

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

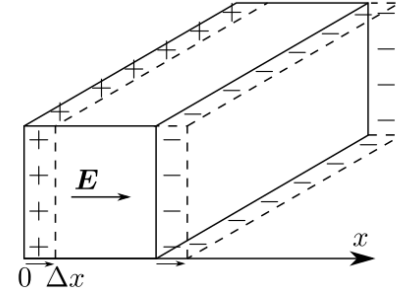


Рис. 1: Плазменные колебания

зондами создаётся разность потенциалов U , 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 Π_1 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 A_1 , а падение напряжения на разрядной трубке вольтметром V_1 . 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 Π_2 позволяет изменять полярность напряжения на зондах. Для измерения зондового тока используется микроамперметр A_2 .

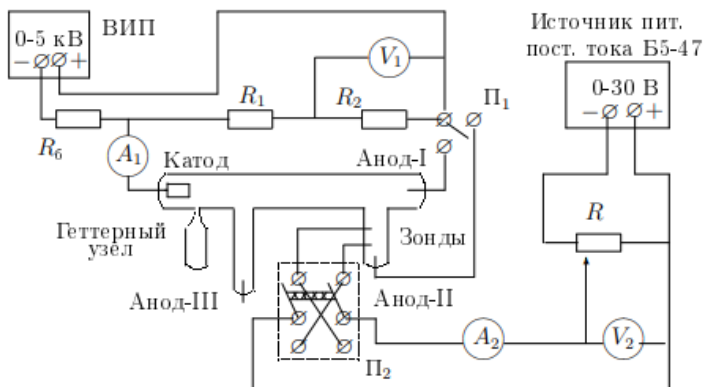
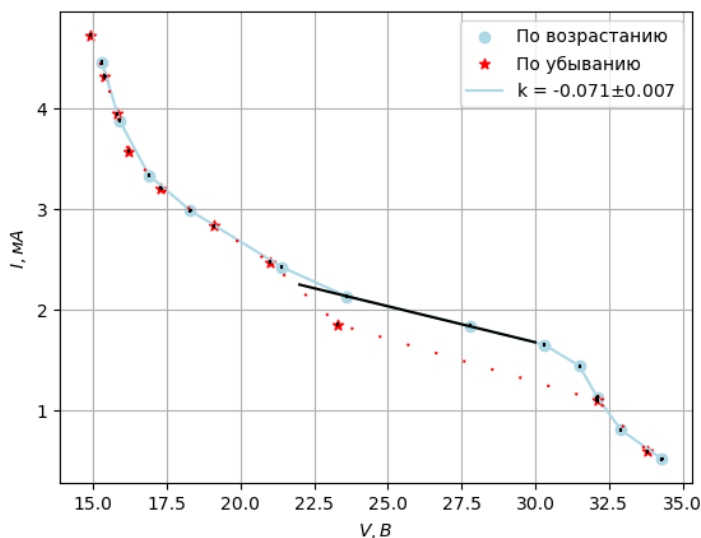


Схема экспериментальной установки



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 ω , электронную поляризационную длину r_{De} и число ионов N_D в дебаевской сфере по формулам соответственно:

$$r_{De} = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e e^2}} \quad (5)$$

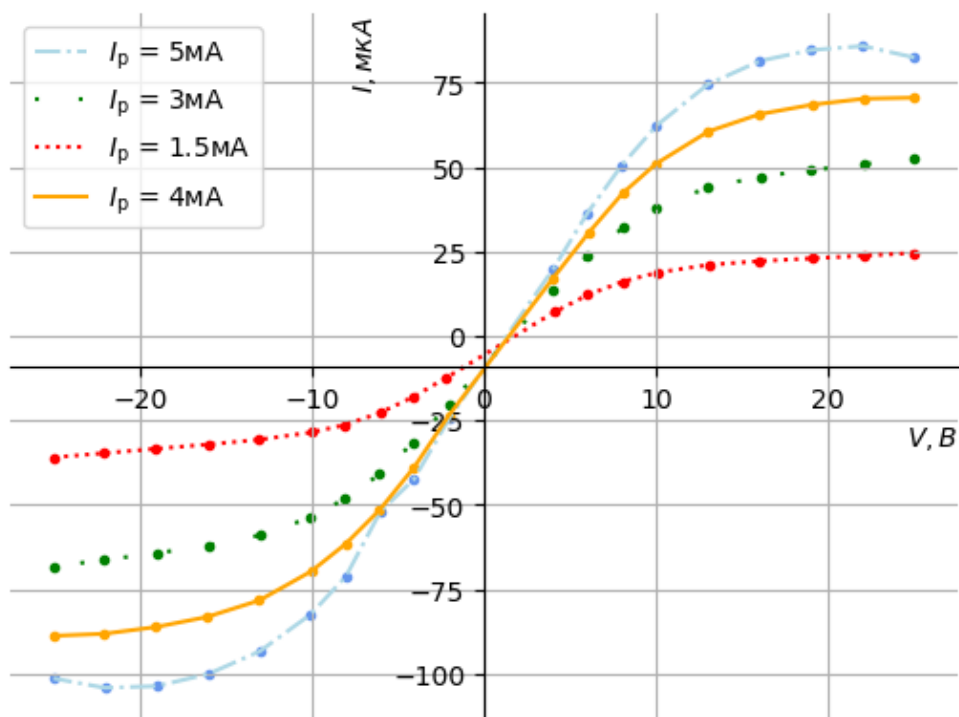
$$N_D = \frac{4}{3} \pi r_D^3 n_i \quad (6)$$

I_p , мА	5 ± 0.02	4 ± 0.02	3 ± 0.02	1.5 ± 0.02
ΔU , В	11.5 ± 0.5	10.3 ± 0.3	8.1 ± 0.4	7 ± 0.5
$I_{\text{ин}}$, мкА	79.8 ± 9.3	70 ± 8	44.5 ± 6.5	21.4 ± 3.7
$T_e, K \cdot 10^3$	68 ± 8	60 ± 7	47 ± 7	18 ± 3
$n, \text{м}^{-3} \cdot 10^{16}$	5.3 ± 0.6	5 ± 0.6	3.6 ± 0.5	2.7 ± 0.5
ω , рад/с $\cdot 10^4$	13.6 ± 1.6	13.2 ± 1.5	11.1 ± 1.7	9.7 ± 1.8
r_{De} , мкм	60.6 ± 7.9	62.2 ± 7.5	69.8 ± 11.3	91.9 ± 18.3
r_D , мкм	4.32 ± 0.60	5.13 ± 0.76	5.68 ± 0.97	7.96 ± 1.62
N_D	26.3 ± 3.6	29.6 ± 4.4	34.5 ± 5.9	48.4 ± 9.8
$\alpha, 10^{-7}$	12.06 ± 0.06	8.54 ± 0.05	7.00 ± 0.04	3.56 ± 0.02

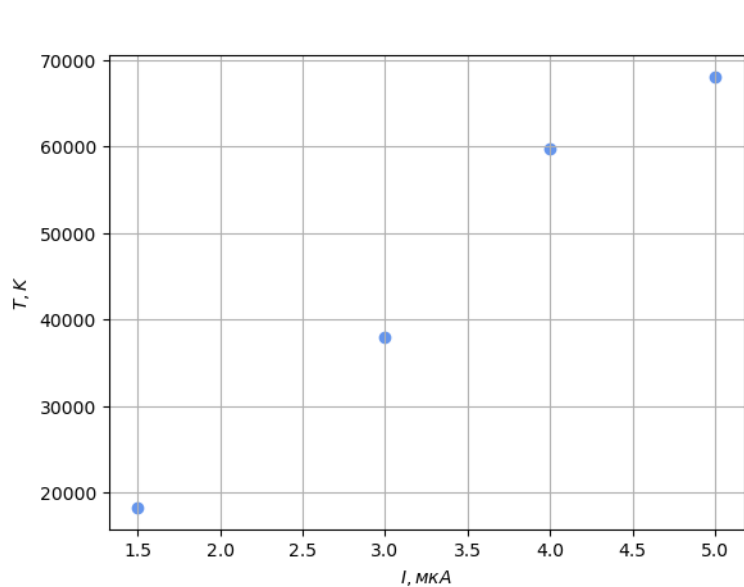
Таблица 2: Данные найденные по ВАХ зонда для различных значений тока разряда

$I_p = 5$ мА	I , мА U , В	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
$I_p = 4$ мА	I , мА U , В	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
$I_p = 3$ мА	I , мА U , В	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
$I_p = 1.5$ мА	I , мА U , В	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

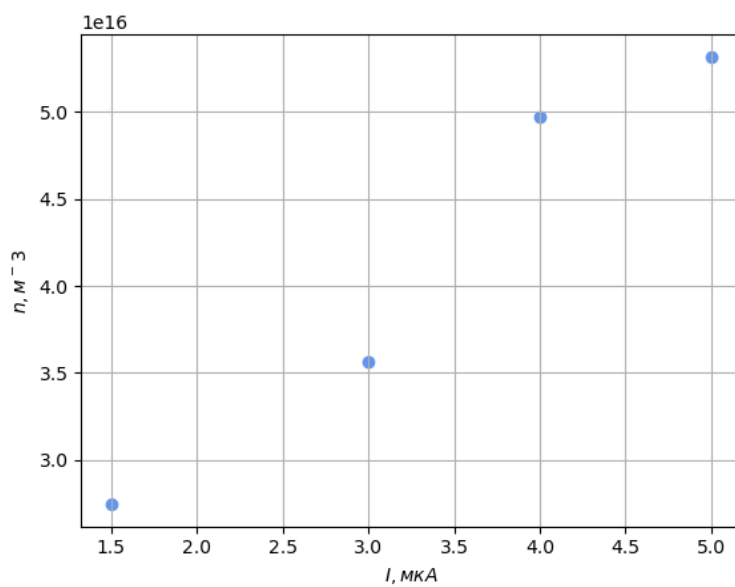
Таблица 3: Данные ВАХ двойного зонда при различных токах разряда



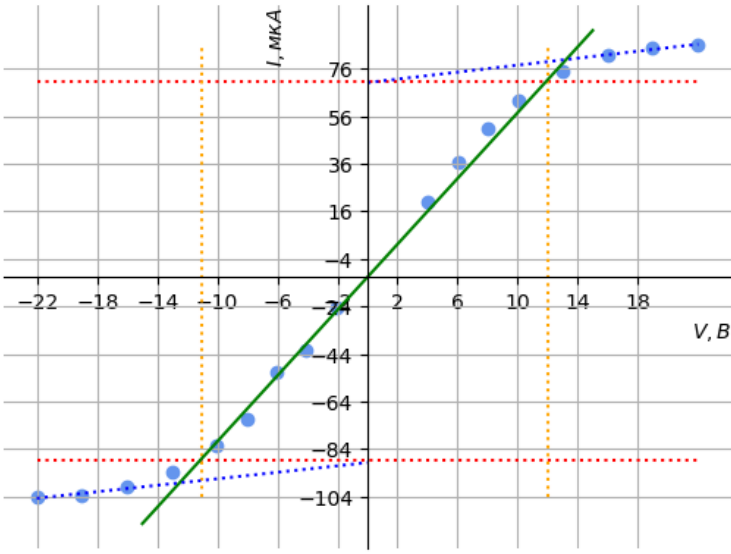
(а) Сравнение ВАХ двойного зонда при различных токах разряда



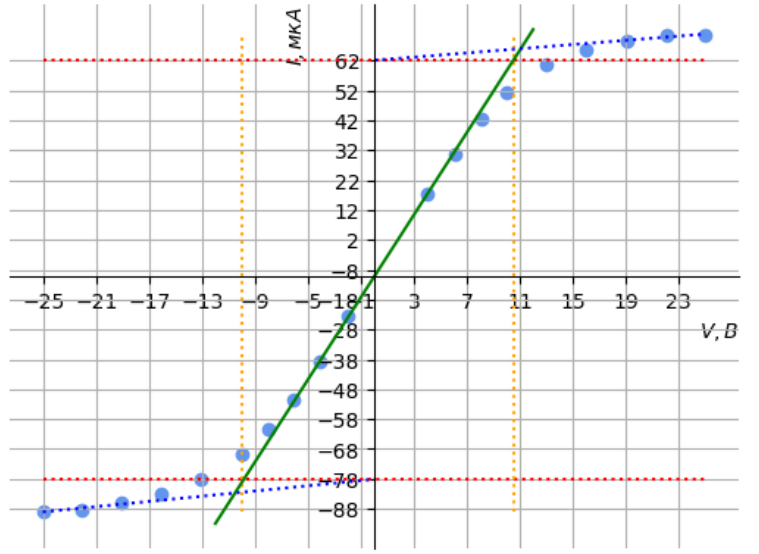
(b) График зависимости температуры от тока насыщения



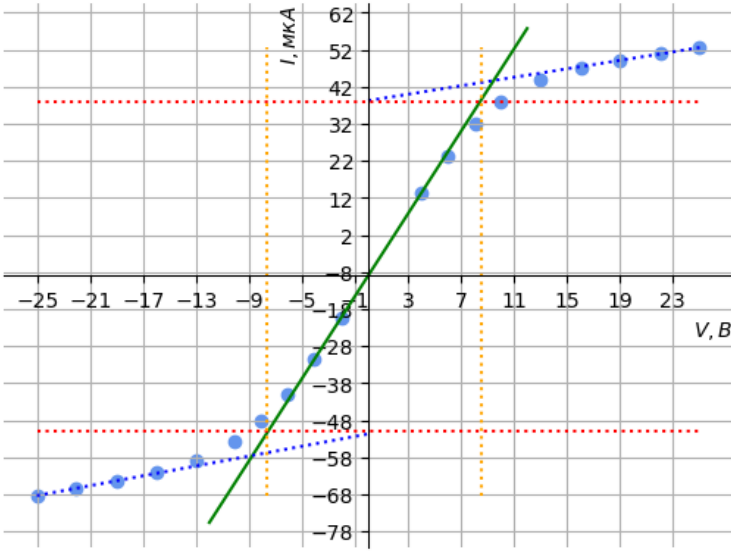
(с) График зависимости концентрации от тока насыщения



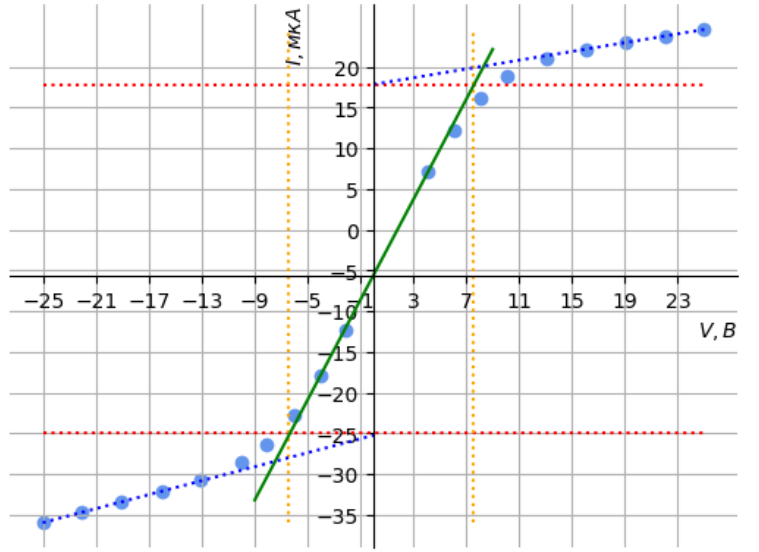
(а) При $I_p = 5$ мА



(б) При $I_p = 4$ мА



(с) При $I_p = 3$ мА



(д) При $I_p = 1.5$ мА

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

Результаты и выводы

1) Построили ВАХ для разряда и по нему определили максимальное дифференциальное сопротивление разряда $R \approx 14$ кОм.

2) Построили зондовые характеристики для разных токов разряда. По этим графикам определили ток насыщения, концентрацию ионов и электронов, электронную поляризационную длину, дебаевский радиус экранирования, среднее число ионов в дебаевской сфере и степень ионизации плазмы. Результаты приведены в Таблице 2.

3) Построили графики зависимостей температуры и концентрации от тока разряда. Видим, что с возрастанием тока разряда возрастает и концентрация, и температура.

4) Т.к $N_D \gg 1$, то мы можем считать плазму идеальной. Так же т.к $l \gg r_{De}$, то плазму можно считать квазинейтральной.