

# 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-

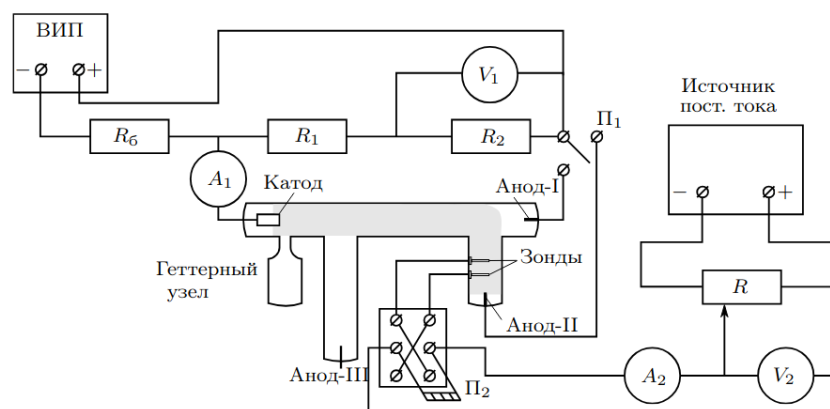


Рис. 1: установка для исследования газового разряда

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 (слева) и ионную (справа), в понимании, что их температуры различны  $T_e \neq T_i$ :

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

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:

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

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.

## Измерения и снятие данных

1. Настроим установку для ВАХ газового разряда согласно инструкции, плавно увеличивая напряжение на ВИП, запишем напряжение зажигания, показание вольтметра  $V_1$ . показания выходного напряжения  $U_{out}$ , входного  $U_{in} = 1/\alpha \cdot U_{out}$ .

Номер измерения	1	2	3	4
$U_{out} \pm \Delta U_{out}$ , В	$152.52 \pm 0.01$	$149.54 \pm 0.01$	$152.51 \pm 0.01$	$152.53 \pm 0.01$
$\Delta U_{out}$ , В	0.01			

Таблица 1: Напряжение зажигания для газового разряда

2. С помощью вольтметра  $V_1$  и амперметра  $A_1$  измерим ВАХ газового разряда  $I(U)$ . Ток изменяется в диапазоне 0.5 – 5.0 мА.

$I$ , мА	0.55	0.93	1.55	2.14	2.55	3.07	3.53	4.07	4.51	5.09
$U$ , В	34.00	32.60	31.32	23.69	20.70	18.05	16.35	15.72	15.19	14.43
$I$ , мА	4.50	4.02	3.53	3.00	2.53	2.03	1.55	1.04	0.54	-
$U$ , В	15.10	15.60	16.26	18.33	20.70	24.70	31.26	32.30	34.24	-

Таблица 2: Снятие ВАХ газового разряда в неоне

3. Построим график участка вольт-амперной характеристики газового разряда. Определим дифференциальное сопротивление:

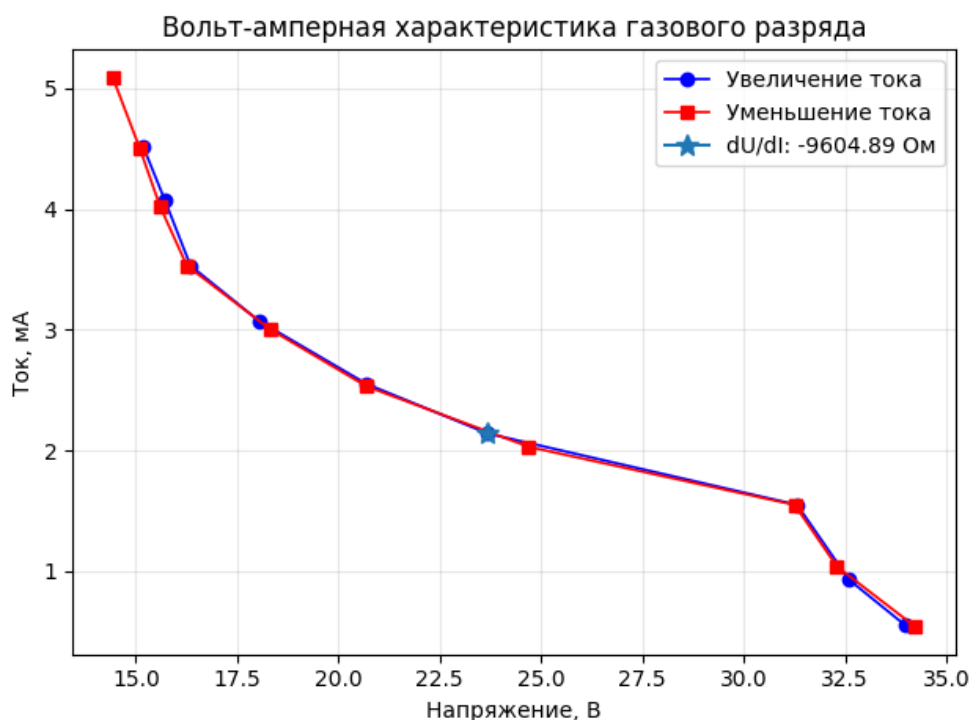


Рис. 2: вах газового разряда

$$R_{dif} = \frac{dU}{dI} = -9605.89 \pm 175.32 \text{ Ом} \quad \Delta R = R \left( \frac{\Delta(dU)}{dU} + \frac{\Delta(dI)}{dI} \right) = 175.32 \text{ Ом} \quad (10)$$

Построенный график соответствует участку поднормального тлеющего разряда.

4. Снимем ВАХ двойного зонда, плавно увеличивая напряжение от  $-U_0$  до  $U_0$  при фиксированном токе разряда  $I_p$ . Построим график зондовых характеристик для разных разрядных токов

$I_p$ , мА	$5.000 \pm 0.001$										
$I$ , мА	22.98	22.10	21.17	20.25	19.26	18.17	17.25	15.88	12.90	6.89	0.07
$U$ , В	24.99	22.07	19.02	16.11	13.08	10.11	8.09	6.08	4.03	2.06	0.55
$I$ , мА	-2.66	-6.74	-12.96	-15.90	-17.13	-18.19	-19.38	-20.37	-21.34	-22.33	-23.18
$U$ , В	0.00	2.02	4.07	6.20	8.08	10.13	13.04	16.04	19.08	22.19	24.99
$I_p$ , мА	$4.005 \pm 0.001$										
$I$ , мА	19.67	18.97	18.12	17.35	16.50	15.54	14.70	13.42	10.85	5.61	0.12
$U$ , В	24.99	22.11	19.09	16.12	13.09	10.07	8.01	6.01	4.08	2.08	0.60
$I$ , мА	-0.15	-5.71	-10.78	-13.37	-14.62	-15.34	-16.29	-17.17	-18.00	-18.76	-19.56
$U$ , В	0.6	2.11	4.08	6.07	8.19	10.02	13.01	16.10	19.14	22.08	25.00
$I_p$ , мА	$3.101 \pm 0.001$										
$I$ , мА	15.92	15.31	14.65	14.00	13.28	12.37	11.68	10.45	8.05	3.98	0.05
$U$ , В	24.99	22.02	19.09	16.22	13.12	10.12	8.10	6.03	4.04	2.07	0.58
$I$ , мА	-0.04	-3.82	-8.03	-10.41	-11.56	-12.26	-13.07	-13.75	-14.42	-15.07	-15.70
$U$ , В	0.58	2.01	4.06	6.07	8.12	10.10	13.24	16.09	19.11	22.18	24.99
$I_p$ , мА	$1.513 \pm 0.001$										
$I$ , мА	9.05	8.65	8.27	7.82	7.42	6.93	6.42	5.52	4.07	1.94	0.13
$U$ , В	24.99	22.01	19.06	16.04	13.09	10.12	8.09	5.97	4.02	2.11	0.56
$I$ , мА	-0.13	-1.88	-4.06	-5.52	-6.37	-6.84	-7.34	-7.73	-8.16	-8.56	-8.95
$U$ , В	0.56	2.06	4.05	6.03	8.09	10.14	13.18	16.10	19.06	22.02	24.99

Таблица 3: Вольт-Амперная характеристика двойного зонда

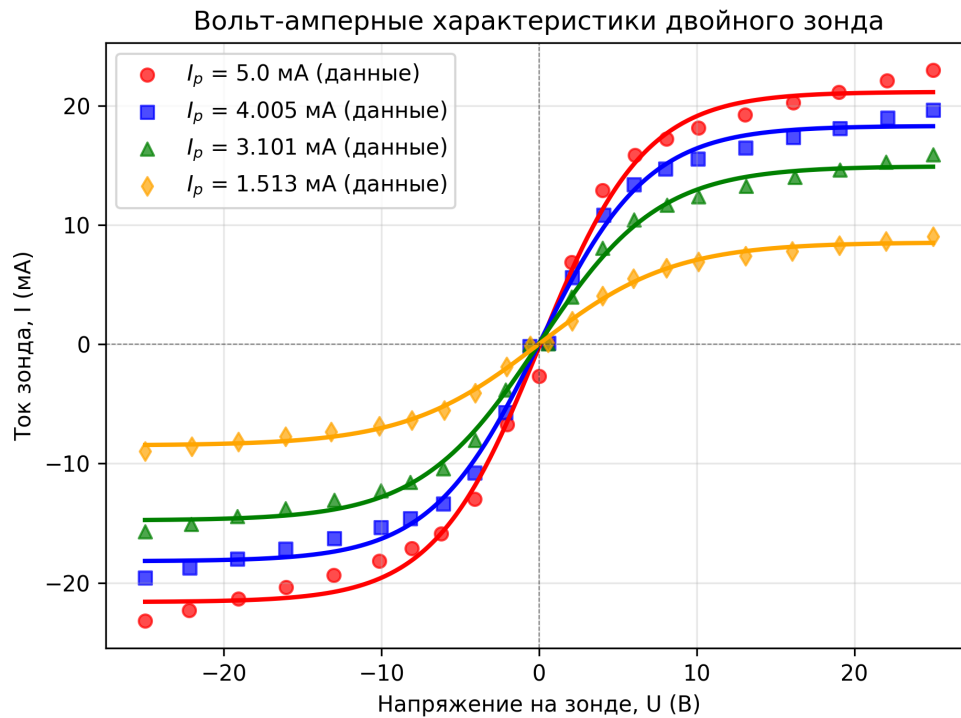


Рис. 3: вах двойного зонда

5. По каждой зондовой характеристике определим ионный ток насыщения  $I_{in}$ , наклон характеристики  $G = dI/dU, U = 0$  в начале координат. Данные графика аппроксимируются зависимостью  $y(x) = A \cdot th(Bx) + C$ :

$I_p$ , мА	$A = I_{in}$ , мА	$G = dI/dU$ , мА/В	$B = e/2kT_e$ , 1/В
$5.000 \pm 0.001$	$21.40 \pm 0.01$	$3.21 \pm 0.01$	$0.150 \pm 0.001$
$4.005 \pm 0.001$	$18.26 \pm 0.01$	$2.66 \pm 0.01$	$0.146 \pm 0.001$
$3.101 \pm 0.001$	$14.86 \pm 0.01$	$1.96 \pm 0.01$	$0.132 \pm 0.001$
$1.513 \pm 0.001$	$8.52 \pm 0.01$	$1.01 \pm 0.01$	$0.118 \pm 0.001$

Таблица 4: Аппроксимация и соответствие коэффициентов

6. Рассчитаем температуру электронов  $T_e$ , концентрацию  $n_e$  электронов для заданных токов разряда. Считаем площадь поверхности зонда равной  $S \approx \pi dl$ , параметры установки:  $l = 5.2$  мм - длина проволоки зонда,  $d = 0.2$ , мм - диаметр проволоки зонда. Величины  $m_i = 3.35 \times 10^{-26}$  кг - масса иона неона,  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  Кл - элементарный заряд электрона:

$$T_e = \frac{e}{2kB} \quad n_i = \frac{2.5I_{in}}{e\pi dl} \sqrt{\frac{m_i}{2kT_e}}$$

Данные	Результаты вычислений			
$I_p$ , мА	5.000	4.005	3.101	1.513
$T_e$ , К	38726	39864	43882	49158
$n_e \times 10^{19}$ 1/м3	1.81	1.52	1.18	0.64

Таблица 5: расчеты температур и концентрации электронов в плазме

7. Рассчитаем плазменную частоту колебаний  $\omega_p$ , электронную поляризационную длину  $r_{De}$  и дебаевский радиус экранирования  $r_D$  для заданных токов разряда. Температура ионов для участка тлеющего разряда  $T_i = 300$  К.

Данные	Результаты вычислений			
$I_p$ , мА	5.000	4.005	3.101	1.513
$\omega_p \times 10^6$ , Hz	2.50	2.32	2.04	1.5
$r_{De}$ , м	0.43	0.47	0.56	0.81
$r_D$ , м	0.026	0.029	0.033	0.044

Таблица 6: расчеты дебаевских длин и плазменной частоты

8. Оценим степень ионизации плазмы, считая давление в трубке  $P \approx 2$  торр. Значения ионизации плазмы действительно малы - плазму можно считать идеальной.

$$\alpha = n_i/n = \frac{n_i}{P/kT_i} = kT_i n_i / P$$

Данные	Результаты вычислений			
$n_e \times 10^{19}$ 1/м3	1.81	1.52	1.18	0.64
$\alpha \times 10^{-4}$	2.81	2.36	1.83	0.99

Таблица 7: расчет степени ионизации плазмы

9. Построим графики зависимости  $T_e(I_p)$ ,  $n_e(I_p)$ .

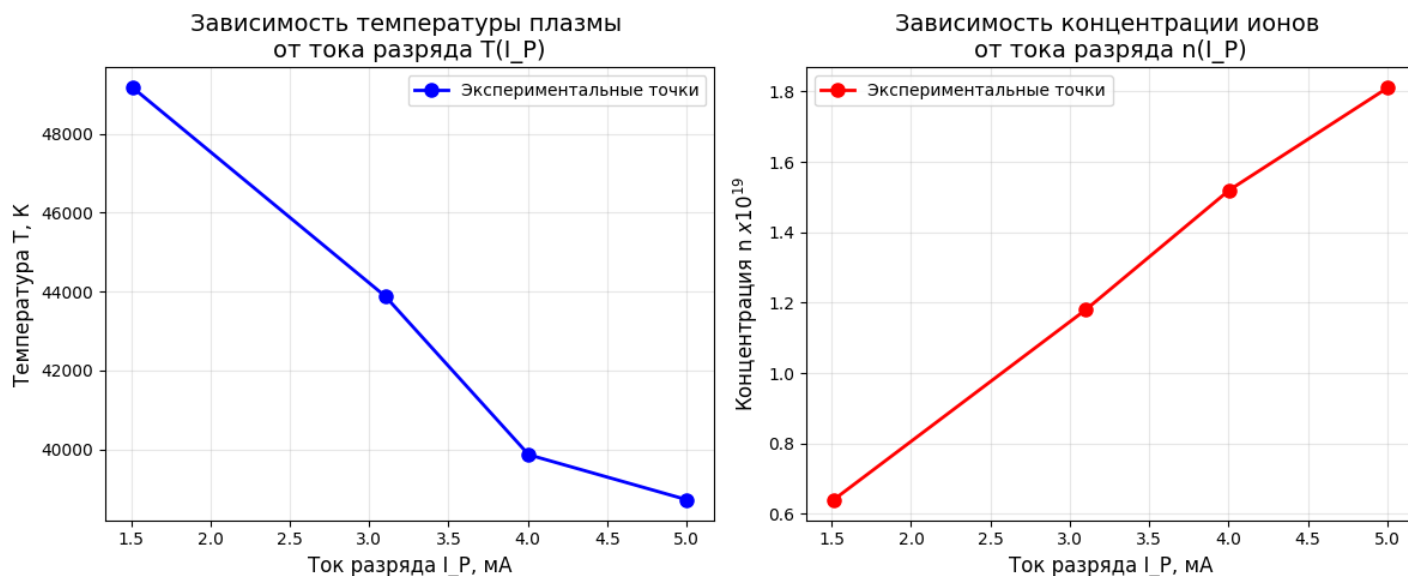


Рис. 4: Зависимости температуры плазмы разряда и концентрации ионов от тока

**Анализ зависимости  $n(I_p)$**  : Концентрация ионов плазмы линейно зависит от тока разряда плазмы, зависимость линейно возрастает на всем промежутке измерений.

**Анализ зависимости  $T(I_p)$**  : Температура электронов в плазме возрастает при уменьшении тока разряда по всему промежутку измерений. При меньших токах плазма становится более разреженной и столкновения электронов происходят реже. Ионизация плазмы приводит к увеличению температуры.

## Вывод

В ходе работы были изучены свойства плазмы и работа двойного зонда.