

Лабораторная работа №319

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА
ИЗ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНОГО ДИОДА

Приборы и принадлежности: лабораторная панель «Вакуумный диод», миллиамперметр постоянного тока, стабилизированные источники питания.

Введение. Явление термоэлектронной эмиссии может изучаться с помощью вакуумной электронной лампы, имеющей два электрода: один – катод (K) – в виде проволоки из тугоплавкого металла, нагреваемой током до высокой температуры, другой – анод (A) – холодный, на котором собираются испущенные катодом электроны.

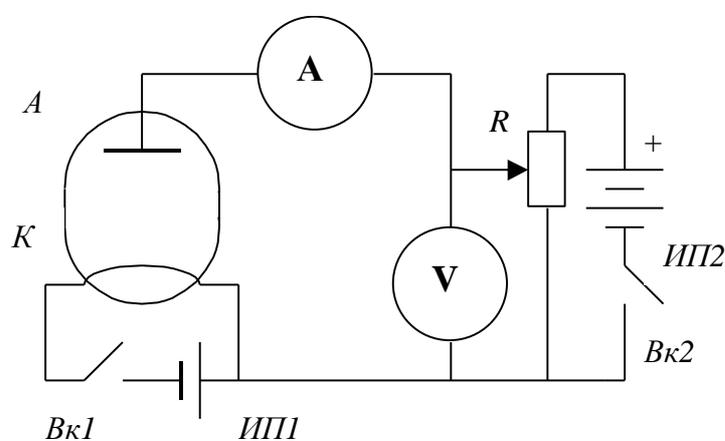


Рис.1

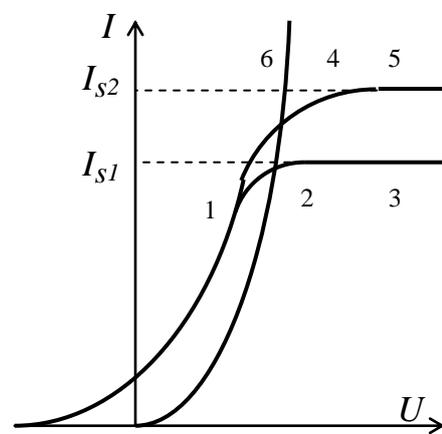


Рис.2

Если составить электрическую цепь, *принципиальная схема* которой приведена на рис.1, содержащую вакуумный диод, источник анодного питания $ИП2$ и амперметр, то при холодном катоде ток в цепи отсутствует, так как внутреннее пространство диода лишено носителей тока (вакуум!). Если же катод нагреть до высокой температуры путем пропускания тока через него от источника тока накала $ИП1$, то благодаря *термоэлектронной эмиссии* с поверхности катода в диоде появятся свободные электроны, которые под действием электрического поля, существующего между катодом и анодом, будут двигаться в сторону анода, который соединен с положительным полюсом источника $ИП2$.

Таким образом, в цепи, содержащей вакуумный диод, возникнет ток, силу которого можно измерить при разных напряжениях между катодом и анодом. Напряжение регулируется потенциометром R . Кривая, изображающая

зависимость тока в диоде от анодного напряжения, называется *вольт-амперной характеристикой* диода (рис.2). Если напряжение равно нулю, ток в диоде очень слабый. По мере увеличения положительного потенциала анода ток возрастает (до т.1), а затем практически перестает увеличиваться (участок кривой 2-3). Говорят, что ток достиг *насыщения* – I_{S1} . Такое явление наступает тогда, когда все электроны, эмиттированные катодом, оказываются на аноде. При повышении температуры катода (за счет пропускания большего тока накала) количество эмиттируемых электронов увеличивается, ток диода возрастает (т.4) и снова достигает насыщения (участок 4-5), но при этом его значение I_{S2} больше прежнего I_{S1} . В диодах с *оксидированным* катодом при нормальном режиме работы ток насыщения практически не достигается (6).

Нелинейная зависимость тока диода от напряжения имеет следующее объяснение [1]. При наличии термоэлектронной эмиссии в пространстве между катодом и анодом в любой момент времени находятся электроны, движущиеся к аноду, которые образуют облако отрицательного заряда (*пространственный заряд*). Этот заряд изменяет распределение электрического потенциала в рассматриваемом промежутке. Пусть анод и катод представляют собой плоские пластины (для упрощения рассуждений), параллельные друг другу (рис.3). В отсутствие пространственного заряда

распределение потенциала V между пластинами, образующими плоский конденсатор, изображается прямой линией 1. При наличии тока между катодом и анодом будет существовать отрицательный пространственный заряд и в любом сечении x значение потенциала оказывается меньше (кривая 2). С увеличением анодного напряжения концентрация электронов в облаке уменьшается, поэтому тормозящее действие пространственного заряда стано-

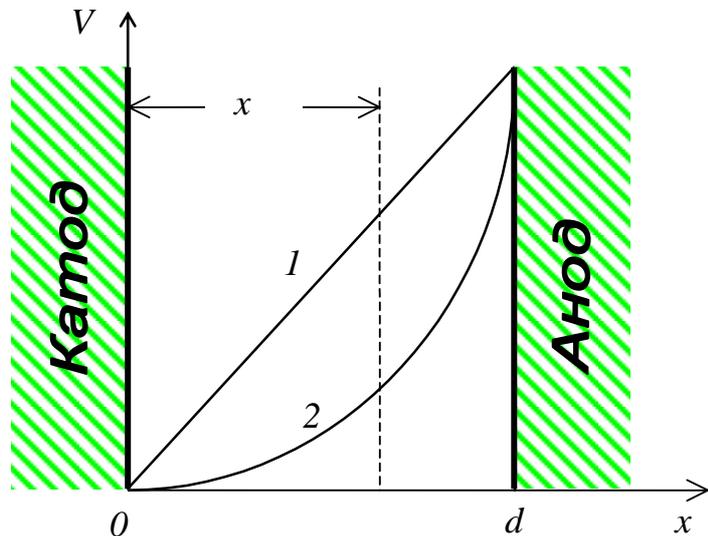


Рис.3

вится меньше и анодный ток увеличивается быстрее. При достижении насыщения все эмиттированные электроны попадают на анод. Рост анодного тока при этом должен прекратиться. Если катод изготовлен из чистого металла, это действительно так. При оксидированном катоде анодный ток продолжает расти, только значительно медленнее. Причиной роста является то, что в отсутствие пространственного заряда повышение анодного напряжения приводит к снижению эффективной работы выхода электронов из катода. Это явление носит название *эффекта Шоттки*.

Аналитическая зависимость анодного тока от величины положительного анодного напряжения в вакуумном диоде с плоскими, цилиндрическими и сферическими электродами установлена Ленгмюром в 1913 г¹. Было показано, что на участке вольт-амперной характеристики, удаленном от области насыщения, в диоде с электродами любой геометрии выполняется “закон трех вторых” Ленгмюра (см. Приложение к данной работе).

$$I = K \cdot U^{3/2}, \quad (1)$$

где I – анодный ток электронной лампы,

U – разность потенциалов между катодом и анодом,

K – коэффициент пропорциональности, зависящий от формы и размеров электродов. Для плоских параллельных электродов коэффициент K таков [1]:

$$K = \frac{4\sqrt{2} \varepsilon_0 S}{9d^2} \cdot \sqrt{\frac{e}{m}}, \quad (2)$$

где ε_0 – электрическая постоянная,

S – площадь катода (и анода),

d – расстояние между электродами,

e – заряд электрона,

m – масса электрона.

Для цилиндрических коаксиальных электродов [2]

$$K = \frac{8\sqrt{2}\pi\varepsilon_0 L}{9\beta^2 R} \cdot \sqrt{\frac{e}{m}}, \quad (3)$$

где L – длина катода,

R – радиус анода,

β – коэффициент, зависящий от отношения радиусов анода и катода.

Чтобы определить удельный заряд электрона e/m , достаточно экспериментально снять вольт-амперную характеристику диода и построить график зависимости анодного тока от анодного напряжения в степени $3/2$. Если в таких координатах характеристика диода представляет собой прямую линию, это свидетельствует о справедливости «закона трех вторых» и о качественном проведении эксперимента. Наклон прямой к оси абсцисс дает величину K в уравнении (1). Если при этом известны конструкция лампы и размеры ее электродов, то, подставив значение K в формулу (2) или (3), можно определить удельный заряд электрона, что является **целью** лабораторной работы.

Описание установки. В данной работе снимается вольт-амперная характеристика вакуумного диода 3Ц18П с цилиндрическими коаксиальными электродами. Лампа располагается на лабораторной панели. Электрическая цепь установки состоит из двух частей – накальной и анодной.

Накальная цепь содержит стабилизированный источник питания *ИПП* типа Б5-70 со встроенным амперметром, измеряющим ток накала лампы .

¹ Ленгмюр Ирвинг (1881-1957) – американский физик и химик.

В анодную цепь входит стабилизированный источник питания *ИП2* типа GPR-11H3DD, создающий и измеряющий анодное напряжение, а также универсальный прибор В7-78/1, позволяющий измерять анодный ток. Блок-схема установки в целом представлена на рис.4.

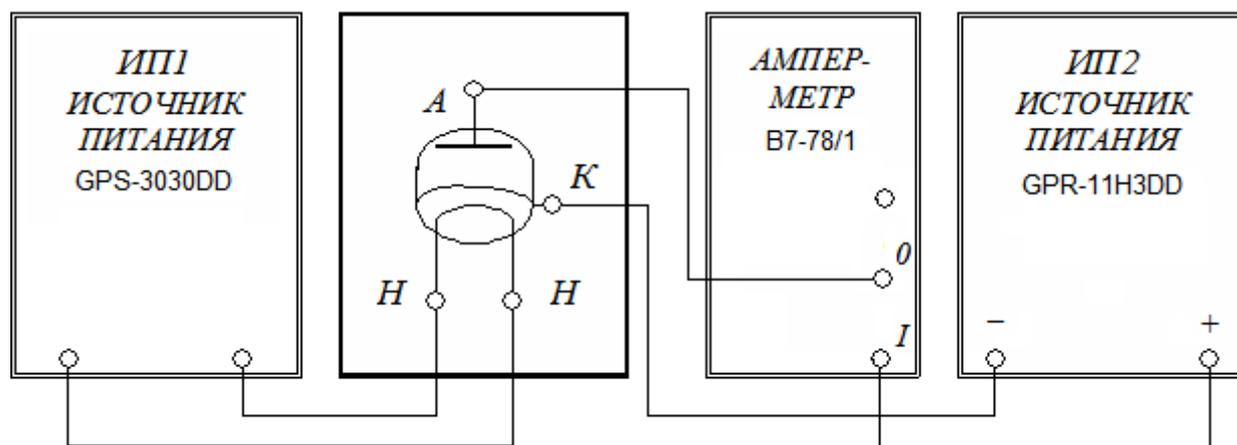


Рис.4

• **Измерения.**

- 1.Соберите электрическую цепь, соответствующую блок-схеме (рис 4).
- 2.Предъявите собранную цепь для проверки преподавателю или лаборанту.
- 3.Включите источник питания цепи накала *ИП1* и регуляторами силы тока «*CURRENT*» установите ток накала **180** мА. (**COARSE**-грубая регулировка, **FINE**-точная). Прогрейте лампу в этом режиме не менее 5 минут.
- 4.Включите универсальный прибор **В7-78/1**, нажмите на его передней панели клавишу «**ПРЕФ**» и «**I=**» (измерение постоянного тока).
- 5.Включите источник питания анодной цепи *ИП2*.
- 6.Регулятором «**VOLTAGE**» установите напряжение 10В, измерьте анодный ток. Затем повышая напряжение на аноде лампы до 90В через каждые 10 В, измерьте анодный ток. Результаты измерений занесите в табл.1.
- 7.Измерьте анодный ток при уменьшении анодного напряжения от 90 до 10 вольт.
- 8.Те же измерения (п.п.7,8) проведите еще при двух значениях тока накала: 190 и 200 мА.

Таблица 1

| $U, В$ | $U^{3/2}, (В)^{3/2}$ | $I_{H1}=180 мА$ | | | $I_{H2}=190 мА$ | | |
|--------|----------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| | | $I, мА$ увелич. | $I, мА$ уменьш. | $I, мА$ средн. | $I, мА$ увелич. | $I, мА$ уменьш. | $I, мА$ средн. |
| | | | | | | | |

Обработка результатов измерений.

1. Вычислите среднее значение анодного тока при каждом значении анодного напряжения.

2. Постройте вольт-амперную характеристику диода при одном токе накала (любом).

3. Постройте график зависимости среднего значения анодного тока I от $U^{3/2}$ при трех значениях тока накала (три линии на одном графике).

4. Выделите на каждом графике линейный участок и найдите угловой коэффициент K каждого, выразив его в единицах СИ. Результаты обработки графиков занесите в табл.2.

Таблица 2

| $R=$ | | $L=$ | | $\beta^2=$ | |
|---------------------|----------------------------------|------------------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| $\Delta I,$ $мА$ | $\Delta U^{3/2},$ $(В)^{3/2}$ | $K,$ $А \cdot (В)^{-3/2}$ | $e/m,$ $Кл/кг$ | $\Delta(e/m),$ $Кл/кг$ | $[\Delta(e/m)]^2,$ $(Кл/кг)^2$ |
| | | | | | |

5. Взяв геометрические параметры лампы (они записаны на лабораторной панели установки), по формуле (3) рассчитайте удельный заряд электрона. Найдите среднее значение e/m и полуширину доверительного интервала по Стьюденту.

6. Сравните полученное значение e/m с табличным. Проанализируйте результат сравнения.

Контрольные вопросы

1. Что такое диод? Как устроен вакуумный диод?
2. Что такое термоэлектронная эмиссия, где это явление находит применение в данной работе?
3. Нарисуйте вольт-амперную характеристику вакуумного диода и расскажите о характерных участках этой кривой.
4. Что такое насыщение? Что такое ток насыщения? Можно ли его изменить в данном диоде, почему и как?
5. Что такое «закон трех вторых»? Какой участок вольт-амперной характеристики подчиняется этому закону? Используйте для ответа построенные графики. Почему в диоде не выполняется закон Ома?

6. С какой целью строится график зависимости анодного тока от напряжения в степени три вторых? Что из него извлекается и как?
7. Что такое удельный заряд электрона, какова методика его нахождения в данной работе?
8. Покажите, что при вычислении удельного заряда по формуле, полученной из (3), в СИ получается результат в Кл/кг.
9. Какие факторы могут приводить к отклонению от «закона трех вторых»?

Приложение к лабораторной работе №319

РАСЧЕТ ТОКА В ВАКУУМНОМ ДИОДЕ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Чтобы установить связь между током диода и приложенным напряжением, решим задачу о движении электронов в пространстве катод-анод. Для этого прежде всего нужно знать, как распределен потенциал электрического поля в указанном промежутке.

Рассмотрим пару цилиндрических коаксиально расположенных электродов: катод радиуса r_K и анод радиуса R (рис.5).

С целью упрощения расчетов сделаем следующие допущения:

1. Расстояние между электродами значительно меньше их длины, поэтому потенциал изменяется только в радиальном направлении.

2. Пространственный заряд, образованный термоэлектронами, имеет всюду одинаковую плотность и не изменяется со временем.

3. Потенциал катода равен нулю ($V_0 = 0$).

4. Начальная скорость термоэлектронов равна нулю.

5. Масса электронов постоянна, не зависит от их скорости.

Потенциал V в пространстве катод-анод можно найти, решая уравнение Пуассона, которое в СИ имеет вид

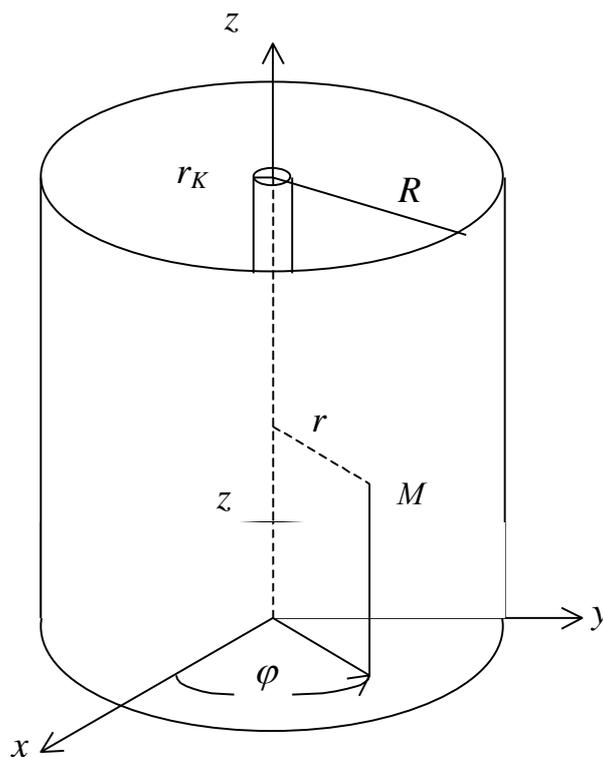


Рис.5

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad (4)$$

где ∇^2 – оператор Лапласа,

ρ – объемная плотность заряда.

Знак минус обусловлен знаком пространственного заряда.

Объемная плотность заряда связана с плотностью тока j следующим образом:

$$j = n \cdot e \cdot v = -\rho \cdot v, \quad (5)$$

где n – число электронов в единице объема,

e – заряд электрона,

v – скорость направленного движения электронов.

Здесь знак минус показывает, что направление тока противоположно скорости движения носителей заряда.

Так как

$$j = \frac{I}{S}, \quad (6)$$

где S – площадь боковой поверхности цилиндра радиуса r , то для объемной плотности заряда получится следующее выражение:

$$\rho = -\frac{I}{2\pi \cdot r \cdot L \cdot v}, \quad (7)$$

где L – длина рабочей части катода.

Скорость электронов в произвольной точке можно определить из условия

$$\frac{mv^2}{2} = eV$$

следующим образом:

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}. \quad (8)$$

Учитывая осевую симметрию электродов и такую же геометрию электрического поля в диоде (рис.5), запишем уравнение Пуассона (4) в цилиндрической системе координат через переменные r, φ, z

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}. \quad (9)$$

В этом уравнении производная по φ равна нулю в силу осевой симметрии поля, а производная по z равна нулю, исходя из сделанного выше допущения о длинных цилиндрических электродах (п.1). С учетом сказанного уравнение (9) будет уравнением одной переменной r .

Подставим выражения (7) и (8) в уравнение (9), получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dV}{dr} \right) = CV^{-1/2}, \quad (10)$$

где
$$C = \frac{I}{2\pi\epsilon_0 L \sqrt{2e/m}}. \quad (11)$$

Будем искать потенциал V , удовлетворяющий уравнению (10), в виде

$$V = D \cdot r^\alpha, \quad (12)$$

где D и α – некоторые постоянные, пока неизвестные. Подставим выражение (12) в уравнение (10), получим

$$D\alpha^2 r^{\alpha-1} = CD^{-1/2} r^{-\alpha/2}.$$

Сравнивая показатели степени переменной r и коэффициенты, стоящие в той и другой частях равенства, найдем, что

$$\alpha = \frac{2}{3}, \quad D = \left(\frac{9C}{4}\right)^{2/3}.$$

Таким образом, выражение потенциала V как функции r – расстояния от оси коаксиальных электродов имеет вид

$$V = \left(\frac{9}{4} \frac{I}{2\pi\epsilon_0 L \sqrt{2e/m}}\right)^{2/3} r^{2/3}. \quad (13)$$

Если принять $r=R$ (R – радиус анода), то из выражения (13) можно получить зависимость тока диода I от напряжения между его электродами U , которое в данном случае совпадает со значением потенциала анода

$$I = \frac{8\sqrt{2}\pi\epsilon_0 L}{9R} \cdot \sqrt{e/m} \cdot U^{3/2}. \quad (14)$$

Итак, получен «закон трех вторых». Теоретическая вольт-амперная характеристика диода, соответствующая этому закону, изображается кривой б (см. рис.2).

Аналогичным образом получается расчетная формула для анодного тока в случае диода с плоскими электродами [1].

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2: Электричество и магнетизм. СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2007. § 74-75.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.3: Электричество. М.: Физматлит МФТИ, 2002. § 101.
3. Калашников С.Г. Электричество. М.: Физматлит, 2003. § 157-158.
4. Лабораторные занятия по физике /под ред. Л.Л.Гольдина. М.: Наука, 1983. С. 283.
5. Физический практикум: Электричество и оптика /под ред. В.И.Ивероной. М.: Наука, 1968. С. 59.