

Заикин А.Д., Суханов И.И.

(кафедра ПиТФ НГТУ)

Лабораторная работа № 12

Определение удельного заряда электрона

Цель работы – экспериментально определить удельный заряд электрона e/m и сравнить его с табличным значением.

Экспериментальная установка

Магнетрон M – электронная лампа, имеющая три электрода, катод K , сетку C и анод $Ан$, и помещённая в магнитное поле. Катод – прямая нить, расположенная по оси магнетрона (Рис. 1). При температуре катода порядка 10^3 К наблюдается термоэлектронная эмиссия – электроны вылетают из катода. Сетка и анод выполнены в виде цилиндров, соосных с нитью, причём диаметр цилиндра сетки мал по сравнению с диаметром анода. Электроны могут пролететь через ячейки сетки и попасть на анод.

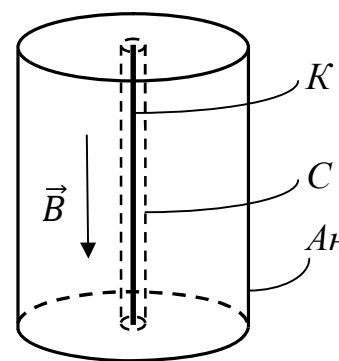


Рис. 1

Электрическая схема экспериментальной установки показана на рис. 2. Слева – электрическая схема включения магнетрона. **Обратите внимание**, что стандартное изображение трёхэлектродной лампы на электрических

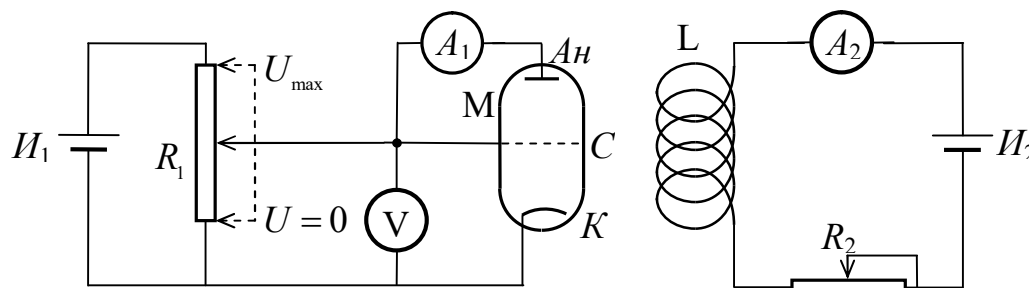


Рис. 2

схемах отличается от внешнего вида магнетрона на рис. 1. К источнику постоянного напряжения I_1 подключено переменное сопротивление R_1 ,

потенциометр, с помощью которого меняют величину анодного напряжения U , подаваемого на магнетрон. Напряжение измеряют вольтметром V . Непосредственно к потенциометру присоединены катод K и сетка C магнетрона. Между анодом и сеткой включён амперметр для измерения анодного тока I_A – потока термоэлектронов с катода, прошедших сетку и попавших на анод.

На рис. 2 справа показана схема включения соленоида L – катушки, создающей магнитное поле в магнетроне. В цепь с источником постоянного напряжения I_2 включены амперметр A_2 для измерения тока I_C через соленоид и переменное сопротивление R_2 , изменяющее его величину.

Магнетрон помещается внутрь катушки, однако на принципиальной электрической схеме (рис. 2) они разнесены. Силовые линии магнитного поля параллельны оси магнетрона, т.е. катодной нити.

Теория

Объёмная концентрация термоэлектронов мала, поэтому межэлектронным взаимодействием пренебрегают. Во всём пространстве между катодом и анодом электроны находятся под действием внешних электрического и магнитного полей. Сила Лоренца

$$\vec{F} = e\vec{E} + e[\vec{v} \times \vec{B}] \quad (1)$$

где e – заряд электрона, \vec{v} – вектор его скорости, \vec{E} – напряжённость электростатического поля, \vec{B} – магнитная индукция.

В общем случае, траектории электрона – сложные кривые. Однако свойства силы Лоренца, устройство магнетрона и схема его включения таковы, что можно действие полей разделить, а уравнения движения упростить до «школьных».

Во-первых, магнитная составляющая силы Лоренца перпендикулярна вектору $e[\vec{v} \times \vec{B}]$ скорости, следовательно, её работа равна нулю:

$$dA = e[\vec{v} \times \vec{B}] \cdot d\vec{l} = e[\vec{v} \times \vec{B}] \cdot \vec{v} dt = 0, \text{ т.к. } [\vec{v} \times \vec{B}] \perp \vec{v}$$

Поэтому кинетическую энергию электрона меняет только работа электростатической силы, равная по модулю изменению потенциальной энергии.

Во-вторых, между сеткой и анодом включён только амперметр A_1 . Внутреннее сопротивление амперметра мало по сравнению с общим сопротивлением цепи. Тогда по закону Ома для участка цепи напряжение "сетка-анод" будет намного меньше анодного напряжения U . Приближённо можно считать, что сопротивление амперметра и соответственно разность потенциалов между сеткой и анодом равны нулю, т.е. электрического поля между этими электродами нет, кинетическая энергия и модуль скорости электрона в пространстве между ними не меняются.

Вылетев из катода, электроны ускоряются в электрическом поле между катодом и сеткой. Конечная скорость v после сетки определяется законом сохранения механической энергии

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

где v_0 – скорость вылета электрона из катода, m – масса электрона.

Кинетическая энергия, приобретаемая электроном в электрическом поле, на три порядка больше его средней тепловой энергии (Докажите это!). Поскольку скорость пропорциональна корню квадратному из кинетической энергии, средняя тепловая скорость электрона примерно в 30 раз меньше приращения скорости в электрическом поле. Поэтому можно начальную скорость электрона считать равной нулю, тогда из (2) следует, что скорость всех электронов на выходе из сетки равна

$$v = \sqrt{2 \frac{eU}{m}} \quad (3)$$

Относительная систематическая погрешность средней (и наиболее вероятной) скорости, т.е. превышение истинной скорости над указанным приближённым значением, равна примерно 3% .

О траектории электрона. На рис. 3 изображено сечение магнетрона, перпендикулярное его оси и силовым линиям магнитного поля \vec{B} . Предположим, мгновенный вектор скорости электрона лежит в этой плоскости. Тогда вся траектория – плоская кривая, т.к. сила $e[\vec{v} \times \vec{B}]$ перпендикулярна вектору скорости и силовым линиям магнитного поля в любой момент времени. На участке «сетка-анод» величина скорости постоянна, поэтому траектория – дуга окружности, радиус r которой определяется центростремительным ускорением во 2-м законе Ньютона

$$m \frac{v^2}{r} = evB \quad (4)$$

Отсюда радиус дуги с учётом (3)

$$r = \frac{mv}{eB} = \frac{\sqrt{2 \frac{m}{e} U}}{B} \quad (5)$$

На рис. 3 показаны несколько траекторий электрона: прямая 1 – для $B = 0$, $r \rightarrow \infty$; и для $0 < B_2 < B_3 < B_4$.

При достаточно сильном магнитном поле B радиус окружности r будет настолько малым, что электроны не будут достигать анода, анодный ток прекратится. Т.к. радиус анода R намного больше радиуса сетки, последним в расчёте можно пренебречь и считать, что граничной траекторией, при которой анодный ток исчезает, будет окружность радиуса $r = R/2$ (окружность 3 на рис. 3).

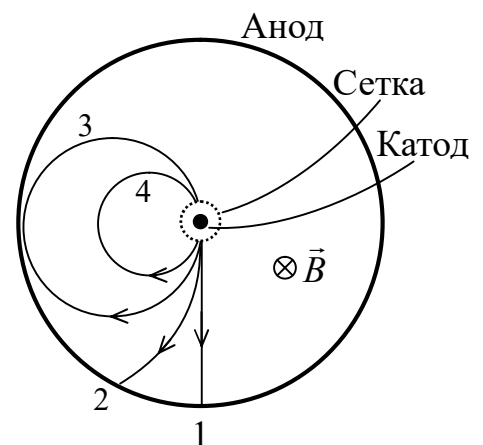


Рис. 3

Таким образом, идеальная зависимость анодного тока от величины магнитной индукции, когда скорости всех электронов одинаковы, представляет собой ступеньку с граничным значением индукции B_0 (рис. 4а): при $B < B_0$ все электроны, прошедшие сетку, попадают на анод, а при $B > B_0$ тока нет.

Магнитная индукция B пропорциональна току соленоида I_C . Поэтому идеальная зависимость анодного тока I_A от тока соленоида I_C – тоже ступенька, изображённая на рис. 4б штриховой линией. Граничное значение

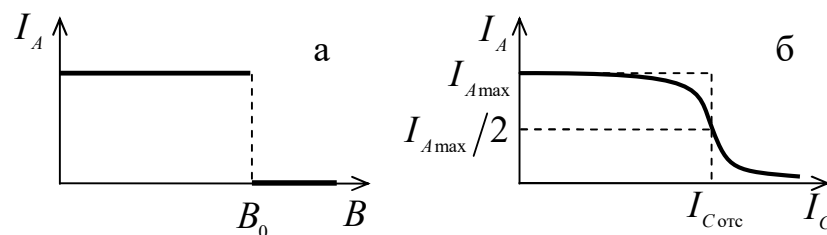


Рис. 4

тока соленоида – ток отсечки $I_{C_{отс}}$. Теоретически при токе соленоида, большем $I_{C_{отс}}$, анодный ток должен быть равным нулю.

Однако реальная зависимость $I_A(I_C)$ – плавная кривая (сплошная линия на рис. 4б), резкой отсечки анодного тока не наблюдается, причём ширина склона $I_A(I_C)$ сравнима с величиной тока отсечки $I_{C_{отс}}$. Причина этого явления – неоднородность магнитного поля вдоль оси магнетрона.

Если длина l соленоида намного больше диаметра витка, то можно считать соленоид бесконечно длинным. В этом приближении магнитное поле внутри соленоида однородно и равно

$$B_{\infty} = \mu_0 \frac{N}{l} I_C \quad (6)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Генри / метр – магнитная постоянная в системе СИ, N – число витков соленоида, $n = N/l$ – линейная плотность витков катушки, т.е. число витков на единицу длины соленоида.

Однако у используемой в экспериментальной установке катушки длина сравнима со средним диаметром витка. Кроме того, катушка многослойная, поэтому для внешних слоёв обмотки отношение длины катушки к диаметру витка ещё меньше, чем для внутренних. По расчётам, поле на оси в центре соленоида равно $0,73 B_\infty$, а на торцах соленоида $0,47 B_\infty$. Следовательно, при данном токе соленоида магнитная индукция вдоль оси магнетрона уменьшается от центра к торцам на 36%. Поэтому по мере увеличения тока соленоида магнитное поле сначала достигает граничного значения B_0 в центре магнетрона, затем область нулевого анодного тока постепенно расширяется вдоль оси к торцам.

Среднее значение магнитной индукции вдоль оси соленоида равно

$$B = KB_\infty = \mu_0 \frac{N}{l} I_C; \quad K = 0,65 \quad (7)$$

Решая уравнение (5) при $r = R/2$ с учётом (7), найдём величину удельного заряда электрона

$$\frac{e}{m} = \frac{8}{\left(K\mu_0 \frac{N}{l} R \right)^2} \frac{U}{I_{C\text{отс}}^2} \quad (8)$$

За величину тока отсечки $I_{C\text{отс}}$ можно принять величину тока соленоида, при котором анодный ток уменьшается вдвое (Рис. 4б)

Задание к работе

1. Снять зависимость анодного тока магнетрона I_A от тока соленоида I_A при анодном напряжении $U = 60$ В. При малых токах соленоида достаточно 3-4 точек, на участке спада анодного тока – 10-15 точек. В процессе измерений необходимо поддерживать постоянным анодное напряжение.
2. Повторить п.1 для анодного напряжения $U = 70$ В, а затем и для $U = 80$ В.

3. Построить на одном графике экспериментальные зависимости $I_A(I_C)$.
4. Определить значение тока отсечки $I_{C\text{отс}}$ для каждой кривой
5. Вычислить по формуле (8) удельный заряд электрона e/m для каждой кривой и найти среднее значение $(e/m)_{\text{cp}}$. Обратите внимание, что первая дробь в (8) имеет одно и то же значение для всех опытов.
6. Вычислить случайную погрешность измерений $\sigma_{e/m}$. Формула (8) – степенная функция своих переменных. Поэтому $\sigma_{e/m}$ оценим по формуле погрешности косвенных измерений

$$\sigma_{e/m} = \left(\frac{e}{m}\right) \sqrt{\left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^2 + \left(2\frac{\sigma_{I_{\text{Comc}}}}{I_{\text{Comc}}}\right)^2 + \left(2\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 + \left(2\frac{\sigma_l}{l}\right)^2}, \quad (8)$$

где можно использовать значения U и I_{Comc} для одного из графиков.

7. Сравнить полученный доверительный интервал с теоретическим значением e/m .

Контрольные вопросы

1. **Экспериментальная установка.** Как устроен магнетрон?
2. Нарисуйте электрические схемы включения магнетрона и соленоида (вопрос для аудиторных занятий).
3. Каково взаимное расположение магнетрона и соленоида?
4. Опишите назначение каждого элемента электрической схемы.
5. Опишите элементы цепи, в которую включён прибор A_2 . Варианты: максимальный ток, минимальный ток.
6. Опишите элементы цепи, в которую включён прибор A_1 . Варианты: напряжение максимальное, минимальное, промежуточное.
7. Опишите последовательность измерений при заданном анодном напряжении.

8. Определите цены деления приборов реальной лабораторной установки № 12, фотографии которых приведены на интернет-странице виртуальной работы № 12 (Фото 2 и 4). На каждом приборе указан предел измерения.
9. **Теория.** Как направлены силовые линии электрического и магнитного полей в магнетроне?
10. Запишите формулу силы Лоренца. Какие у неё составляющие, как они направлены?
11. Запишите уравнение движения электрона в пространстве «катод-сетка». Почему в этом уравнении нет магнитного поля?
12. Оцените кинетическую энергию термоэлектрона, вылетевшего из катода, при температуре электронного газа $T = 1000$ К.
13. Оцените приращение кинетической энергии электрона в ускоряющем электрическом поле eU с разностью потенциалов $U = 100$ В. Какое приближение можно принять, исходя из соотношения приращения энергии электрона в ускоряющем электрическом поле и его первоначальной тепловой энергии? Какую скорость имеет электрон на выходе из сетки с учётом данного приближения? Запишите уравнение движения электрона в пространстве «сетка-анод».
15. Объясните физический смысл левой и правой частей уравнения
 - a. Почему в этом уравнении нет электрического поля? В каком приближении?
 - b. Каково изменение модуля скорости электрона в этом пространстве?
 - c. Как направлен вектор мгновенного ускорения по отношению к вектору скорости?
 - d. Каково изменение модуля мгновенного ускорения? Докажите это, исходя из уравнения движения.

- е. Какова траектория движения электрона, исходя из этого уравнения?
16. Какой вид имеет идеальная зависимость анодного тока магнетрона от тока соленоида?
17. Что такое ток отсечки, с каким физическим явлением он связан, с какой траекторией электронов?
18. **Выведите** теоретическую формулу удельного заряда электрона в опыте с магнетроном.