

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Ю. А. Бурачевский

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА
МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА
(МАГНЕТРОН)**

Методические указания по выполнению компьютерных лабораторных работ по физике для студентов всех специальностей

Томск
2023

УДК 531.262
ББК 22.3
Б 912

Рецензент
Зенин А.А., доцент, канд. техн. наук

Одобрено на заседании каф. физики протокол №104 от 16.04.23

Бурачевский, Юрий Александрович

Б 912 Определение удельного заряда электрона методом магнетрона (магнетрон): метод. указания к выполнению лабораторной работы по физике / Ю. А. Бурачевский. – Томск: Томский гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 17 с.

Представлена краткая теория движения заряженной частицы во взаимно перпендикулярных магнитном и электрическом полях. Рассмотрен метод определения удельного заряда электрона методом магнетрона. Описана экспериментальная установка, а также методика проведения измерений и обработки результатов.

Для студентов ТУСУРа, обучающихся по техническим направлениям подготовки и специальностям.

УДК 531.262
ББК 22.3

© Бурачевский Ю. А., 2023
© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ	4
2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	9
3 ЗАДАНИЕ.....	10
4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	11
5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ	15
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	17

ВВЕДЕНИЕ

Удельным зарядом частицы называется физическая величина, равная отношению заряда частицы к её массе - q/m . Соответственно, удельный заряд электрона, это физическая величина, равная отношению заряда электрона к его массе - e/m .

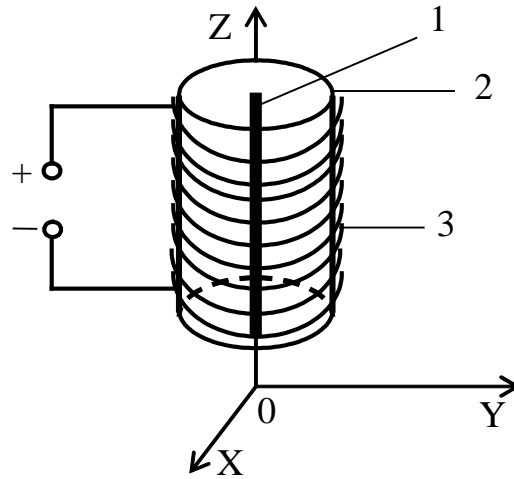
Цель работы – определить величину удельного заряда электрона, используя метод магнетрона.

1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

При движении заряженной частицы в электрическом и магнитном полях траектория её движения зависит как от величины напряжённостей данных полей, так и от взаимной ориентации векторов скорости частицы и напряжённостей электрического и магнитного полей. В отдельности траектория движения частицы не зависит от её заряда или массы, а полностью определяется отношением q/m . Зная скорость и траекторию частицы, движущейся одновременно в электрическом и магнитном полях, структура которых задана, можно определить величину и знак удельного заряда, получить ценные сведения о природе частицы и о тех процессах, в которых она возникает. Определение удельного заряда имеет большое значение: если одна величина известна, то по найденному значению q/m можно определить и другую. Именно таким образом была определена масса электрона.

В настоящее время известны различные способы определения удельного заряда электрона: метод магнитной фокусировки, метод магнетрона, метод Чайлда-Ленгмюра, оптические методы и т.д. Одним из простейших является метод магнетрона, в котором поток заряженных частиц управляется одновременно электрическим и магнитным полями, направленными взаимно перпендикулярно.

В качестве магнетрона можно использовать электронную лампу с цилиндрическим анодом и прямолинейным катодом, расположенным на оси анода. Между анодом и катодом приложено постоянное напряжение, создающее радиальное электрическое поле. На лампу надевают соленоид, по которому протекает постоянный ток, создающий постоянное магнитное поле, направленное вдоль оси анода (рисунок 1.1).



1 – катод; 2 – анод; 3 – соленоид.

Рисунок 1.1 – Магнетрон

Электроны, испускаемые накалившимся катодом, в отсутствие магнитного поля движутся к аноду так, что проекция их траектории на плоскость XOY представляет собой отрезки прямых (рис. 1.2).

При включении тока в соленоиде, его магнитное поле будет действовать на движущийся электрон с силой Лоренца:

$$\vec{F}_л = e[\vec{v}, \vec{B}], \quad (1.1)$$

где e – заряд электрона;

\vec{v} – скорость электрона;

\vec{B} – индукция магнитного поля.

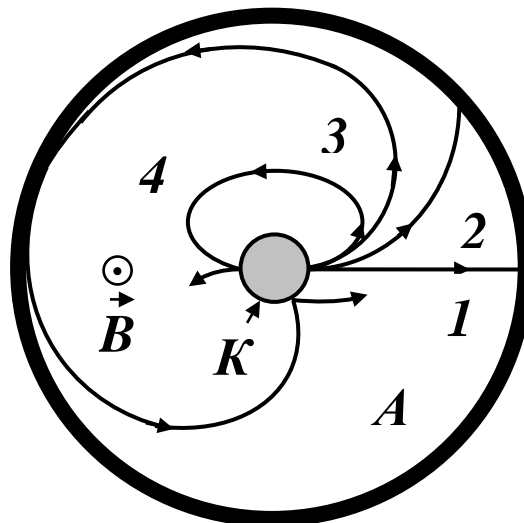
Направление вектора индукции магнитного поля \vec{B} определяется по правилу буравчика. Направление силы Лоренца определяется по правилу векторного произведения с учётом знака заряда. Вектор силы всегда перпендикулярен вектору скорости электрона. Это значит, что сила Лоренца является центростремительной силой и при движении электрона в плоскости XOY будет справедливо равенство

$$evB = \frac{mv^2}{r} \quad \text{или} \quad \frac{e}{m} = \frac{v}{Br}. \quad (1.2)$$

$$r = \frac{mv}{eB} \quad (1.3)$$

Следовательно, при возрастании скорости электронов при приближении их к аноду возрастает и радиус кривизны траектории. В слабом магнитном поле электроны будут двигаться по криволинейным траекториям, достигая анода (рис. 1.2).

При увеличении тока в соленоиде возрастает индукция магнитного поля и уменьшается радиус кривизны траектории электрона. Увеличивая магнитную индукцию B , можно достигнуть такого её значения $B_{кр}$, начиная с которого электроны перестанут достигать анода (рис. 1.2). Анодный ток при этом становится близким к нулю.



A – анод; K – катод.

1. $B_1 = 0$; 2. $B_2 > 0$; 3. $B_3 = B_{кр}$; 4. $B_4 > B_{кр}$. $B_2 < B_3 < B_4$.

Рисунок 1.2 – Проекция траекторий электрона на плоскость XOY при различных значениях индукции магнитного поля.

Если катод принять за бесконечно тонкую нить (его радиус много меньше расстояния от катода до анода), то приближённо можно считать, что при $B = B_{кр}$ электроны движутся по окружностям радиуса

$$r = \frac{R}{2}, \quad (1.4)$$

где R – расстояние от катода до анода.

Если пренебречь распределением по скоростям вылетевших из катода электронов и приближённо принять скорость их вылета равной нулю, то для определения значения скорости v в формулах (1.2) можно воспользоваться соотношением:

$$eU_a = \frac{mv_{\text{макс}}^2}{2}, \quad (1.5)$$

где U_a - анодное напряжение лампы;

$v_{\text{макс}}$ - максимальная скорость электрона.

Уравнение (1.5), выражающее равенство кинетической энергии электронов вблизи анода и работы электрического поля, даёт лишь приближённое значение для скорости v . Чем ближе конструкция катода к бесконечно тонкой нити, тем с большей точностью выполняется равенство $v = v_{\text{макс}}$.

Учитывая уравнения (1.2), (1.4) и (1.5), получаем:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{\text{кр}}^2 R^2}. \quad (1.6)$$

Магнитное поле в достаточно длинном соленоиде можно приближённо считать однородным и магнитную индукцию определить по формулам:

$$B = \mu \mu_0 n I \quad \text{или} \quad B_{\text{кр}} = \mu \mu_0 n I_{\text{кр}} \quad (1.7)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость среды (для вакуума $\mu = 1$);

μ_0 – магнитная постоянная (в СИ $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м);

n – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида;

$I_{\text{кр}}$ – значение силы тока в соленоиде, при котором индукция магнитного поля достигает критического значения.

Подставляя значение $B_{\text{кр}}$ в уравнение (1.6), окончательно получаем, что

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{\mu^2 \mu_0^2 n^2 I_{\text{кр}}^2 R^2}. \quad (1.8)$$

Таким образом, для вычисления e/m необходимо знать расстояние R от катода до анода, число витков на единицу длины соленоида n и силу тока $I_{кр}$ в соленоиде, при которой исчезает ток в анодной цепи. Значения n и R даны в описании экспериментальной установки. Опыт сводится к снятию зависимости анодного тока I_a от тока в соленоиде I_c . Резкий спад этой кривой соответствует критическим условиям работы магнетрона (рис. 1.3 а).

На самом деле вертикального спада анодного тока наблюдаться не будет. На экспериментальной зависимости $I_a = f(I_c)$ (рисунок 1.3 б) можно выделить три прямолинейных участка. На первом участке все электроны, эмитированные катодом, достигают анода. На втором участке наблюдается плавное уменьшение анодного тока с ростом тока соленоида. Это связано с тем, что в экспериментальной установке катод установлен не точно по оси анода. Кроме этого, радиус катода отличен от нуля, т.е. катод не представляет собой бесконечно тонкую нить. Он является цилиндром малого диаметра. Так же начальные скорости электронов, вылетевших с поверхности катода, не равны нулю, а имеют различные значения (согласно распределению Максвелла). Третий участок обусловлен высокоэнергичными электронами (их скорости много больше средней скорости). Доля их невелика (согласно распределению Максвелла). При данном значении индукции магнитного поля B радиус кривизны траектории электрона изменяется так, что более медленные электроны уже не попадают на анод, а быстрые электроны еще достигают анода. Поэтому с ростом тока соленоида анодный ток медленно спадает (рисунок 1.3б).

В данной работе для определения значения $I_{кр}$ на полученном графике $I_a = f(I_c)$ проводят две прямые: одну (горизонтальную, область 1) через точки до спада анодного тока, другую – через точки, образующие линейный участок в области 2 спада анодного тока. Точка пересечения этих прямых (касательных к областям 1 и 2) будет наиболее точно соответствовать значению $I_{кр}$ (рисунок 1.3б).

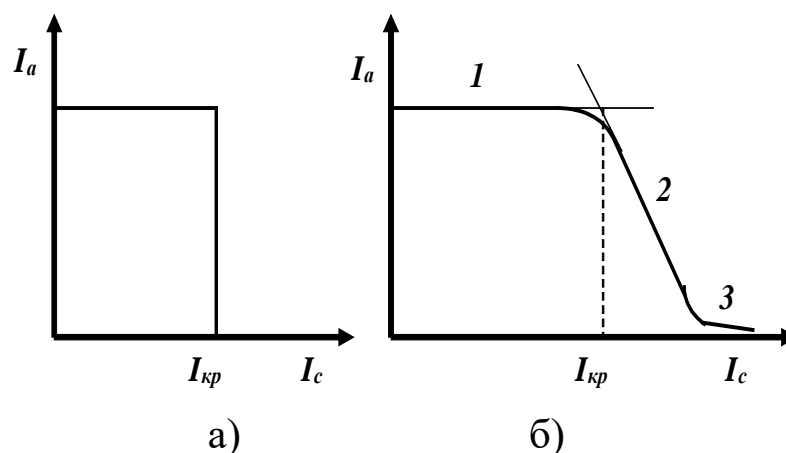


Рисунок 1.3 – Зависимость анодного тока I_a от тока в обмотке соленоида I_c .

2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В качестве магнетрона используется электронная лампа 3Ц22С, которая имеет цилиндрические анод и катод. Диаметр катода равен 1 мм. Несоосность между осями катода и анода порядка 1 мм. Поэтому для данной лампы расстояние от катода до анода можно принять $R = (8 \pm 1)$ мм.

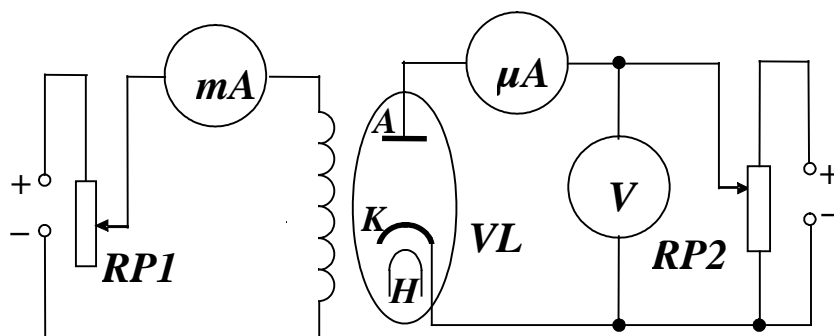
На лампу надевается соленоид с большим числом витков на единицу длины. Густота намотки соленоида для разных лабораторных макетов указана на катушке в левом верхнем окне макета и приведена в таблице 2.1. Номер лабораторного макета указан на правой боковой вертикальной панели.

Таблица 2.1 – Густота намотки соленоида.

Номер стенда	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
n ВИТ./СМ	200	200	200	180	200	180	210	220	200	180	190	200

Погрешность густоты намотки соленоида составляет 5 вит./см.

Для определения зависимости анодного тока от тока соленоида используется следующая схема измерения (рисунок 2.1).



A – анод, *K* – катод, *H* – накал катода лампы

Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки

При выполнении лабораторной с помощью компьютера в качестве измерительных приборов (миллиамперметра, микроамперметра и вольтметра) используется контроллер, измерительные шкалы которого выводятся на экран монитора, создавая **стенд** (вид **стенда** приведен на рисунке 4.3).

Значение анодного тока измеряется микроамперметром (μA). Значение тока соленоида измеряется миллиамперметром (mA). Регулировка тока соленоида осуществляется с помощью ручки потенциометра «Ток соленоида» *RP1*. С помощью ручки потенциометра «Напряжение анода» *RP2* устанавливается анодное напряжение. Обе ручки выведены на панель лабораторного макета.

3 ЗАДАНИЕ

3.1 Изучить работу магнетрона. Снять зависимость анодного тока в лампе от тока соленоида для четырех значений анодного напряжения.

3.2 Рассчитать удельный заряд электрона по формуле (1.8) и сравнить с табличным значением.

3.3 Оценить погрешность определения удельного заряда электрона.

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1 Запустить лабораторную работу.

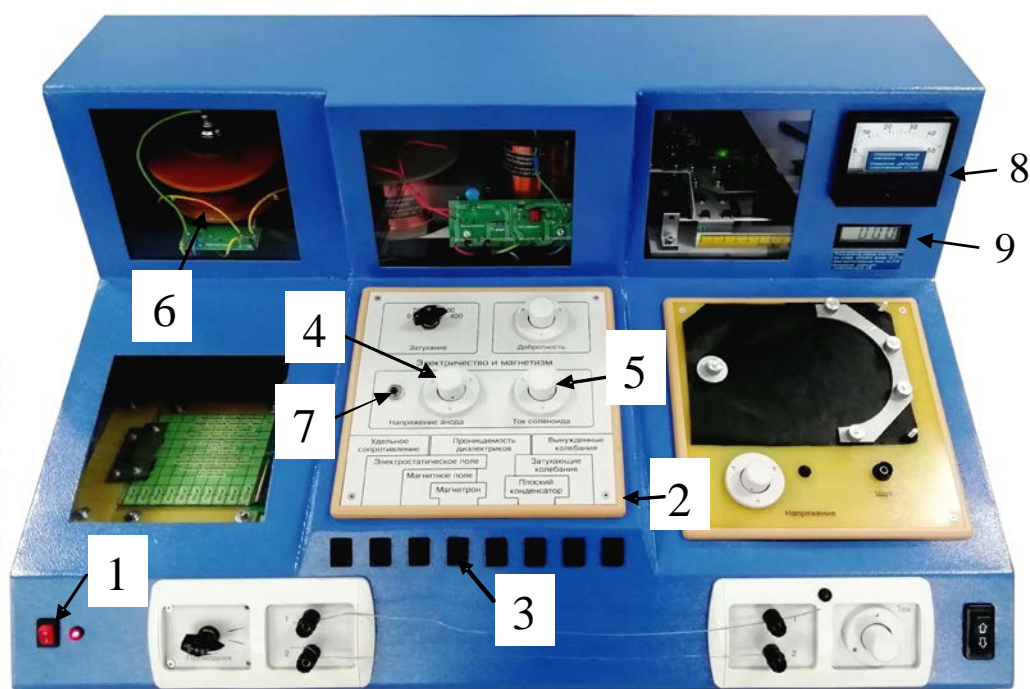
4.1.1 Ознакомиться с видом лабораторного макета (рисунок 4.1) и его органами управления. На данном макете выполняются 8 лабораторных работ. Все лабораторные работы выполняются в сопряжении с компьютером, но возможно выполнение работ по приборам.

4.1.2 На панели лабораторного макета ручки потенциометров «Напряжение анода» (*RP2*) и «Ток соленоида» (*RP1*) вывести в крайнее положение против часовой стрелки. Переключатели, находящиеся ниже панели перевести в положение «Выкл».

4.1.3 Включить питание макета, нажав переключатель «Сеть».

4.1.4 Включить питание данной лабораторной работы переключателем, находящемся ниже панели, под надписью «Магнетрон».

4.1.5 Включить питание компьютера и дождаться загрузки «Windows».



- 1 – переключатель «Сеть»; 2 – панель лабораторного макета;
3 – переключатель данной лабораторной работы; 4 – ручка потенциометра «Напряжение анода»; 5 – ручка потенциометра «Ток соленоида»; 6 – магнетрон; 7 – кнопка включения индикации «Напряжение анода» при работе без компьютера; 8 – ток анода;
9 – ток соленоида и напряжение анода.

Рисунок 4.1 – Внешний вид лабораторного макета.

4.1.6 На рабочем столе (рисунке 4.2), на экране монитора, после загрузки, выбрать папку «Лаборатория». В открывшемся окне выбрать из списка лабораторных работ «Определение удельного заряда электрона». Во вновь открывшемся окне появится **стенд** (панель) данной лабораторной работы (рисунок 4.3), на котором расположены шкалы измерительных приборов и электронная таблица.

4.1.7 Через 1 – 2 минуты (за это время катод лампы нагреется) с помощью потенциометра «Напряжение анода» на макете (см. рисунок 4.1) установить по вольтметру на стенде анодное напряжение в пределах от 9 до 15 В.

4.1.8 Проверить работоспособность схемы. При постоянном анодном напряжении с помощью потенциометра «Ток соленоида», увеличивая ток в соленоиде (начиная с минимального значения),

проследить за изменением анодного тока. Если наблюдаются изменения всех токов, то установить на макете ручку регулировки потенциометра в нулевое положение (повернуть до упора против часовой стрелки) и приступить к измерениям.

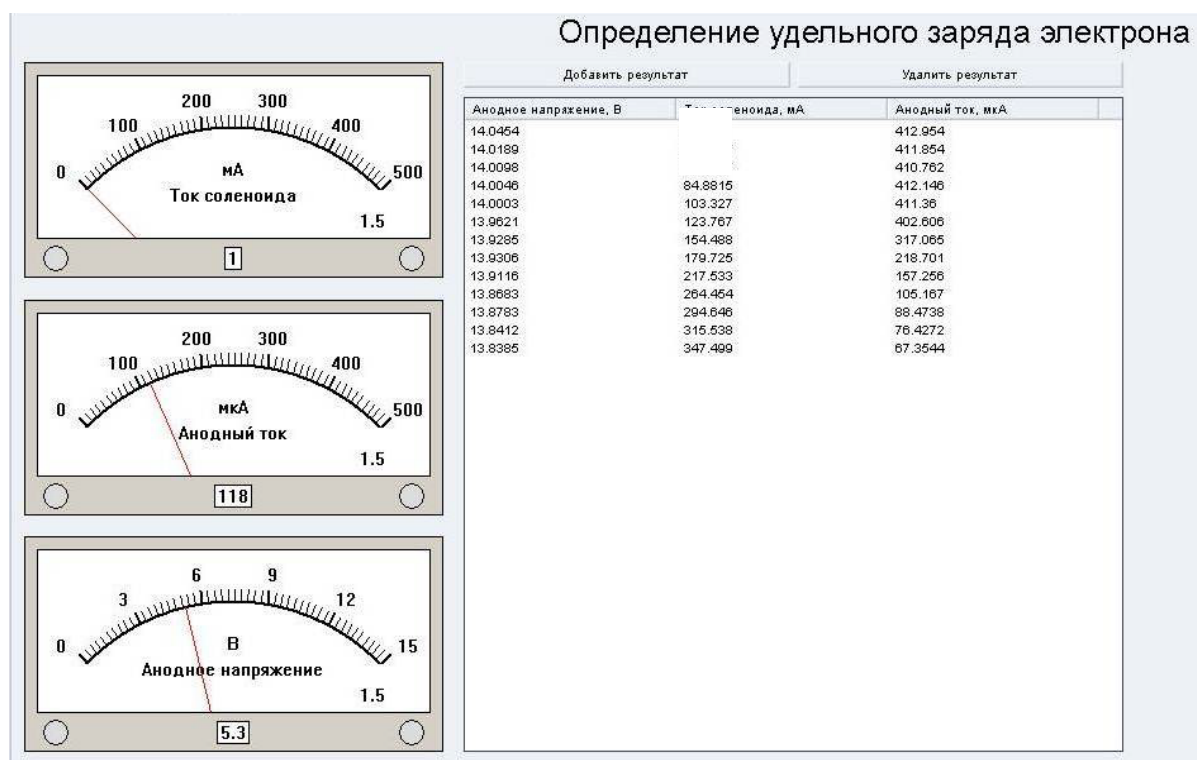


Рисунок 4.3 – Внешний вид стенда на экране монитора.

4.2 Проведение измерений.

4.2.1 Снять зависимость анодного тока от тока соленоида при четырёх значениях анодного напряжения в пределах от 9 В до 15 В.

Причём, на линейном участке спада анодного тока (на втором участке экспериментальной зависимости см. рис. 1.3,б) получить не менее 8 – 10 экспериментальных точек. Результат каждого измерения с помощью кнопки «Добавить результат» занести в электронную таблицу на стенде. Эту кнопку необходимо нажимать с помощью левой кнопки мышки после каждого изменения тока соленоида.

4.2.2 После завершения измерений при одном анодном напряжении потенциометр «Ток соленоида» установить в нулевое положение. Установить новое значение анодного напряжения и повторить п.п.

4.2.1. Далее повторить п.п. 4.2.1 еще для двух других значений анодного напряжения.

4.2.3 После завершения всех измерений данные из электронной таблицы переписать в таблицу 4.1 в рабочей тетради.

4.2.4 После записи данных в рабочую тетрадь закрыть все окна на экране, выключить макет.

Таблица 4.1 – Зависимость анодного тока I_a от тока соленоида I_c при различных значениях анодного напряжения U_a .

Номер опыта	$U_a =$ В		$U_a =$ В		$U_a =$ В		$U_a =$ В	
	$I_c,$ мА	$I_a,$ μА	$I_c,$ мА	$I_a,$ μА	$I_c,$ мА	$I_a,$ μА	$I_c,$ мА	$I_a,$ μА
1								
2								
3								
·								
13								
14								
15								
	$I_{кр} =$ мА		$I_{кр} =$ мА		$I_{кр} =$ мА		$I_{кр} =$ мА	

4.3 Обработка результатов измерений.

4.3.1 По полученным значениям на одном графике необходимо построить четыре зависимости $I_a = f(I_c)$ для выбранных значений анодных напряжений и графически определить значения критического тока ($I_{кр}$).

4.3.2 Зная значения критического тока $I_{кр}$, для выбранных анодных напряжений, рассчитать четыре значения e/m . Найти среднее значение полученных результатов и систематическую, случайную и общую погрешности определения удельного заряда электрона.

4.3.3 Для вычисления случайной погрешности и среднего значения удельного заряда электрона на экране монитора установить указатель мышки на папку папка «Погрешность измерений», открыть её. Открыть «Случайную погрешность», ввести полученные значения и рассчитать случайную погрешность.

4.3.4 Исходя из формулы (1.8) рассчитать систематическую погрешность.

4.3.5 Рассчитать общую погрешность и результат записать в виде:

$$\frac{e}{m} = \left\langle \frac{e}{m} \right\rangle \pm \sigma_{общ} \left\{ \left\langle \frac{e}{m} \right\rangle \right\}$$
$$\varepsilon \left\{ \frac{e}{m} \right\} = \frac{\sigma_{общ} \left\{ \left\langle \frac{e}{m} \right\rangle \right\}}{\left\langle \frac{e}{m} \right\rangle} \times 100\%$$

4.3.6 Проанализировать полученные результаты и сделать вывод.

4.4 Порядок выполнения работы без компьютера.

4.4.1 Индикация осуществляется с помощью приборов: стрелочного «Анодный ток» и цифрового «Ток соленоида» и «Напряжение анода», расположенных справа сверху на вертикальной панели макета.

4.4.2 Через 1 – 2 минуты после включения с помощью потенциометра «Напряжение анода» на макете (рис. 4.1) установить по стрелочному вольтметру анодное напряжение в пределах от 9 до 15 В. Для этого нажать кнопку 7 на панели лабораторного макета и удерживая ее установить нужное напряжение.

4.4.3 Проверить работоспособность схемы. Для этого, отпустив кнопку 7 на панели при постоянном анодном напряжении с помощью потенциометра «Ток соленоида» (рис. 4.1), увеличивать ток в соленоиде. Индикация тока в соленоиде осуществляется с помощью цифрового индикатора 9.

Ток соленоида увеличивать, начиная с минимального значения и проследить за изменением анодного тока (стрелочный прибор 8 на вертикальной панели макета). Установить на макете ручку регулировки потенциометра в нулевое положение (повернуть до упора против часовой стрелки) и приступить к измерениям.

4.4.4 Снять зависимость анодного тока от тока соленоида при четырёх значениях анодного напряжения в пределах от 9 В до 15 В. Причём, на линейном участке спада анодного тока (на втором участке экспериментальной зависимости см. рисунок 1.3 б) получить не менее 8 – 15 экспериментальных точек. Результат каждого измерения занести в табл. 4.1.

4.4.5 После завершения измерений при одном анодном напряжении потенциометр «Ток соленоида» установить в нулевое положение. Установить новое значение анодного напряжения и повторить п.п.

4.4.4. Далее повторить п.п. 4.4.4 еще для двух других значений анодного напряжения.

Примечание. Измерительные приборы 8 и 9 имеют множители. «Анодный ток» - $\times 10$ мкА, «Напряжение анода» - $\times 0,01$ В.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

5.1 Как устроена магнетронная система?

5.2 От чего зависит радиус кривизны траектории электрона в магнетроне?

5.3 Какая сила называется силой Лоренца и как определяется её направление?

5.4 Почему сила Лоренца не изменяет кинетической энергии заряженной частицы?

5.5 По какому правилу и как определяется направление вектора магнитной индукции в соленоиде при заданном направлении тока в нём?

5.6 Что означают величины, входящие в формулу для определения магнитной индукции?

5.7 Что происходит с электронами, вылетевшими из катода, если величина магнитной индукции $B \geq B_{кр}$?

5.8 Какие из характеристик, измеренных и рассчитанных в данной работе, зависят от величины напряжения?

5.9 В какой цепи токи больше: в анодной цепи или в цепи соленоида?

5.10 Каким способом в данной работе определяется величина критического тока $I_{кр}$?

5.11 Ток эмиссии катода постоянен при постоянном токе накала. Почему при увеличении тока в соленоиде ($I > I_{кр}$) наблюдается снижение анодного тока?

5.12 Почему в экспериментальной зависимости $I_a = f(I_c)$ не наблюдается резкого спада анодного тока при величине магнитной индукции $B \geq B_{кр}$?

5.13 Два электрона с кинетическими энергиями E_1 и E_2 движутся в магнитном поле, перпендикулярно направлению поля. Найти отношение их периодов обращения и радиусов траекторий.

5.14 Определить частоту вращения (циклотронную частоту) частицы массы m и зарядом q в магнитном поле индукции B .

5.15 Выполняется ли принцип независимости движения для заряженных частиц, движущихся одновременно в электрическом и магнитном полях?

5.16 Электрон, обладающий скоростью v , попадает в однородное магнитное поле, индукция которого перпендикулярна скорости v . Окружность, какого радиуса описывает электрон?

5.17 Заряженная частица, пролетая некоторую область пространства, не отклоняется от первоначального направления движения. Можно ли на основании этого факта утверждать, что магнитное поле в этой области отсутствует?

5.18 Пучок протонов, попадая в некоторую область пространства, отклоняется на некоторый угол. Можно ли на основании этого факта определить, каким полем вызвано отклонение, электрическим или магнитным?

5.19 Протон и электрон, имеющие одинаковую скорость, попадают в однородное магнитное поле, индукция B которого перпендикулярна скорости частиц. Как будут различаться их траектории?

5.20 Протон и электрон, ускоренные одинаковой разностью потенциалов, влетают в однородное магнитное поле. Во сколько раз

радиус кривизны траектории протона будет больше радиуса кривизны траектории электрона?

5.21 Протон и электрон влетают в однородное магнитное поле с одинаковой скоростью. Во сколько раз радиус кривизны траектории протона будет больше радиуса кривизны траектории электрона?

5.22 Показать, что какой бы скоростью v ни обладал электрон, влетающий в однородное магнитное поле с индукцией B , и каким бы ни был угол между векторами v и B , время T , за которое он опишет виток винтовой линии, будет одним и тем же.

5.23 Показать, что радиус кривизны траектории заряженной частицы, движущейся в однородном магнитном поле, перпендикулярном её скорости, пропорционален импульсу частицы.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 Савельев И. В. Курс общей физики. В 3 т. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика [Электронный ресурс]: учебное пособие / И. В. Савельев. – СПб.: Лань, 2018. – 500 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/98246>. (дата обращения: 10.04.23)

2 Бурачевский Ю. А. Электричество и магнетизм: учебно-методическое пособие по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной работе [Электронный ресурс] / Ю. А. Бурачевский. – 2018. – 137 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/7729>. (дата обращения: 10.04.23)

3 Зенин А.А. Общие требования и правила оформления отчета о лабораторной работе по физике: Методические указания [Электронный ресурс] / А.А. Зенин. – Томск: ТУСУР, 2019. – 20 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/8957>. (дата обращения: 10.04.23)

4 Мухачев В. А. Оценка погрешностей измерений [Электронный ресурс] / метод. указания к лабораторной работе / В. А. Мухачев, А. Л. Магазинников. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 24 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1099>. (дата обращения: 10.04.23)