

# Лабораторная работа 3.5.1

## Изучение плазмы газового разряда в неоне

Татаурова Юлия Романовна

1 ноября 2024 г.

**Цель работы:** изучение вольт-амперной характеристики тлеющего разряда; изучение свойств плазмы методом зондовых характеристик.

**Оборудование:** стеклянная газоразрядная трубка, наполненная неоном, высоковольтный источник питания, источник питания постоянного тока, делитель напряжения, резистор, потенциометр, амперметры, вольтметры, переключатели.

### Теоретические сведения

Если газ продолжать нагревать, то сначала молекулы диссоциируют на атомы, а затем и атомы распадаются на электроны и ионы, так что газ становится ионизованным, представляя собой смесь из свободных электронов и ионов, а также нейтральных частиц. Газ с достаточно большой степенью ионизации называют плазмой.

Рассмотрим простейший вид **плазменных колебаний**. Ионы будем считать одноразрядными т.е.  $n_i = n_e$ . Выделим в нейтральной плазме некоторый объем (рис.1). Пусть все электроны сместились на расстояние  $x$  относительно ионов (ионы как существенно тяжелые частицы можно считать неподвижными). Тогда на боковых гранях возникнут поверхностные заряды с плотностью  $\sigma = \pm n_e e \Delta x \Rightarrow E = 4\pi n_e e \Delta x \Rightarrow \ddot{x} = -\frac{eE}{m} = -\frac{4\pi n_e e^2}{m} x \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m}}$  - плазменная (ленгмюровская) частота коллективных колебаний электронов.

Определим амплитуду колебаний в случае, когда колебания возбуждены за счет тепловой энергии. Средняя скорость теплового движения  $\bar{v}_e = \sqrt{\frac{kT_e}{m_e}}$ . Амплитуду колебаний оценим как смещение с этой скоростью за характерное время плазменных колебаний  $1/\omega$

$$r_D \approx \frac{\bar{v}_e}{\omega} = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e e^2}} \quad (1)$$

$r_D$  - **дебаевский радиус**. **Идеальной плазмой** называется ионизованный газ, дебаевский радиус которого существенно меньше характерного размера области, занимаемой этим газом.

Простым методом исследования свойств плазмы является измерение электрических потенциалов с помощью **зондов** - небольших проводников, вводимых в плазму. При внесении в плазму он сталкивается с заряженными частицами. И т.к. скорости электронов существенно превышает скорости ионов, то проводник зарядится отрицательно  $-U_f$ . Рассмотрим измерения с помощью **двойного зонда** - система, состоящая из двух одинаковых зондов, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга. Между

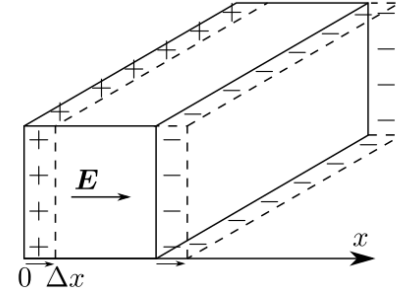


Рис. 1: Плазменные колебания

зондами создаётся разность потенциалов, которая по величине много меньше плавающего потенциала  $|U| \ll |U_f|$ . При этом оба зонда имеют относительно плазмы близкий к плавающему отрицательный потенциал. Рассчитаем величину тока, проходящего через двойной зонд вблизи точки  $I = 0$ .

$$I = I_i \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e} \quad (2)$$

## Экспериментальные данные и установка

Стеклянная газоразрядная трубка имеет холодный полый катод, три анода и геттерный узел — стеклянный баллон, на внутреннюю поверхность которого напылена газопоглощающая плёнка (геттер). Катод и один из анодов (I или II) с помощью переключателя П1 к регулируемому высоковольтному источнику питания (ВИП) с выходным напряжением до нескольких киловольт. При подключении к ВИП анода-I между ним и катодом возникает газовый разряд. Ток разряда измеряется миллиамперметром А1, а падение напряжения на разрядной трубке вольтметром V1. При подключении к ВИП анода-II разряд возникает в пространстве между катодом и анодом-II, где находится двойной зонд, используемый для диагностики плазмы положительного столба. Зонды изготовлены из молибденовой проволоки диаметром  $d = 2$  мм и имеют длину  $l = 5.2$  мм. Они подключены к источнику питания через потенциометр R. Переключатель П2 позволяет изменять полярность напряжения на зондах. Для измерения зондового тока используется микроамперметр А2.

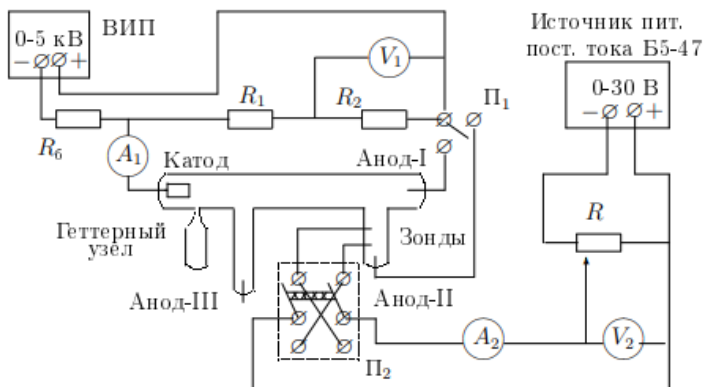
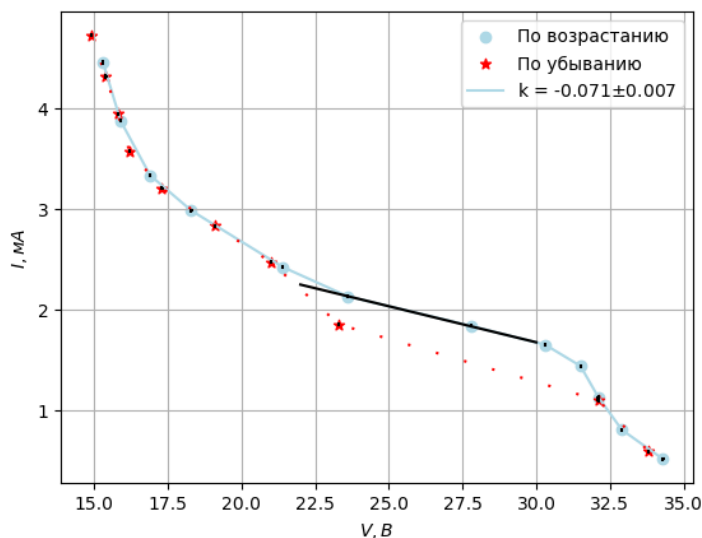


Схема экспериментальной установки



ВАХ разряда при убывании и нарастании тока

## Вольт-амперная характеристика разряда

Определим напряжение зажигания разряда  $U_{\text{разр}} = 200$  В. Из графика находим  $R_{\text{диф}}^{\text{max}} = \frac{dU}{dI} = (13.98 \pm 0.05) \cdot 10^3$  Ом

(нарастание) $I$ , мА	0.52	0.80	1.13	1.439	1.84	2.42	2.98	3.33	3.87	4.45
(нарастание) $U$ , В	34.3	32.9	32.1	31.5	27.8	21.4	18.3	16.9	15.9	15.3
(убывание) $I$ , мА	4.721	4.31	3.939	3.570	3.203	2.827	2.469	1.852	1.100	0.594
(убывание) $U$ , В	14.9	15.4	15.8	16.2	17.3	19.1	21.0	23.3	32.1	33.8

Таблица 1: ВАХ разряда при нарастании и убывании тока

## Зондовые характеристики

Снимем вольт-амперную характеристику двойного зонда для различных значений разрядного тока  $I_p$ . По полученным графикам определим температуру электронов по формуле:

$$kT_e = \frac{1}{2} \frac{eI_{\text{ин}}}{\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0}} \quad (3)$$

Определим так же ионный ток насыщения  $I_{\text{ин}}$  и концентрацию  $n_e = n_i = n$  через этот ток:

$$I_i = 0.4n_i e S \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}} \quad (4)$$

Рассчитаем плазменную частоту колебаний  $\omega$ , электронную поляризационную длину  $r_{De}$  и число ионов  $N_D$  в дебаевской сфере по формулам соответственно:

$$\omega = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} = 5.6 \cdot 10^4 \sqrt{n_e} \quad (5)$$

$$r_{De} = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e e^2}} \quad (6)$$

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

$$r_D \approx \frac{\bar{v}_e}{\omega} = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e e^2}} \quad (8)$$

$I_p$ , мА	$5 \pm 0.02$	$4 \pm 0.02$	$3 \pm 0.02$	$1.5 \pm 0.02$
$\Delta U$ , В	$11.5 \pm 0.5$	$10.3 \pm 0.3$	$8.1 \pm 0.4$	$7 \pm 0.5$
$I_{\text{ин}}$ , мкА	$79.8 \pm 9.3$	$70 \pm 8$	$44.5 \pm 6.5$	$21.4 \pm 3.7$
$T_e, K \cdot 10^3$	$68 \pm 8$	$60 \pm 7$	$47 \pm 7$	$18 \pm 3$
$n, \text{м}^{-3} \cdot 10^{16}$	5.3	5	3.6	2.7
$\omega$ , рад/с $\cdot 10^4$	13.6	13.2	11.1	9.7

Таблица 2: Данные найденные по ВАХ зонда для различных значений тока разряда

$I_p = 5 \text{ mA}$	$I, \text{ mA}$ $U, \text{ B}$	82.5 25.01	85.9 22.03	84.7 19.	81.5 16.04	74.6 13.03	62.4 10.04	50.6 8.01	36.5 6.02	19.9 4.03	-24.4 -2.02	-42.5 -4.08	-51.9 -6.01
$I_p = 4 \text{ mA}$	$I, \text{ mA}$ $U, \text{ B}$	70.6 25.03	70.3 22.08	68.5 19.04	65.7 16.	60.6 13.04	51.1 10.02	42.3 8.06	30.5 6.07	17.1 4.01	-23.5 -2.04	-38.9 -4.06	-51.5 -6.06
$I_p = 3 \text{ mA}$	$I, \text{ mA}$ $U, \text{ B}$	52.6 25.03	50.9 22.04	49.17 19.03	47.2 16.06	44. 13.04	38.1 10.03	32.02 8.07	23.5 6.	13.5 4.03	-20.3 -2.03	-31.5 -4.08	-41.0 -6.08
$I_p = 1.5 \text{ mA}$	$I, \text{ mA}$ $U, \text{ B}$	24.6 25.	23.8 22.09	23. 19.06	22.2 16.03	21.1 13.08	18.8 10.06	16.1 8.05	12.2 6.04	7.1 4.09	-12.3 -2.17	-17.9 -4.06	-22.7 -6.02

Таблица 3: ВАХ двойного зонда при различных токах разряда

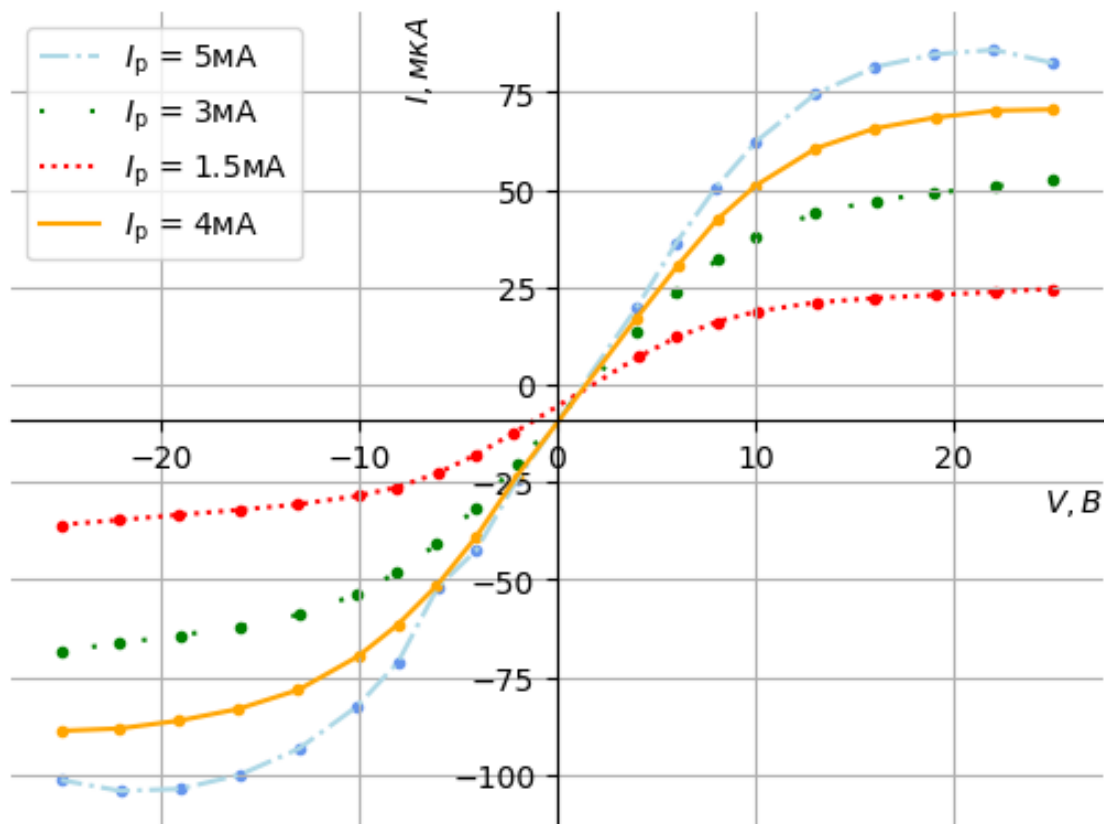
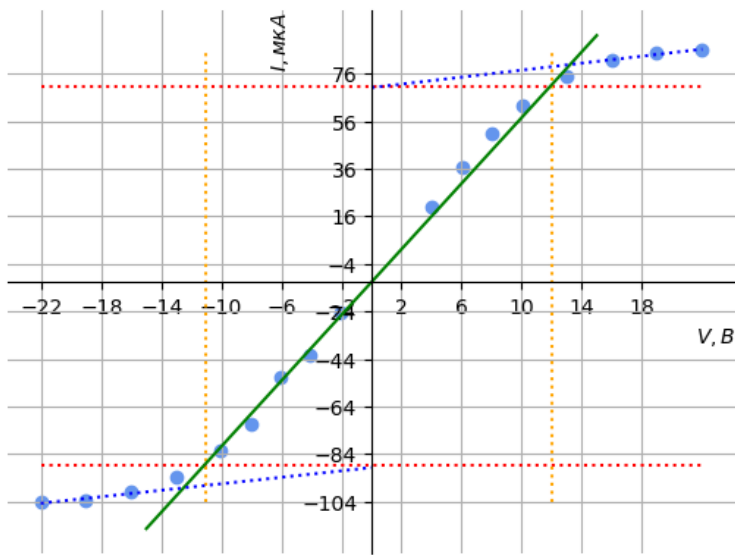
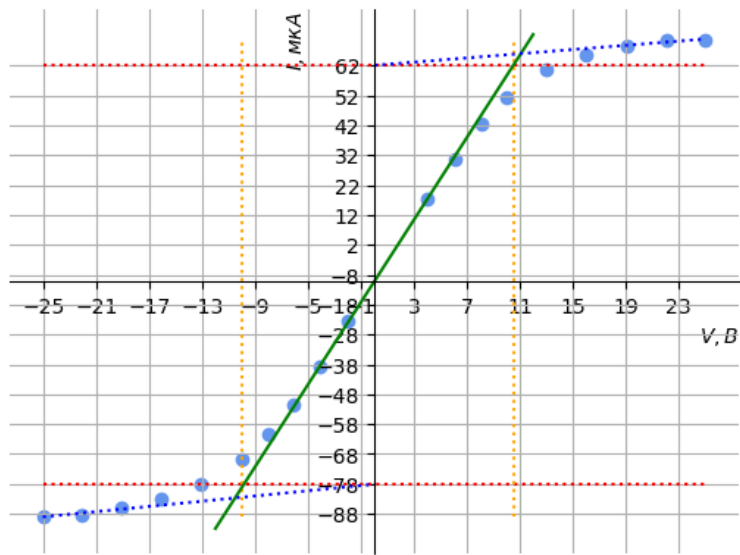


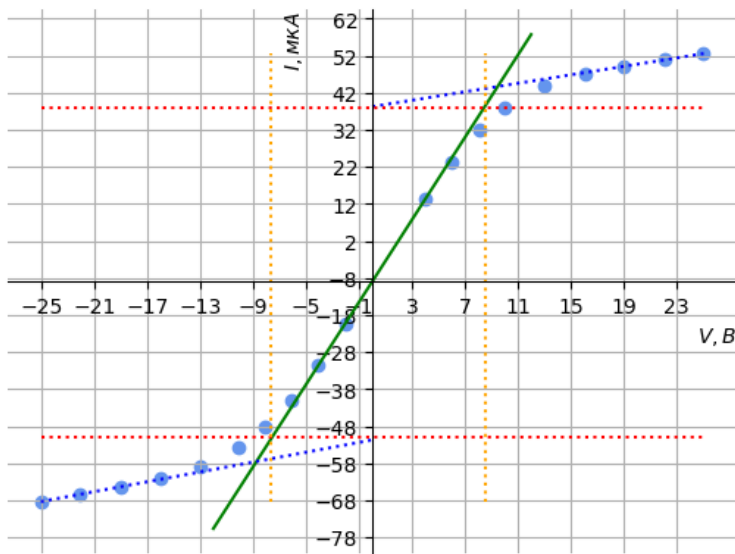
Рис. 3: Сравнение ВАХ двойного зонда при различных токах разряда



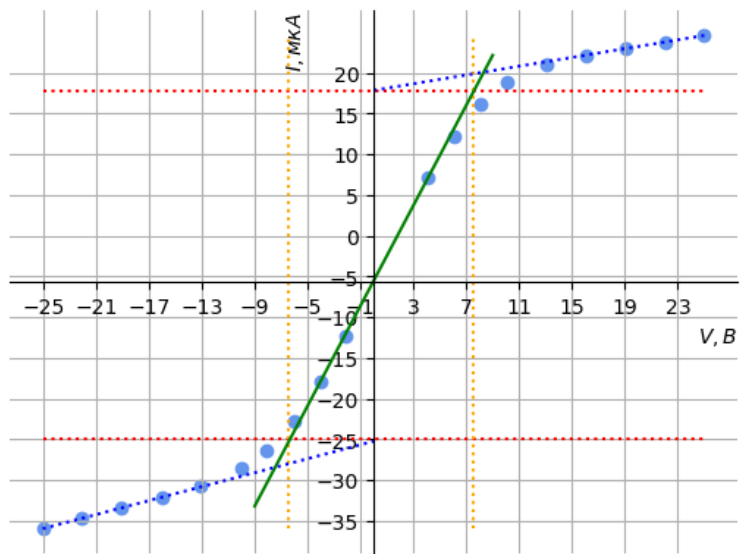
(a) При  $I_p = 5$  мА



(b) При  $I_p = 4$  мА



(c) При  $I_p = 3$  мА



(d) При  $I_p = 1.5$  мА

Рис. 4: ВАХ двойного зонда при различных значениях тока разряда  $I_p$