

## Описание экспериментальной установки

Внутри исследуемого соленоида (рис. 2.10.1) с помощью стержня с указателем, скользящим вдоль шкалы, может перемещаться измерительная катушка ИК, соединенная с веберметром — прибором, измеряющим протекающий по нему заряд. Шкала веберметра, как показывает название прибора, градуирована в единицах магнитного потока. Обмотка соленоида питается постоянным током, измеряемым амперметром. Сила тока изменяется реостатом.

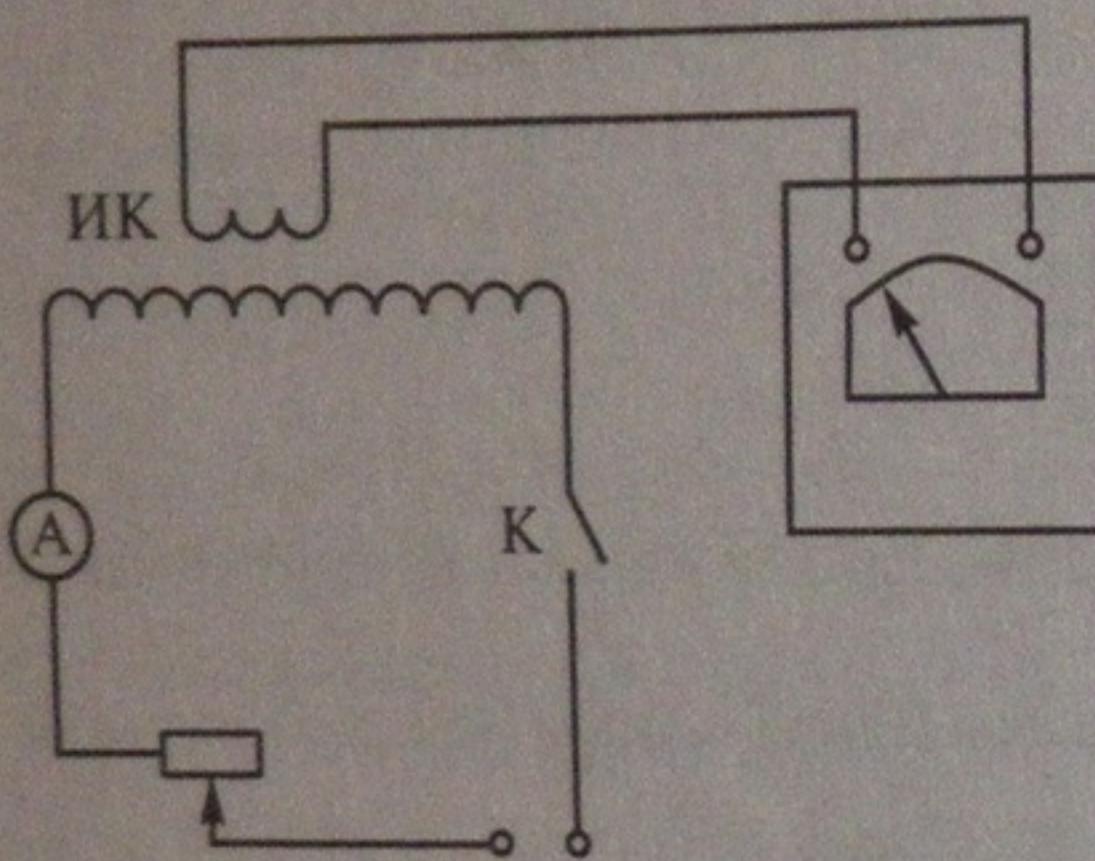


Рис. 2.10.1

Включая ток, отмечают показания веберметров до и после включения. Разность показаний равна значению магнитного потока, сцепленного с измерительной катушкой. Используя данные установки (площадь измерительной катушки ИК и число ее витков  $N$ ), вычисляют искомое значение магнитной индукции в данном месте на оси соленоида.

## Измерения и обработка результатов

### Задание 1. Измерение поля внутри соленоида.

При неизменной силе тока перемещайте измерительную катушку вдоль оси соленоида, измеряя через каждые 1—3 см магнитный поток.

Если стрелка веберметра подошла к краю шкалы, следует поставить переключатель прибора в положение «корректор» и с помощью корректора вывести стрелку примерно на середину шкалы. По окончании измерений переключатель поставьте в положение «арретир».

По полученным данным постройте график зависимости  $B_{\text{эксп}} = f(x)$ , где  $x$  — расстояние от края соленоида до исследуемой точки.

Задание 2. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими.

На графике, полученном в задании 1, постройте в том же масштабе теоретическую кривую зависимости  $B_{\text{теор}} = f(x)$ , пользуясь формулой

$$B_{\text{теор}} = \mu_0 \frac{nI}{2} \left( \frac{l-x}{\sqrt{R^2 - (l-x)^2}} + \frac{x}{R^2 + x^2} \right),$$

где  $n$  — число витков на единицу длины соленоида;  $l$  — длина соленоида;  $x$  — расстояние от края соленоида до исследуемой точки;  $R$  — радиус соленоида.

**Задание 3.** Исследование зависимости индукции внутри соленоида от силы тока в обмотке.

Установите измерительную катушку в определенном месте (вблизи середины соленоида), изменяйте силу тока, отметьте показания веберметра для каждого значения силы тока. После этого вычислите значения  $B$  и постройте график  $B_{\text{эксп}} = f(I)$ .

В том же масштабе постройте теоретическую кривую  $B_{\text{теор}} = f(I)$ , рассчитав  $B$  по приведенной выше формуле. Необходимые для расчета данные соленоида, а также пределы изменения силы тока указаны в паспорте установки.

## Вопросы и упражнения

1. Каков физический смысл величин  $H$  и  $B$  и каковы единицы измерения этих величин?
2. Как связаны между собой величины  $H$  и  $B$  в вакууме и в различных средах?
3. Как устроен и как работает веберметр?
4. Почему стрелку веберметра не следует ставить на нуль перед началом измерений?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2.11

### ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

**Цель работы:** изучение движения зарядов в скрещенных полях — электрическом и магнитном; определение удельного заряда электрона.

**Приборы и принадлежности:** электронная лампа с цилиндрическим анодом (6E5C — индикатор настройки), соленоид, микроамперметр, амперметр и вольтметр постоянного тока, реостат, источники питания.

**Литература:** [6, § 7.1, 7.9, 7.12]; [31, § 10.1—10.4]; [37, § 49, 86, 87, 89, 90]; [18, § 179, 183].

## Введение

На заряд  $e$ , движущийся в электрическом поле с напряженностью  $\vec{E}$  и магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ , действует сила Лоренца:

$$\vec{F}_\text{л} = e\vec{E} + e[\vec{v}\vec{B}]. \quad (1)$$

В общем случае, когда магнитное и электрическое поля неоднородны и меняются во времени, движение частицы приобретает сложный характер. Однако в простейших случаях траекторию движения заряда можно легко найти. В отсутствие электрического поля заряд движется по траектории, форма которой зависит от взаимного направления  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ , а именно: если  $\vec{v} \parallel \vec{B}$ , то траектория — прямая; если  $\vec{v} \perp \vec{B}$ , то траектория — окружность радиуса  $r = mV/(eB)$ ; если  $\vec{v}$  направлено под углом к  $\vec{B}$ , траектория имеет вид винтовой линии с постоянным радиусом и шагом.

Эти и более сложные случаи движения зарядов в электрическом и магнитном полях подробно рассмотрены в [2] и [20].

### Описание экспериментальной установки и методика измерений

В настоящей работе удельный заряд (отношение  $e/m$ ) для электрона определяется методом магнетрона. Это название связано с тем, что применяемая в работе конфигурация электрического и магнитного полей подобна используемой в магнетронах — генераторах электромагнитных колебаний сверхвысоких частот.

Движение электронов в этом случае происходит в кольцевом пространстве, заключенном между катодом и анодом электронной лампы — индикатора настройки (рис. 2.11.1). Катод К располагается вдоль оси лампы и является источником свободных термоэлектронов. В верхней части лампы находится экран (Э) в виде усеченного конуса, внутренняя поверхность которого покрыта веществом, светящимся при попадании на него электронов.

В нижней части лампы располагается анод А и сетка С, соединенная с анодом через резистор  $R \approx 2 \text{ МОм}$  (см. рис. 2.11.7).

Лампа помещается внутри соленоида, создающего магнитное поле, параллельное катоду. Рассмотрим траекторию электронов в этой части лампы. Воспользуемся цилиндрической системой координат, т.е. будем характеризовать положение точки расстоянием от оси цилиндра  $r$ , полярным углом  $\phi$  и смещением вдоль оси  $z$  (рис. 2.11.2).

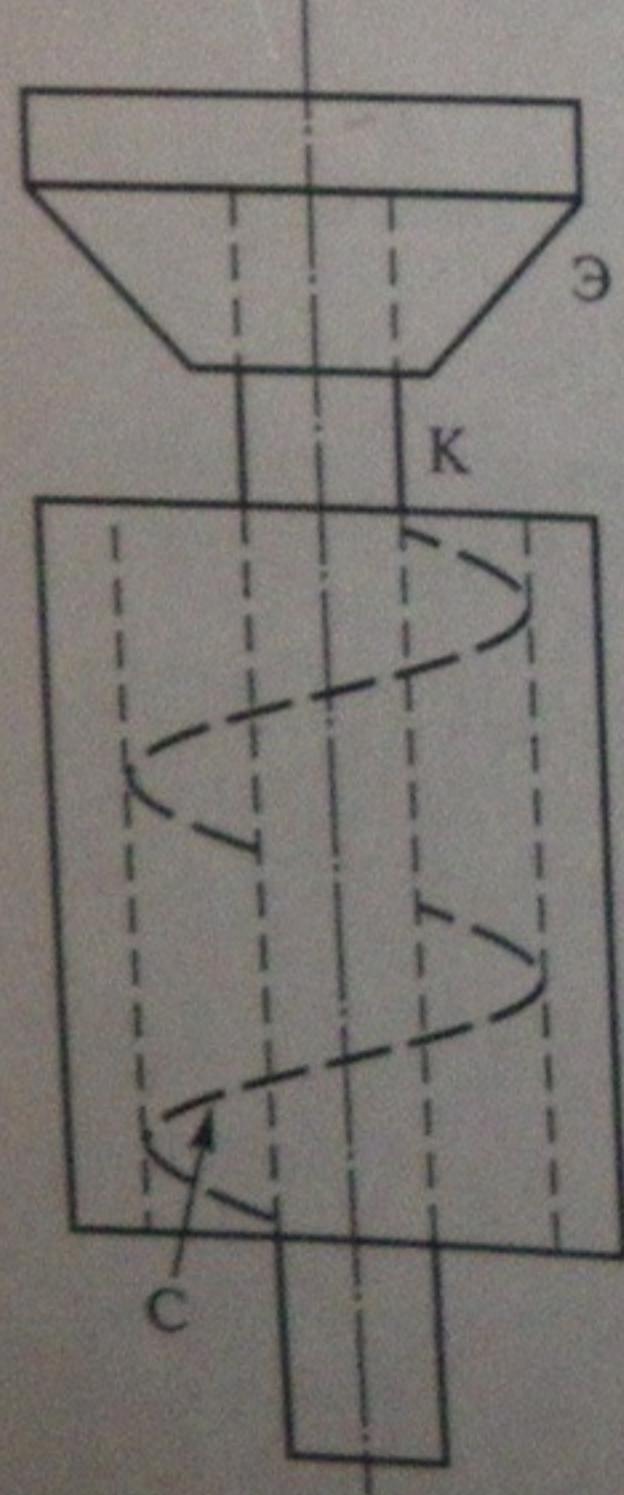


Рис. 2.11.1

Известно, что в цилиндрическом конденсаторе вектор напряженности электрического поля имеет только радиальную компоненту, равную

$$E_r = -U/[r \ln(a/b)], \quad (2)$$

где  $U$  — разность потенциалов между анодом и катодом (анодное напряжение);  $r$  — расстояние от оси катода до исследуемой точки;  $a$  и  $b$  — радиусы катода и анода соответственно.

Сила, действующая на электрон в таком поле, направлена по радиусу и равна (далее в настоящей работе под  $e$  понимается  $|e_{\text{эл}}|$ )

$$F_r^{\text{эл}} = -eE_r. \quad (3)$$

Рассмотрим силы, действующие на электроны со стороны магнитного поля. Как нетрудно убедиться (см. [1]), они равны:

$$F_\phi^M = ev_r B, \quad F_r^M = -ev_\phi B; \quad (4)$$

где

$$v_r = \frac{dr}{dt}, \quad v_\phi = \frac{d\phi}{dt} r. \quad (5)$$

Таким образом, магнитные и электрические силы, действующие на электрон, не имеют составляющих вдоль оси  $z$ , и движение вдоль нее является равномерным. Запишем уравнения моментов для движения электронов в плоскости  $(r, \phi)$

$$\frac{d}{dt} \left( J \frac{d\phi}{dt} \right) = M_z,$$

где  $J = mr^2$  — момент инерции электрона относительно оси  $z$ ;  $M_z = rF_\phi$ .

Из (4) и (5) следует

$$\frac{d}{dt} (mr^2\dot{\phi}) = eBr \frac{dr}{dt} = \frac{1}{2} Be \frac{d(r^2)}{dt}. \quad (6)$$

Интегрируя это выражение, можно найти  $\phi$ :

$$\phi = eB(1 - a^2/r^2)/2m. \quad (7)$$

Рассмотрим движение электрона вдоль радиуса лампы. Так как магнитное поле никакой работы не производит, то работа электрических сил при перемещении электрона от катода до точки с потенциалом  $U$  равна кинетической энергии электрона

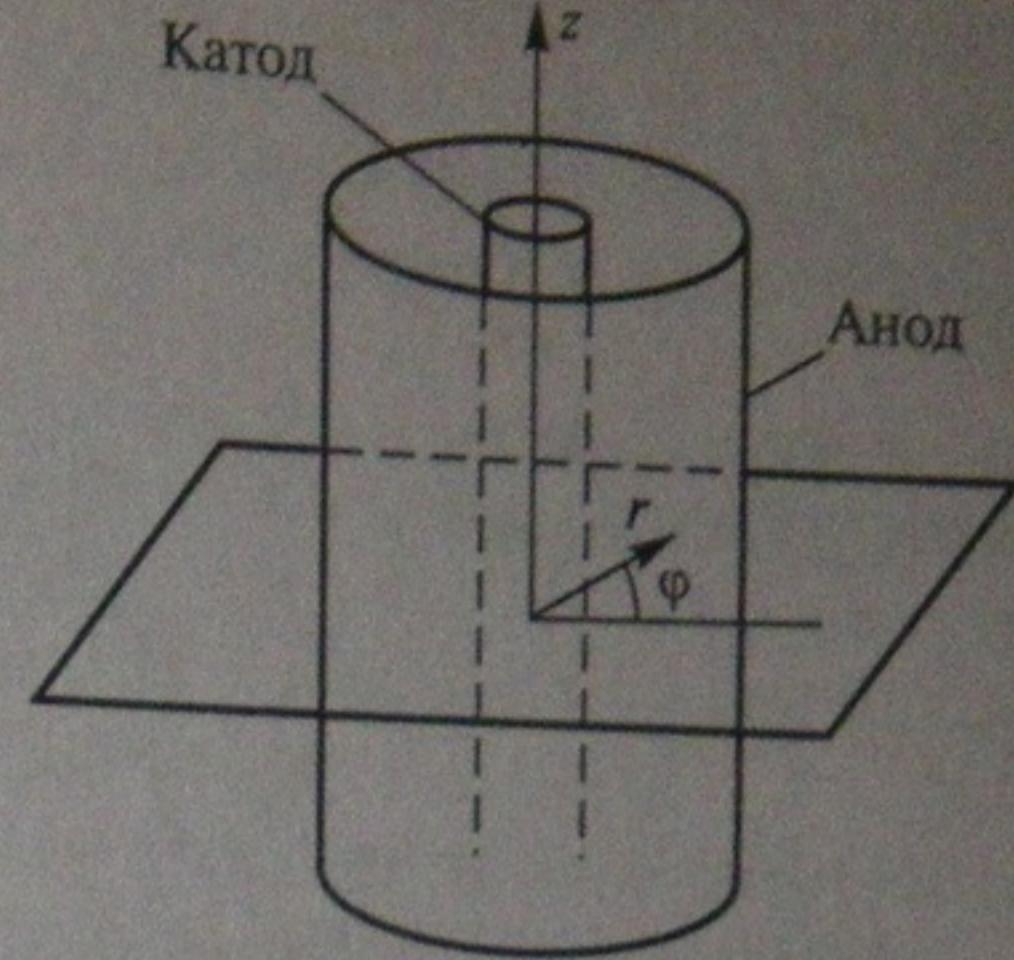


Рис. 2.11.2

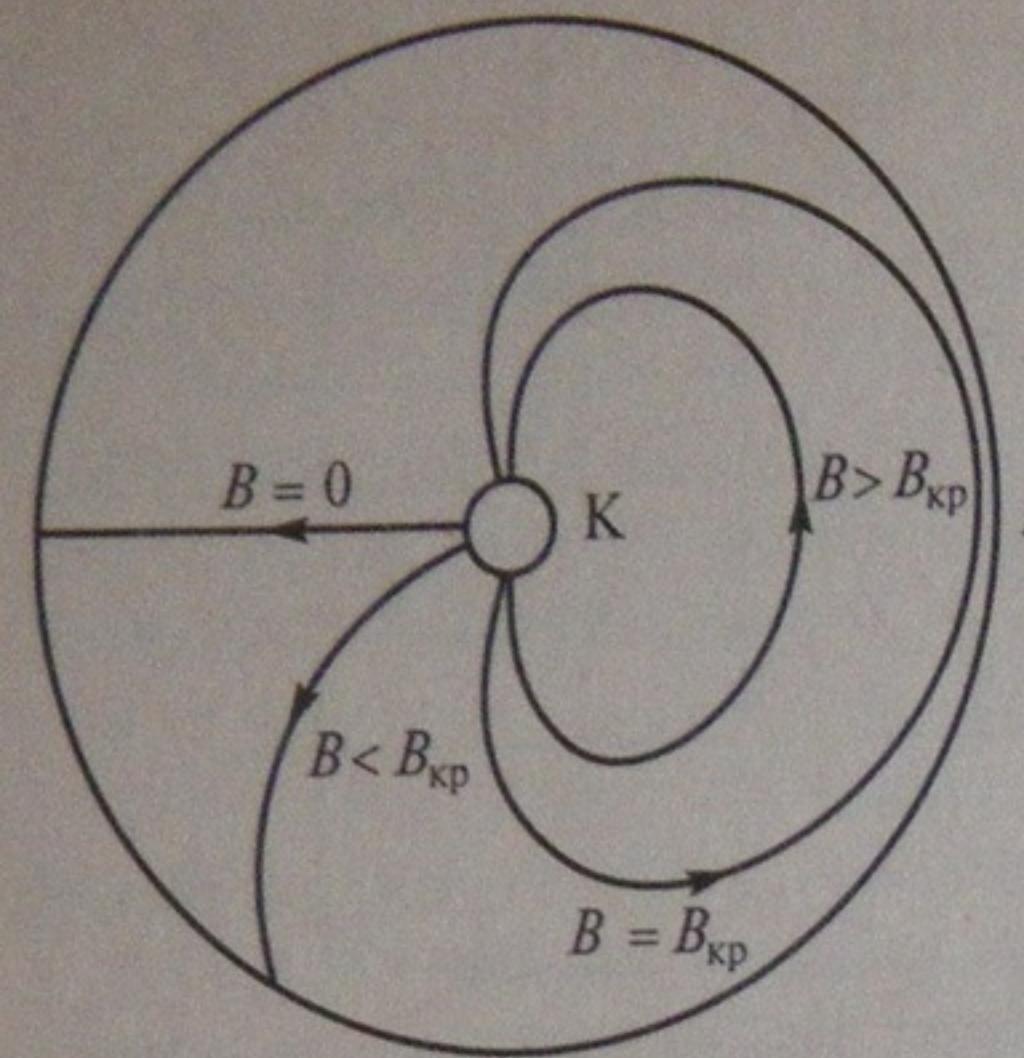


Рис. 2.11.3

на (начальной скоростью электрона мы пренебрегаем):  $eU = mV^2/2 = m(V_r^2 + V_\phi^2)/2$ , или, используя (5) и (7):

$$eU = \frac{m}{2} \left\{ V_r^2 + \left[ \frac{reB}{2m} \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \right]^2 \right\}. \quad (8)$$

Это уравнение полностью определяет радиальное движение электронов.

Рассмотрим траекторию движения электронов, вылетающих из катода при потенциале анода  $U_a$ . В отсутствие магнитного поля (рис. 2.11.3) траектория электрона прямолинейна и направлена вдоль радиуса. При слабом поле траектория несколько искривлена, но электрон все же попадает на анод. При некотором критическом значении поля  $B_{kp}$  траектория искривляется настолько, что касается анода. Наконец, при  $B > B_{kp}$  электрон вовсе не попадает на анод. При  $B = B_{kp}$  можно найти  $U_a$ , если учесть, что в этом случае радиальная скорость электрона  $V_r$  при  $r = b$  обращается в нуль —  $U_a = eB_{kp}b^2(1 - a^2/b^2)/(8m)$ , откуда

$$(e/m) = 8U_a / \{B^2b^2[1 - (a/b)^2]^2\}. \quad (9)$$

Формула (9) позволяет вычислить  $e/m$ , если при заданном  $U_a$  найдено такое значение магнитного поля, при котором электроны перестают попадать на анод.

Если считать, что все электроны покидают катод со скоростью, точно равной нулю, то при  $B < B_{kp}$  все электроны попадали бы на анод, а при  $B > B_{kp}$  — нет. Анодный ток  $I_a$  с увеличением  $B$  изменялся бы при этом так, как это показано на рис. 2.11.4 штриховой линией.

В действительности электроны, испускаемые нагретым катодом, обладают различными начальными скоростями. Поэтому значения  $B_{kp}$  для таких электронов оказываются разными. Кроме того, в установке невозможно обеспечить полную coaxialность анода, катода и соленоида. Все эти причины приводят к тому, что зависимость  $I_a = f(B)$  изменяется так, как показано сплошной линией на рис. 2.11.4. В хорошо собранной установке перелом функции  $I_a = f(B)$  остается достаточно

резким и для измерения  $e/m$  в задании 2 в качестве  $B_{kp}$  лучше всего принимать такое значение индукции магнитного поля, при котором эта кривая имеет *максимальный наклон*. Естественно, что в этой области экспериментальные точки снимают наиболее часто.

В задании 1 визуально (по экрану индикатора настройки) наблюдается закручивание траектории электрона в магнитном поле. По этим наблюдениям можно оценить  $B_{kp}$ , при котором электроны перестают достигать края экрана и он начинает темнеть. После этого можно вычислить по формуле (9) величину  $e/m$ .

Индикатор настройки 6Е5С имеет следующие геометрические размеры: радиус анода  $b = 3$  мм, катода —  $a = 0,5$  мм, экрана —  $c = 10$  мм. Для определения величины магнитного поля катушки (соленоида) используется прилагаемый к работе график зависимости  $B$  от тока соленоида  $I_c$ .

### Измерения и обработка результатов

**Задание 1.** Оценка величины  $e/m$  по картине на экране индикатора настройки.

Соберите схему согласно рис. 2.11.5. После проверки схемы включите источник тока и установите напряжение между катодом и экраном  $U_a = 100$  В. После прогрева лампы экран должен засветиться в виде зеленоватого кольца с темным сектором.

Выключите схему, наденьте катушку на лампу и установите ее на уровне экрана.

Соберите схему питания катушки согласно рис. 2.11.6.

После повторного включения источника наблюдайте за изменением картинки на экране индикатора при изменении  $I_c$  от 0 до 0,2 А. Заметьте, при каком  $I_c$  край экрана лампы начинает темнеть, и запишите это значение. Проделайте это несколько раз, найдите среднее значение  $I_c$ ; по графику  $B=f(I_c)$  найдите  $B_{kp}$ . Вычислите значение  $e/m$ , используя расчетную формулу (9), геометрические размеры лампы  $a$  и  $c$ , а также значение  $U_a$  (в данном случае экран является анодом, поэтому

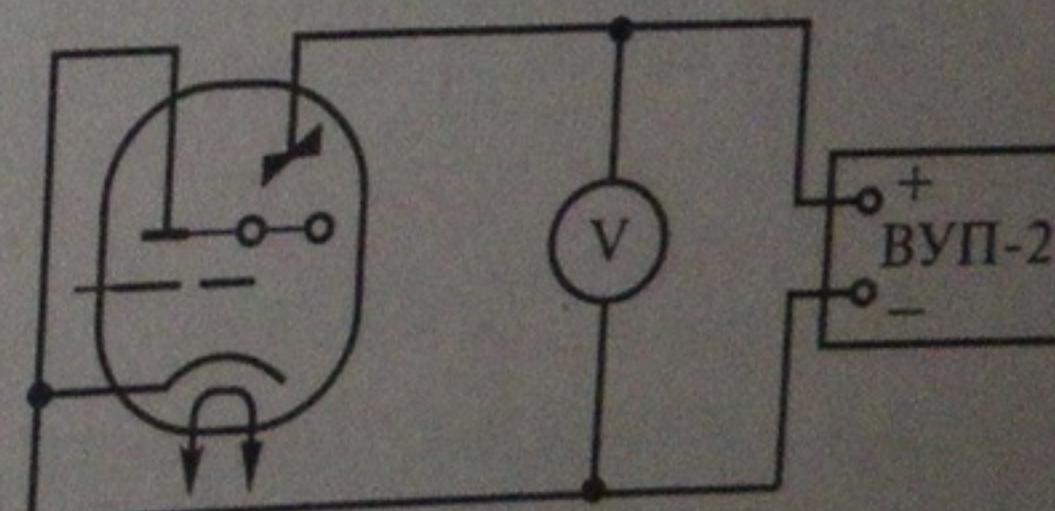


Рис. 2.11.5

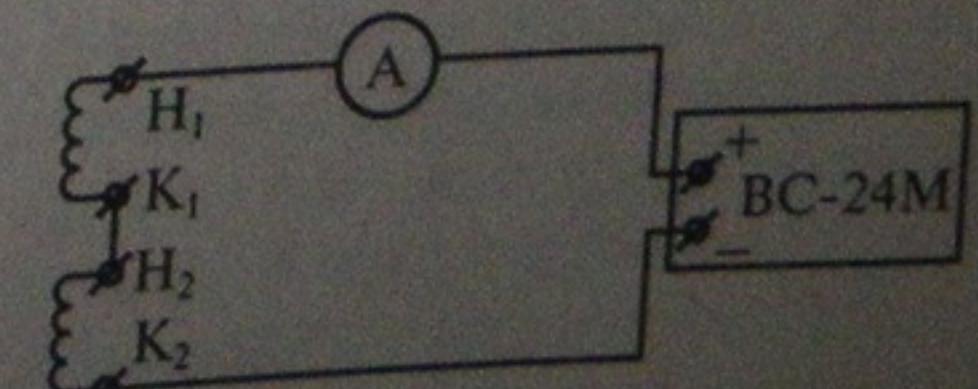


Рис. 2.11.6

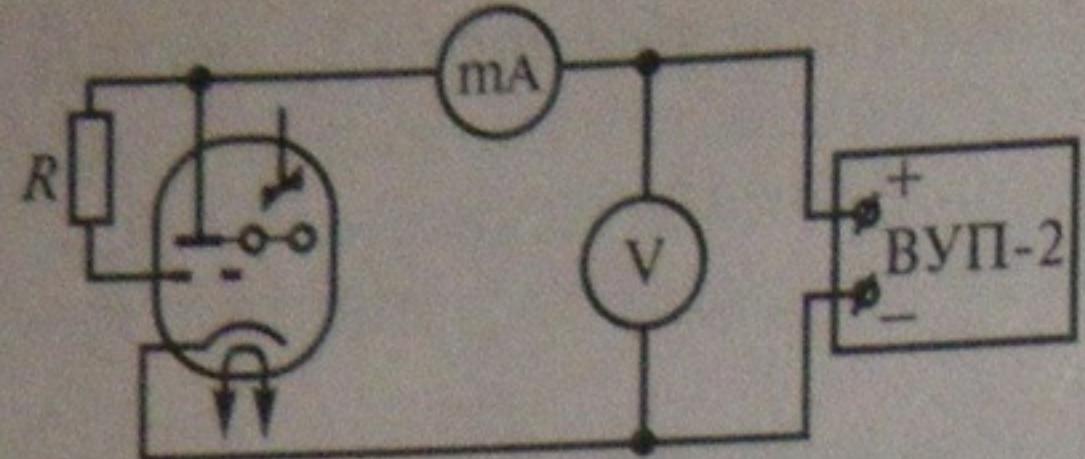


Рис. 2.11.7

му радиус анода  $b$  в выражении для  $U_a$  заменяется на радиус экрана  $c$ .

**Задание 2.** Измерение  $e/m$  методом магнетрона.

Соберите схему по рис. 2.11.7.

Для этого сравните ее со схемой установки задания 1 (см. рис.

2.11.5) и внесите необходимые изменения.

Установите катушку на штырьки с индексом «2». Установите анодное напряжение  $U_a = 3 \div 4$  В и снимите зависимость анодного тока  $I_a$  от  $I_c$  (в области резкого изменения  $I_a$ , шаг изменения  $I_c$  должен быть минимальным).

Постройте график  $I_a = f(I_c)$ . По максимальному наклону зависимости  $I_a = f(I_c)$  определите  $I_{c\text{кр}}$ ; по графику  $B = f(I_c)$  найдите  $B_{\text{кр}}$  и вычислите значение  $e/m$ .

### Вопросы и упражнения

1. Объясните, как будет двигаться электрон, если векторы скорости, напряженности электрического поля и индукции магнитного поля расположены следующим образом: а)  $\vec{v}$  параллельно  $\vec{E}$  и перпендикулярно  $\vec{B}$ ; б)  $\vec{v}$  перпендикулярно  $\vec{E}$  и параллельно  $\vec{B}$ ; в)  $\vec{E} = 0$ , между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$  угол  $45^\circ$ .

2. Что называют термоэлектронной эмиссией?

3. Объясните, почему зависимость  $I_a = f(I_c)$  (см. рис. 2.11.4) в эксперименте не имеет «ступенчатой» формы.

4. В задании 1 при  $B \gg B_{\text{кр}}$  на экране индикатора остается светящееся пятно, т. е. экран полностью не гаснет. Объясните это явление.

5. Получите формулу для расчета  $e/m$ .

6. Влияет ли геомагнитное поле на результаты измерений  $e/m$ ?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2.12

### ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

**Цель работы:** получение экспериментальной зависимости магнитной индукции и магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля; определение коэрцитивной силы, остаточной индукции и коэффициента прямоугольности петли гистерезиса.

**Приборы и принадлежности:** ферромагнитный сердечник тороидальной формы с двумя обмотками, осциллограф, ламповый милливольтметр, миллиамперметр переменного тока (200 мА), конденсатор, магазин сопротивлений (с декадой

« $\times 10000$ »), реостат (41 Ом, 2,1 А), автотрансформатор, понижающий трансформатор.

**Литература:** [6, § 8.1, 8.2, 8.5–8.7]; [31, § 7.1–7.3, 7.5, 7.9, 8.9]; [37, § 74–77, 79]; [14, § 7.1–7.3, 7.5, 7.6]; [18, § 103–107, 109–112].

### Введение

Для нахождения зависимости магнитной индукции  $B$  внутри ферромагнетика от напряженности магнитного поля  $H$  с помощью электронного осциллографа достаточно подать на одну пару его отклоняющих пластин напряжение, пропорциональное  $H$ , а на другую — пропорциональное  $B$ . Это можно осуществить, используя ферромагнитный сердечник с двумя обмотками: первичной (намагничающей) и вторичной (измерительной) (рис. 2.12.1). Получить напряжение, пропорциональное  $H$ , легко. Для этого в цепь первичной обмотки следует включить резистор и с него подать напряжение на вход  $X$ . Получить подобным образом напряжение, пропорциональное  $B$ , невозможно, так как ЭДС во вторичной обмотке пропорциональна не самой индукции  $B$ , а ее производной по времени. Поэтому, прежде чем подать напряжение со вторичной обмотки на вход  $Y$ , его нужно проинтегрировать с помощью так называемой интегрирующей цепочки  $RC$  при правильном подборе ее параметров (см. ниже).

Отклонение луча осциллографа по оси  $x$  будет, таким образом, пропорционально  $H$ , а по оси  $y$  — пропорционально  $B$ , и, следовательно, на экране получится график искомой зависимости  $B$  от  $H$  при периодическом изменении  $H$  (первичная обмотка питается переменным током), т. е. петля гистерезиса, характеризующая исследуемый ферромагнетик.

### Описание экспериментальной установки

В работе используется установка, схема которой приведена на рис. 2.12.1 (AT — автотрансформатор; Тр — понижающий трансформатор; Ф — сердечник из ферромагнетика с двумя обмотками: намагничающей  $N_1$  и измерительной  $N_2$ ;  $R_1$  — реостат; тА — миллиамперметр;  $R_2$  — переменный резистор (магазин сопротивлений); С — конденсатор; мВ — ламповый милливольтметр; ЭО — электронный осциллограф).

При пропускании переменного тока по первичной обмотке сердечника во вторичной наводится ЭДС индукции

$$\mathcal{E} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt},$$