

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА
МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА**

**Методические указания к лабораторной работе № 46
по дисциплине «Физика»**

Уфа 2015

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

Кафедра физики

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА
МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Методические указания к лабораторной работе № 46
по дисциплине «Физика»

Уфа 2015

Составитель В. Р. Строкина

УДК 537(07)

ББК 22.33(я7)

Определение удельного заряда электрона методом магнетрона: Методические указания к лабораторной работе № 46 по дисциплине «Физика» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост. В. Р. Строкина – Уфа, 2015. – 17 с.

Цель методических указаний – закрепление и совершенствование знаний студентов по дисциплине «Физика» и формирование умений их применять для решения научно-технических задач в теоретических и прикладных аспектах, возникающих в последующей профессиональной деятельности выпускников технического университета.

В теоретической части методических указаний описано действие магнитного поля на движущийся заряд, приведена теория определения удельного заряда электрона методом магнетрона. В экспериментальной части приведены описание лабораторной установки и порядок выполнения работы.

Предназначены для студентов технических вузов, изучающих дисциплину «Физика» по разделу «Электричество и магнетизм» на всех направлениях подготовки бакалавров и специалистов.

Ил. 2. Табл. 6. Библиогр.: 3 назв.

Рецензенты: канд. физ.-мат. наук, доц. Тучков С. В.,
канд. техн. наук, доц. каф. ТОЭ Крайнова Т. М.

© Уфимский государственный
авиационный технический университет, 2015

Содержание

Введение	4
1. Цели работы	5
2. Задачи.....	5
3. Теоретическая часть	5
3.1. Взаимодействие заряженных частиц с электрическими и магнитными полями. Сила Лоренца	5
3.2. Метод магнетрона	9
4. Экспериментальная часть.....	12
5. Требования по технике безопасности	13
6. Задания	13
7. Методика выполнения заданий	14
Контрольные вопросы	16
Требования к содержанию и оформлению отчета	16
Критерии результативности выполнения лабораторной работы	17
Список литературы	17

Введение

Электрические и магнитные поля проявляются в их действии на электрические заряды. Практическая значимость и важность взаимодействия заряженных частиц с этими полями очень велика.

Изучение движения заряженных частиц в электрических и магнитных полях дает возможность определить отношение их заряда к массе и получить ценные сведения о природе этих частиц и о тех процессах, в которых они возникают. Управление потоками заряженных частиц с помощью электрических и магнитных полей лежит в основе работы различных важных физических приборов и установок (осциллографов, электронных микроскопов, масс-спектрографов, ускорителей элементарных частиц и др.)

В результате выполнения данной лабораторной работы у студентов формируются следующие компетенции:

- способность демонстрировать базовые знания в области общенаучных дисциплин и готовность использовать основные законы в будущей профессиональной деятельности;

- способность проводить эксперименты по заданной методике, обрабатывать результаты, оценивать их погрешность и достоверность.

Перечисленные компетенции формируются через умения:

- работать с измерительными приборами;
- рассчитывать физические величины по экспериментальным данным;
- анализировать результаты экспериментов;
- оформлять отчет;
- а также владения:
 - теоретическим материалом;
 - навыками измерения физических величин по приборам;
 - технологией обработки экспериментальных данных.

Лабораторная работа № 46

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

1. ЦЕЛИ РАБОТЫ

1. Изучение взаимодействия электрических зарядов с внешними электрическим и магнитным полями.
2. Снятие зависимостей анодного тока от величины индукции внешнего магнитного поля.
3. Построение сбросовых характеристик магнетрона.
4. Определение удельного заряда электрона.

2. ЗАДАЧИ

1. Усвоение студентами темы «Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях».
2. Приобретение навыков правильной эксплуатации электроизмерительных приборов и оборудования физической лаборатории, получение экспериментальных функциональных зависимостей между физическими величинами.
3. Освоение одного из методов обработки экспериментальных данных и определения удельного заряда электрона.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1. Взаимодействие заряженных частиц с электрическими и магнитными полями. Сила Лоренца

Действие электрических и магнитных полей на движущуюся заряженную частицу определяется силой Лоренца

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v} \cdot \vec{B}], \quad (3.1)$$

где \vec{E} – напряженность электрического поля, \vec{B} – индукция магнитного поля, q – заряд частицы, \vec{v} – скорость ее движения.

Выражение для силы Лоренца является фундаментальным законом физики электромагнитных явлений. Из формулы (3.1) видно, что сила Лоренца имеет две составляющие: силу $\vec{F}_э = q\vec{E}$, действующую со стороны электрического поля, и силу $\vec{F}_м = q[\vec{v} \cdot \vec{B}]$, действующую со стороны магнитного поля. Между этими

составляющими имеется принципиальная разница. Под действием сил электрического поля частица приобретает ускорение, равное $\vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m}$, что приводит к изменению ее скорости и по величине, и по направлению. В отличие от $F_э$, магнитное поле действует только на движущуюся частицу и, не меняя величины ее скорости, изменяет траекторию движения.

Рассмотрим подробнее движение заряженных частиц в однородном магнитном поле. При этом будем считать, что на частицы не действуют никакие электрические поля.

Движущиеся электрические заряды создают вокруг себя магнитное поле. При движении заряда во внешнем магнитном поле возникает силовое взаимодействие магнитных полей. Процесс взаимодействия магнитных полей исследовался Лоренцем, который вывел формулу для расчета силы, действующей со стороны магнитного поля на движущуюся заряженную частицу.

Согласно закону Ампера на элемент тока $I d\vec{l}$ в магнитном поле индукции \vec{B} действует сила, равная

$$dF = I dl B \cdot \sin\alpha, \quad (3.2)$$

где α – угол между направлением тока и вектором магнитной индукции \vec{B} .

Пусть по проводнику длиной dl за промежуток времени dt проходит n одинаковых зарядов величиной q , т.е. через проводник протекает ток, сила которого равна

$$I = \frac{nq}{dt}. \quad (3.3)$$

Тогда на n движущихся зарядов со стороны магнитного поля действует сила, равная

$$dF = \frac{nq}{dt} B dl \sin\alpha. \quad (3.4)$$

Сила, с которой поле действует на каждый заряд, определяется формулой

$$F_M = \frac{dF}{n} = Bq \frac{dl}{dt} \sin\alpha, \quad (3.5)$$

где $v = \frac{dl}{dt}$ – скорость движения заряда q .

Таким образом, сила, действующая со стороны магнитного поля на движущийся заряд, равна

$$F_M = qvB \sin\alpha \quad (3.6)$$

и называется магнитной составляющей силы Лоренца.

При отсутствии электрических полей магнитную составляющую силы Лоренца часто называют просто силой Лоренца. Формула, определяющая направление этой силы, имеет вид

$$\vec{F}_M = q[\vec{v} \cdot \vec{B}]. \quad (3.7)$$

На рис. 3.1 приведено направление силы Лоренца, действующей на положительный и отрицательный заряды.

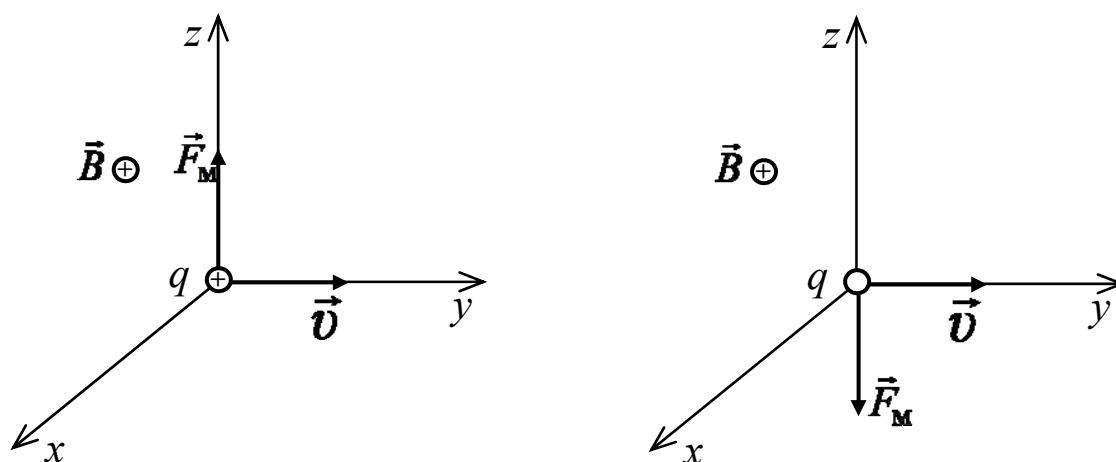


Рис. 3.1

Сила Лоренца всегда перпендикулярна направлению вектора скорости заряженной частицы. Поэтому она изменяет только направление движения частицы, не изменяя модуля скорости, т.е. постоянное магнитное поле не совершает работы по изменению скорости движущейся в нем заряженной частицы.

Если заряженная частица движется в однородном магнитном поле со скоростью \vec{v} вдоль линий магнитной индукции, то угол α между векторами \vec{v} и \vec{B} равен 0 или π . В этом случае сила Лоренца равна нулю, т.е. магнитное поле на частицу не действует, и она движется равномерно и прямолинейно. В случае, когда заряженная частица движется в однородном магнитном поле со скоростью \vec{v} , перпендикулярной вектору \vec{B} , сила Лоренца, равная $F_M = qvB$,

сообщает частице постоянное нормальное ускорение, и она движется по окружности в плоскости, перпендикулярной силовым линиям магнитного поля.

Уравнение движения частицы в этом случае имеет вид

$$m \frac{v^2}{R} = q v B, \quad (3.8)$$

где m – масса частицы, R – радиус окружности, $a_n = \frac{v^2}{R}$ – центростремительное ускорение.

Радиус окружности и период обращения частицы определяются соответственно формулами:

$$R = \frac{m v}{q B}, \quad (3.9)$$

$$T = \frac{2 \pi R}{v} = \frac{2 \pi m}{B q}. \quad (3.10)$$

Рассмотрим общий случай движения заряженной частицы в однородном магнитном поле, когда ее скорость \vec{v} направлена под углом α к вектору магнитной индукции \vec{B} (рис. 3.2). Разложим скорость \vec{v} на две составляющие:

$$v_{\parallel} = v \cos \alpha, \quad v_{\perp} = v \sin \alpha. \quad (3.11)$$

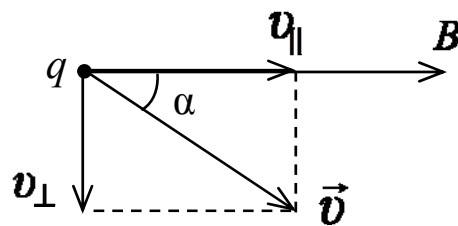


Рис. 3.2

Скорость \vec{v} в магнитном поле не изменяется. Частица одновременно участвует в двух движениях: она равномерно вращается со скоростью v_{\perp} по окружности радиуса

$$R = \frac{m v \sin \alpha}{q B} \quad (3.12)$$

и движется поступательно с постоянной скоростью v_{\parallel} в направлении, перпендикулярном плоскости вращения. В результате траектория

частицы представляет собой винтовую линию, ось которой совпадает с направлением вектора \vec{B} (рис. 3.3).

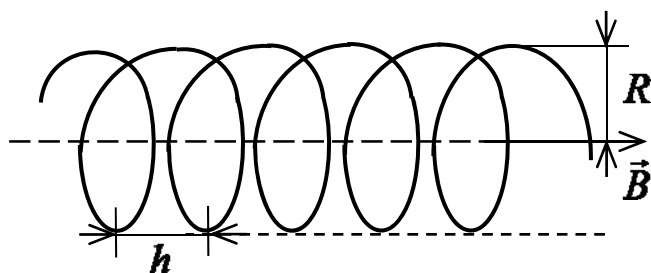


Рис. 3.3.

Траектория движения частицы в магнитном поле

Шаг винтовой линии (расстояние между соседними витками) определяется по формуле

$$h = v_{\parallel} \cdot T = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{qB}, \quad (3.13)$$

где $T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}}$ – период вращения частицы.

3.2. Метод магнетрона

Удельным зарядом электрона называется отношение величины его заряда e к массе m . В данной работе удельный заряд электрона $\frac{e}{m}$ определяется методом магнетрона. Устройство и принцип работы магнетрона приведены на рис. 3.4.

Магнетрон представляет собой двухкатодную электродную лампу 2 (диод) с цилиндрическим катодом 4 и коаксиальным с ним цилиндрическим анодом 3. Лампа помещена в однородное магнитное поле, силовые линии которого направлены параллельно образующим электродам. Магнитное поле создается соленоидом 1.

Катод нагревается нитью накала и испускает (имитирует) электроны. Если к электродам подключить источник питания («+» к аноду, «-» к катоду), то в промежутке между электродами образуется электрическое поле, линии напряженности которого направлены по радиусам от анода к катоду. В магнетроне магнитное и электрическое поля взаимно перпендикулярны.

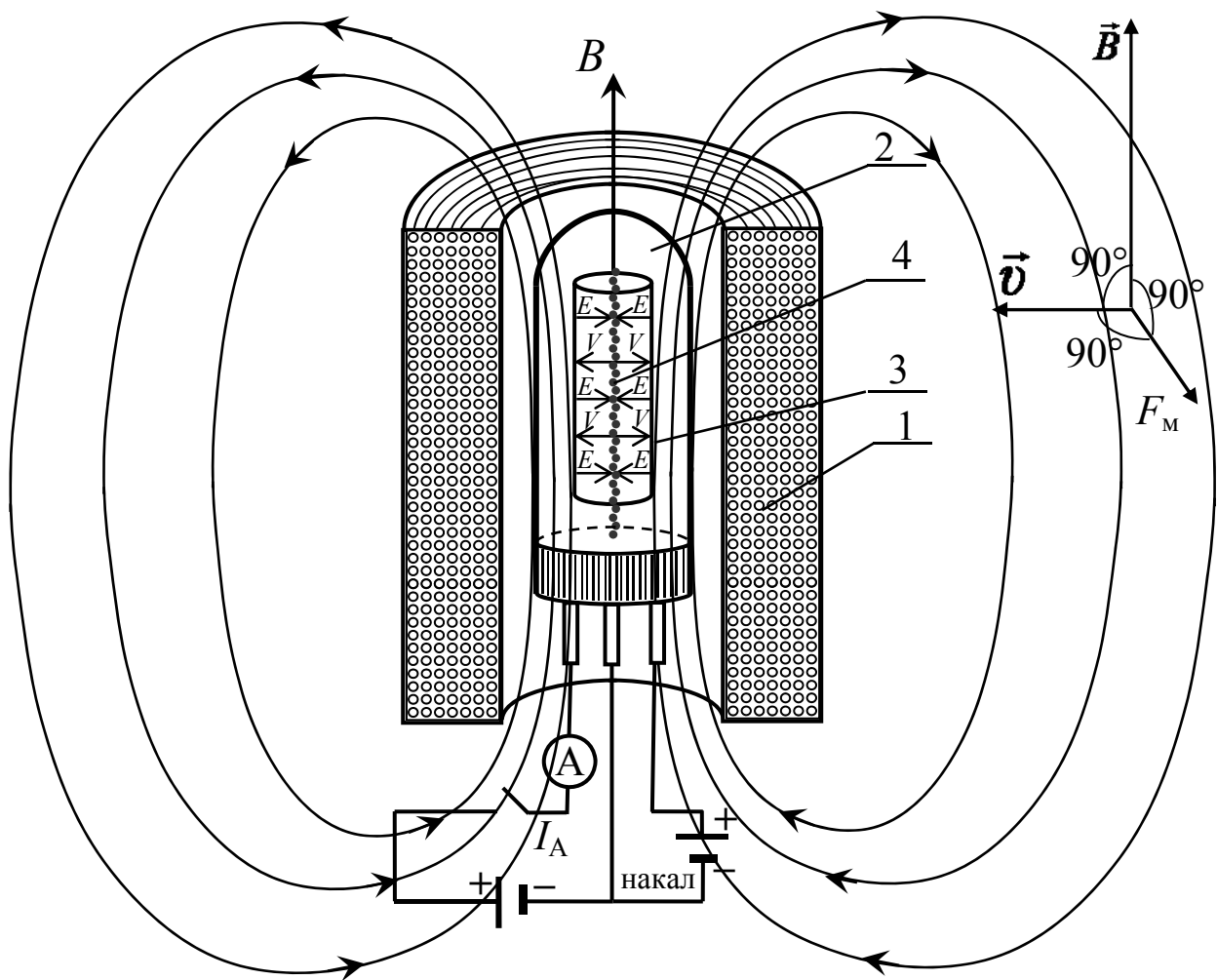


Рис. 3.4.
1 – соленоид, 2 – диод, 3 – анод, 4 – катод

Если магнитное поле отсутствует, то электроны под действием электрического поля движутся прямолинейно от катода к аноду (рис. 3.5, а) и в анодной цепи возникает анодный ток, зависящий от анодного напряжения и тока накала. Если, не меняя анодного напряжения и тока накала, приложить небольшое магнитное поле в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа (рис. 3.5, б), то под действием этого поля траектория электронов искривляется, но все электроны, в конечном счете, попадут на анод и в анодной цепи будет протекать такой же анодный ток, как и в отсутствии магнитного поля. По мере увеличения индукции магнитного поля \vec{B} траектория электронов будет все больше искривляться и при некотором значении $B = B_{кр}$, называемом критическим, траектория электронов будет лишь касаться анода и электроны вернуться на катод (рис. 3.5, в).

Таким образом, при $B = B_{кр}$ анодный ток резко падает до нуля. При дальнейшем увеличении \vec{B} траектория электронов будет еще больше искривляться (рис. 3.5, г) и, следовательно, анодный ток будет оставаться равным нулю.

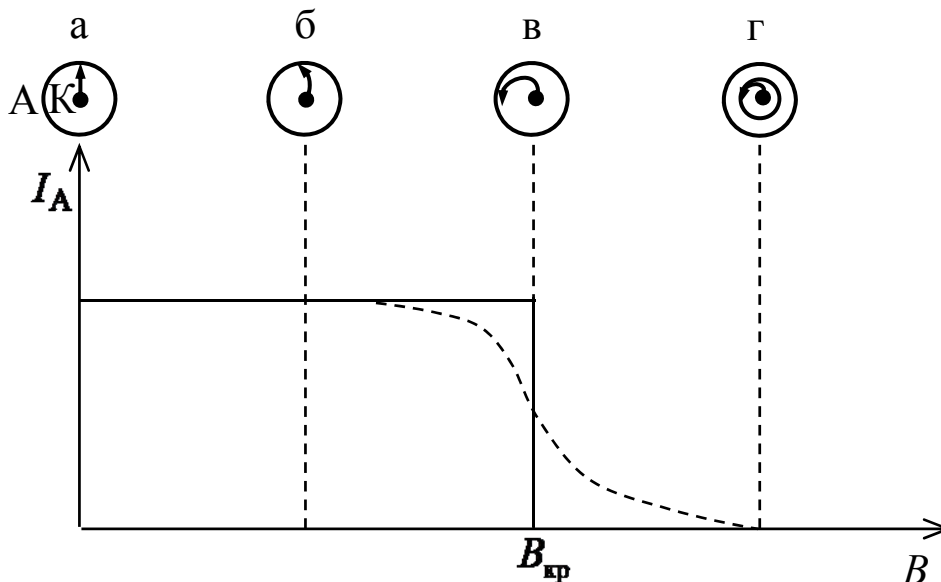


Рис. 3.5. Сбросовая характеристика магнетрона

Зависимость анодного тока I_A от величины индукции магнитного поля B при постоянном напряжении между катодом и анодом называется сбросовой характеристикой магнетрона. Вертикальный сброс анодного тока при I_A (сплошная кривая, рис. 3.4) справедлив в предположении, что электроны покидают катод со скоростями, равными нулю. В реальных условиях электроны имеют разброс по тепловым скоростям, поэтому резкой сбросовой характеристики не получается, и она имеет вид кривой, изображенной пунктирной линией (рис. 3.5).

В пространстве между катодом и анодом напряженность электрического поля определяется так же, как и в цилиндрическом конденсаторе, и равна

$$E = \frac{u_A}{\ln \frac{r_A}{r_K}} \cdot \frac{1}{r}, \quad (3.14)$$

где u_A – напряжение между анодом и катодом, r_A и r_K – радиусы анода и катода, r – расстояние от оси катода до данной точки поля.

В магнетроне радиус катода много меньше радиуса анода. При

условии $r_A \gg r_K$ из формулы (3.14) следует, что напряженность поля E , максимальная у катода, с увеличением r быстро уменьшается до нуля. Поэтому основное изменение скорости электронов происходит вблизи катода и при дальнейшем движении их скорость будет изменяться незначительно. Приближенно можно считать, что в этом случае электроны движутся в магнитном поле с постоянной по величине скоростью и, следовательно, их траектории будут близки к окружности. Предполагая, что траектория электрона при I_A – окружность, радиус которой приближенно можно считать равным $R = \frac{r_A}{2}$, и, используя уравнение (3.8), получаем формулу для магнитной индукции критического магнитного поля

$$B_{\text{кр}} = \frac{v}{\left(\frac{e}{m}\right) \cdot \left(\frac{r_A}{2}\right)}. \quad (3.15)$$

Магнитное поле работы по изменению скорости электрона не совершает ($\vec{v} \perp \vec{F}$), поэтому кинетическая энергия электрона равна работе сил электрического поля. Следовательно,

$$\frac{mv^2}{2} = eu_A, \quad (3.16)$$

и скорость движения электронов равна

$$v = \sqrt{\frac{2eu_A}{m}}. \quad (3.17)$$

Из соотношений (3.15) и (3.17) следует, что удельный заряд электрона равен

$$\frac{e}{m} = \frac{8u_A}{B_{\text{кр}}^2 r_A^2}, \quad (3.18)$$

где $r_A = 4$ мм – радиус анода.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Приборы и оборудование. Описание установки

Кассета ФПЭ-03

Источник питания

Цифровой вольтметр В7-40

Принципиальная схема установки приведена на рис. 4.1.

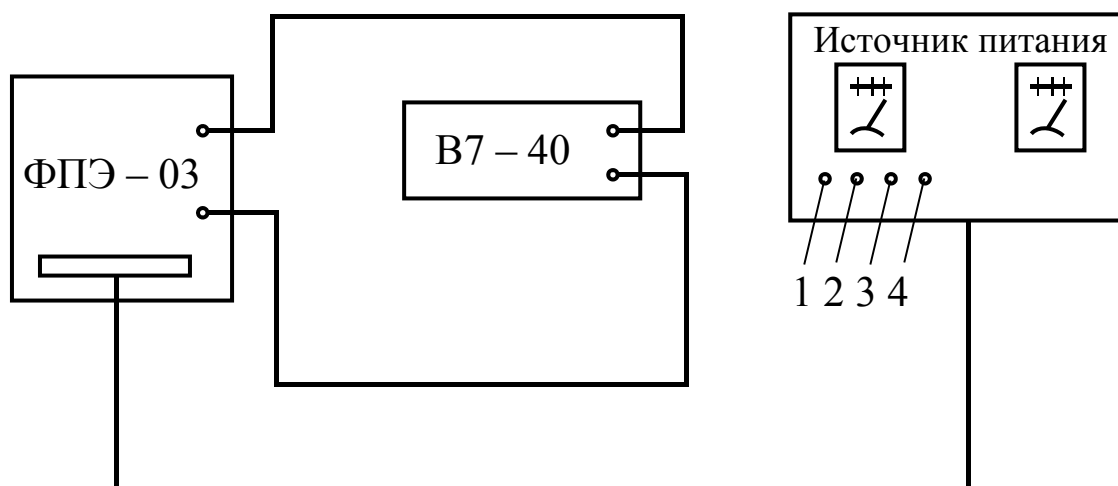


Рис. 4.1

Питание на соленоид и лампу, которые находятся в кассете ФПЭ-3, подается с источника питания. Регулирование анодного напряжения U_A и тока соленоида I_C производится с помощью ручек источника питания, анодный ток I_A измеряется цифровым вольтметром.

5. ТРЕБОВАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Прежде чем приступить к работе, внимательно ознакомьтесь с заданием и оборудованием.
2. Проверьте заземление лабораторной установки и изоляцию токонесущих проводов. Немедленно сообщите преподавателю о замеченных неисправностях.
3. Не оставляйте без присмотра лабораторную установку. Это может привести к несчастному случаю.
4. По окончании работы приведите в порядок свое рабочее место. Обесточьте приборы.

6. ЗАДАНИЯ

1. Измерить силу анодного тока в лампе в зависимости от тока в соленоиде при напряжениях между электродами 50 В, 60 В, 70 В.
2. Построить сбросовые характеристики и по ним определить критические значения тока в соленоиде.
3. Определить значение критической индукции магнитного поля в магнетроне.

4. Вычислить величину удельного заряда электрона для каждого значения критической индукции магнитного поля в магнетроне.

5. Определить абсолютную и относительную погрешности измерений удельного заряда электрона.

7. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ

1. Проверить электрическую схему лабораторной установки (рис 4.1).

2. Установить ручки 2, 3 источника питания в положения, соответствующие минимальному току I_C в соленоиде и минимальному анодному напряжению U_A , путем поворота их против часовой стрелки в крайнее положение.

3. Включить источник питания и вольтметр в сеть.

4. Путем поворота ручки 3 источника питания по часовой стрелке установить анодное напряжение $U_A = 50$ В.

5. Нажать клавишу 4 на передней панели источника питания и установить путем поворота ручки 2 силу тока в соленоиде, равную 0,4 А.

6. Нажать на вольтметре клавишу « $I =$ », соответствующую измерению постоянного тока, и клавишу «АВП», соответствующую автоматическому выбору пределов измерения анодного тока I_A в магнетроне.

7. Ступенчато изменяя силу тока I_C в соленоиде с шагом 0,1 А вплоть до 2,5 А, измерить соответствующие значения силы анодного тока I_A в магнетроне.

8. Полученные результаты занести в табл. 7.1, обратив внимание на размерность измеренных значений анодного тока I_A .

9. Повторить пункты 7, 8 для значений анодного напряжения U_A , равных 60 В и 70 В. Данные занести в табл. 7.1.

10. Построить сбросовые характеристики в виде графиков на миллиметровой бумаге. Примерный вид сбросовой характеристики показан на рис. 7.1.

11. Определить критическую индукцию магнитного поля $B_{кр}$. Для этого, найдя пересечение прямолинейных участков сбросовой характеристики, отпустить из точки O (рис. 7.1) на ось абсцисс перпендикуляр и определить $I_{Cкр}$.

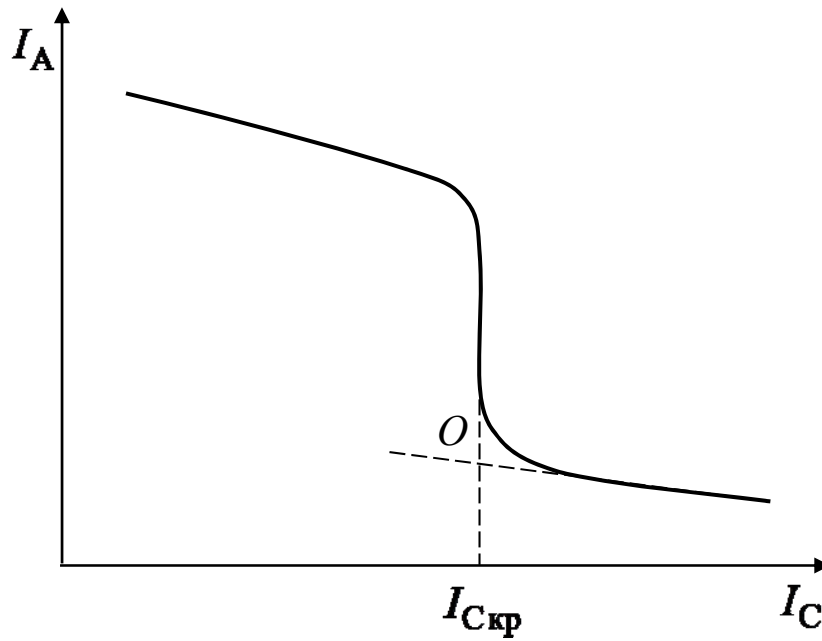


Рис. 7.1

Критическую индукцию магнитного поля найти по формуле

$$B_{кр} = k \cdot I_{кр}, \quad (7.1)$$

где $k = (0,014 \pm 0,001) \frac{\text{кг}}{\text{А}^2 \text{с}^2}$.

12. Вычислить $\frac{e}{m}$ по формуле (3.18) для каждого значения $B_{кр}$ в соленоиде. Занести полученные результаты в табл. 7.2.

13. Найти среднее значение удельного заряда электрона и сравнить с табличным значением.

14. Вычислить относительную и абсолютную погрешность измерений удельного заряда электрона.

15. Результат измерения удельного заряда $\left(\frac{e}{m}\right)$ записать в виде

$$\frac{e}{m} = \left[\left(\frac{e}{m}\right)_{\text{ср}} \pm \left(\Delta \frac{e}{m}\right) \right] \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}.$$

Таблица 7.1.

$u_A = 50 \text{ В}$		$u_A = 60 \text{ В}$		$u_A = 70 \text{ В}$	
$I_C, \text{ А}$	$I_A, \text{ мА}$	$I_C, \text{ А}$	$I_A, \text{ мА}$	$I_C, \text{ А}$	$I_A, \text{ мА}$

Таблица 7.2

п/п	$u_A, В$	$I_{кр}, А$	$B_{кр}, Тл$	$\frac{e}{m}, \frac{Кл}{кг}$	$\Delta\left(\frac{e}{m}\right), \frac{Кл}{кг}$	$\frac{\Delta\left(\frac{e}{m}\right)}{\frac{e}{m}}, \%$
1						
2						
3						

Контрольные вопросы

1. Дайте определение удельного заряда электрона. Какие методы определения удельного заряда электрона Вы знаете?

2. Чему равна сила Лоренца? В чем разница действия на заряженные частицы составляющих этой силы?

3. Чему равна работа силы Лоренца при движении заряженной частицы в магнитном поле? Ответ обоснуйте.

4. От чего зависит форма траектории заряженной частицы, движущейся в магнитном поле?

5. Как устроен магнетрон? В чем суть метода магнетрона для определения удельного заряда электрона?

6. Как в работе определяется критическая индукция магнитного поля $B_{кр}$? Какова форма траектории движения электрона при $B < B_{кр}$, $B = B_{кр}$, $B > B_{кр}$?

7. Какова причина отличия экспериментальной сбросовой характеристики от теоретической?

Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Номер, название и цель работы.

2. Краткий конспект теоретической части с расчетными формулами.

3. Таблицы с результатами измерений и вычислений удельного заряда $\frac{e}{m}$. Расчеты вычислений $\frac{e}{m}$ должны быть приведены в отчете.

4. Сбросовые характеристики магнетрона на миллиметровой бумаге.

5. Формулы и расчеты абсолютной и относительной погрешностей измерения удельного заряда электрона.

6. Выводы.

Критерии результативности выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- усвоил основные закономерности движения заряженных частиц в электрических и магнитных полях;
- правильно выполнил экспериментальную часть работы;
- правильно построил графики зависимости величин анодного тока от силы тока соленоида $I = f(I_c)$ и по ним определил величину критического тока I_c ;
- правильно выполнил вычисления и получил достоверную величину удельного заряда;
- определил абсолютную и относительную погрешности измерений;
- составил отчет, соответствующий предъявляемым к нему требованиям;
- сформулировал выводы о проделанной работе;
- подготовил ответы на все контрольные вопросы.

Список литературы

1. *Савельев И. В.* Курс общей физики. Т. 2. – КноРус, 2012.
2. *Детлаф А. Н., Яворский Б. М.* Курс физики. – М.: Academia, 2012.
3. *Трофимова Т. И.* Курс физики. – М.: Высшая школа, 2012.

Составитель СТРОКИНА Венера Рамазановна

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА
МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Методические указания к лабораторной работе № 46
по дисциплине «Физика»

Подписано в печать 2015. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Печать плоская. Гарнитура Nimes New Roman Cyr.
Усл. печ. л. 1,1. Усл.-кр.-отг. 1,1. Уч-изд.л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ №
ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный
технический университет
Редакционно-издательский комплекс УГАТУ
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12