

Кафедра физики

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3э.6

**ИЗУЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОСТОЯННЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ
НА ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ**

МЕТОДИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ

Минск 2022

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3э.6

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОСТОЯННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ НА ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ

Цель работы:

1. Изучить движение электронов в поперечных электрическом и магнитном полях.
2. Определить удельный заряд и скорость электронов.
3. Определить зависимость скорости электронов от величины электрического поля.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Согласно современным представлениям, взаимодействие между частицами осуществляется посредством особой формы материи – физических полей. Примеры физических полей: гравитационное, электромагнитное, поле ядерных сил. Каждый вид взаимодействия связывается с определенной характеристикой частицы (массой, зарядом и др.).

Форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между электрически заряженными частицами, называется **электромагнитным полем**. Частными формами проявления электромагнитного поля являются электрическое и магнитное поля.

Представление об электрическом поле было введено Фарадеем. Согласно Фарадею, каждый заряд q изменяет определенным образом свойства окружающего его пространства: создает в окружающем пространстве электрическое поле. Это поле проявляет себя в том, что помещенный в любую точку пространства \vec{r} другой заряд q' испытывает действие силы, пропорциональной величине заряда:

$$\vec{F}(\vec{r}) = \vec{E}(\vec{r}) q'$$

Величина $\vec{E}(\vec{r})$ называется **напряженностью** электрического поля и является его силовой характеристикой. Напряженность численно равна силе, действующая на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля \vec{r} :

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}(\vec{r})}{q'} \quad (1)$$

Напряженность электрического поля в СИ измеряется в вольтах на метр (В/м).

Термин **магнитное поле** введен также Фарадеем. Источниками магнитных полей являются проводники с током, движущиеся электрические заряды и намагниченные тела. Природа этих источников едина: магнитное поле создается движущимися электрическими зарядами.

Магнитные поля проявляются в воздействии на те же объекты, которые их порождают. Силовой характеристикой магнитного поля является **магнитная индукция** \vec{B} . Единица измерения магнитной индукции в системе СИ – тесла (Тл).

На заряд q , движущийся в магнитном поле $\vec{B}(\vec{r})$ со скоростью \vec{v} , действует магнитная сила

$$\vec{F}_m(\vec{r}) = q[\vec{v}, \vec{B}(\vec{r})] \quad (2)$$

Направление силы $\vec{F}_m(\vec{r})$ определяется по правилу правого винта (с учетом знака заряда q): если винт вращать от вектора \vec{v} к вектору $\vec{B}(\vec{r})$ кратчайшим путем, то поступательное движение винта совпадает с направлением магнитной силы $\vec{F}_m(\vec{r})$ (для $q > 0$) (рис. 2.8.1, а, б).

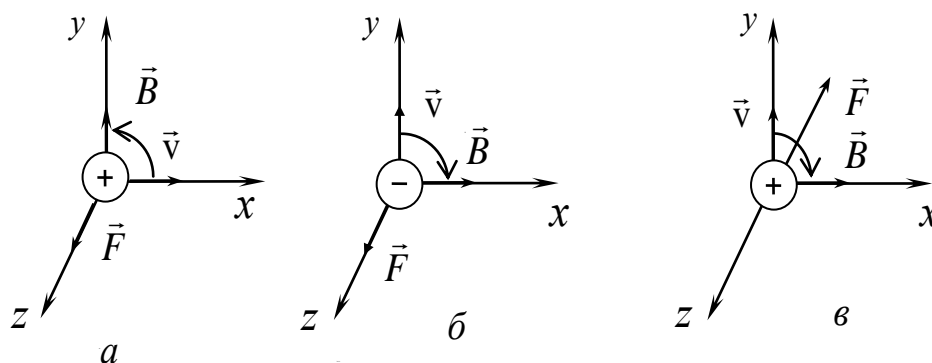


Рис.1

Модуль этой силы равен $F_m = qvB \sin \alpha$, где α – угол между вектором индукции $\vec{B}(\vec{r})$ и вектором скорости \vec{v} .

Если заряженная частица движется одновременно в электрическом и магнитном полях, то полная электромагнитная сила (сила Лоренца), действующая на частицу

$$\vec{F}(\vec{r}) = q\vec{E}(\vec{r}) + q[\vec{v}, \vec{B}(\vec{r})] \quad (2.8.3)$$

Для достижения поставленной цели работы используется двухэлектродная лампа (диод) с цилиндрическими коаксиальными электродами: катод располагается вдоль оси цилиндрического анода. Лампа помещается внутри цилиндрического соленоида (рис. 2). Вектор магнитной индукции \vec{B} направлен параллельно оси электродов, а величина вектора \vec{B} определяется током соленоида I_c .

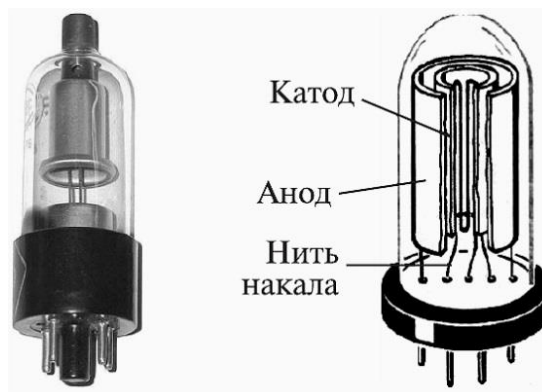


Рис. 2

Подобная конфигурация поля применяется в таких приборах, как магнетроны, в связи с чем, описываемый метод определения удельного заряда носит название **метода магнетрона**.

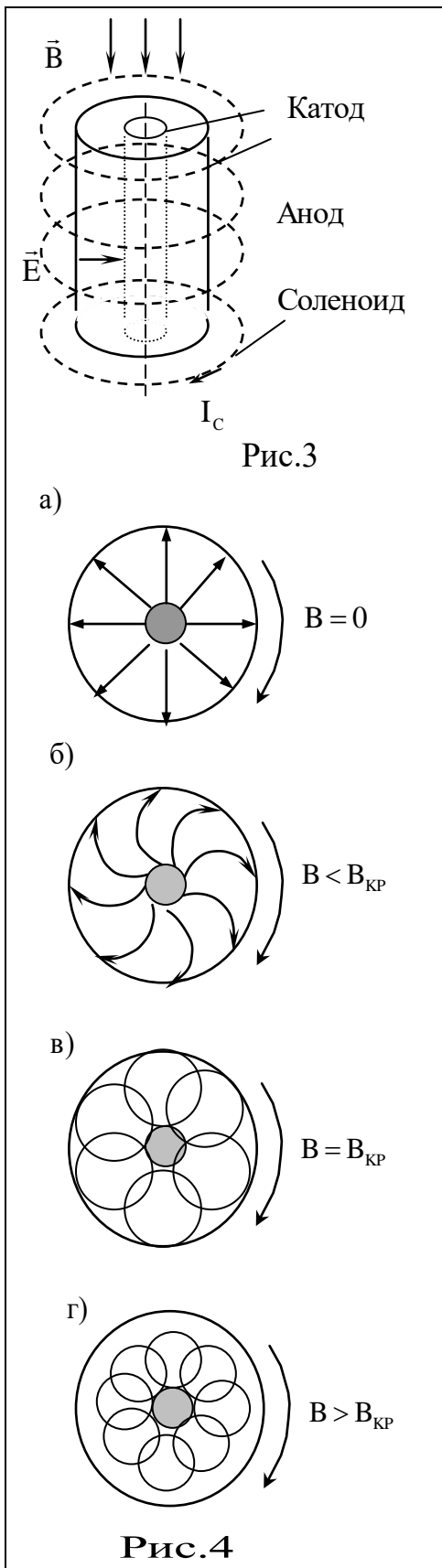


Рис.3

Рис.4

Рассмотрим идеализированный случай, когда концентрация электронов мала, скорости их одинаковы, и они не взаимодействуют между собой. Тогда при отсутствии магнитного поля ($I_c = 0$) каждый электрон движется по радиусу от катода к аноду, этому движению будет соответствовать анодный ток

$$I_a = \int_0^{S_a} \vec{j} d\vec{S},$$

где j – плотность тока, S_a – площадь анода (рис. 3, 4,а).

При включении магнитного поля на движущийся электрон будет действовать магнитная составляющая силы Лоренца \vec{F}_m , которая искривляет его траекторию (рис. 4,б).

Если скорости испускаемых катодом электронов одинаковы, то при некотором значении магнитной индукции $B = B_{кр}$ траектория электрона может только коснуться поверхности анода (рис. 4,в). При дальнейшем увеличении индукции $B > B_{кр}$ электрон не будет достигать поверхности анода (рис. 4,г) и анодный ток прекратится.

Зависимость анодного тока I_a от тока соленоида I_c представлена в виде ступеньки на рис. 5,а (пунктирная кривая 1). Вертикальная ее часть соответствует достижению индукции магнитного поля критического значения.

Однако реальная зависимость анодного тока от тока соленоида имеет вид, изображенный на рис. 5,а (кривая 2). Постепенный спад анодного тока объясняется несовершенством вакуумных диодов и условий опыта, а также тем, что электроны покидают катод с различными начальными скоростями. Поэтому критические условия, при которых электроны лишь касаются анода, возникают для разных электронов при разных значениях индукции B .

Максимальное изменение анодного тока наблюдается в том случае, когда до анода не

долетают электроны, обладающие наиболее вероятной скоростью. Магнитная индукция в этом случае считается критической $B_{кр}$, а значение тока соленоида – критическим током $I_{c(кр)}$.

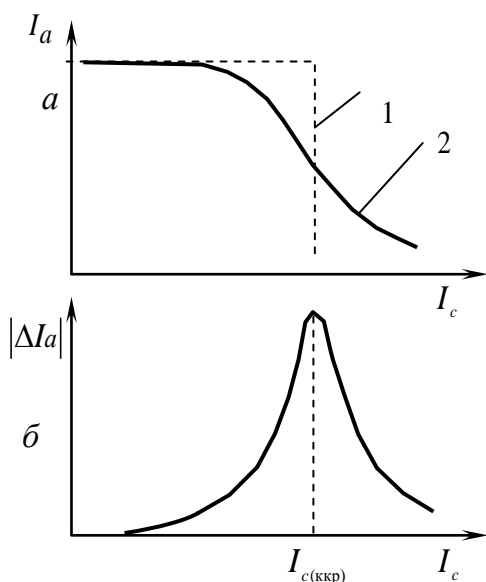


Рис.5

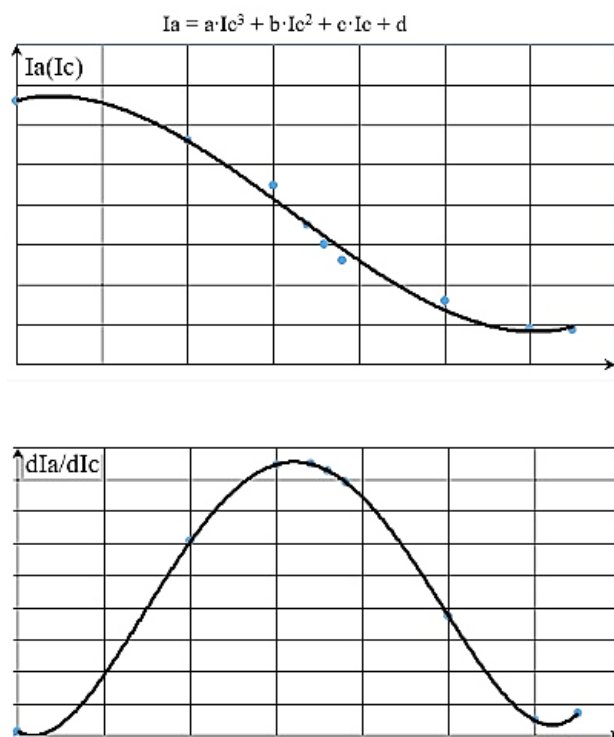


Рис.6

Критический ток соленоида $I_{c(кр)}$ можно определить по графику зависимости изменения анодного тока $|\Delta I_a|$ от тока соленоида I_c (рис. 5,б) $|\Delta I_a| = |I_{ai} - I_{ai-1}|$, где I_{ai} и I_{ai-1} – соответственно последующее и предыдущее значения тока анода.

Более точно построение графиков можно выполнить в Microsoft Excel. Для этого надо ввести данные в виде 2-х столбцов, сделать вставку «Точечная диаграмма», добавить «линия тренда, полином 3-е степени», показать уравнение.

Пусть функция интерполяционной кривой имеет вид

$$I_a = a \cdot I_c^3 + b \cdot I_c^2 + c \cdot I_c + d,$$

тогда функция производной определяется как

$$\frac{dI_a}{dI_c} = 3aI_c^2 + 2bI_c + c,$$

график модуля этой функции показан на рис. 6.

Исследуя последнюю функцию на экстремум, путем взятия производной

$$\frac{d^2 I_a}{dI_c^2} = 6aI_c + 2b$$

и приравнивая её к нулю, находим критический ток соленоида:

$$I_{c(кр)} = b/3a.$$

Удельный заряд электрона e/m и скорость v электрона определяются из следующих соображений. Пусть \vec{v}_0 – наиболее вероятная скорость вылета электрона с поверхности

катода; \vec{v} – конечная скорость электрона при достижении им анода.

Изменение кинетической энергии электрона обусловлено только действием электрического поля

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = eU, \quad (4)$$

где U – напряжение между катодом и анодом.

Учитывая, что $v \gg v_0$ скорость электрона у анода

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \quad (5)$$

Для простоты будем считать, что электроны движутся в магнитном поле с постоянной скоростью v . Тогда их траектории представляют собой окружности, а уравнение движения для каждого электрона имеет вид

$$m \frac{v^2}{r} = e v B_{\text{кр}}, \quad (6)$$

где v^2/r – центростремительное ускорение, обусловленное действием силы Лоренца ($\vec{v} \perp \vec{B}$).

Так как радиус катода много меньше радиуса анода ($r_K \ll r_A$), будем считать, что в случае $B = B_{\text{кр}}$ электроны движутся по окружности, радиус которой $r = r_A/2$. Используя выражения (5) и (6), найдем удельный заряд электрона

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{r_A^2 B_{\text{кр}}^2} \quad (7)$$

и наиболее вероятную скорость электронов, движущихся внутри диода

$$v = \frac{4U}{r_A B_{\text{кр}}}. \quad (8)$$

Реально в диоде, помещенном в магнитное поле, электроны движутся от катода к аноду не с постоянной скоростью v , а с постепенно возрастающей от v_0 до $v = \sqrt{2Ue/m}$. Однако более строгий расчет также приводит к выражению (8).

Критическое значение индукции магнитного поля рассчитывается по формуле

$$B_{\text{кр}} = \frac{I_{\text{с(кр)}} N}{2l} \mu \mu_0 (\cos \beta_1 - \cos \beta_2), \quad (9)$$

где $I_{\text{с(кр)}}$ – критический ток соленоида (определяется по графику), l – длина соленоида; μ – относительная магнитная проницаемость среды; μ_0 – магнитная постоянная; β_1, β_2 – углы, показанные на рис. 7; N – число витков соленоида.

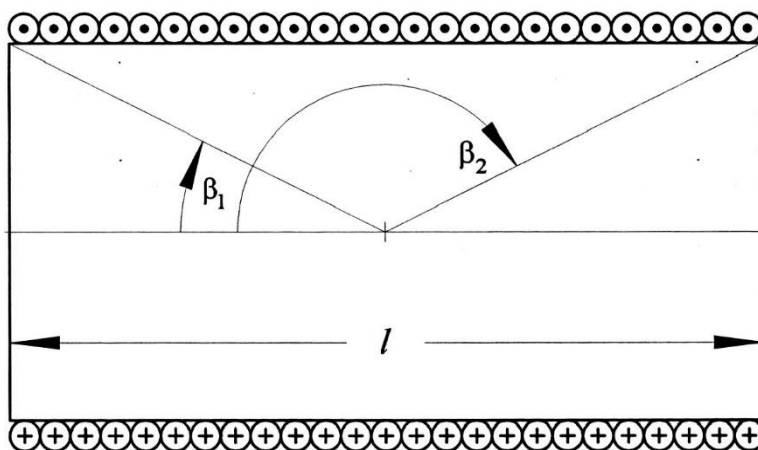


Рис. 7

Функциональная схема установки изображена на рис. 8. Установка состоит из диода типа 2Ц2С, находящегося внутри соленоида, создающего магнитное поле, и источников питания диода и соленоида.

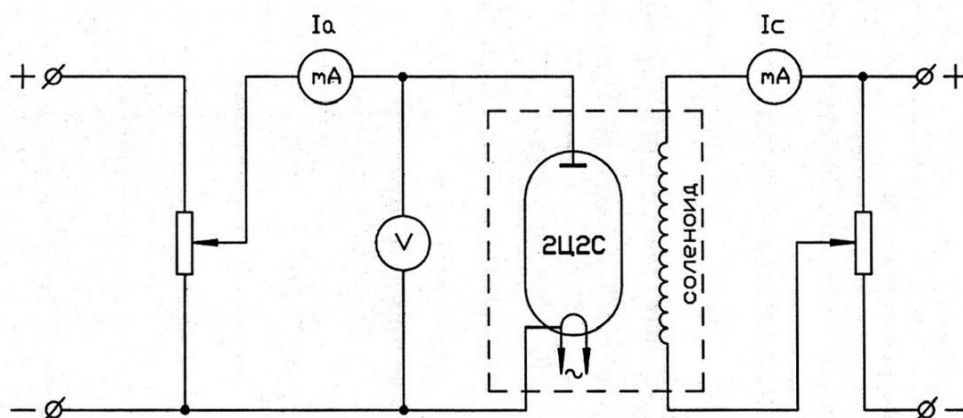


Рис. 7

Миллиамперметр I_a служит для измерения анодного тока. Ток соленоида регулируется потенциометром и измеряется миллиамперметром I_c .

ЗАДАНИЕ

1. Получить зависимость анодного тока I_a от тока соленоида I_c для трех значений напряжения на аноде U .
2. Построить зависимости $\left| \frac{dI_a}{dI_c} \right| = f(I_c)$ для каждого значения U .
3. Из графиков $\left| \frac{dI_a}{dI_c} \right| = f(I_c)$ определить значения $I_{c(кр)}$.
4. Рассчитать по формуле (9) $B_{кр}$ для каждого из трех случаев.
5. Рассчитать наиболее вероятную скорость электронов v для каждого значения U по формуле (8).
6. Построить кривую зависимости скорости электронов от анодного напряжения $v = f(U)$.
7. Рассчитать по формуле (7) удельный заряд электрона e/m и сравнить полученные значения с табличными.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Лабораторная установка состоит из диода 2Ц2С с цилиндрическими коаксиальными электродами, который располагается внутри цилиндрического соленоида, источников питания диода и соленоида. Миллиамперметры служат для измерения анодного тока (I_a) и тока соленоида (I_c).

Наименование прибора	Тип прибора	Класс точности	Пределы измерения (x_N)	Цена деления	Абсолютная погрешность
Миллиамперметр (I_c)	M265M	$\gamma = 2$	0 – 800 mA	20 mA	$\Delta = \pm \frac{\gamma \cdot x_N}{100}$
Миллиамперметр (I_a)	M1792	$\gamma = 2$	0 – 2 mA	0,02 mA	$\Delta = \pm \frac{\gamma \cdot x_N}{100}$

1. Подключить лабораторный макет к сети, перевести тумблер “Сеть” в положение “Вкл” и дать прогреться лампе 2Ц2С с течение 5–10 мин.
2. Нажать тумблер 12 v, и убедиться в наличии тока в цепи анода.
3. Нажать «Кнопка», установить потенциометром ток соленоида 0,8 А.
4. Уменьшая потенциометром ток соленоида I_c с шагом 20 мА, снять зависимость анодного тока диода I_a от тока соленоида I_c [$I_a = f(I_c)$]. Измерения анодного тока провести при напряжениях на аноде 12 v, 14 v, 16 v.
5. После выполнения всех работ, отключить установку от сети.
6. Построить графики зависимости тока анода I_a от тока соленоида I_c при значениях напряжения на аноде 12 v, 14 v, 16 v.
7. Построить графики зависимости приращения тока анода I_a от тока соленоида I_c [$\Delta I = f(I_c)$] при значениях напряжения на аноде 12 v, 14 v, 16 v.

Справочные данные

$N = 2000$ витков

$l = 0,1$ м

$r_A = 9 \cdot 10^{-3}$ м

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м

$\mu = 1$

$\cos \beta_1 - \cos \beta_2 = 1,7$

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл

$m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг

Примечание: Следует отметить, что анод диода 2Ц2С изготовлен из ферромагнитного материала и имеет форму стакана, поэтому поле внутри анода не равно полю соленоида. Поскольку магнитное поле “втягивается” внутрь ферромагнетиков, то поле внутри анода лампы меньше, чем поле соленоида (известный эффект “магнитного экранирования”).

Это приводит к погрешности определения критического значения индукции магнитного поля $B_{кр}$ по величине тока соленоида и, соответственно, погрешности расчета удельного заряда электрона. С учетом выше изложенного, для устранения погрешности определения $B_{кр}$ и удельного заряда электрона, используем приведенный радиус анода $r_A = 2$ мм.

После окончания работ выключить приборы из сети.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит метод магнетрона для определения удельного заряда электрона e/m ?
2. Запишите общее выражение для силы Лоренца. В каких единицах измеряются величины, входящие в формулу силы Лоренца? Как определяется направление силы Лоренца?
3. Каковы траектории заряженных частиц в постоянном магнитном поле, если вектор скорости частиц \vec{v} :
а) $\vec{v} \uparrow \uparrow \vec{B}$; б) $\vec{v} \perp \vec{B}$; в) $(\vec{v}, \vec{B}) = \alpha$, α – произвольный угол?
4. В каких случаях магнитное поле не действует на заряженную частицу?
5. Изменяет ли электрическое и магнитное поля кинетическую энергию движущихся в них заряженных частиц?
6. Почему критическое значение магнитной индукции определяется по току соленоида $I_{c(кр)}$?

7. Как изменяются значения $I_{c(\text{кр})}$ и максимальные значения функции $\left| \frac{dI_a}{dI_c} \right|$ на кривой зависимости $\left| \frac{dI_a}{dI_c} \right| = f(I_c)$ по мере увеличения напряжения на аноде?

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1988, т.2. Электричество и магнетизм, Волны. Оптика. Стр. 117 – 119, 201 – 210.
2. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Наука, 1970. Стр. 435 – 446.