

## Лабораторная работа 2.29

### ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

**Цель работы:** исследование движения электронов в магнитном поле, созданном внутри соленоида.

**Задание:** определить удельный заряд электрона на основе исследования зависимости анодного тока магнетрона от приложенного магнитного поля.

#### Библиографический список

1. Савельев И.В.- Курс общей физики.- М.: Наука, 1988, т.2, §§ 40, 43, 72, 73.

#### Контрольные вопросы

1. Что такое сила Лоренца? Чему она равна?
2. Какова траектория заряженной частицы, движущейся в однородном магнитном поле, если :
  - 1) вектор ее скорости перпендикулярен вектору индукции магнитного поля?
  - 2) составляет с вектором индукции угол, отличный от прямого?
3. Может ли измениться кинетическая энергия частицы, движущейся в магнитном поле, если другие поля отсутствуют?
4. Что такое магнетрон?
5. Как движутся электроны в магнетроне в отсутствие магнитного поля?
6. Чему равна скорость электронов , достигших анода?
7. Как зависит радиус кривизны траектории электронов от величины индукции магнитного поля?
8. Какое значение индукции магнитного поля называется критическим?
9. Как зависит анодный ток магнетрона от индукции магнитного поля вблизи критического значения?

10. Как направлено магнитное поле в магнетроне относительно цилиндрических электродов вакуумного диода? Как направлено электрическое поле относительно магнитного?
11. Почему в окрестности критического значения тока соленоида анодный ток спадает не сразу, а постепенно?
12. Чему равно табличное значение удельного заряда электрона?

### **Описание аппаратуры и метода измерений**

Известно, что на заряженную частицу (в нашем случае это электрон с зарядом  $e$ ), движущуюся в магнитном поле, со стороны поля действует сила Лоренца

$$\vec{F} = e[ \vec{V}\vec{B} ], \quad (1)$$

где  $e=1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл, а модуль вектора  $\vec{F}$  определяется выражением  $F = eVB \sin \alpha = eV_{\perp} B$ . В плоскости, перпендикулярной направлению магнитной индукции, частица будет описывать окружность, радиус которой можно определить, воспользовавшись вторым законом Ньютона:

$$F = m \frac{V_{\perp}^2}{R}. \quad (2)$$

Из (1)-(2) можно получить выражения для радиуса окружности  $R$

$$R = \frac{mV_{\perp}}{qB}. \quad (3)$$

Действие магнитного поля на движущиеся электроны можно изучить на примере магнетрона - двухэлектродной лампы, помещенной в магнитное поле. Простейший прибор магнетронного типа представляет собой вакуумный диод, у которого цилиндрические катод и анод строго коаксиальны, причем радиус катода значительно меньше радиуса анода (рис. 1). Лампа помещается в однородное магнитное поле, параллельное оси цилиндра так, что на электроны, вылетевшие из катода, действуют одновременно электрическое и магнитное поля.

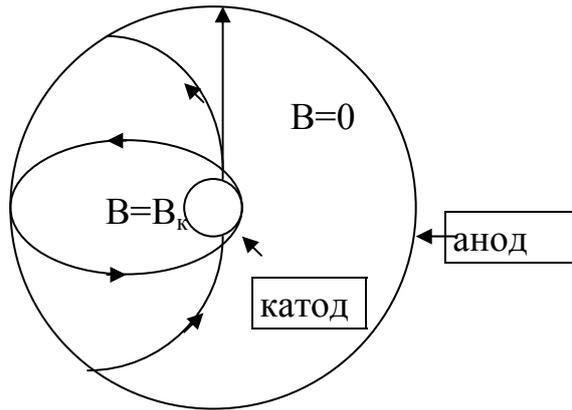


Рис. 1

Электрическое поле является радиальным: в отсутствие магнитного поля электроны движутся в нем по радиусам и, подходя к аноду, имеют скорость

$$V = \sqrt{\frac{2e}{m} U_a}, \quad (4)$$

где  $U_a$  – разность потенциалов между катодом и анодом,  $m$  – масса электрона.

При наличии магнитного поля, направленного вдоль оси магнетрона, траектория электронов искривляется, но вблизи анода скорость электронов по-прежнему определяется формулой (4), являющейся следствием закона сохранения энергии. Подставляя выражение для скорости из (3) в (4), получим:

$$\frac{e}{m} = \frac{2U_a}{B^2 R^2}, \quad (5)$$

где  $R$  – радиус кривизны траектории электрона вблизи поверхности анода.

Из (5) видно, что при заданном анодном напряжении увеличение индукции магнитного поля ведет к уменьшению радиуса кривизны траектории электронов так, что произведение  $B^2 R^2$  остается постоянным. При достаточно высоком  $B$  ( $B=B_k$  на рис. 1) радиус кривизны становится настолько малым, что электрон, описывая кривую, близко подходящую к внутренней поверхности анода, не попадает на него. Соответствующее значение индукции  $B_k$  называется критическим. Расчет

показывает, что в цилиндрическом магнетроне при критическом значении индукции магнитного поля радиус кривизны траектории электрона в точке касания анода примерно равен  $R \approx \frac{1}{2}R_a$ . Тогда, полагая в (5)  $V=B_k$ , получим

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_k^2 r_a^2}. \quad (6)$$

Таким образом, задача определения удельного заряда электрона методом магнетрона сводится к определению индукции критического магнитного поля, соответствующего заданному значению анодного напряжения при заданном  $r_a$ .

Если индукцию магнитного поля, в котором находится магнетрон, постепенно увеличивать, то достижение критического состояния легко обнаруживается по спаду тока, идущего через магнетрон, как показано на рис. 2.

На этом рисунке приведена зависимость величины тока через магнетрон  $I_a$  от силы тока  $I_c$  в соленоиде, создающем магнитное поле при  $U_a = \text{const}$ . Поскольку индукция магнитного поля в соленоиде линейно зависит от силы тока  $I_c$  через соленоид, то этот график фактически представляет собой зависимость  $I_a$  от  $B$ .

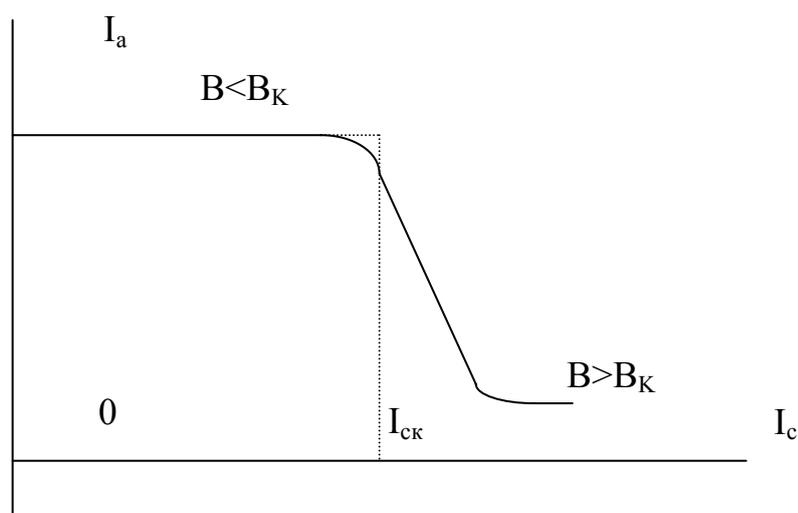


Рис. 2

Изменение силы тока через соленоид от нуля до некоторого  $I_c$ , несколько меньшего критического значения, не вызывает изменения анодного тока, так как в этих условиях все электроны, движущиеся от катода, попадают на анод. Когда  $I_c$  приближается к критическому значению  $I_{ск}$ , электроны перестают попадать на анод и под действием магнитного поля возвращаются к катоду. Поэтому анодный ток при  $I_{ск}$  спадает. Анодный ток спадает не строго вертикально при  $I_{ск}$ , а понижается плавно. Такой характер спада обусловлен тем, что электроны, покидающие катод, имеют неодинаковые скорости. Значение  $I_{ск}$  нужно получить следующим образом: экстраполировать прямой участок спада  $I_a$  до пересечения с продолжением горизонтальной части кривой. Ток соленоида, соответствующий точке пересечения, и будет  $I_c$  (см. рис. 2).

Для снятия критических характеристик служит схема рис. 3. От источника переменного напряжения питается накал лампы (вакуумного диода). Анодное напряжение подается между клеммами А и К и регулируется соответствующей ручкой выпрямителя. Измеряется напряжение вольтметром  $V_a$ . Анодный ток измеряется миллиамперметром  $mA_a$ .

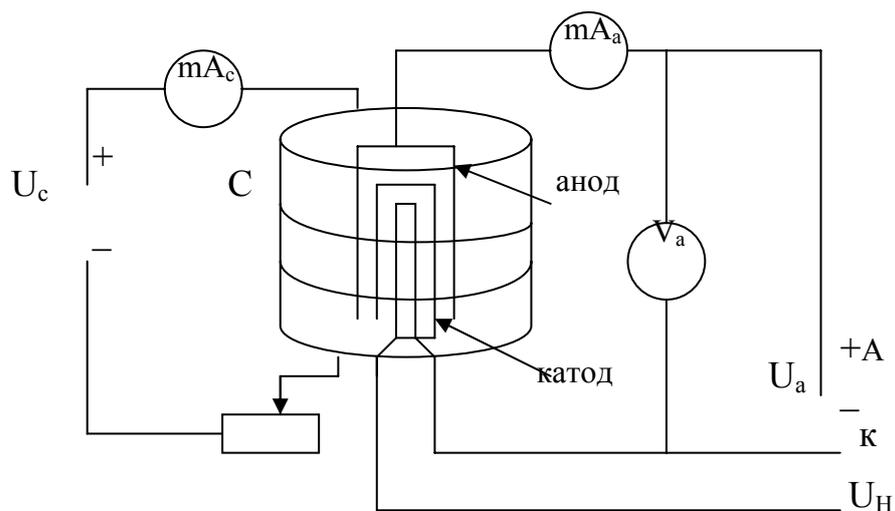


Рис. 3

Магнитное поле создается соленоидом С, внутри которого располагается вакуумный диод так, чтобы ось симметрии его электродов совпадает с осью соленоида. Величина тока в соленоиде регулируется с помощью реостата  $R_c$  и измеряется миллиамперметром  $mA_c$ .

Индукция магнитного поля на оси соленоида конечной длины в точке М (см. рис. 4) равна

$$B_m = \frac{1}{2} \mu_0 I_c n (\cos \alpha + \cos \beta) \quad (7)$$

где  $n$  – число витков соленоида на единицу его длины,  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

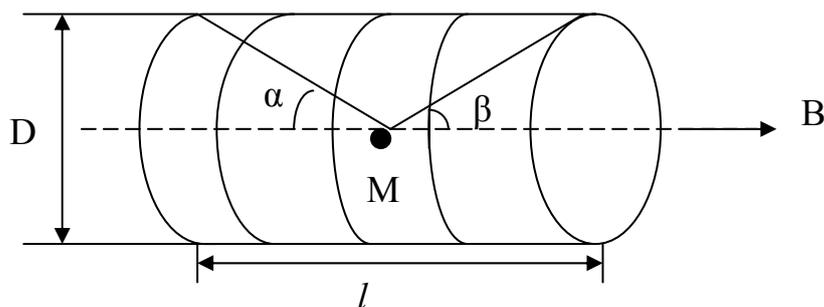


Рис. 4

Лампа расположена так, что анод и катод находятся в средней части соленоида, поэтому

$$\cos \alpha = \cos \beta = \frac{l}{\sqrt{l^2 + D^2}}; \quad (8)$$

$$B = \frac{\mu_0 I_c n l}{\sqrt{l^2 + D^2}}, \quad (9)$$

где  $l$  – длина соленоида,  $D$  – средний диаметр его витков.

Так как  $nl$  представляет собой полное число витков и при  $V=V_k$  ток в соленоиде равен  $I_{ck}$ , то окончательное выражение имеет вид

$$B_k = I_{ck} = \frac{\mu_0 N}{\sqrt{l^2 + D^2}}. \quad (10)$$

Таким образом, определив из критических характеристик  $I_{ck}$ , можно вычислить  $B_k$  а затем и  $e/m$  по формуле (6).

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему согласно рис.3.
2. Составить спецификацию электроизмерительных приборов.
3. После проверки схемы преподавателем приступить к измерениям, для чего:
  - а) включить накал  $U_n$ , выждать 1 –2 минуты, необходимые для прогрева лампы;
  - б) включить анодное напряжение и через 2 –3 минуты установит первое значение  $U_a$ ;
  - в) включит питание соленоида и, изменяя величину тока в нем с помощью реостата, снять критическую характеристику  $I_a = f(I_c)$ .

При снятии характеристики следует вначале просто увеличить ток через соленоид. Следя за величиной анодного тока, но ничего не записывая. Когда анодный ток начнет резко падать, нужно заметить, при каком примерно  $I_c$  это происходит, после чего, уменьшив  $I_c$  до нуля, начать измерения. Нужно произвести 10-15 измерений  $I_c$  и  $I_a$ , меняя ток  $I_c$  от нуля до максимального значения, причем большая часть измерений должна приходиться на область резкого спада анодного тока. При получении критической характеристики анодное напряжение должно оставаться постоянным.

Измерения провести при нескольких значениях анодного напряжения. Результаты занести в таблицу.

### Обработка результатов измерения

1. По экспериментальным данным построить характеристики  $I_a = f(I_c)$ . Определить, как показано на рис.2, критические значения тока соленоида  $I_{ck}$  при различных анодных напряжениях.

2. По формуле (10) рассчитать  $V_k$  для каждого анодного напряжения.
3. Вычислить для каждого анодного напряжения  $e/m$  по формуле (6). Результаты расчетов занести в таблицу.
4. Найти среднее значение удельного заряда электрона и сравнить его со значением, указанным в справочной литературе.