

Работа 3.11

Проверка закона Богуславского — Ленгмюра и определение удельного заряда электрона

Оборудование: двухэлектродная электронная лампа 2Ц2С на панели, выпрямители ВУП-2 и ВС-24, два амперметра (1 А и 2,5 А), цифровые электронные приборы Щ4313 и М890G, соленоид, реостат (30 Ом), соединительные провода.

Введение

Для выполнения данной работы необходимо знать принцип действия *двухэлектродной электронной лампы* и поведение электронов, движущихся в электрическом и магнитном полях.

Двухэлектродная электронная лампа представляет собой стеклянный баллон, из которого откачан воздух, а внутри находятся два электрода — *анод*, обычно имеющий форму цилиндра, и *катод* в виде проволоки, расположенной по оси цилиндра и накаливаемой током.

Если к электродам лампы подключить источник напряжения, то при холодном катоде ток в цепи не возникает. Чтобы появился ток, катод необходимо раскалить до высокой температуры. Величина тока, проходящего через лампу, зависит от температуры катода и разности потенциалов между катодом и анодом. При постоянной температуре катода *анодный ток* I_a возрастает с увеличением *анодного напряжения* U_a , но зависимость I_a от U_a не подчиняется закону Ома, а имеет более сложный характер.

Это вызвано тем, что электроны, которые покидают катод, в пространстве между катодом и анодом образуют облако отрицательного заряда (*пространственный заряд*). Пространственный заряд образует электрическое поле, направление которого противоположно приложенному полю. Особенно сильное влияние на характер движения электронов оно оказывает при низких анодных напряжениях. В этом случае анодный ток значительно меньше, чем возможный *ток эмиссии катода*. При увеличении анодного напряжения пространственный заряд уменьшается, и анодный ток возрастает.

Теоретически вопрос о зависимости анодного тока вакуумного диода от анодного напряжения был исследован Ленгмюром и Богуславским при упрощающих предположениях, что начальная скорость электронов, покидающих катод, равна нулю; непосредственно возле катода электрическое поле равно нулю; анодный ток значительно меньше *тока насыщения*.

При выполнении этих предположений зависимость анодного тока диода от анодного напряжения имеет вид:

$$I_a = KU^{\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

где коэффициент K зависит от формы катода и его размеров.

Формула (1) представляет аналитическое выражение закона Богуславского — Ленгмюра или «закона 3/2».

Для электродов в форме коаксиальных цилиндров теоретические расчеты дают:

$$K = \frac{8\sqrt{2}\pi\varepsilon_0}{9} \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{l}{r_a \beta^2}, \quad (2)$$

где ε_0 — электрическая постоянная, r_a — радиус анода, l — длина катода, β — коэффициент, зависящий от отношения радиусов анода и катода (при отношении радиусов больше 10 он близок к единице), e/m — удельный заряд электрона.

Если коэффициент K определить экспериментально, то формула (2) дает возможность найти значение удельного заряда электрона:

$$\frac{e}{m} = \left(\frac{9r_a \beta^2}{8\sqrt{2}\pi\varepsilon_0 l} K \right)^2. \quad (3)$$

Для этого по экспериментальным данным строится график $I_a = f(U_a^{3/2})$. Он представляет собой прямую линию, тангенс угла наклона которой равен коэффициенту K . Если по графику определить

$$K = \operatorname{tg} \alpha, \quad (4)$$

то по формуле (3) можно вычислить удельный заряд электрона e/m .

Выполнимость закона Богуславского — Ленгмюра можно проверить опытным путем. С этой целью прологарифмируем формулу (1):

$$\lg I_a = \lg K + \frac{3}{2} \lg U_a. \quad (5)$$

Выражение (5) представляет собой уравнение прямой, тангенс угла наклона которой равен 3/2.

Построим график $\lg I_a = f(\lg U_a)$. Если измеренные значения I_a и U_a удовлетворяют зависимости (1) (закон Богуславского — Ленгмюра выполняется), то получим:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{3}{2}, \quad (6)$$

где φ — угол наклона прямой.

Другой способ определения удельного заряда электрона основан на одновременном действии на движущиеся электроны электрического и магнитного полей. Электрическое поле создается за счет приложенного к лампе анодного напряжения, а магнитное — с помощью соленоида. Двухэлектродная лампа по-

мещается внутри соленоида так, чтобы ее катод расположился вдоль оси соленоида. При этом магнитное поле будет направлено вдоль оси цилиндрического анода лампы, а электрическое — вдоль его радиуса. Данный способ определения e/m получил название «метод магнетрона».

При отсутствии тока в соленоиде на электроны, вылетающие из катода, действует только электрическое поле и они движутся к аноду прямолинейно по радиусам. При включении тока в цепи соленоида в последнем возникает магнитное поле и на движущиеся электроны действует сила Лоренца:

$$\vec{F} = e[\vec{v}, \vec{B}]. \quad (7)$$

Под действием этой силы траектории движения электронов становятся криволинейными. При некотором значении индукции \vec{B} электроны перестают достигать анода, и анодный ток прекращается.

Для каждого значения анодного напряжения U_a существует некоторое критическое значение магнитной индукции B_k , при которой электроны перестают попадать на анод.

Если $B < B_k$, то все электроны достигают анода и анодный ток имеет такое же значение, как и при отсутствии магнитного поля. Если же $B > B_k$, то ни один из электронов не достигает анода и ток равен нулю.

Найдем критическое значение магнитной индукции B_k . Будем считать, что радиус катода r_k значительно меньше радиуса анода r_a , а начальная скорость электронов, вылетающих из катода, равна нулю. При $r_k \ll r_a$ потенциал электрического поля вблизи катода очень быстро нарастает и далее изменяется незначительно. Поэтому основное изменение скорости электронов происходит вблизи катода, а дальше скорость почти не изменяется. Это дает основание считать, что электроны двигаются с постоянной скоростью. Учитывая, что $\vec{v} \perp \vec{B}$, можно записать:

$$\frac{mv^2}{r} = evB, \quad (8)$$

где e , m , v — заряд, масса и скорость электрона; r — радиус окружности, по которой движется электрон.

С учетом того, что $r_k \ll r_a$, при $B = B_k$ $r = r_a/2$, и в соответствии с соотношением (8) будем иметь:

$$\frac{e}{m} = \frac{2v}{r_a B_k}. \quad (9)$$

Выразив скорость v из соотношения

$$eU_a = \frac{mv^2}{2} \quad (10)$$

и подставив ее в формулу (9), получим:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{r_a^2 B_k^2}. \quad (11)$$

Формула (11) позволяет вычислить e/m , если при заданном U_a найдено значение магнитной индукции B_k , при которой электроны перестают попадать на анод.

При выводе формулы (11) предполагалось, что все электроны покидают катод с одинаковой скоростью, равной нулю. Если бы это условие точно выполнялось, то анодный ток с увеличением магнитного поля изменялся бы так, как показано на рис. 3.35 пунктиром. На самом деле электроны, испускаемые нагретым катодом, имеют разные начальные скорости. Поэтому для разных электронов критические условия достигаются при разных значениях B , и зависимость анодного тока от индукции магнитного поля имеет вид сплошной линии, изображенной на рис. 3.35.

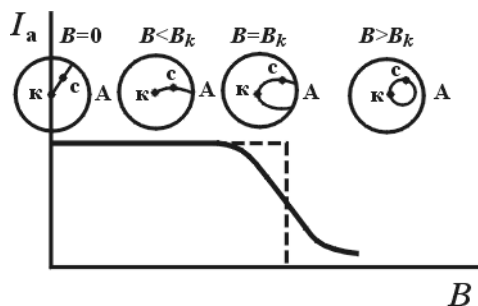


Рис. 3.35

При $B < B_k$ анодный ток остается постоянным, а при $B = B_k$ вместо резкого обрыва наблюдается его плавный спад.

Согласно (11) экспериментальное определение e/m сводится к измерению анодного напряжения U_a и критического значения магнитной индукции B_k . Однако учитывая, что магнитная индукция соленоида без ферромагнитного сердечника прямо пропорциональна току I ,

$$B = \frac{\mu_0 NI}{\sqrt{d^2 + l^2}} \quad (12)$$

($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная, d — диаметр соленоида, l — его длина, N — число витков), экспериментально можно исследовать зависимость анодного тока лампы I_a от тока соленоида I и определить критическое значение тока соленоида I_k , при котором происходит резкое уменьшение анодного тока.

Значение магнитной индукции B_k , соответствующее току I_k , можно вычислить по формуле (12).

Целью работы является исследование вольтамперной характеристики вакуумного диода и определение отношения заряда электрона к его массе.

Описание установки и метода. В работе используется вакуумный диод 2Ц2С с цилиндрическим анодом. Схема установки приведена на рис. 3.36. Регулируемое постоянное напряжение подается от выпрямителя ВУП-2 и измеряется электронным вольтметром М890Г. Анодный ток измеряется цифровым электронным прибором Ц4313. Нить накала лампы питается переменным напряжением

6,3 В, которое подается от ВУП-2. Ток накала регулируется реостатом R сопротивлением 30 Ом и измеряется амперметром с предельным током 2,5 А. При определении удельного заряда электрона методом магнетрона двухэлектродная лампа 2Ц2С помещается внутрь соленоида L (рис. 3.37). Для питания соленоида используется выпрямитель ВС-24, который позволяет регулировать силу тока. Ток соленоида измеряется амперметром с предельным значением тока 1 А. Двухэлектродная лампа характеризуется следующими параметрами: длина катода $l = 0,9$ см, радиус анода $r_a = 0,85$ см, отношение радиусов анода и катода приближенно равно 10, поэтому $\beta^2 \approx 0,98$. Соленоид L имеет $N = 1000$ витков, его длина $l = 7,5$ см, а диаметр $d = 6,8$ см.

Порядок выполнения работы

1. Соберите схему согласно рис. 3.36. В качестве миллиамперметра для измерения анодного тока используйте прибор Щ4313, а прибор Щ890G — для измерения анодного напряжения. Подвижный контакт реостата R установите в положение, которое соответствует максимальному сопротивлению.

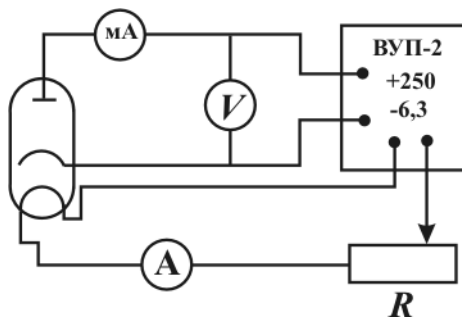


Рис. 3.36

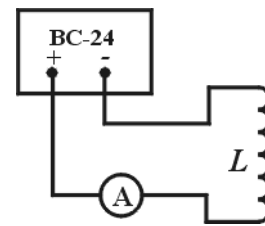


Рис. 3.37

2. Установите ручку регулировки напряжения выпрямителя ВУП-2 в крайнее левое положение и включите его в сеть 220 В. Подготовьте приборы Щ4313 и Щ890G для измерения постоянного тока и напряжения до 50 мА и 200 В соответственно. Включите их в сеть 220 В.

3. С помощью реостата R установите ток накала катода лампы равным 1,75 А. Исследуйте зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения U_a , изменяя его через каждые 10 В в пределах от 0 до 200 В. Результаты измерений запишите в таблицу 1.

Таблица 1

№ п/п	U_a , В	I_a , мА	$\lg U_a$	$U_a^{3/2}$	$\ln I_a$
-------	-----------	------------	-----------	-------------	-----------

4. Постройте график зависимости $\lg I_a = f(\lg U_a)$. По наклону прямой с учетом (6) проверьте выполнение «закона $3/2$ ».

5. Постройте график $I_a = f(U_a^{3/2})$. Вычислите угловой коэффициент $K = \operatorname{tg} \varphi$ и по формуле (3) вычислите удельный заряд электрона e/m .

6. Соберите схему согласно рис. 3.37. Ручку регулировки напряжения выпрямителя ВС-24М поставьте в крайнее левое положение и включите его в сеть 220 В. Для измерения тока используйте амперметр с номинальным значением тока 1 А.

7. Подайте на лампу анодное напряжение в пределах 120 — 140 В. Проверьте ток накала катода лампы (его значение должно быть 1,5 — 1,75 А).

8. Исследуйте зависимость анодного тока лампы I_a от тока в соленоиде I . Для этого увеличивайте ток в соленоиде от 0 до 2 А и через каждые 0,2 А записывайте значения анодного тока. Следите, чтобы анодное напряжение при этом не изменялось. Результаты измерений запишите в таблицу 2.

Таблица 2

№ п/п	$U_a = 120$ В		$U_a = 130$ В		$U_a = 140$ В		$\frac{e}{m}$, Кл/кг
	I , А	I_a , мА	I , А	I_a , мА	I , А	I_a , мА	

9. По графику $I_a = f(I)$ определите критическое значение тока I_k . По формуле (12) определите критическое значение магнитной индукции B_k , подставьте его в формулу (11) и определите e/m .

10. Повторите опыты при других значениях анодного напряжения. Найдите среднее значение e/m . Результаты измерений запишите в таблицу 2.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ УИР

На величину магнитной индукции в пространстве между катодом и анодом лампы 2Ц2С оказывает влияние ее цилиндрический анод. Определите экспериментально это влияние.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляют собой свободные электроны в металле?
2. Каков механизм выхода электронов за пределы поверхности металла?
3. Что называют работой выхода электрона из металла?
4. Объясните принцип работы и устройство лампы диод.
5. Что такое ток насыщения?

6. Почему вольфрамовые катоды электронных ламп покрывают мономолекулярным слоем тория или оксидами щелочноземельных металлов?
7. Чем отличаются вольтамперные характеристики диодов с оксидными катодами от характеристик диодов с катодами из чистых металлов?
8. Почему анодный ток в электронной лампе не подчиняется закону Ома?
9. Какой формулой выражается зависимость анодного тока диода от напряжения? При каких упрощающих предположениях получили эту формулу?
10. Чему равна и как направлена сила, действующая на заряд, движущийся в магнитном поле?