

Л-236

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени С. П. КОРОЛЕВА

2-15 ; 2-25

**ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
И МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

Лабораторные работы № 2—15, 2—25

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Цель работы: определение удельного заряда электрона, т. е. отношения его заряда к массе методом магнетрона. Этот метод получил свое название вследствие того, что конфигурация применяемых здесь электрического и магнитного полей очень похожа на конфигурацию полей в магнетроне — электронной лампе, используемой в технике СВЧ.

Приборы и принадлежности: панель с соленоидом, внутри которого установлен электровакуумный диод; амперметр; миллиамперметр; вольтметр.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА МАГНЕТРОНА

Электровакуумный диод, примененный в данной работе, содержит два электрода: катод 3, выполненный в виде тонкого стержня, и анод 2, представляющий собой цилиндрическую обечайку (рис. 1). Катод расположен по оси анода.

Если к аноду приложить положительный потенциал относительно катода, то в пространстве между катодом и анодом появится электрическое поле, силовые линии которого будут направлены от анода к катоду (толстые линии на рис. 1). Если поместить диод в соленоид 1, по которому идет ток, то в пространстве между анодом и катодом возникнет магнитное поле, силовые линии которого направлены по оси симметрии электродов (тонкие линии на рис. 1). Таким образом, электроны, испускаемые катодом, окажутся в области электрического и магнитного полей, причем $\vec{E} \perp \vec{B}$ во всех точках этой области. В этом случае движение электронов определяется силой Лоренца

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

1

где e — заряд электрона; \vec{v} — скорость электрона; \vec{E} — напряженность электрического поля; \vec{B} — индукция магнитного поля.

В формуле (1) первое слагаемое определяет электрическую силу \vec{F}_e , обусловленную действием электрического поля на заряженную частицу, второе слагаемое определяет магнитную силу \vec{F}_m , обусловленную действием магнитного поля на движущуюся заряженную частицу.

В зависимости от соотношения между \vec{F}_e и \vec{F}_m изменяются траектории движения электронов от катода к аноду, а, следовательно, изменяется и анодный ток. При $F_e \gg F_m$ траектории электронов слегка искривляются, однако на анод электроны все же попадают, и анодный ток практически не изменяется (рис. 2, а). Если увеличивать \vec{B} , то кривизна траектории электронов возрастает и, наконец, при некотором значении магнитной индукции $B_{кр}$, называемом «критическим значением», электроны перестают попадать на анод (рис. 2, б), и

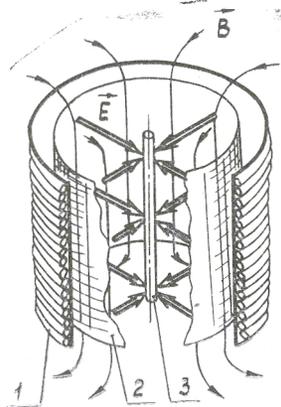


Рис. 1

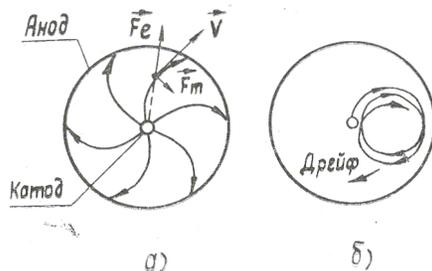


Рис. 2

анодный ток резко уменьшается. Этот эффект наблюдается, когда $F_e \ll F_m$, т. е. определяющей в движении электронов будет являться магнитная сила $\vec{F}_m = e[\vec{v}, \vec{B}]$. Эта сила перпендикулярна к скорости и, следовательно, играет роль центростремительной силы. В результате электроны будут двигаться по траекториям, близким к окружности с радиусом $r = R_a/2$ (R_a — радиус анода, который для примененной лампы мно-

2

го больше радиуса катода). Электрическая сила в рассмотренном случае (т. е. при $F_e \ll F_m$) вызывает относительно медленное смещение траектории в направлении, перпендикулярном радиусу. Это движение называется электрическим дрейфом.

Для получения расчетной формулы воспользуемся уравнением

$$e U_a = \frac{mv^2}{2}, \quad (2)$$

где U_a — анодное напряжение; v — скорость электрона вблизи анода.

Следует отметить, что магнитная составляющая силы Лоренца работы не совершает, поэтому она и не входит в формулу (2). С другой стороны, для вращающегося электрона можно записать уравнение динамики в виде

$$F_{цс} = \frac{mv^2}{r},$$

где $F_{цс}$ — центростремительная сила. В изучаемой задаче $F_{цс} = evB_{кр}$ (так как $\vec{v} \perp \vec{B}$). Поэтому

$$evB_{кр} = \frac{mv^2}{r}.$$

Воспользовавшись условием $r = R_a/2$, последнее уравнение можно переписать следующим образом:

$$eB_{кр} = \frac{2mv}{R_a}. \quad (3)$$

Исключив v из выражений (2) и (3) и преобразовав их, получим окончательную расчетную формулу

$$\frac{e}{m} = \frac{8 U_a}{B_{кр}^2 R_a^2}. \quad (4)$$

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В данной работе используется электровакуумный диод, установленный на панели внутри соленоида (рис. 3). Анод, катод и нить накала лампы, а также выводы обмотки соленоида присоединены к соответствующим клеммам панели.

Лампа питается от переносного блока питания, который обеспечивает регулируемое анодное напряжение в интервале

3

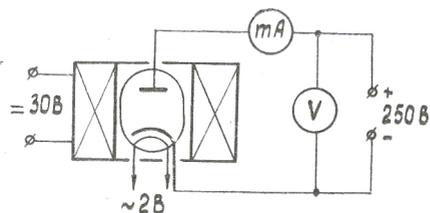


Рис. 3

0 ÷ 250 В и переменное напряжение 2 В для нити накала катода. Соленоид питается от клемм «= 30 В» распределительного щитка. Регулировка тока в соленоиде осуществляется с помощью автотрансформатора, ручка управления которым выведена на лабораторный стол.

Основные данные установки приведены на монтажной панели и корпусе соленоида.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему согласно рис. 3.
2. Установить ручки регулировки анодного напряжения и тока через соленоид в крайнее левое положение, соответствующее минимуму значений этих параметров.
3. Включить питание схемы и после прогрева лампы (~1 мин) приступить к измерениям.
4. Установить какое-либо значение анодного напряжения U_a из числа рекомендуемых. Увеличивая постепенно ток соленоида I_c , записывать соответствующие значения анодного тока I_a , что необходимо для построения так называемой «сбросовой» характеристики, т. е. зависимости $I_a = f(I_c)$. Во время измерений надо следить, чтобы анодное напряжение оставалось постоянным, и, в случае необходимости, регулировать его.

Число экспериментальных точек должно быть достаточным для построения сбросовой характеристики, особенно в области резкого изменения анодного тока.

5. Повторить все измерения для двух других значений анодного напряжения. Полученные результаты записать в таблицу.

$U_a =$		$U_a =$		$U_a =$	
I_c, A	I_a, mA	I_c, A	I_a, mA	I_c, A	I_a, mA

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

1. По данным таблицы построить графики трех сбросовых характеристик.

2. Для каждой характеристики определить значение тока $I_{кр}$, при котором начинает происходить резкое уменьшение анодного тока. Обычно это значение выбирается из верхнего участка крутого спада сбросовой характеристики (рис. 4).

3. Определить значение $B_{кр}$. Расчет $B_{кр}$ можно провести по формуле для соленоида конечной длины:

$$B_{кр} = \mu_0 n I_{кр} \frac{L}{\sqrt{L^2 + d^2}},$$

где n — число витков на единицу длины соленоида; L — длина соленоида; d — диаметр соленоида; μ_0 — магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

4. Рассчитать e/m по формуле (4). Определить среднее значение e/m и сравнить его с табличными данными. Оценить погрешности определения e/m .

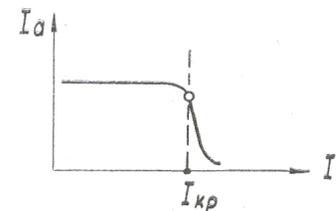


Рис. 4

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Запишите выражение для силы Лоренца и укажите направление этой силы относительно остальных множителей определяющего выражения.
2. Дайте описание метода магнетрона для определения удельного заряда электрона.
3. Выведите основную расчетную формулу, используемую в работе.

4. Почему магнитная составляющая силы Лоренца не совершает работы?

5. Как изменяются траектории электронов при увеличении тока в соленоиде?

6. Начертите принципиальную схему экспериментальной установки и дайте описание порядка выполнения работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. — М.: Наука, 1978, гл. X, § 72, 73, 74.

2. Методы физических измерений. — Новосибирск: Наука, 1975, работа № 17, с. 98—103.

Лабораторная работа № 2—25

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА ХОЛЛА

Цель работы: построение градуировочного графика для датчика Холла; определение постоянной Холла для материала, из которого изготовлен датчик, и расчет концентрации носителей тока в этом материале; экспериментальное определение зависимости $B = f(B_0)$ материала тороидального магнита с помощью датчика Холла.

Приборы и принадлежности: пластина, на которой установлен датчик Холла; панель с соленоидом и тороидальным магнитом; потенциометр; миллиамперметры; реостаты.

ОПИСАНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

Сущность эффекта Холла, который относится к так называемым гальваномагнитным явлениям, заключается в следующем: если поместить проводник, выполненный, например, в виде прямоугольной пластинки (рис. 5), в магнитное поле, перпендикулярное линиям тока I , то между гранями, параллельными плоскости $B-I$, возникает э.д.с. В частности, если при отсутствии магнитного поля разность потенциалов между точками 1 и 2 равна нулю, то при наложении поперечного магнитного поля $\varphi_1 - \varphi_2 \neq 0$.

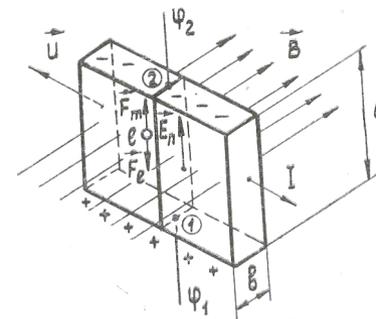


Рис. 5

Эффект Холла объясняется следующим образом: носители тока в проводнике имеют скорость упорядоченного движения \vec{u} , поэтому в магнитном поле на них будет действовать сила Лоренца

$$\vec{F}_m = e [\vec{u}, \vec{B}],$$

в результате чего у верхней грани (см. рис. 5, где принято, что носители тока — электроны) образуется избыток отрицательных зарядов, а у нижней грани — избыток положительных зарядов. Таким образом, в проводнике появляется поперечное электрическое поле \vec{E}_d , препятствующее действию силы Лоренца.

Установившееся распределение зарядов достигается при равновесии сил, действующих на носители тока:

$$\vec{F}_m = \vec{F}_e \quad \text{или} \quad euB = eE_d. \quad (5)$$

Выражение (5) получено с использованием условий $\vec{u} \perp \vec{B}$, $\vec{F}_m \parallel \vec{F}_e$, справедливых для выбранных направлений магнитного поля и тока.

Скорость упорядоченного движения u можно найти, используя формулу

$$I = enuS, \quad (6)$$

где $S = ab$ — площадь поперечного сечения проводника, n — концентрация носителей тока.

Разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ определяется выражением

$$\varphi_1 - \varphi_2 = E_d a. \quad (7)$$

Подставив сюда E_d из формулы (5), получим

$$\varphi_1 - \varphi_2 = uBa,$$

после чего, исключая u из (6) и (7), найдем окончательную формулу, определяющую количественно эффект Холла:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{1}{en} \frac{IB}{b} = R \frac{IB}{b}. \quad (8)$$

Величина $R = 1/en$ называется постоянной Холла для данного вещества. Определив экспериментально значение и знак постоянной Холла, можно рассчитать концентрацию носителей тока и установить знак их заряда.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Исследуемый датчик Холла закреплен между двумя пластинами из оргстекла. На конце пластины находятся четыре клеммы: две клеммы — токовые (обозначены буквами « $-I$ », « $+I$ ») и две клеммы — потенциальные (обозначены буквами « U »).

В комплект установки входит панель, на которой закреплены длинный соленоид и тороидальный магнит. Обмотки соленоида и магнита выведены на соответствующие клеммы. В центре соленоида имеется прорезь, в которую при проведении градуировки вставляется пластина с датчиком Холла. Тороидальный магнит тоже имеет прорезь для установки датчика Холла.

Электрическая схема установки показана на рис. 6. Обмотки магнита и соленоида питаются от источника постоянного тока через регулировочные реостаты R_2 и R_3 . Ток в обмотке измеряется с помощью миллиамперметра mA . Аналогично питается ток датчик Холла (ДХ). Разность потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ измеряется с помощью потенциометра.

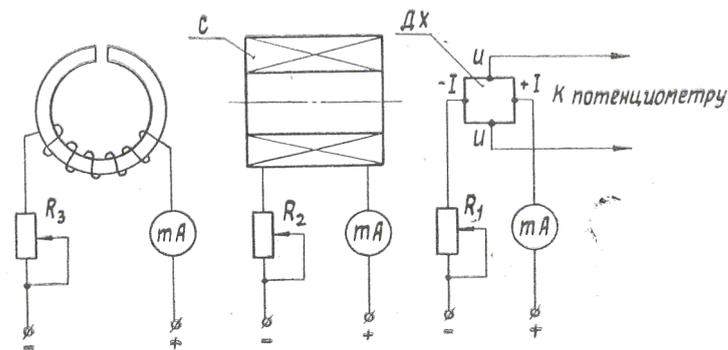


Рис. 6

Упражнение 1. Построение градуировочного графика. Определение постоянной Холла.

1. Собрать схему согласно рис. 6. Обратит внимание на правильное подключение питания датчика Холла — к клеммам « $-I$ » и « $+I$ ». Клеммы « U » подключаются к зажимам « X » потенциометра.

2. Подготовить потенциометр к измерениям согласно прилагаемой инструкции.

3. Вставить пластину с датчиком в прорезь соленоида. Включить питание датчика и с помощью реостата R_1 установить рекомендуемое значение тока через датчик (см. данные на панели установки).

При всех дальнейших измерениях указанный рабочий ток должен оставаться постоянным. В случае его отклонения от заданного значения следует отрегулировать ток реостатом R_1 .

4. Определить начальную разность потенциалов $\Delta\varphi_n$. Наличие этой величины объясняется технологией изготовления датчика: трудно приварить к материалу датчика потенциальные выводы так, чтобы они находились на одной эквипотенциальной поверхности. Поэтому в дальнейшем отсчет холловской разности потенциалов ведется от начального значения $\Delta\varphi_n$.

5. Установить реостат R_2 в положение, соответствующее минимуму тока в соленоиде. Включить питание соленоида.

6. С помощью потенциометра определить разность потенциалов $\Delta\varphi_i$ при установленном токе I_c в соленоиде.

Увеличить ток I_c и измерить новое значение $\Delta\varphi_i$. Измерения проводить до тех пор, пока не будет полностью выведен реостат R_2 , что соответствует максимальному значению I_c .

7. Результаты измерений, а также параметры датчика и установки записать в табл. 1.

Таблица 1

Параметры датчика и установки			Результаты эксперимента			Результаты расчета			
b , мм	I , мА	n_c , м ⁻¹	$\Delta\varphi_n$, мВ	I_c , А	$\Delta\varphi_i$, мВ	$\Delta\varphi$, мВ	B , Т	R , м ³ /Кл	n , м ⁻³

Обработка результатов измерений

1. Вычислить холловскую разность потенциалов $\Delta\varphi = \Delta\varphi_i - \Delta\varphi_n$ для каждого измерения и записать ее в табл. 1.

2. Рассчитать магнитную индукцию в центре соленоида по формуле для длинного соленоида

$$B = \mu_0 n_c I_c,$$

где n_c — число витков на единицу длины соленоида; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

3. Построить градуировочный график, т. е. зависимость $\Delta\varphi = f(B)$, который должен представлять собой прямую, проходящую через начало координат.

4. Используя градуировочный график, определить чувствительность датчика Холла S_B , т. е. величину

$$S_B = \frac{\Delta\varphi}{B}, \text{ мВ/Т.} \quad (9)$$

Из формулы (9) следует, что чувствительностью датчика называется величина, численно равная холловской разности потенциалов при действии поперечного магнитного поля 1 Т. Следует иметь в виду, что S_B зависит от рабочего тока датчика: чем больше рабочий ток, тем выше S_B . Однако при больших токах датчик будет нагреваться, что может привести к появлению паразитных термо э. д. с. Поэтому следует устанавливать и поддерживать указанный на панели установки рабочий ток.

5. Рассчитать постоянную Холла по формуле

$$R = \frac{\Delta\varphi}{B} \frac{b}{I} = S_B \frac{b}{I}, \quad (10)$$

которая может быть получена из выражения (8). При расчете обратить внимание на правильный переход к основным единицам величин, которые входят в формулу (10). Единица R выражается в м³/Кл.

6. Вычислить концентрацию носителей тока n :

$$n = \frac{1}{eR},$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — элементарный заряд.

Упражнение 2. Определение кривой намагничивания $B = f(B_0)$.

1. Переставить пластину с датчиком Холла в зазор тороидального магнита.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте описание и физическое объяснение эффекта Холла.
2. Укажите направление силы Лоренца по отношению к скорости частицы и магнитной индукции поля.
3. По какому закону будет изменяться холловская разность потенциалов, если рабочий ток через датчик изменять по синусоидальному закону?
4. Что называется постоянной Холла? От чего зависит знак этой величины?
5. Что называется чувствительностью датчика?
6. Дайте описание порядка выполнения упражнений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. — М.: Наука, 1978, гл. XI, § 79.

2. Установить реостат R_3 в положение, при котором ток в обмотке тороида I_T будет минимальным. Включить питание обмотки тороида.

3. Постепенно увеличивая ток I_T , провести измерение ряда значений I_T и соответствующих значений $\Delta\varphi$ аналогично измерениям, описанным в упражнении 1. Следить за неизменностью рабочего тока через датчик и, в случае необходимости, регулировать его реостатом R_1 .

Результаты измерений записать в табл. 2. Сюда же записать значение чувствительности датчика, полученное в упражнении 1, и число витков на метр длины средней линии тороида n_T .

Таблица 2

Параметры датчика и тороида		Результаты эксперимента			Результаты расчета		
		$\Delta\varphi_H$, мВ	I_T , мА	$\Delta\varphi_i$, мВ	$\Delta\varphi$, мВ	B , Т	B_0 , Т
S_B , мВ/Т	n_T , м ⁻¹						

Обработка результатов измерений

1. Вычислить холловскую разность потенциалов $\Delta\varphi = \Delta\varphi_i - \Delta\varphi_H$ для каждого измерения.

2. Рассчитать магнитную индукцию B в зазоре тороида по формуле

$$B = \frac{\Delta\varphi}{S_B},$$

которая следует из формулы (9).

3. Рассчитать магнитную индукцию B_0 , создаваемую обмоткой тороида:

$$B_0 = \mu_0 n_T I_T.$$

Результаты расчетов записать в табл. 2.

4. По данным расчета построить график кривой намагничивания $B = f(B_0)$.