

# Лабораторная работа № 3.5.1 "Изучение плазмы газового разряда в неоне"

Кирилл Шевцов Б03-402

16.09.2025

## Цель работы

Изучить вольт-амперную характеристику тлеющего разряда, изучить свойства плазмы методом зондовых характеристик.

## Оборудование

Стеклянная газоразрядная трубка, наполненная неоном, источник напряжения, делитель напряжения, потенциометр, амперметр, вольтметры, амперметры, переключатели.

## Лабораторная установка

Стеклянная газоразрядная трубка имеет ненагреваемый полый катод, три анода и геттерный узел - стеклянный баллон, на внутреннюю поверхность которого напылена газопоглощающая плёнка (геттер). Трубка наполнена изотопом неона при давлении 2 мм. рт. столба. Катод и один из анодов с помощью переключателя  $P_1$  подключаются через балластный резистор  $R_b$  к регулируемому ВИП. При подключении первого анода к ВИП, между ним и катодом возникает газовый разряд. Ток раз-

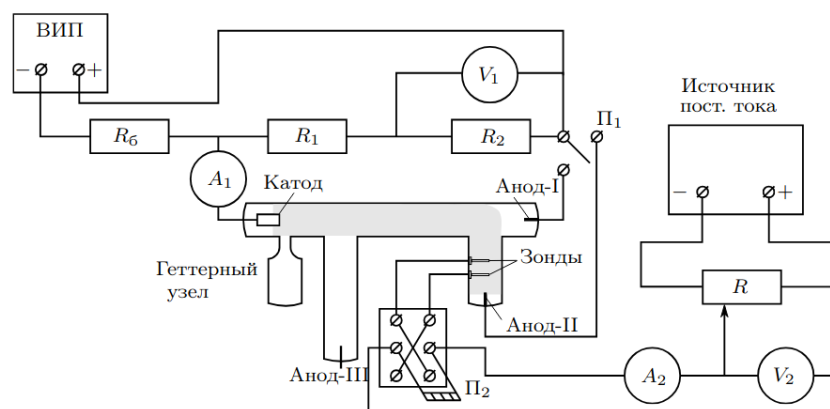


Рис. 1: установка для исследования газового разряда

ряда измеряется амперметром  $A_1$ , падение напряжения - на вольтметре  $V_1$ , подключенным к трубке через делитель напряжения с коэффициентом, равным  $\alpha = R_1 + R_2/R_2 = 10$ . При подключении к ВИП второго анода, возникает газовый разряд между катодами и вторым анодом, где находится двойной зонд, необходимый для диагностики плазмы. Третий анод в работе не используется.

# Необходимые формулы

Частота коллективных колебаний электронов (или плазменная частота) относительно квазинейтрального состояния (то есть такого состояния, при котором равна нулю средняя плотность заряда):

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} \quad (1)$$

колебания, описываемые плазменной частотой, называют ленгмюровскими.

Важнейший плазменный параметр, задающий характерный пространственный масштаб многих плазменных явления - дебаевский радиус:

$$r_D = \sqrt{\frac{k_B T_e}{4\pi n_e e^2}} \quad (2)$$

Эти два параметра представляют собой две важные характеристики плазмы, определяющие временной и пространственный масштабы коллективного движения электронов относительно ионов.

**Замечание:** если плазма неравновесная, различают два типа дебаевской длины: электронную (3a) и ионную (3b), в понимании, что их температуры различны  $T_e \neq T_i$ :

$$r_{De} = \sqrt{\frac{k_B T_e}{4\pi n_e e^2}} \quad (3a)$$

$$r_{Di} = \sqrt{\frac{k_B T_i}{4\pi n_i e^2}} \quad (3b)$$

Поэтому иногда дебаевский радиус называют поляризационной длиной.

Выражение, определяющее энергию кулоновского взаимодействия частиц в плазме:

$$\varphi = -\frac{q}{\tilde{r}} \exp\left(-\frac{r}{r_D}\right) \quad (4)$$

где  $\varphi_0 = q/\tilde{r}$  - потенциал одного иона.

Плотность энергии кулоновского взаимодействия зарядов в плазме:

$$\omega = -\frac{1}{2} n_i \frac{q^2}{r_D} \quad (5)$$

В сравнении полученной кулоновской энергии с тепловой  $l \sim n_i kT$ :

$$\frac{l}{\omega} \sim \frac{kT r_D}{q^2} = 4\pi n_i r_D^3 \quad (6)$$

Отсюда выражение для числа заряженных частиц в сфере дебаевского радиуса (дебаевской сфере):

$$N_D = \frac{4}{3} \pi n_i r_D^3 \quad (7)$$

Оценка тока насыщения для ионов, согласно полуэмпирическому соотношению Д. Бомома:

$$I_{in} \sim 0.4 n_i e S \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}} \quad (8)$$

Зависимость тока от напряжения для ВАХ газового разряда:

$$I = I_0 \operatorname{th} \frac{eU}{2k_B T_e} \quad (9)$$

Эту формулу можно использовать для определения температуры электронов по вольт-амперной характеристике двойного зонда. По пересечению асимптот с вертикальной осью можно определить ток насыщения  $I_{in}$ , а затем и концентрацию заряженных частиц в плазме.

## Выполнение работы

1. Настроим установку для ВАХ газового разряда согласно инструкции, плавно увеличивая показания ВИП, запишем напряжение зажигания, показание вольтметра  $V_1$ :
2. С помощью вольтметра  $V_1$  и амперметра  $A_1$  измерим ВАХ газового разряда  $I_p(U_p)$ . Ток изменяется в диапазоне  $0.5 - 5.0$  мА. Построим ВАХ разряда, определим дифференциальное сопротивление.
3. По каждой зондовой характеристике определим ионный ток насыщения, наклон характеристики  $dI/dU$  в начале координат.
4. По результатам предыдущего пункта рассчитаем температуру электронов  $T_e$ , концентрацию электронов и ионов в плазме. Считаем площадь поверхности зонда равной  $S \approx \pi dl$ , необходимые параметры указаны на установке.
5. Рассчитаем плазменную частоту колебаний  $\omega_p$ , электронную поляризационную длину  $r_{De}$  и дебаевский радиус экранирования  $r_D$ .
6. Оценим степень ионизации плазмы, считая давление в трубке  $P \approx 2$  торр.
7. Построим графики зависимости  $T_e(I_p)$ ,  $n_e(I_p)$ .