

ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

Цель работы: определение опытным и расчетным путем критической индукции магнитного поля соленоида с помощью законов движения электрона в электрическом и магнитном полях.

Приборы и принадлежности: электровакуумный диод, помещенный в соленоид; потенциометр; блоки питания диода и соленоида.

Объект измерений: анодный ток электровакуумного диода.

Средства измерений: амперметр, миллиамперметр, вольтметр.

1. Теоретическая часть

В работе рассматривается движение электронов в электрическом и магнитном полях.

Электрон – отрицательно заряженная частица массой $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, модуль заряда электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Силы, действующие на заряженную частицу. На заряженную частицу в электрическом поле действует *электрическая сила* пропорциональная ее заряду q и напряженности электрического поля \mathbf{E}^* :

$$\mathbf{F}_э = q\mathbf{E}. \quad (1)$$

Таким образом, напряженность поля и сила сонаправлены, если заряд положительный ($q > 0$) и направлены в противоположные стороны, если заряд отрицательный ($q < 0$).

Магнитное поле оказывает силовое воздействие только на движущиеся заряженные частицы (т.е. при наличии у них скорости). В этом случае сила называется *силой Лоренца* $\mathbf{F}_л$ и определяется так:

$$\mathbf{F}_л = q[\mathbf{v}, \mathbf{B}], \quad (2)$$

* Векторы выделены полужирным начертанием

где \mathbf{v} – вектор скорости электрона; \mathbf{B} – вектор индукции магнитного поля (Тл); квадратными скобками обозначено векторное произведение.

Существенно, что согласно свойствам векторного произведения, сила Лоренца направлена перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы \mathbf{v} и \mathbf{B} . На рис. 1 показана взаимная ориентация векторов \mathbf{v} , \mathbf{B} и \mathbf{F}_L в случае, если вектор \mathbf{B} перпендикулярен вектору \mathbf{v} , для различных знаков заряда частицы. Вектор индукции магнитного поля направлен перпендикулярно плоскости XU . В этом случае векторы скорости \mathbf{v} и силы Лоренца \mathbf{F}_L всегда лежат в плоскости XU . В зависимости от знака заряда сила Лоренца направлена либо по оси x , либо против. В результате траектория движения электрона отклоняется от прямолинейной. При этом сила Лоренца \mathbf{F}_L всегда остается перпендикулярной направлению вектора скорости \mathbf{v} , поэтому траектория все время искривляется.

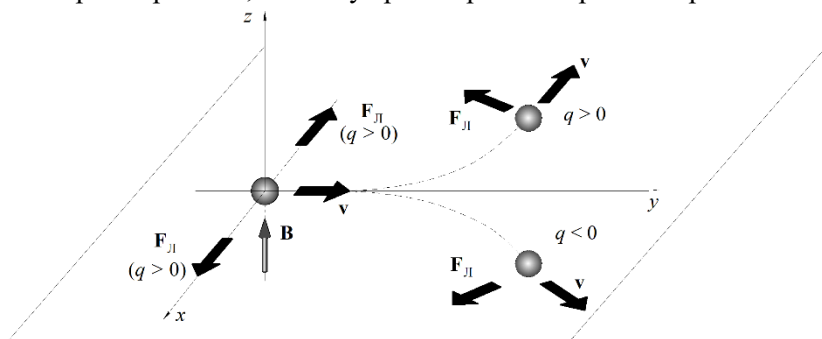


Рис. 1. Направление силы Лоренца

В общем случае на заряженную частицу действуют обе силы – и электрическая и магнитная, поэтому уравнение движения для нее можно записать в виде

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F}_\Sigma + \mathbf{F}_L = q(\mathbf{E} + [\mathbf{v}, \mathbf{B}]). \quad (3)$$

где m – масса частицы; \mathbf{a} – вектор мгновенного ускорения частицы.

Принцип работы установки. Движение электронов изучается в кольцевом пространстве между катодом и анодом лампы электровакуумного диода. *Катод* – отрицательно заряженный электрод; *анод* – положительно заряженный электрод.

Катод лампы в форме длинной нити располагается вдоль оси цилиндрического анода (рис. 2), так что электрическое поле между анодом и катодом имеет радиальный характер, т. е. напряженность поля \mathbf{E} направлена от анода к катоду вдоль радиуса. Радиус катода значительно меньше радиуса анода, $r_k \ll r_a$.

В результате нагрева катода электроны в нем приобретают достаточную энергию для совершения работы выхода[†]. Этот процесс носит название *термоэлектронной эмиссии*. Выходящие из материала катода электроны под действием электрического поля, формируемого разностью потенциалов между катодом и анодом, движутся от катода к аноду. Поток этих электронов представляет собой анодный ток I_a .

Лампа помещена внутрь соленоида, в котором создается однородное магнитное поле параллельное оси анода (перпендикулярное плоскости рис. 3). Вектор индукции магнитного поля \mathbf{B} между анодом и катодом перпендикулярен вектору напряженности электрического поля \mathbf{E} и, следовательно, скорости электронов \mathbf{v} (на рис. 3 вектор \mathbf{B} направлен перпендикулярно плоскости рисунка на читателя).

В отсутствие магнитного поля ($\mathbf{B} = 0$) электроны движутся от катода к аноду по прямой вдоль радиусов как показано на рис. 2 (и на рис. 3 при $B = 0$). При включении магнитного поля траектории электронов искривляются под действием силы Лоренца. В слабом магнитном поле это искривление незначительно, электроны все равно попадают на анод, и анодный ток имеет такое же значение, как и в отсутствие магнитного поля. По мере увеличения магнитного поля траектории электронов все более искривляются. Наконец, при некотором критическом значении индукции магнитного поля $B_{кр}$ электрон не достигает анода и разворачивается (см. рис. 3, случай $B = B_{кр}$). В результате траектории электронов едва касаются поверхности анода, и анодный ток резко падает. При $B > B_{кр}$ электроны не достигают анода и ток через лампу прекращается.

На рис. 4 приведена характерная зависимость анодного тока от величины индукции магнитного поля. Если бы все электроны

[†] Это энергия, которую необходимо затратить электрону, чтобы покинуть материал катода.

имели одинаковую начальную скорость, то они бы все не смогли достичь анода при одном и том же критическом значении индукции магнитного поля. В результате кривая имела бы строго ступенчатый характер и на ней бы наблюдался очень резкий спад тока до нуля. В действительности этого не происходит потому, что все электроны обладают различными начальными скоростями. Это связано с тем, что у электронов, как и молекул газа, есть определенное распределение по скоростям. Из-за этого кривая имеет сглаженный характер.

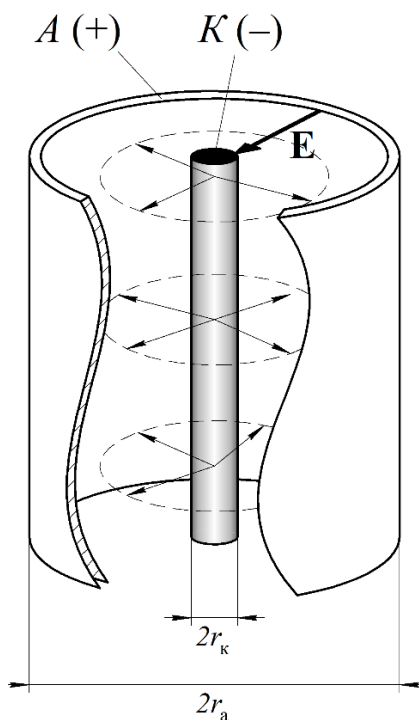


Рис. 2. Схема лампы электровакуумного диода; стрелками показано направление движения электронов

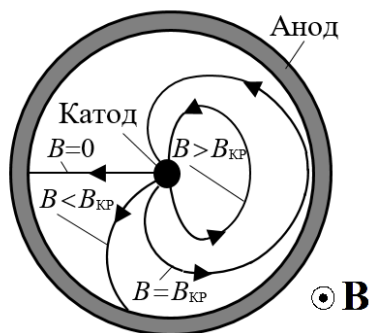


Рис. 3. Траектории движения электрона при различных величинах индукции магнитного поля B

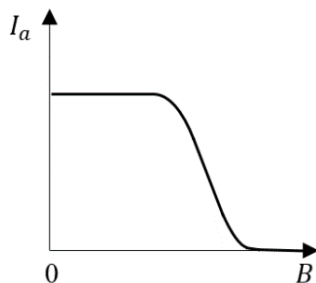


Рис. 4. Зависимость анодного тока от величины магнитной индукции

Экспериментальное определение $B_{кр}$. Принципиальная схема включения электронной лампы и соленоида показана на

рис. 5. Соленоид служит для создания магнитного поля; амперметр для измерения тока соленоида; вольтметр для измерения анодного напряжения; потенциометр для регулирования анодного напряжения; миллиамперметр для измерения анодного тока лампы.

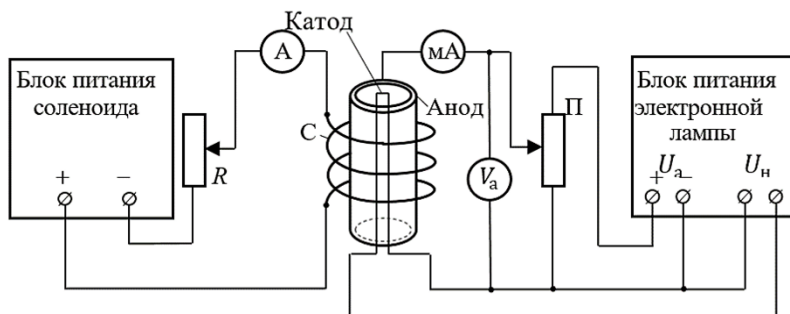


Рис. 5. Принципиальная схема включения электронной лампы: С – соленоид; А – амперметр; V_a – вольтметр; П – потенциометр; mA – миллиамперметр

Эксперимент заключается в регистрации анодного тока лампы при заданном напряжении между анодом и катодом для различных значений индукции магнитного поля на оси соленоида, значения которой управляются регулировкой тока через обмотку соленоида.

Считая соленоид бесконечно длинным, можно полагать, что величина индукции магнитного поля в соленоиде B прямо пропорциональна силе тока I_c , текущего в обмотке соленоида:

$$B = KI_c, \quad (4)$$

где K – коэффициент, зависящий от конструкции соленоида[‡].

Построив график зависимости анодного тока I_a от тока в соленоиде I_c , можно определить значение тока соленоида, соответствующего критическому режиму $I_{c\text{кр}}$. Критическим можно считать режим, при котором величина анодного тока уменьшается не менее чем в два раза по сравнению с током анода при выключенном магнитном поле. После этого по формуле (4) вычисляется значение величины $B_{\text{кр}}$.

[‡] Для аудитории 14206 коэффициент K указан на стенде.

Замечание. Сглаживание кривой, изображающей зависимость анодного тока от величины магнитной индукции (см. рис. 4), может быть вызвано также неполной коаксиальностью анода и катода и неточностью ориентирования внешнего магнитного поля относительно оси катода.

Теоретическая оценка $B_{кр}$. На электрон, движущийся в однородном магнитном поле, действует сила Лоренца (2). Модуль этой силы равен

$$F_{л} = evB \sin \alpha, \quad (5)$$

где α – угол между векторами скорости электрона \mathbf{v} и магнитной индукции \mathbf{B} . Вектор магнитной индукции в рассматриваемой установке перпендикулярен плоскости движения электрона, а значит и его вектору скорости. Поэтому $\sin \alpha = 1$ и

$$F_{л} = evB. \quad (6)$$

Будучи перпендикулярной вектору скорости электрона в любой точке траектории, эта сила является центростремительной. Тогда уравнение движения электрона имеет вид:

$$m_e a_n = m_e \frac{v^2}{r} = F_{л} = evB. \quad (7)$$

где a_n – величина нормального ускорения.

Отсюда можно выразить индукцию магнитного поля

$$B = \frac{m_e v}{er}. \quad (8)$$

В критическом режиме радиус кривизны траектории электрона приближенно можно считать равным половине радиуса анода

$$r = \frac{r_a}{2}, \quad (9)$$

поэтому

$$B_{кр} \cong \frac{2m_e v}{er_a}. \quad (10)$$

При движении электрона между анодом и катодом лампы электрическое поле совершает работу, которая идет на увеличение кинетической энергии электрона. Пренебрегая начальными скоростями электронов, имеем

$$eU_a = \frac{mv^2}{2}, \quad (11)$$

где U_a – анодное напряжение. Выражая отсюда скорость электрона v и подставляя ее в (10), найдем выражение для критической индукции магнитного поля:

$$B_{кр} = \frac{2}{r_a} \sqrt{\frac{2m_e U_a}{e}}. \quad (12)$$

Полученное теоретически значение критической величины индукции магнитного поля можно сравнить с экспериментальным.

2. Методика проведения измерений и описание установки

Необходимо провести три серии экспериментов для трех различных значений анодного напряжения U_a . Эти три значения для работы № 22 (ауд. 14202) указаны на стенде, для работы № 242 (ауд. 14110) задаются преподавателем.

Для каждого значения анодного напряжения необходимо изменять ток соленоида от нуля до значения, при котором анодный ток падает практически до нуля через равные интервалы так, чтобы получилось 10 значений.

Экспериментальные установки немного различаются в зависимости от лаборатории. Ниже приведены описания установок и методики измерений в зависимости от лаборатории.

Лаборатория 14110 (работа № 242). На рис. 6 показана фотография экспериментальной установки.

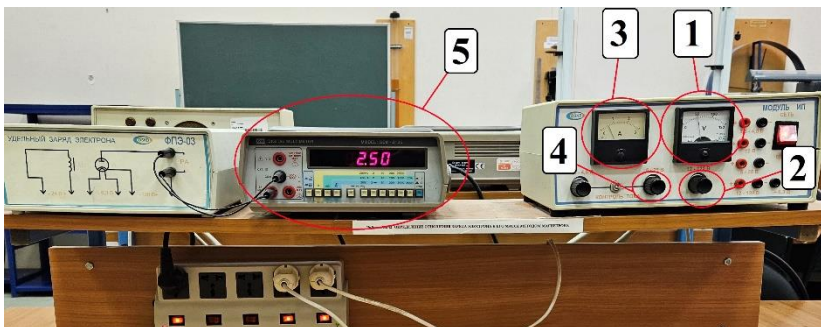


Рис. 6. Схема лабораторной установки в ауд. 14110

Вольтметр **1** показывает анодное напряжение, которое регулируется ручкой **2**. Ток соленоида показывает амперметр **3**, регулируется он ручкой **4**. Мультиметр **5** типа GDM-8135 (который включен в режим измерения тока) показывает возникающий при этом анодный ток.

Геометрические размеры соленоида:

- длина $L = 167$ мм;
- число витков $N = 2112$;
- диаметр $D = 62$ мм;
- Радиус анода $r_a = 6$ мм;
- Радиус катода $r_k \approx 0$ мм.

Зная эти параметры и критический анодный ток $I_{кр}$, можно определить экспериментальное значение $B_{кр}$ по формуле:

$$B_{кр} = \frac{\mu_0 N I_{кр}}{\sqrt{L^2 + D^2}}, \quad (13)$$

где $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Лаборатория 14202 (работа № 22). На рис. 7 показана фотография экспериментальной установки.

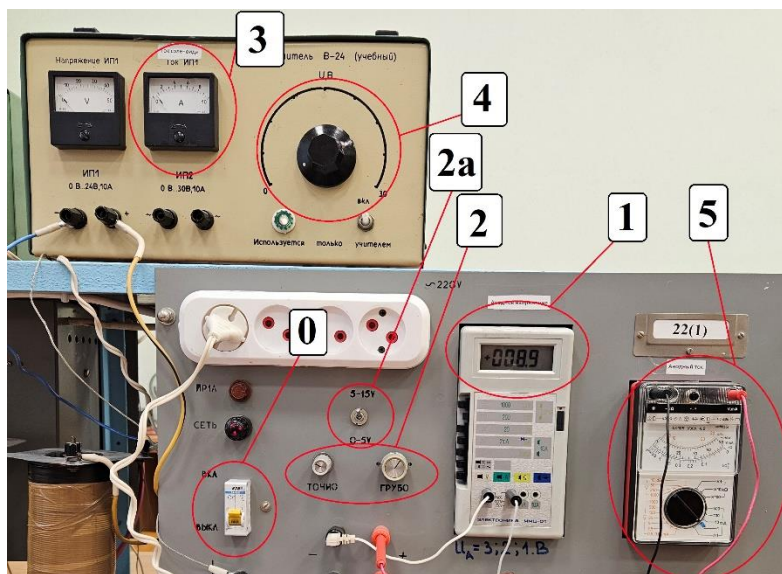


Рис. 7. Схема лабораторной установки в ауд. 14202

Установка включается переключателем **0**. Вольтметр **1** (тестер, который включен в режим измерения напряжения) показывает анодное напряжение. Сначала нужно убедиться, что выставленное напряжение находится в нужном диапазоне (от 0 до 5 В или от 5 до 15 В), выбрав положение переключателя **2а** соответствующим образом. Далее устанавливается требуемое значение анодного напряжения с помощью ручек регулировки «точно» и «грубо» **2**. После этого с помощью ручки **4** устанавливается ток соленоида, который отображается на амперметре **5**. Возникающий при этом анодный ток показывает миллиамперметр **6** (тестер, который включен в режим измерения тока).

По формуле (4) вычислить экспериментальное значение $B_{кр}$, подставляя в уравнение критические значения индукции и силы тока. Радиус анода r_a и коэффициент K для расчета указаны на стенде.

3. Порядок выполнения работы

а) проведение измерений в лаборатории

1. Включите блоки питания лампы и соленоида (если необходимо).

2. Силу тока соленоида установите равной нулю (ручка **4**).

3. Установите первое значение анодного напряжения U_{a1} (отображается на вольтметре **1**) и занесите его в таблицу 1:

3.1. Для ауд. 14202 в соответствии с указаниями на стенде.

3.2. Для ауд. 14110 в соответствии с указаниями преподавателя (базовый вариант: 50 В, 100 В, 150 В).

4. Снимите значение анодного тока с миллиамперметра **5** при нулевом значении тока через соленоид и занесите в таблицу 1.

5. Увеличивая ток через соленоид ручкой **4**, определите максимальное значение тока соленоида при каком значении этого тока анодный ток (см. показания миллиамперметра **5**) спадает практически до нуля (то есть по крайней мере в 10 раз по сравнению со значением, измеренным в п.4).

6. Проведите еще 8 измерений через равные интервалы изменения тока соленоида в диапазоне между значениями тока, полученными в п.п. 4 и 5. Результаты занесите в таблицу 1.

7. Повторите опыт, описанный в п.п. 4–6 при двух других значениях анодного напряжения U_{a2} и U_{a3} (в соответствии с указаниями на стенде или указаниями преподавателя). Результаты занесите в таблицу 1.

8. Покажите заполненную таблицу 1 преподавателю.

б) обработка результатов измерений

9. Для трех значений анодного напряжения U_{a1} , U_{a2} и U_{a3} постройте три графика зависимостей анодного тока I_a от тока соленоида I_c .

10. Для каждого графика определите величины токов соленоида, соответствующие критическому режиму. Критическим считается такой ток соленоида, при котором величина анодного тока уменьшается не менее, чем в два раза по сравнению с током анода при токе соленоида, равным нулю. Результаты занесите в таблицу 2 (эксперимент).

11. По формуле (12) для трех значений анодного напряжения U_{a1} , U_{a2} и U_{a3} рассчитайте значения критической индукции магнитного поля $B_{кр}$ с использованием радиуса анода r_a . Результаты занесите в таблицу 2 (теория).

12. Оцените расхождение между теоретическим и экспериментальным значением для трех значений по формуле:

$$\eta = \frac{|B_{кр}^{экс} - B_{кр}^{теор}|}{B_{кр}^{теор}} \cdot 100\%. \quad (14)$$

Запишите значения η в таблицу 2.

Таблица 1

Измеренные значения анодного тока и анодного напряжения

| № | Ток соленоида, I_c , А | Анодный ток I_a , мА | | |
|-----|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | $U_{a1} = \text{_____ В}$ | $U_{a2} = \text{_____ В}$ | $U_{a3} = \text{_____ В}$ |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| ... | | | | |

Таблица 2

Сравнение теоретических и экспериментальных значений

| $U_a, \text{В}$ | Эксперимент | | Теория | | $\eta, \%$ |
|-----------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------|
| | $I_{с\text{ кр}}, \text{А}$ | $B_{\text{кр}}, \text{Тл}$ | $I_{с\text{ кр}}, \text{А}$ | $B_{\text{кр}}, \text{Тл}$ | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

4. Контрольные вопросы

1. Какие силы действуют на заряженную частицу в электрическом и магнитном полях?
2. Оказывают ли электрическое и магнитное поле силовое воздействие на неподвижную заряженную частицу? А на подвижную незаряженную?
3. Как электрическая и магнитная сила зависят от знака заряда частицы?
4. Как определяется направление силы Лоренца?
5. Как определить радиус траектории электрона, если его скорость перпендикулярна направлению вектора магнитной индукции?
6. Как движется заряженная частица в магнитном поле при произвольном угле между ее скоростью и вектором магнитной индукции?
7. Опишите принцип работы лампы электровакуумного диода. Чем определяется анодный ток?
8. Как меняются траектории движения электронов при помещении лампы электровакуумного диода в магнитное поле?
9. Почему при определенном значении индукции магнитного поля анодный ток через лампу диода падает?
10. Будет ли влиять на величину критической индукции магнитного поля изменение направления тока соленоида?
11. Нарисуйте характерный график зависимости анодного тока от величины индукции магнитного поля.
12. Как теоретически оценить критическое значение индукции магнитного поля, при котором спадает анодный ток?

5. Рекомендуемая литература

В качестве литературы для изучения движения заряженных частиц в электрическом и магнитном полях рекомендуется: [1, §42-43; 2, §86, §89; 3, §114-116]. Там же можно найти ответы на некоторые контрольные вопросы.

1. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 3 т. Том 2. Электричество. Волны. Оптика. С.-Пб.: Лань, 2022. 468 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 3. Электричество. М.: Физматлит, 2020. 656 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Академия, 2006. 560 с.