

Московский государственный технический университет им. Н.Э.

Баумана

(Мытищинский филиал)

Н. П. Полуэктов, О.М. Полещук, И. И. Усатов

Учебно-методическое пособие

**Определение удельного заряда электрона методом
магнетрона**

Москва

Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана

2021

УДК 53.536

ББК. 22.3

Факультет «Космический»

Кафедра «высшая математика и физика»

Рекомендовано научно-методическим советом

МГТУ им. Н.Э.Баумана в качестве учебно-методического пособия

Рецензент к.ф.-м.н. О.В.Русаков

Полуэктов, Н. П.

Определение удельного заряда электрона методом магнетрона:
учебно-методическое пособие / Н.П. Полуэктов, О.М. Полещук,
И.И. Усатов – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021.

– 17 с. : илл.

В учебно-методическом пособии рассмотрен способ определения удельного заряда электрона методом магнетрона. Приведена теория работы магнетрона, описаны силы, действующие на заряд при его движении в скрещенных электрическом и магнитном полях.

Для студентов всех технических специальностей Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (уровень бакалавриата и специалитета), изучающих дисциплину «Физика».

© МГТУ им. Н.Э. Баумана
(Мытищинский филиал) 2021

© Оформление. Издательство МГТУ
им. Н.Э. Баумана, 2021

ISBN

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений,
устанавливаемых техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель
вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
1. Теоретические основы работы	5
2. Методика эксперимента	6
3. Описание установки	12
4. Порядок выполнения работы	12
5. Обработка результатов измерений	14
6. Форма отчета о работе	16
7. Контрольные вопросы	16
8. Список литературы	17

ПРЕДИСЛОВИЕ

Электрон фундаментальная элементарная частица. Электрон – стабильная частица, имеет отрицательный заряд и является одной из основных структурных единиц вещества. Электроны образуют электронные оболочки атомов, строение которых определяет большинство оптических, электрических, магнитных, механических, химических свойств вещества. Движение электронов обуславливает протекание электрического тока во многих проводниках (в частности, в металлах).

В работе рассмотрен способ определения удельного заряда электрона методом магнетрона. Удельный заряд – отношение заряда к массе заряженной частицы. Он является важной характеристикой при анализе элементарных частиц. Этот параметр позволяет определить с какими частицами имеет дело экспериментатор.

В работе приведена теория работы магнетрона, описаны силы, действующие на заряд при его движении в скрещенных электрическом и магнитном полях. Магнетрон применяется для получения редких изотопов с особо чистым составом.

Цель лабораторной работы: ознакомиться с методом магнетрона, экспериментально определить значение удельного заряда электрона и сравнить его с табличным значением.

1. Теоретические основы работы

Важнейшими характеристиками электрона являются его заряд e и масса покоя m , которые определяют удельный заряд электрона e/m . При движении электрона в электрическом и магнитном полях его траектория зависит от величины и конфигурации этих полей и его удельного заряда.

На заряженную частицу, находящуюся в электрическом поле, действует сила:

$$\vec{F}_{эл} = Q\vec{E}, \quad (1)$$

где Q – заряд частицы, \vec{E} – напряженность электрического поля в точке нахождения частицы. Если заряд Q положителен, направление силы совпадает с направлением вектора \vec{E} . В случае отрицательного Q направление векторов $\vec{F}_{эл}$ и \vec{E} противоположны.

Если частица, обладающая массой m и зарядом Q , движется со скоростью \vec{v} в пространстве, где имеется магнитное поле индукцией \vec{B} , то на неё действует сила Лоренца:

$$\vec{F}_{л} = Q[\vec{v}, \vec{B}] \quad (2)$$

где выражение справа есть векторное произведение векторов. Направление действия силы Лоренца перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы \vec{v} и \vec{B} определяется по правилу буравчика. Если заряд Q положителен, направление вектора силы $\vec{F}_{л}$ совпадает с направлением вектора $[\vec{v}, \vec{B}]$. В случае отрицательного Q направление силы $\vec{F}_{л}$ нужно изменить на

противоположное. Для определения направления результирующего вектора векторного произведения, можно пользоваться правилом буравчика.

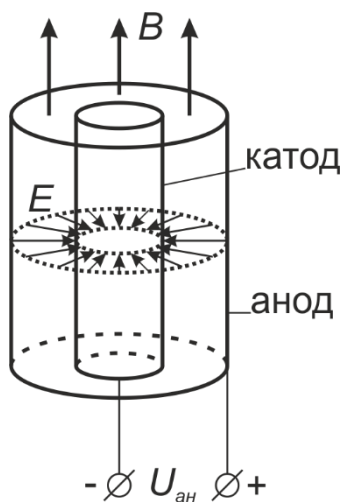
Модуль силы Лоренца равен $F = QvB \sin \alpha$, где α – угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

Сила, действующая на движущуюся заряженную частицу при одновременном наличии электрического и магнитного полей, равна:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} \quad \text{или} \quad \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{Q}{m} \vec{E} + \frac{Q}{m} [\vec{v}, \vec{B}] \quad (3)$$

Из последнего уравнения видно, что характер движения и траектория заряженной частицы зависят не от её заряда и массы в отдельности, а определяются их отношением, то есть Q/m . Это отношение называется **удельным зарядом** частицы и является её важнейшей характеристикой. Экспериментально определить удельный заряд частицы можно разными способами, одним из которых является *метод магнетрона*.

2. Методика эксперимента



Название метода связано с тем, что в работе используется взаимная ориентация магнитного и электрического полей, подобная ориентации этих полей в **магнетронах** – генераторах электромагнитных колебаний сверхвысоких частот.

Электрическое поле создают с помощью двухэлектродной лампы (диода). Её электроды –

Рис.1. Схема магнетрона. анод и катод – имеют форму соосных (коаксиальных) цилиндров, и когда к ним прикладывают разность потенциалов, вектор напряжённости электрического поля имеет радиальное направление (рис.1). Магнитное поле создают соленоидом при пропускании

по нему электрического тока. Лампа помещена внутри соленоида вдоль его оси, то есть вектор индукции \vec{B} магнитного поля направлен вдоль оси электродов. Таким образом, магнитное и электрическое поле в магнетроне взаимно перпендикулярны.

Электроны в лампе испускаются нагретым катодом (термоэлектронная эмиссия) и под действием электрического поля начинают двигаться к аноду. Напряжённость \vec{E} максимальна у катода и с увеличением расстояния от него быстро уменьшается. Поэтому основное изменение скорости электронов происходит вблизи катода, и при дальнейшем движении их скорость будет изменяться незначительно. Так как в диоде радиус катода значительно меньше радиуса анода, то приближенно можно считать, что в кольцевом пространстве между анодом и катодом электроны движутся с постоянной скоростью. В лампе возникает анодный ток, величина которого зависит от анодного напряжения.

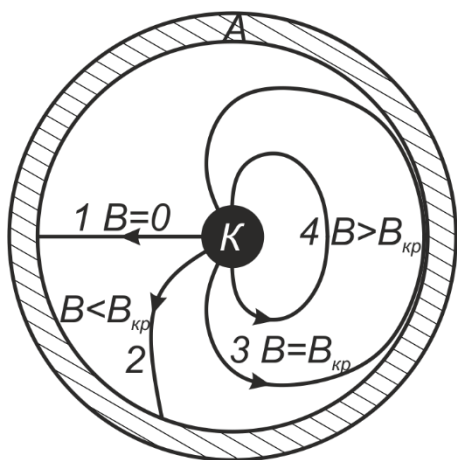


Рис.2. Траектории электронов магнетроне при различных магнитных полях.

Если магнитное поле отсутствует, то при неизменном токе накала и стабильном анодном напряжении анодный ток имеет постоянное значение.

Если магнитное поле отсутствует (ток в цепи соленоида равен нулю), то электроны, эмитированные катодом (К), под действием электрического поля движутся на анод (А) прямолинейно по радиусам (рис.2 кривая 1), и в анодной цепи возникает некоторый ток, зависящий от анодного напряжения и напряжения накала. Если, не меняя анодного напряжения и напряжения накала, приложить небольшое магнитное поле, то оно будет действовать на электроны и отклонять их перпендикулярно к плоскости, векторов \vec{v} и \vec{B} . Под действием отклоняющей силы движения

электронов приобретает более сложный характер, и их траектория станет криволинейной (рис. 2 кривая 2), но все электроны, в конечном счете, попадают на анод и в анодной цепи будет протекать такой же ток, как в отсутствие магнитного поля. При наличии внешнего магнитного поля на движущийся электрон будет действовать магнитная составляющая силы Лоренца. Эта сила, будучи перпендикулярной к направлению движения электрона, выполняет роль центростремительной силы и вызывает движение по окружности. Радиус этой окружности определяется вторым законом Ньютона:

$$evB = \frac{m_e v^2}{R} \quad (4)$$

где m_e – масса электрона, e – модуль его электрического заряда, то есть

$$R = \frac{m_e v}{eB} \quad (5)$$

Отсюда следует:

$$\frac{e}{m_e} = \frac{v}{RB} \quad (6)$$

то есть удельный заряд электрона можно определить, зная его скорость и радиус окружности, по которой он движется в магнитном поле с индукцией B .

В слабом магнитном поле этот радиус довольно велик, поэтому траектория электронов искривляется незначительно, и они все достигают анода (рис.2 кривая 2). При некотором значении магнитной индукции, называемом критическим $B_{кр}$, траектория искривляется настолько, что касается поверхности анода (рис.2 кривая 3). Наконец, при $B > B_{кр}$ электроны, не достигая анода, возвращаются на катод (рис.2 кривая 4).

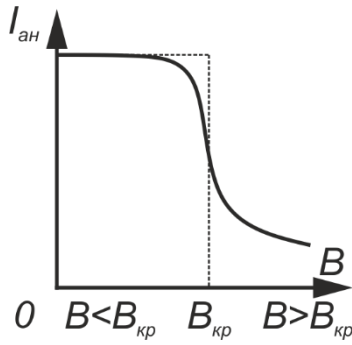


Рис.3. Зависимость анодного тока от магнитного поля.

На рис.3 показан график зависимости анодного тока от магнитной индукции. Если $B < B_{кр}$, все электроны доходят до анода, и анодный ток имеет такое же значение, как и при отсутствии магнитного поля (горизонтальная часть графика). Если $B > B_{кр}$, то электроны перестают достигать анода, и ток через лампу становится равным

нулю. При $B = B_{кр}$ анодный ток должен резко уменьшаться (штриховая линия на графике), однако в реальных условиях такого явления не наблюдается. Это связано, прежде всего, с тем, что электроны, испускаемые катодом, обладают различными начальными скоростями. Поэтому критические условия для различных электронов достигаются при разных значениях индукции магнитного поля. Зависимость величины анодного тока $I_{ан}$ от индукции магнитного поля B приобретает вследствие этого вид плавной кривой.

Дополнительными причинами плавного изменения анодного тока при переходе магнитной индукции через критическое значение служат несоосность анода и катода, неортогональность магнитного и электрического полей, нестабильность питающих напряжений и т.п. Тем не менее, участок спада анодного тока остаётся достаточно резким и может быть использован для измерения удельного заряда электрона.

Как видно из рис. 2, при $B = B_{кр}$ радиус кривизны траектории электрона равен половине радиуса анода $R = r_{ан}/2$. Подставив это значение в формулу (6), выразим удельный заряд электрона:

$$\frac{e}{m_e} = \frac{2v}{B_{кр} r_{ан}} \quad (7)$$

Для нахождения e/m_e нужно знать скорость электронов. Катод электронной лампы (рис.2), подключенный к источнику питания, при

пропускании по нему электрического тока, накаливается и, в результате термоэлектронной эмиссии, испускает электроны со средней кинетической энергией:

$$\frac{m_e v^2}{2} \approx \frac{3}{2} kT \quad (8)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/град}$ – постоянная Больцмана, $T \approx 2000^\circ\text{C} = 0,2\text{эВ}$ – температура катода.

Между катодом и анодом приложена разность потенциалов $U_{ан}$, ускоряющая электроны. По закону сохранения энергии скорость v электронов, достигающих анода, определяется формулой:

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = eU \quad (9)$$

При $U_{ан} \sim 3-10\text{В}$ начальная кинетическая энергия электронов $\frac{mv_0^2}{2} \ll eU$ и с достаточной степенью точности можно полагать, что $\frac{mv^2}{2} = eU_{ан}$ и скорость электронов

$$v = \sqrt{\frac{2eU_{ан}}{m_e}} \quad (10)$$

Подставив формулу (10) в уравнение (7), получим

$$\frac{e}{m_e} = \frac{8U_{ан}}{B_{кр}^2 r_{ан}^2} \quad (11)$$

Из закона Био-Савара-Лапласа следует, что индукция магнитного поля в соленоиде B прямо пропорциональна силе тока I_C , текущего в его обмотке:

$$B = a \cdot I_C \quad (12)$$

где a – коэффициент пропорциональности.

Величину B соленоида можно рассчитать по известной формуле, зная его размеры и количество витков. Сложность в том, что анод лампы изготовлен из никеля, который является ферромагнетиком, в результате магнитное поле изменяется. Мы измерили зависимость магнитной индукции внутри анода подобной разбитой лампы от тока соленоида, график которой приведен на рисунке 4. Критическому значению индукции $B_{кр}$ соответствует значение силы тока соленоида $I_{Cкр}$. Для определения $I_{Cкр}$ можно использовать экспериментальную зависимость анодного тока от тока в соленоиде $I_{ан} = f(I_C)$ (сплошная кривая на рис. 5). Она по виду подобна зависимости $I_{ан} = f(B)$ (рис.3). В этом случае критический ток в соленоиде будет определяться наибольшим наклоном кривой в области спадания анодного тока (участок $b-c$ на рис. 5), то есть максимальным значением модуля производной $dI_{ан}/dI_C \approx \Delta I_{ан}/\Delta I_C$. Таким образом, если построить график $\Delta I_{ан}/\Delta I_C = g(I_C)$, то максимум этой зависимости будет соответствовать значению критического тока в соленоиде (точечная кривая на рис. 5).

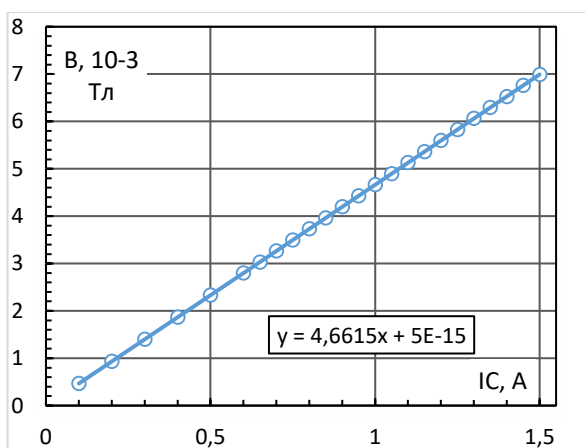


Рис.4. Зависимость магнитной индукции от тока соленоида.

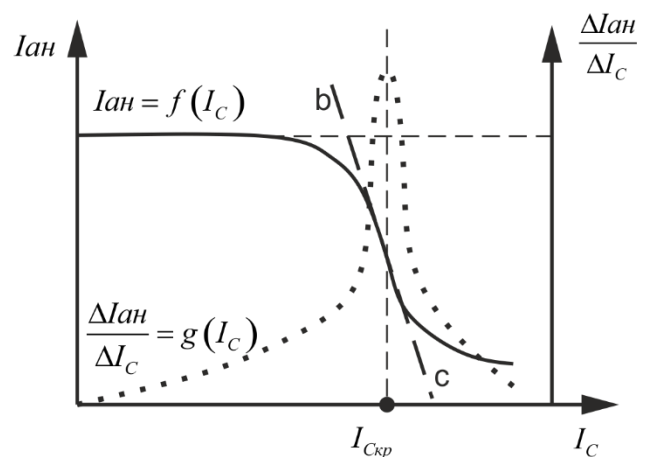


Рис.5. Зависимость анодного тока $I_{ан}$ магнетрона от тока соленоида I_C .

3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка для определения удельного заряда электрона состоит из блока питания, соленоида, вакуумного диода, мультиметра, соединительных проводов. На рис. 6 показана электрическая схема установки. На рис. 7 представлена ее фотография.

Вакуумный высоковольтный диод (1) помещен в центре соленоида (2) таким образом, что их оси совпадают. Нагреватель катода (3) диода подключен к источнику напряжения $1,2\text{ В}$ (4). На анод диода (5) подают напряжение от $0,1$ до $7,5\text{ В}$. Соленоид подключен к регулятору напряжения $12-120\text{ В}$ (6). Для измерения тока катода использован мультиметр (7), включенный последовательно в цепи питания катода.

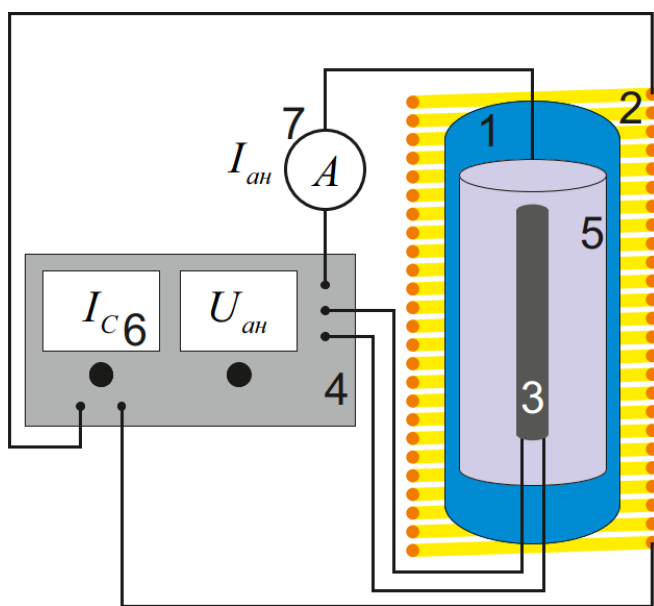


Рис.6. Схема установки.



Рис.7. Фото установки.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Перед включением установки преподаватель проверяет правильность собранной электрической схемы.
2. Переключатель рода работы мультиметра установить в положение DCA $200\ \mu\text{A}$.

3. Включают источник питания.
4. Установить регулятором напряжения на аноде (АНОД) в диапазоне от 3 до 4 В.
5. Снять зависимость анодного тока в диодной лампе от тока в соленоиде. Для этого, вращая регулятор тока соленоида, устанавливать по амперметру токи в соленоиде, а по мультиметру измерять соответствующие значения анодного тока. Первые 5 – 6 значений тока соленоида I_C от 0,1 до 0,6 А устанавливают через 0,1 А, а затем через 0,05 А до тока 1,4 А. Показания соленоида I_C и тока анода $I_{ан}$ заносить в таблицу.
6. Повторите опыт, описанный в пп. 3 – 5 при двух других значениях анодного напряжения $U_{ан} = 4 – 5В$; $U_{ан} = 6 – 7,5В$ в соответствии с таблицей 1.
7. В результате измерений у Вас должно получиться три таблицы 1 для значений анодного напряжения: (3 – 4) В, (4 – 5) В и (6 – 7,5) В

Таблица 1

№	$U_{ан} = \dots В$				
	$I_C, А$	$\Delta I_C, А$	$I_{ан}, мкА$	$\Delta I_{ан}, мкА$	$\Delta I_{ан} / \Delta I_C$
1					
2					
3					
...					
24					

Радиус магнетрона $r_{ан} = 4,5 мм$.

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Найти изменение тока в соленоиде и модуль изменения анодного тока по формулам:

$$\Delta I_{an} = |I_{ani+1} - I_{ani}|, \quad (13)$$

$$\Delta I_C = |I_{Ci+1} - I_{Ci}| \quad (14)$$

здесь $i = 1, 2, 3, \dots$ – номер измерения. Результаты записать в таблицу 1 начиная со второй строки.

2. Рассчитать отношение $\Delta I_{an} / \Delta I_C$. Результаты записать в таблицу 1 начиная со второй строки.

3. По данным таблицы 1 построить на миллиметровой бумаге график зависимости $\Delta I_{an} / \Delta I_C = f(I_C)$. Для оси **X** значения I_C брать начиная со второй строчки. По положению максимума на графике производной находят значение критического тока соленоида $I_{Cкр}$ (рис. 5).

4. По найденному значению $I_{Cкр}$, пользуясь формулой (12) определить $B_{кр}$ (коэффициент пропорциональности равен коэффициенту наклона графика на рис. 4).

5. Рассчитайте величину удельного заряда электрона по формуле (11) для 3-х проведенных опытов и определите ее среднее значение. Результаты расчетов занесите в табл. 2.

Таблица 2

$U_{ан}, B$	$I_{Скр}, A$	$B_{кр}, Tл$	$\frac{e}{m_e}, \frac{Kл}{кг}$	$\Delta \frac{e}{m_e}, \frac{Kл}{кг}$
$U_{ан} = 3B$				
$U_{ан} = 5B$				
$U_{ан} = 7B$				
$\left\langle \frac{e}{m_e} \right\rangle = \dots, \frac{Kл}{кг}$			$\Delta \left\langle \frac{e}{m_e} \right\rangle = \dots, \frac{Kл}{кг}$	

6. Запишите результат в соответствии с полученной погрешностью:

$$\frac{e}{m_e} = \left\langle \frac{e}{m_e} \right\rangle \pm \Delta \left\langle \frac{e}{m_e} \right\rangle, \quad (15)$$

где

$$\Delta \frac{e}{m_{e_i}} = \left| \frac{e}{m_{e_i}} - \left\langle \frac{e}{m_e} \right\rangle \right|, \quad (16)$$

$$\Delta \left\langle \frac{e}{m_e} \right\rangle = \frac{\Delta \frac{e}{m_{e_1}} + \Delta \frac{e}{m_{e_2}} + \Delta \frac{e}{m_{e_3}}}{3}, \quad (17)$$

7. результат записать в виде:

$$\frac{e}{m_e} = \left\langle \frac{e}{m_e} \right\rangle \pm \Delta \left\langle \frac{e}{m_e} \right\rangle \quad (18)$$

Табличное значение e/m_e :

$$\frac{e}{m_{e \text{ табл}}} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$$

6. ФОРМА ОТЧЕТА О РАБОТЕ

«Определение удельного заряда электрона методом магнетрона»

Исполнитель: студент(ка) гр. _____

Цель работы:

1. Краткое описание метода исследования:
2. Расчетные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать их наименование в СИ)
3. Вывод.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как определить величину и направление силы Лоренца?
2. Как определить радиус движения электрона в однородном магнитном поле?
3. Какая сила действуют на заряд в электрическом поле?
3. Как определить величину и направление силы, действующей на частицу, движущуюся в электрическом и магнитном полях?
4. По какой траектории движется заряженная частица в однородном магнитном поле в зависимости от угла между скоростью и силовыми линиями.

8. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калашников С.Г. Электричество. – 6-е изд., стер. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 624 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики в 4-х томах. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: КноРус, 2012. – Т.2. – 576 с.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – Т.3. – 656 с.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – 20-е изд., стер. – М.: Изд-во «Академия», 2014. – 560 с.