

## Лабораторная работа № 3–3(М)

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

**Цель работы:** определение удельного заряда электрона с помощью двухэлектродной лампы.

**Приборы и принадлежности:** модуль ИП; модуль ФПЭ-03; миллиамперметр постоянного тока; набор проводов.

#### Описание метода определения удельного заряда

Удельным зарядом электрона  $e/m$  называется отношение заряда электрона  $e$  к его массе  $m$ . Для определения удельного заряда используются закономерности движения электронов в кольцевом пространстве между анодом и катодом двухэлектродной лампы (вакуумного диода), помещенной в магнитное поле. Вакуумный диод (рис. 1) представляет собой стеклянный баллон, из которого выкачан воздух, содержащий внутри два металлических электрода: анод А и катод К. В результате термоэлектронной эмиссии из нагретого катода вылетают электроны. Анод имеет форму цилиндра, коаксиально окружающего катод. На анод подается положительный потенциал (относительно катода), то есть напряженность электрического поля  $\vec{E}$  в лампе направлена по радиусу от анода к катоду (см. рис. 1). Под действием электрического поля вылетевшие из катода электроны начнут двигаться к аноду, и через диод потечет анодный ток.

Лампа помещается внутри соленоида (катушки индуктивности) с током, создающего магнитное поле, вектор индукции которого  $\vec{B}$  параллелен по оси анода  $Z$  (см. рис. 1).

Рассмотрим движение электрона под действием электрического и магнитного полей, показанных на рис. 1. Траектории движения электронов при различных значениях индукции магнитного поля представлены на рис. 2.

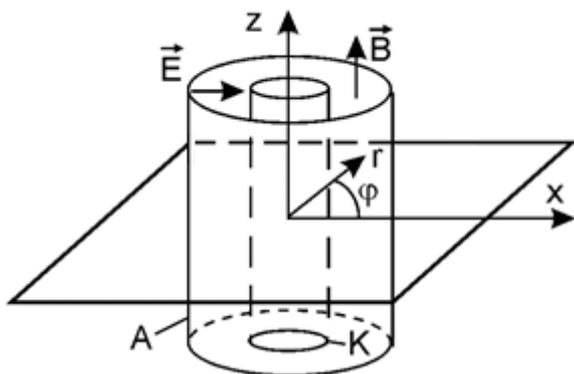


Рис. 1. Вакуумный диод

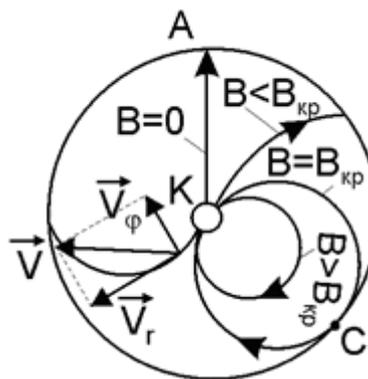


Рис. 2. Траектории движения электронов в зависимости от величины магнитной индукции

При отсутствии магнитного поля ( $B = 0$ ) траектория электрона прямолинейна и направлена вдоль радиуса от катода К к аноду А. При слабом магнитном поле траектория слегка искривляется под действием силы Лоренца,

но электрон еще попадает на анод. С увеличением индукции магнитного поля траектория электрона все больше искривляется и при некотором критическом значении индукции  $B_{кр}$  траектория электрона только касается анода ( $B = B_{кр}$ ). При  $B > B_{кр}$  электрон не достигает анода. Поэтому зависимость анодного тока  $I_a$  от индукции магнитного поля  $B$  имеет вид, показанный на рис. 3 пунктирной линией. Однако разброс начальных скоростей, некоторая несоосность катода и анода и другие причины приводят к тому, что эта зависимость имеет вид, показанный сплошной линией.

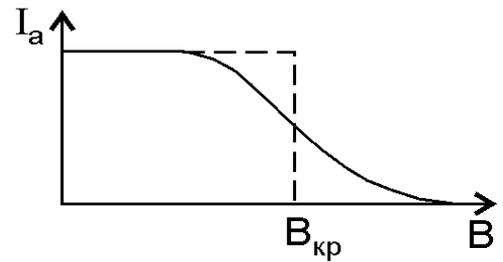


Рис. 3. Зависимость анодного тока от индукции магнитного поля

Для описания движения электрона используем полярные координаты: радиус  $r$  и угол  $\varphi$  (см. рис. 1). Начальной скоростью электронов пренебрегаем. Работа сил электрического поля

$$A = e \cdot U_a,$$

где  $e$  – модуль заряда электрона;  $U_a$  – анодное напряжение.

Магнитное поле работы не совершает, так как сила Лоренца перпендикулярна скорости электрона. Поэтому по закону сохранения энергия электрона равна работе сил электрического поля:

$$e \cdot U_a = \frac{m v^2}{2} = \frac{m}{2} (v_r^2 + v_\varphi^2),$$

где  $v_r$  и  $v_\varphi$  – радиальная и угловая компоненты скорости электрона  $v$  (см. рис. 2).

При  $B = B_{кр}$  траектория электрона только касается анода в точке  $C$  с координатой  $r = r_a$ , где  $r_a$  – радиус анода (см. рис. 2), поэтому в точке касания радиальная компонента скорости  $v_r = 0$ , следовательно выполняется соотношение

$$e \cdot U_a = \frac{m v_\varphi^2}{2}, \quad (1)$$

Величину скорости  $v_\varphi = r \cdot \omega$  найдем из уравнения движения электрона под действием силы Лоренца

$$J_z \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_z, \quad (2)$$

где  $J_z = m \cdot r^2$  – момент инерции электрона относительно оси  $Z$ ;  $\frac{d\omega}{dt}$  – производная угловой скорости  $\omega$  по времени  $t$  (угловое ускорение);  $M_z$  – момент силы Лоренца относительно оси  $Z$ . Величина момента силы Лоренца

$$M_z = r \cdot F_{Л} = r \cdot e \cdot v_r \cdot B = r \cdot e \cdot \frac{dr}{dt} \cdot B. \quad (3)$$

Подставив величину  $M_z$  из уравнения (3) в уравнение (2) и интегрируя последнее, получаем

$$m \cdot r^2 \cdot \omega = e \cdot B \cdot r^2 / 2, \quad r \cdot \omega = e \cdot B \cdot r / (2m),$$

откуда

$$v_{\varphi} = r \cdot \omega = \frac{e \cdot B \cdot r}{2 \cdot m} \quad (4)$$

Подставив  $v_{\varphi}$  из выражения (4) в (1) и решив полученное уравнение относительно величины  $e/m$ , получим

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 r_a^2}, \quad (5)$$

где  $B_{кр}$  – критическое значение индукции магнитного поля, при котором начинается быстрый спад анодного тока (см. рис. 3).

Таким образом, для определения удельного заряда электрона необходимо по результатам эксперимента найти критическое значение индукции магнитного поля  $B_{кр}$  при заданном анодном напряжении  $U_a$  и известном радиусе анода  $r_a$ .

### Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 4) включает в себя: модуль ИП – источник питания постоянного тока с вольтметром и амперметром; модуль ФПЭ-03, содержащий соленоид и двухэлектродную лампу; миллиамперметр постоянного тока. Источник питания ИП и модуль ФПЭ-03 соединяются между собой специальным кабелем, подключённым к разъёмам на задних панелях модулей. Миллиамперметр mA подключается к гнездам РА на лицевой панели модуля ФПЭ-03: клемма «←» на миллиамперметре к верхнему гнезду; клемма «5 mV» – к нижнему гнезду.

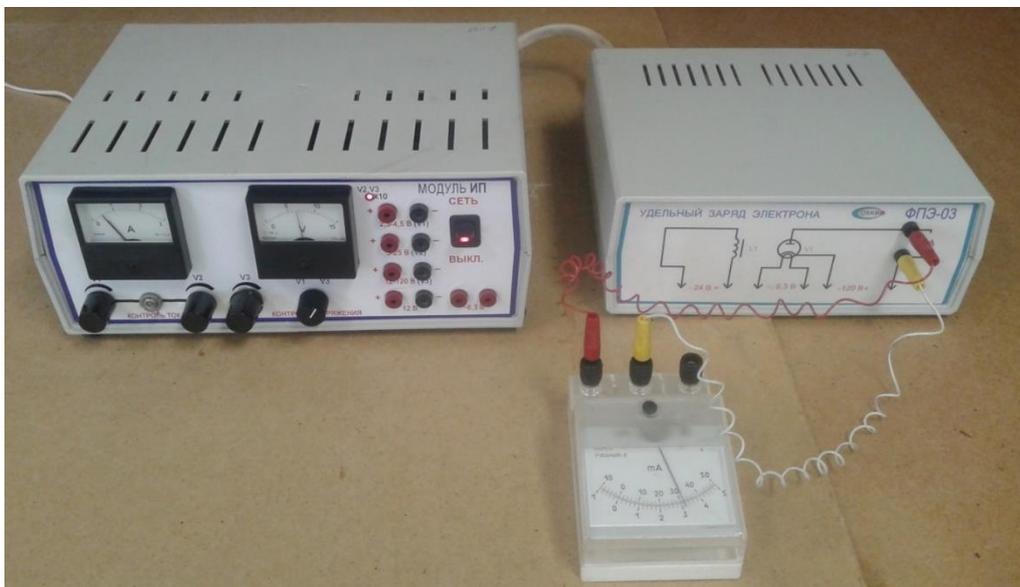


Рис. 4. Экспериментальная установка

Электрическая схема экспериментальной установки приведена на рис. 5.

В корпусе модуля ФПЭ-03 установлен соленоид  $L$ . Цепь соленоида питается постоянным напряжением 24 В от источника питания ИП. Изменение тока соленоида производится вращением ручки регулятора «V2» на передней панели ИП. В данной установке минимальное возможное значение тока соленоида  $I_{сол}$  составляет 0,6 А. Регистрация тока соленоида  $I_{сол}$  осуществляется амперметром на передней панели ИП.

Внутри соленоида размещена двухэлектродная лампа АК с цилиндрическим анодом радиусом  $r_a = 6$  мм. Питание накала лампы осуществляется переменным напряжением  $U_H = 6,3$  В от источника питания ИП.

На лампу подается постоянное напряжение  $U_a$  (предельное значение 120 В) от источника питания ИП. Изменение анодного напряжения производится плавным вращением ручки регулятора «V3» на передней панели ИП. Контроль величины анодного напряжения  $U_a$  осуществляется по вольтметру на передней панели ИП.

Регистрация анодного тока  $I_a$  производится по миллиамперметру, подключённому к гнездам РА модуля ФПЭ-03.

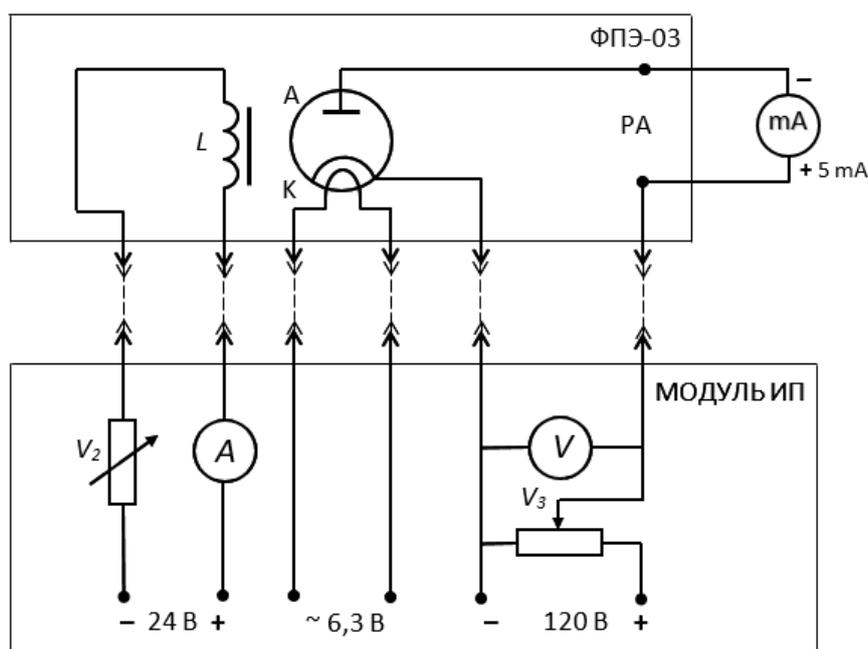


Рис. 5. Схема экспериментальной установки

### Порядок выполнения работы

1. Записать в таблицу три значения анодного напряжения  $U_a$ . Задаются преподавателем из интервала 70...100 В. Например:

$$U_{a1} = 70 \text{ В}, U_{a2} = 85 \text{ В}, U_{a3} = 100 \text{ В} \text{ или } U_{a1} = 75 \text{ В}, U_{a2} = 85 \text{ В}, U_{a3} = 95 \text{ В}.$$

№	$I_{\text{сол}}$ , А	$U_{a1} = \text{В}$				$U_{a2} = \text{В}$				$U_{a3} = \text{В}$			
		$I_a$ , мА	$I_{\text{сол}}^{\text{кр}}$ , А	$B_{\text{кр}}$ , мТл	$e/m$ , Кл/кг	$I_a$ , мА	$I_{\text{сол}}^{\text{кр}}$ , А	$B_{\text{кр}}$ , мТл	$e/m$ , Кл/кг	$I_a$ , мА	$I_{\text{сол}}^{\text{кр}}$ , А	$B_{\text{кр}}$ , мТл	$e/m$ , Кл/кг
1	0,6												
2													
...													

2. Подготовить экспериментальную установку к работе. На передней панели модуля ИП (рис. 6):

тумблер «Контроль тока» переключить в правое положение на «V2»;

рукоятку «Контроль напряжения» переключить (повернуть) в крайнее правое положение на «V3»;

рукоятки регулировки «V2» и «V3» перевести в крайнее положение, вращая их против часовой стрелки до упора.



Рис. 6. Передняя панель модуля ИП

3. Получив разрешение преподавателя, подключить вилку сетевого шнура модуля ИП к розетке переменного напряжения 220 В. Включить источник питания тумблером «СЕТЬ/ВЫКЛ.» на лицевой панели ИП, переведя его в верхнее положение – «СЕТЬ». При этом на тумблере засветится индикатор подключения.

4. Плавно вращая рукоятку регулировки напряжения «V3», установить на вольтметре первое значение анодного напряжения –  $U_{a1}$ . Светящийся светодиод справа от вольтметра указывает на значение множителя шкалы ( $\times 10$ ), то есть показания стрелки по шкале прибора надо умножить на 10.

5. Меняя с помощью рукоятки регулировки «V2» ток соленоида  $I_{\text{сол}}$  от 0,6 А с интервалом 0,1 А (через одно деление амперметра), записывать значения тока в соленоиде  $I_{\text{сол}}$  и соответствующие им значения анодного тока  $I_a$  в таблицу. Закончить измерения, если анодный ток  $I_a = 0$  мА.

*В процессе измерений следует следить за показаниями вольтметра, поддерживая постоянным заданное анодное напряжение  $U_a$ .*

6. Согласно пункту 5 для тех же, что и в первом опыте значений тока соленоида  $I_{\text{сол}}$ , измерить значения анодного тока  $I_a$  для напряжения  $U_{a2}$  и  $U_{a3}$ . Данные занести в таблицу.

### Обработка результатов эксперимента

1. По данным таблицы построить (в одной координатной системе) графики зависимости  $I_a = f(I_{\text{сол}})$  для трех опытов ( $U_{a1}$ ,  $U_{a2}$ ,  $U_{a3}$ ).

2. Проводя через точку перегиба П (рис. 7) касательную к кривой зависимости  $I_a = f(I_{\text{сол}})$ , определить критическое значения тока в соленоиде  $I_{\text{сол}}^{\text{кр}}$ , при котором начинается быстрый спад анодного тока, для трех опытов. Результаты записать в таблицу.

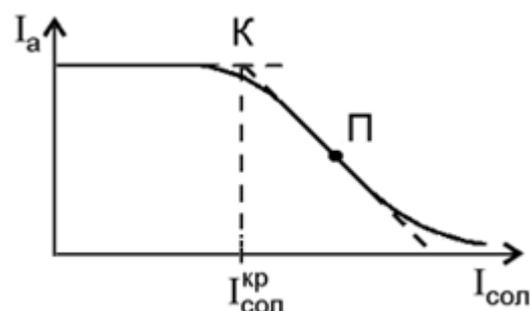


Рис. 7. Пример определения критического значения силы тока в соленоиде

3. По величине  $I_{\text{сол}}^{\text{кр}}$  рассчитать критическое значение индукции магнитного поля соленоида для трех опытов по формуле

$$B_{\text{кр}} = \mu_0 \cdot I_{\text{сол}}^{\text{кр}} \cdot n,$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $n$  – число витков на единицу длины соленоида (указано на установке). Результат записать в таблицу.

4. По формуле (5) вычислить значения  $e/m$  для трех опытов. Результат записать в таблицу.

5. Вычислить среднее значение удельного заряда  $\langle e/m \rangle$ , доверительный интервал  $\Delta_{e/m}$  и относительную погрешность измерения  $E$  согласно Приложению 1.

6. Сравнить экспериментально определенное значение  $e/m$  с табличным, используя формулу

$$E' = \frac{|(e/m)_{\text{таб}} - e/m|}{(e/m)_{\text{таб}}} 100 \%.$$

### Результаты работы

1. Записать значение удельного заряда в виде

$$e/m = \langle e/m \rangle \pm \Delta_{e/m}; \quad E = \quad \%$$

2. Сделать выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Что такое сила Лоренца, как определяется ее величина и направление?
2. Электрон влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно его силовым линиям. Записать уравнение движения электрона. Какой вид имеет траектория электрона в этом случае?
3. Изобразить вектора сил, действующих на электрон в произвольной точке его траектории (см. рис. 2), и объяснить различные формы траектории электрона.
4. Какие методы, кроме использованного в работе, существуют для определения удельного заряда электрона?
5. В каких устройствах одновременно действуют электрические и магнитные поля на заряженные частицы?
6. Чему равна работа сил электрического поля и работа силы Лоренца?
7. Объясните вид графиков зависимостей анодного тока от индукции магнитного поля (см. рис. 3) и от силы тока в соленоиде (см. рис. 7).
8. Зависит ли величина  $e/m$  от величины анодного напряжения  $U_a$ ?
9. Зачем на нить накала электронной лампы подают напряжение  $U_H$ ?

### Дополнительная литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. СПб.: Лань, 2019. §40, 43, 50, 72–74.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. школа, 2008. §1–5, 114–116.

## Приложения

### Приложение 1

#### Обработка результатов измерения

Пусть в результате эксперимента получено  $n$  значений измеряемой величины  $u$ :

$$u_1, u_2, \dots, u_n.$$

Обработка результатов измерения включает в себя этапы:

1. Рассчитывается среднее значение измеряемой величины:

$$\langle u \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n} = \frac{u_1 + u_2 + \dots + u_n}{n}.$$

2. Рассчитывается абсолютная погрешность каждого измерения:

$$\Delta u_i = |u_i - \langle u \rangle|.$$

3. Рассчитываются квадраты абсолютных погрешностей каждого измерения  $(\Delta u_i)^2$  и находится их сумма:

$$\sum_{i=1}^n (\Delta u_i)^2 = (\Delta u_1)^2 + (\Delta u_2)^2 + \dots + (\Delta u_n)^2.$$

4. Рассчитывается доверительный интервал:

$$\Delta_u = t_{\alpha, n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta u_i)^2}{n(n-1)}},$$

где  $t_{\alpha, n}$  – коэффициент Стьюдента, значение которого определяется по таблице в зависимости от числа опытов  $n$  и доверительной вероятности  $\alpha$ . Чем выше вероятность  $\alpha$ , тем больше будет доверительный интервал. Рекомендуется брать  $\alpha = 0,95$ .

Таблица значений коэффициента Стьюдента

$\alpha \backslash n$	3	4	5	10	15
0,70	1,3	1,3	1,2	1,1	1,1
0,95	4,3	3,2	2,8	2,3	2,1
0,99	9,9	5,8	4,6	3,3	3,0

5. Рассчитывается относительная погрешность измерения:

$$E = \frac{\Delta_u}{\langle u \rangle} \cdot 100 \%$$

Результат измерения нужно представить в виде

$$u = \langle u \rangle \pm \Delta_u; \quad E = \dots \%$$

### Приложение 2

#### Некоторые физические постоянные

Название	Значение
Ускорение свободного падения	$g = 9,81 \text{ м/с}^2$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Элементарный заряд	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Электрон-вольт	$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$