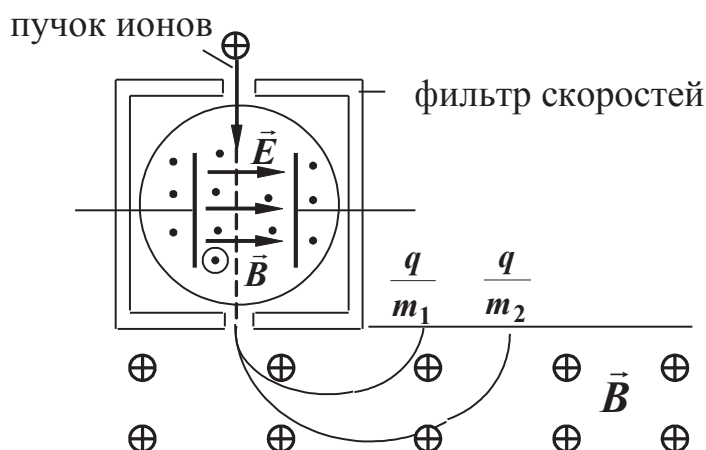


Рис. 8. Принципиальная схема масс-спектрографа

Сначала пучок ионов проходит через фильтр скоростей, в ко-

тором на движущиеся ионы одновременно действуют взаимно перпендикулярные электрическое и магнитное поля. Направления полей выбираются так, чтобы силы, действующие на ионы с их стороны, были противоположны по направлению. Через щель фильтра, противоположную входной, выходят только те ионы, на которые действуют равные по величине силы \vec{F}_E и \vec{F}_B .

$$q \cdot E = q \cdot v \cdot B. \quad (2.9.12)$$

Следовательно, из фильтра вылетают ионы одинаковых скоростей

$$v = \frac{E}{B}. \quad (2.9.13)$$

При выходе из фильтра частицы попадают в магнитное поле, перпендикулярное их скорости. Траектория их движения — окружность, радиус которой зависит от удельного заряда частицы

$$R = \frac{m}{q} \cdot \frac{v}{B} = \frac{m}{q} \cdot \frac{E}{B^2}. \quad (2.9.14)$$

Попадая на фотопластинку, ионы оставляют след, расстояние которого от выходной щели фильтра зависит от удельного заряда ионов.

По найденным значениям q/m можно определить массы ионов.

В наши дни точность определения масс ионов с помощью масс-спектрографов достигают 6—8 значащих цифр (правда, не в граммах, а по отношению к массе эталонного атома).

Масс-спектрографические методы позволяют проводить количественный анализ нефти, состоящий из молекул различных углеводородов, трудно различимых обычными химическими способами. При большой мощности ионного пучка этот метод позволяет разделять изотопы в заметных количествах.

Масс-спектрографический метод часто применяют для определения изотопного состава исследуемого вещества. В частности, он был применён при исследовании лунного грунта. Близость изотопного состава земных и лунных пород свидетельствует об одновозрастности и единстве происхождения земного и лунного вещества. По-видимому, это следует распространить и на другие космические тела солнечной системы. Исследования вещества метеоритов не противоречат такому обобщению.

Масс-спектрографы нашли широкое применение в различных

областях физики, химии, техники. Они используются для определения содержания примесей в газах, для анализа состава и процентного содержания различных смесей углеводородов и т. д.

Выполнение работы

Необходимые приборы: лабораторный стенд, внутри которого смонтированы все элементы схемы; цифровой вольтметр (или осциллограф).

На рис. 9 приведена схема экспериментальной установки, которая технически реализована на лабораторном стенде с возможностью самостоятельно вручную и с управлением от внешних источников изменять параметры эксперимента.

Экспериментальная установка состоит из трёх цепей.

Цепь намагничивающей катушки состоит из соленоида, создающего однородное магнитное поле при подключении к нему источника постоянного тока \mathcal{E}_3 , регулятора тока с внутренним и внешним управлением (коммутация осуществляется тумблером S_1) и низкоомного резистора $R_5 = 1 \text{ Ом}$, предназначенного для контроля силы тока $I_{\text{сол}}$ в соленоиде по величине напряжения на этом сопротивлении.

Анодная цепь состоит из электронной лампы L , источника постоянного тока \mathcal{E}_1 , делителя напряжения на резисторах R_2, R_3, R_4 и последовательно включенного резистора $R_1 = 1 \text{ кОм}$, предназначенного для контроля силы тока в анодной цепи I_A , по величине напряжения на этом резисторе.

Цепь накала включает в себя нитевидный катод K лампы L , источник тока \mathcal{E}_2 и тумблер S_2 , отключающий его.

Порядок выполнения работы

1. Замкните цепь накала тумблером S_2 (на стенде на линии “катод” загорается светодиод) и дайте лампе прогреться 3 – 5 минут. Тумблер S_1 поставьте в положение “ручное управление регулятора тока”.

2. Чтобы определить намагничивающий ток $I_{\text{сол}}$, необходимо замкнуть клеммы 9-10, вольтметр подключить к резистору $R_5 = 1 \text{ Ом}$ (клеммы 11-12). Снимите значения $I_{\text{сол}}$ при положениях переключателя S_3 от 0 до 9 (при этом ток получается в амперах).

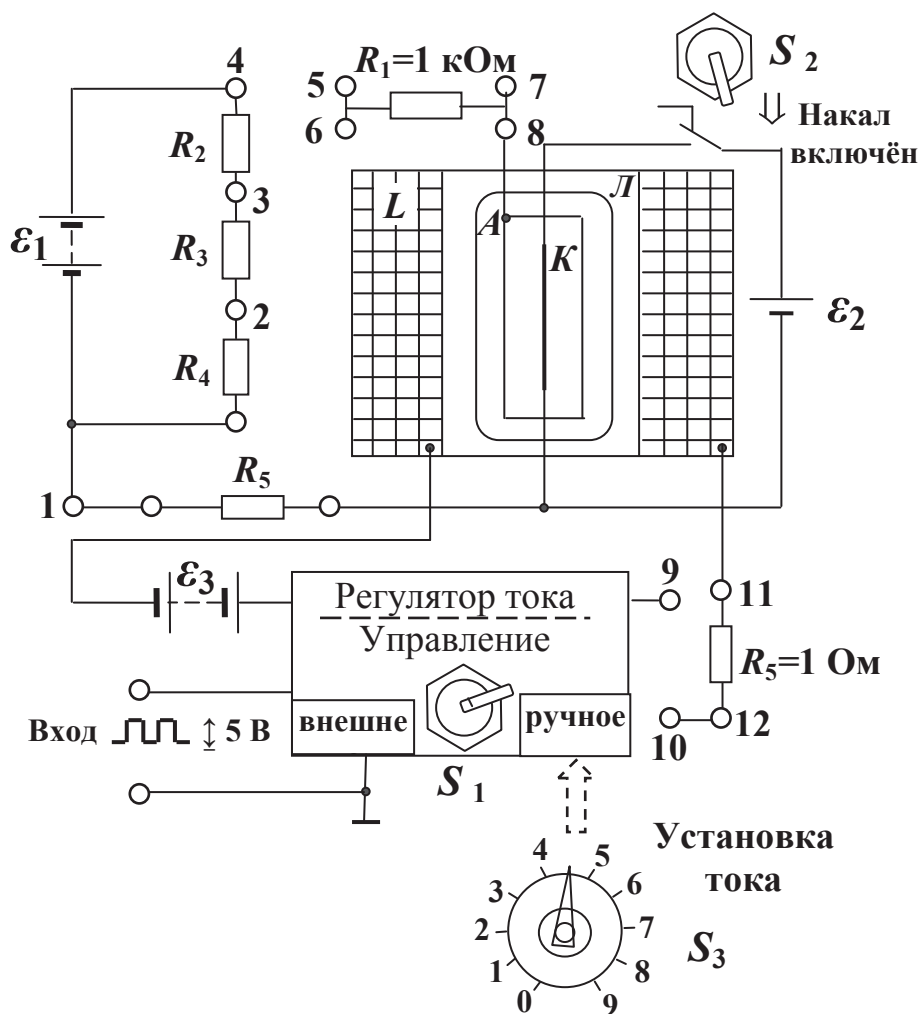


Рис. 9. Схема экспериментальной установки

3. Соберите анодную цепь, подав на анод максимально возможное напряжение U_1 (соедините перемычкой клеммы 4-5).

4. **Анодный ток I_A** , определяют по величине падения напряжения на резисторе $R_1=1 \text{ кОм}$ (для чего вольтметр подключают к клеммам 6-8), при этом ток получается в мА. Первое измерение анодного тока производят при отсутствии намагничивающего тока $I_{\text{сол}} = 0,0$, т. е. цепь соленоида (клеммы 9-10) разомкнута, что соответствует прочерку (“-”) в первой строке S_3 табл. 9.1.

5. Затем замыкают цепь намагничивающей катушки, соединив перемычкой клеммы 9-10. Ток соленоида устанавливают дискретно с помощью переключателя S_3 от 0-го до 9-го положения, записывая значения I_A в табл. 9.1.

6. Опыт повторите при других значениях анодного напряжения: U_2 (соединены клеммы 5-3) и U_3 (соединены клеммы 5-2).

7. Значения анодных напряжений U_1, U_2, U_3 измерить вольтметром (клеммы 1-6), при этом переключатель “ПРЕДЕЛ ИЗМЕРЕНИЙ” вольтметра переключить в положение 100. Напряжения U_1, U_2, U_3 подавать на анод с помощью перемычки, как в пунктах 3, 6. Результаты занести в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Результаты измерений

№	Намагничивающий ток $I_{сол}, А$	Анодное напряжение, В		
		$U_1 =$	$U_2 =$	$U_3 =$
S_3		Анодный ток $I_A, мА$		
—	0,0			
0				
1				
2				
...				
8				
9				

8. На основании экспериментальных значений постройте сбросовые характеристики (рис. 7). Учитывая, что $B \sim I_{сол}$, а в расчётную формулу необходимо подставить найденное из опыта значение $I_{кр}$, удобно построить график зависимости анодного тока не от индукции поля B , а от силы намагничивающего тока $I_A = f(I_{сол})$.

По графикам найдите три значения критического тока $I_{кр}$, которые соответствуют максимальной крутизне зависимостей $I_A = f(I_{сол})$. Эти значения подставьте в формулу (2.9.11), вычислите три значения удельного заряда электрона, найдите среднее значение и среднюю абсолютную погрешность измерений.

Окончательный результат запишите в виде:

$$\frac{e}{m} = \left(\frac{e}{m} \right)_{cp} \pm \Delta \left(\frac{e}{m} \right)_{cp} . \quad (2.9.15)$$

Сравните полученный результат с табличным значением и сделайте выводы.

Снятие сбросовой кривой по точкам (т. е. дискретно изменяя

условия эксперимента) можно производить и с помощью осциллографа, включенного в режим изображения функциональных зависимостей между двумя сигналами (фигур Лиссажу). Для этого на осциллографе **С1 – 83** необходимо установить переключатели режима работы усилителей и канала синхронизации в положение «**X-Y**», а входы усилителей в режим измерения постоянных значений напряжений (переключатели режимов работы входов усилителей обоих каналов в положение « \sim », т. е. «открытый вход»). В таком режиме работы осциллографа цена деления шкалы электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) по оси **X** определяется положением аттенюатора (переключателя) первого канала, а по оси **Y** — второго канала. Первый канал подключается к резистору **R₅**, напряжение на котором пропорционально модулю индукции магнитного поля в соленоиде, а второй канал к резистору **R₁**, напряжение на котором пропорционально силе тока в анодной цепи лампы.

Аналогичные измерения проводят ещё для двух значений анодных напряжений, устанавливаемых путём коммутации (замыкания перемычкой) резисторов **R₂**, **R₃**, **R₄**.

Сбросовые характеристики можно наблюдать непосредственно на экране осциллографа, если регулятор тока переключить в режим дискретного изменения тока с подключением к его входу управления внешнего или встроенного в лабораторном стенде генератора.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется удельным зарядом электрона?
2. Какая сила действует на электрон в электрическом поле?
3. Какая сила действует на электрон, движущийся в магнитном поле?
4. Выведите формулу для радиуса кривизны электрона, движущегося в однородном магнитном поле.
5. Какой вид может принимать форма траектории электрона при разных значениях индукции магнитного поля в магнетроне.
6. Что собой представляет сбросовая характеристика магнетрона?
7. Какова методика определения **B_{кр}**?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1974. 336 с.

Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1978. 480 с.

Трофимова Т. И. Курс общей физики: М.: Высшая школа, 1985. 432 с.