

Вывод закона 3/2 Ленгмюра

GordStep

18 ноября 2025 г.

Определим зависимость анодного тока от анодного напряжения в диоде, образованном двумя плоскими, безграничными, параллельными друг другу пластинами. В этом случае можно пренебречь краевым эффектом и считать поле между анодом и катодом однородным. Примем следующие допущения. Пусть у поверхности катода $x = 0 : U_k = 0$, начальная скорость электронов $u_0 = 0$.

Если предположить, что электроды вакуумной трубки плоские, а температура катода постоянная, то потенциал электрического поля будет зависеть только от одной координаты x , направленной вдоль вакуумной трубки от катода к аноду.

Используем одно из уравнений Максвелла в дифференциальной форме:

$$\operatorname{div} E = \frac{\rho}{\mathcal{E}_0}$$

где ρ - объёмная плотность заряда. Спроецируем это уравнение на ось x :

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{1}{\mathcal{E}_0} en \quad (1)$$

Знак минус учитывает, что эмиттируемые электроны имеют отрицательный заряд, \mathcal{E}_0 - электрическая постоянная, n - концентрация электронов, E - напряжённость электрического поля.

Работа по перемещению единичного точечного положительного заряда из одной точки поля в другую вдоль оси x при условии, что точки расположены бесконечно близко друг к другу $x_2 - x_1 = dx$, равна $E_x dx$. Та же работа равна $\phi_1 - \phi_2 = -dU$. Приравняв оба выражения, можем записать:

$$E_x = -\frac{dU}{dx} \quad (2)$$

Выразим напряжённость E через потенциал U , с помощью формулы (2). Заряд можно представить как количество элементарных зарядов(электронов) или заряд электрона на концентрацию в объёме:

$$q = eN = enV \quad (3)$$

С другой стороны объёмная плотность заряда равна:

$$\rho = \frac{dq}{dV} = \frac{d}{dV} enV = en$$

Тогда получаем, что объёмная плотность тока равна:

$$j = \rho u = enu \quad (4)$$

Концентрацию выразим через объёмную плотность тока, а скорость электронов - из закона сохранения энергии: $mu^2/2 = eU$:

$$n = \frac{j}{eu} \quad (5)$$

$$u = \sqrt{\frac{2eU}{m}} \quad (6)$$

Тогда уравнение (1) с учётом (2), (5) и (6) принимает вид:

$$\frac{d}{dx} \frac{dU}{dx} = -\frac{1}{\epsilon_0} e \frac{j}{e} \sqrt{\frac{m}{2eU}}$$

$$\frac{d^2U}{dx^2} = \frac{j}{\epsilon_0} \sqrt{\frac{m}{2e}} U^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Решение дифференциального уравнения второго порядка (7) будем искать при граничных условиях $\lim_{x \rightarrow 0} U = \lim_{x \rightarrow 0} E = 0$. Если бы электрическое поле на границе катода было больше нуля, то все электроны, испускаемые катодом, увлекались бы этим полем к аноду, и термоэлектронный ток достигал бы насыщения при любых напряжениях на вакуумной трубке. Коэффициент перед $U^{-1/2}$ обозначим за a :

$$a^2 = \frac{j}{\epsilon_0} \sqrt{\frac{m}{2e}} \quad (8)$$

$$\frac{d^2U}{dx^2} = a^2 U^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Введём замену:

$$p = \frac{dU}{dx}, \quad \frac{d^2U}{dx^2} = p \frac{dp}{dU}$$

Тогда, учитывая, что $x = 0 : U_k = 0, dU/dx = 0$, получаем:

$$\begin{aligned} p \frac{dp}{dU} &= a^2 U^{-\frac{1}{2}} \\ pdp &= a^2 U^{-\frac{1}{2}} dU \\ \frac{p^2}{2} &= 2a^2 U^{\frac{1}{2}} \\ p &= 2a U^{\frac{1}{4}} \end{aligned}$$

$$\frac{dU}{U^{1/4}} = 2adx$$

$$\frac{4}{3}U^{\frac{3}{4}} = 2ax$$

$$a = \frac{2U^{3/4}}{3x} \quad (10)$$

Подставим (10) в (8) и пологая, что $x = l$, где l - расстояние между анодом и катодом, получаем:

$$j = \frac{4\mathcal{E}_0}{9l^2} \sqrt{\frac{2e}{m}} U^{\frac{3}{2}} \quad (11)$$

Учитывая, что коэффициент перед U - константа, зависящая только от геометрических свойств прибора и фундаментальных постоянных(обозначим её B), то уравнение (11) можно переписать в виде:

$$j = BU^{3/2} \quad (12)$$