Лабораторная работа 2.17.

ИЗУЧЕНИЕ ВАКУУМНОГО ДИОДА И ПРОВЕРКА ФОРМУЛЫ БОГУСЛАВСКОГО -ЛЕНГМЮРА

Цель работы : экспериментальное изучение зависимости анодного тока вакуумного диода от анодного напряжения и проверка теоретической формулы Богуславского–Ленгмюра для этой зависимости.

Задание: используя результаты измерений анодного тока I_A и анодного напряжения U_A вакуумного диода, построить график зависимости анодного тока от $U_A^{3/2}$. Установить наличие прямолинейного участка на этом графике в области малых анодных напряжений, найти тангенс угла наклона этого участка к оси $U_A^{3/2}$ и сравнить его с соответствующим теоретическим значением.

Подготовка к выполнению лабораторной работы: изучить по учебнику явление термоэлектронной эмиссии и познакомиться с законом трех вторых, описывающим начальный участок вольт-амперной характеристики вакуумного диода; ответить на контрольные вопросы.

Библиографический список

1. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1988, т.3, гл. IX, §§ 60, 61.

Контрольные вопросы

1. Подчиняется ли вакуумный диод закону Ома?
2. Для чего нагревается катод?
3. Что такое оксидный катод?
4. Почему при малых анодных напряжениях U_A анодный ток растет с ростом U_A?
5. Что такое ток насыщения?
6. Почему при больших анодных напряжениях наступает насыщение анодного тока?
7. Как изменяется ток насыщения с ростом температуры катода?
8. Что такое закон трех вторых и при каких (больших или малых) анодных напряжениях он справедлив?

9. Вывести закон трех вторых для плоского диода.
10. От чего зависит коэффициент пропорциональности α в законе трех вторых?
11. Что такое вольт-амперная характеристика диода?
12. Каким образом изменяется температура катода в данной работе?

Описание аппаратуры и метода измерений

Вакуумный диод представляет собой стеклянный баллон, из которого выкачан воздух. Внутри баллона помещены два металлических электрода: анод и катод. Форма электродов бывает различной. В данной работе используется диод с электродами в форме коаксиальных цилиндров (цилиндрический диод). Цилиндр с меньшим радиусом, катод, подогревается либо расположенной внутри него проволочной нитью, через которую пропускается электрический ток (ток накала), либо же ток пропускается через сам катод (катод прямого нагрева). Снаружи катод покрыт тонким слоем вещества, имеющего малую работу выхода электронов. В качестве такого вещества часто используют окислы щелочно-земельных металлов (оксидный катод).

В результате термоэлектронной эмиссии электроны вы-летают из раскаленного катода и, не долетая до анода, образуют вокруг катода электронное облако (пространственный заряд). Если между анодом и катодом приложить анодное напряжение U_A, то под действием электрического поля электроны начнут двигаться к аноду, и через диод потечет анодный ток (строго говоря, небольшой ток будет идти и в отсутствие разности потенциалов между анодом и катодом, однако мы не будем принимать его во внимание).

При небольших анодных напряжениях U_A сила анодного тока I_A растет с ростом напряжения. Это объясняется тем, что не все электроны, вылетевшие из катода, попадают на анод. Часть из них возвращается обратно, отразившись от электронного облака. С увеличением напряжения U_A электронное облако вокруг катода постепенно рассасывается, всё большая часть электронов достигает анода, и ток I_A возрастает. Начиная с некоторого

напряжения $U_A = U_{нас}$, наступает насыщение анодного тока: все электроны, вылетающие из катода, достигают анода, и рост тока прекращается.

Таким образом, зависимость анодного тока от анодного напряжения (вольт-амперная характеристика диода) имеет вид, представленный на рис.1. Максимальный (при постоянной температуре катода) анодный ток называется током насыщения. Ток насыщения зависит от температуры катода, а именно, растет с ростом температуры, поскольку увеличивается число электронов, вылетающих из катода в результате термоэлектронной эмиссии.

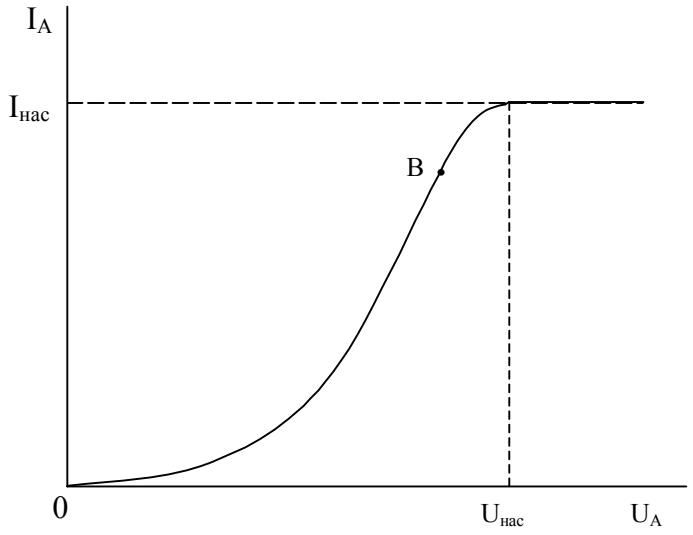

Рис. 1

В области напряжений U_A , где анодный ток ограничивается пространственным зарядом (т.е. в области ОВ на рис. 1), зависимость анодного тока от анодного напряжения дается теоретической формулой Богуславского–Ленгмюра (закон трех вторых):

$$I_A = \alpha U_A^{3/2}, \qquad (1)$$

где коэффициент пропорциональности α зависит от формы и расположения электродов в диоде. Рассмотрим вывод закона трех вторых в наиболее простом случае, когда электродами являются параллельные плоские пластины, расстояние между которыми много меньше их размеров (плоский диод — см. рис. 2). В этом случае напряженность электрического поля E внутри

диода направлена вдоль оси X, перпендикулярной пластинам, и зависит только от x. Для нахождения $E(x)$ воспользуемся теоремой Гаусса. Рассмотрим плоский слой толщиной dx, параллельный пластинам. Поток вектора E через поверхность этого слоя равен

$$d\Phi_E = (E + dE)S - ES = dE \cdot S, \tag{2}$$

где S — площадь каждой пластины. По теореме Гаусса этот поток равен dq/ε_0, где $dq = \rho S dx$ — заряд внутри слоя, ρ — объемная плотность пространственного заряда, ε_0 — электрическая постоянная. Таким образом,

$$dE \cdot S = \frac{1}{\varepsilon_0}\rho S dx, \qquad \frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \ . \tag{3}$$

Напряженность поля $E(x)$ связана с измеряемым относительно катода потенциалом $U(x)$ соотношением

$$E(x) = -\frac{dU}{dx} \ . \tag{4}$$

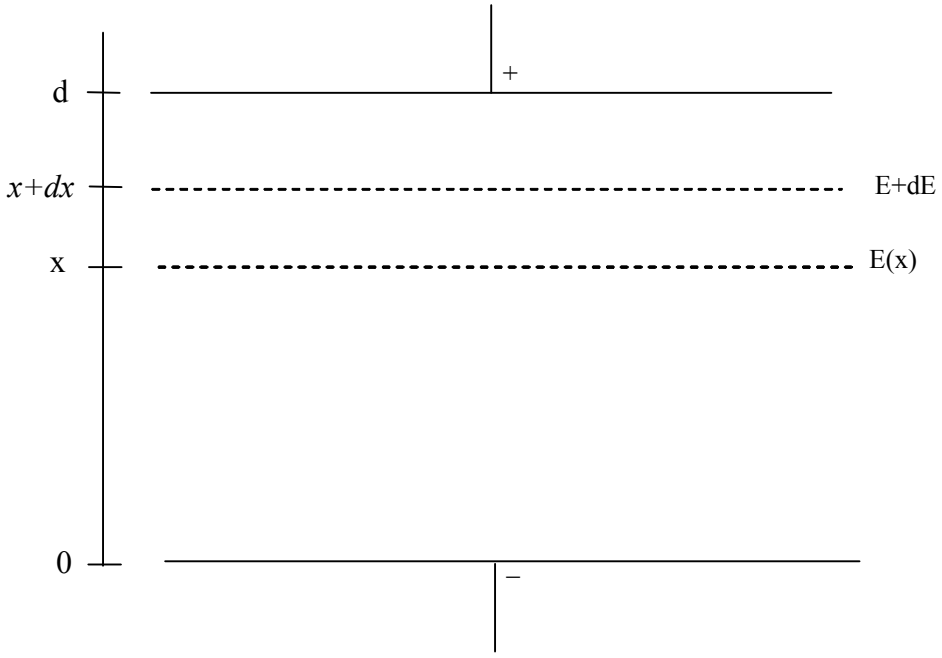

Рис. 2

Подставляя это в (3), получим

$$\frac{d^2U}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}. \qquad (5)$$

Плотность заряда ρ связана с силой тока I_A, протекающего через диод, соотношением

$$I_A = (-\rho)\cdot v \cdot S, \qquad -\rho = \frac{I_A}{v \cdot S}, \qquad (6)$$

где v — скорость электронов, находящихся в точке x; знак "минус" в (6) учитывает тот факт, что $\rho < 0$. По закону сохранения энергии, имеем

$$\frac{mv^2}{2} = eU, \qquad v = \sqrt{\frac{2}{m}\cdot eU}, \qquad (7)$$

где e и m — заряд и масса электрона. Подставляя (6) и (7) в соотношение (5), получим дифференциальное уравнение для потенциала $U(x)$

$$\frac{d^2U}{dx^2} = \frac{b}{\sqrt{U}}, \qquad (8)$$

где

$$b = \frac{I_A}{S\cdot\varepsilon_0}\cdot\sqrt{\frac{m}{2e}}. \qquad (9)$$

Решение уравнения (8) ищем в виде

$$U(x) = \gamma \cdot x^{\delta}, \qquad (10)$$

где γ и δ — неизвестные постоянные. Для их нахождения подставим (10) в уравнение (8):

$$\gamma\cdot\delta\cdot(\delta-1)\cdot x^{\delta-2} = b\cdot\gamma^{-1/2}\cdot x^{-\delta/2}. \qquad (11)$$

Приравнивая по отдельности показатели степени и коэффициенты в обеих частях равенства, находим

$$\delta = \frac{4}{3}, \qquad \gamma = \left(\frac{9}{4}b\right)^{2/3}. \qquad (12)$$

Найденное решение (10) с параметрами (12) , помимо условия $U(0) = 0$, удовлетворяет также граничному условию

$$E(0) = -\left.\frac{dU}{dx}\right|_{x=0} = 0\,. \qquad (13)$$

Такое граничное условие соответствует случаю, когда любое отличное от нуля и соответствующим образом направленное поле вблизи катода вызывает бесконечный ток эмиссии. Чтобы в этом случае ток через диод был конечным, необходимо выполнение равенства (13).

Из (10) получим для потенциала $U_\mathrm{A} = U(d)$, подставляя $x = d$ и используя (12),

$$U_\mathrm{A} = \left(\frac{9}{4}b\right)^{2/3} \cdot d^{4/3}\,. \qquad (14)$$

Коэффициент b зависит от силы тока I_A согласно соотношению (9), поэтому из (14) получаем

$$U_\mathrm{A} \sim I_\mathrm{A}^{2/3} \quad \text{или} \quad I_\mathrm{A} \sim U_\mathrm{A}^{3/2}\,, \qquad (15)$$

т.е. закон трех вторых.

Аналогичное рассмотрение для случая электродов в виде коаксиальных цилиндров математически гораздо сложнее, однако также приводит к закону трех вторых (1), причем для цилиндрического диода имеем

$$\alpha = C\sqrt{\frac{2e}{m}}\,, \qquad C = \frac{8\pi \cdot \varepsilon_0}{9\beta^2}\,\frac{L}{r_\mathrm{A}}\,, \qquad (16)$$

где L — длина катода, r_A — радиус анода, β — безразмер-ный коэффициент, зависящий от отношения радиусов анода и катода.

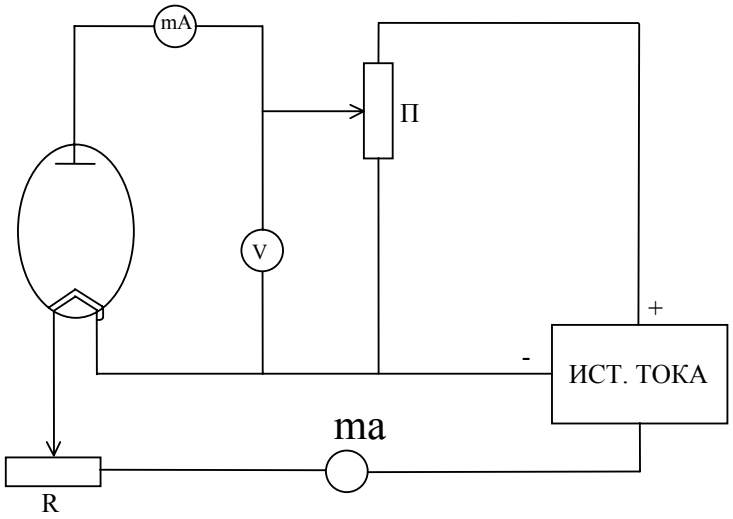

Рис. 3

Снятие вольт-амперных характеристик вакуумного диода производится с помощью схемы, представленной на рис. 3.

Анодное напряжение подается от выпрямителя. Величина напряжения регулируется потенциометром П и измеряется вольтметром. Анодный ток лампы измеряется милли-амперметром. Напряжение накала подается от понижающей обмотки трансформатора выпрямителя. Ток накала регулируется реостатом R и измеряется миллиамперметром.

Порядок выполнения работы

1. Ручку потенциометра П повернуть против часовой стрелки до отказа. При таком положении потенциометра анодное напряжение будет равно нулю.
2. Включить выпрямитель в сеть переменного тока.
3. Установить небольшой ток накала и снять зависимость анодного тока от анодного напряжения, увеличивая анодное напряжение от нуля до некоторого предельного значения.
4. Увеличивая ток накала, снять вольт-амперные характеристики еще для двух значений тока накала. Результаты измерений оформить в виде таблицы.

5. После окончания измерений уменьшить анодное напряжение до нуля, ток накала сделать минимальным и выключить выпрямитель.

Обработка результатов измерений

1. На миллиметровой бумаге построить вольт-амперные характеристики $I_A = f(U_A)$, указав для них соответствующие токи накала.
2. Для одного из значений тока накала возвести напряжения U_A (в вольтах) в степень три вторых и построить график зависимости анодного тока (в амперах) от $U_A^{3/2}$. Убедиться, что в некоторой области напряжений график имеет прямолинейный участок. Определить коэффициент α в формуле Богуславского–Ленгмюра (1) как тангенс угла наклона этого прямолинейного участка.
3. Сравнить полученное экспериментальное значение коэффициента α с теоретическим значением, рассчитанным по формулам (15).