

Отчет о выполнении лабораторной работы 3.2.1

Изучение плазмы газового разряда в неоне

Исламов Сардор, группа Б02-111

15 октября 2022 г.

Аннотация. В ходе работы снята вольт-амперная характеристика тлеющего разряда и зондовые характеристики при разных токах разряда. По результатам измерений рассчитаны концентрация и температура электронов в плазме, плазменная частота, поляризационная длина, дебаевский радиус экранирования и степень ионизации.

Теоретическое введение

Плазма. В ионизированном газе поле ионов «экранируется» электронами. Для поля \mathbf{E} и плотности ρ электрического заряда

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi\rho,$$

а с учётом сферической симметрии и $\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi$:

$$\frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\varphi}{dr} = -4\pi\rho. \quad (1)$$

Плотности заряда электронов и ионов (которые мы считаем бесконечно тяжёлыми и поэтому неподвижными)

$$\begin{aligned} \rho_e &= -ne \cdot \exp\left(\frac{e\varphi}{kT_e}\right), \\ \rho_i &= ne. \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда из (1) в предположении $\frac{e\varphi}{kT_e} \ll 1$ получим

$$\varphi = \frac{Ze}{r} e^{-r/r_D}, \quad (3)$$

где $r_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi ne^2}}$ – радиус Дебая. Среднее число ионов в сфере такого радиуса

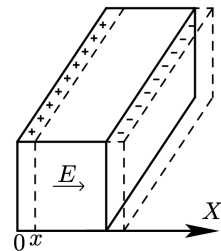
$$N_D = n \frac{4}{3} \pi r_D^3. \quad (4)$$

Теперь выделим параллелепипед с плотностью n электронов (рис. 1), сместим их на x . Возникнут поверхностные заряды $\sigma = nex$, поле от которых будет придавать электронам ускорение:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{eE}{m} = -\frac{4\pi ne^2}{m}x.$$

Отсюда получаем плазменную (ленгмюровскую) частоту колебаний электронов:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi ne^2}{m}}.$$



(5) Рис. 1: Параллелепипед с плотностью n

Одиночный зонд. При внесении в плазму уединённого проводника – зонда – с потенциалом, изначально равным потенциалу точки плазмы, в которую его помещают, на него поступают токи электронов и ионов:

$$I_{e0} = \frac{n\langle v_e \rangle}{4} eS, \quad I_{i0} = \frac{n\langle v_i \rangle}{4} eS, \quad (6)$$

где $\langle v_e \rangle$ и $\langle v_i \rangle$ – средние скорости электронов и ионов, S – площадь зонда, n – плотность электронов и ионов. Скорости электронов много больше скорости ионов, поэтому $I_{i0} \ll I_{e0}$. Зонд будет заряжаться до некоторого равновесного напряжения $-U_f$ – плавающего потенциала.

В равновесии ионный ток мало меняется, а электронный имеет вид

$$I_e = I_0 \exp\left(-\frac{eU_f}{kT_e}\right).$$

Будем подавать потенциал U_3 на зонд и снимать значение зондового тока I_3 . Максимальное значение тока $I_{eн}$ – электронный ток насыщения, а минимальное $I_{иn}$ – ионный ток насыщения. Значение из эмпирической формулы Бомона:

$$I_{иn} = 0.4neS\sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}. \quad (7)$$

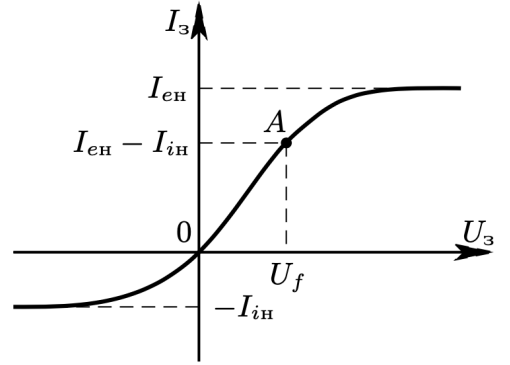


Рис. 2: Вольт-амперная характеристика одиночного зонда

Двойной зонд. Двойной зонд – система из двух одинаковых зондов, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, между которыми создаётся разность потенциалов, меньшая U_f . Рассчитаем ток между ними вблизи $I = 0$. При небольших разностях потенциалов ионные токи на оба зонда близки к току насыщения и компенсируют друг друга, а значит величина результирующего тока полностью связана с разностью электронных токов. Пусть потенциалы на зондах

$$U_1 = -U_f + \Delta U_1,$$

$$U_2 = -U_f + \Delta U_2.$$

Между зондами $U = U_2 - U_1 = \Delta U_2 - \Delta U_1$. Через первый электрод

$$I_1 = I_{иn} + I_{e1} = I_{иn} - \frac{1}{4}neS\langle v_e \rangle \exp\left(-\frac{eU_f}{kT_e}\right) \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e}\right) = I_{иn} \left(1 - \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e}\right)\right). \quad (8)$$

Аналогично через второй получим

$$I_2 = I_{иn} \left(1 - \exp\left(\frac{e\Delta U_2}{kT_e}\right)\right) \quad (9)$$

Из (7) и (8) с учётом последовательного соединения зондов ($I_1 = -I_2 = I$):

$$\Delta U_1 = \frac{kT_e}{e} \ln \left(1 - \frac{I}{I_{иn}}\right)$$

$$\Delta U_2 = \frac{kT_e}{e} \ln \left(1 + \frac{I}{I_{иn}}\right)$$

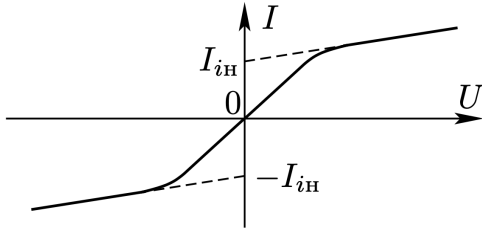


Рис. 3: Вольт-амперная характеристика двойного зонда

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока

$$U = \frac{kT_e}{e} \ln \frac{1 - I/I_{иn}}{1 + I/I_{иn}}, \quad I = I_{иn} \tanh \frac{eU}{2kT_e}. \quad (10)$$

Реальная зависимость выглядит несколько иначе и описывается формулой

$$I = I_{иn} \tanh \frac{eU}{2kT_e} + AU. \quad (11)$$

Из этой формулы можно найти формулу для T_e : для $U = 0$ мы найдём $I_{иn}$, продифференцируем в точке $U = 0$ и с учётом $\tanh \alpha \approx \alpha$ при малых α и $A \rightarrow 0$ получим:

$$kT_e = \frac{1}{2} \frac{eI_{иn}}{\frac{dI}{dU}|_{U=0}}. \quad (12)$$

Экспериментальная установка

Схема установки для исследования плазмы газового разряда в неоне представлена на рис. 1. Стеклообразная газоразрядная трубка имеет холодный (ненагреваемый) полый катод, три анода и геттерный узел - стеклянный баллон, на внутреннюю поверхность которого напылена газопоглощающая плёнка (геттер). Трубка наполнена изотопом неона ^{22}Ne при давлении 2 мм рт. ст. Катод и один из анодов (I или II) с помощью переключателя Π_1 подключаются через балластный резистор R_σ (~ 450 кОм) к регулируемому высоковольтному источнику питания (ВИП) с выходным напряжением до 5 кВ.

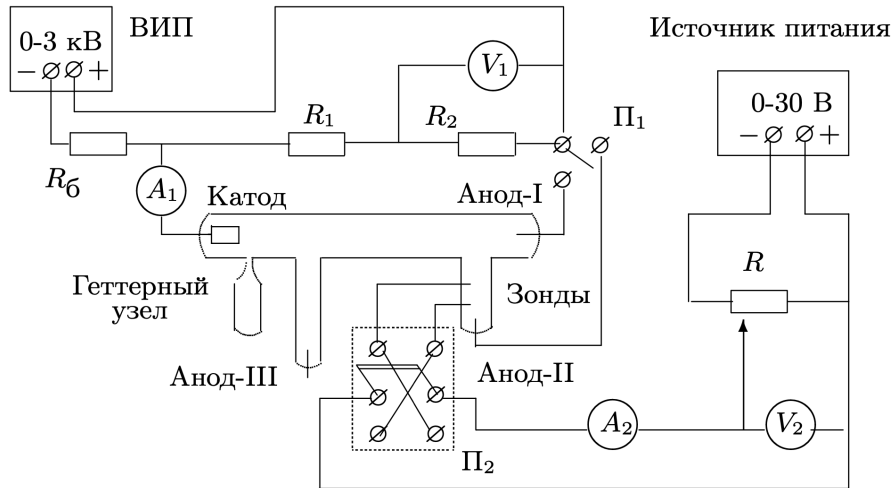


Рис. 4: Схема установки для исследования газового разряда

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 - цифровым вольтметром V_1 (мультиметром GDM), подключённым к трубке через высокоомный (25 МОм) делитель напряжения с коэффициентом $(R_1 + R_2)/R_2 = 10$.

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 $d = 0.2$ мм и имеют длину $l = 5.2$ мм. Они подключены к источнику питания GPS через потенциометр R . Переключатель Π_2 позволяет изменять полярность напряжения на зондах. Величина напряжения на зондах изменяется с помощью дискретного переключателя « V » выходного напряжения источника питания и потенциометра R , а измеряется цифровым вольтметром $V_2(\text{GDM})$. Для измерения зондового тока используется мультиметр $A_2(\text{GDM})$. Анод-III в нашей работе не используется.

Результаты измерений и обработка данных

Для начала, плавно увеличивая напряжение на ВИП определим напряжение зажигания разряда $U_{\text{зж}} = 228\text{В}$.

Теперь снимем зависимость напряжения разряда U_p от его тока I_p как при его увеличении, так и при убывании (табл. 1).

I_p , дел	125	115	105	95	85	75	65	55	45	35	25	14
$U_p \downarrow$, В	24.34	24.47	24.85	25.49	26.54	27.45	26.70	28.48	30.49	32.95	33.80	34.85
$U_p \uparrow$, В	24.27	24.42	24.78	25.42	26.46	27.40	26.66	28.40	30.69	32.96	33.83	34.84

Таблица 1: Вольт-амперная характеристика разряда

Изобразим полученные данные на графике (рис. 5)

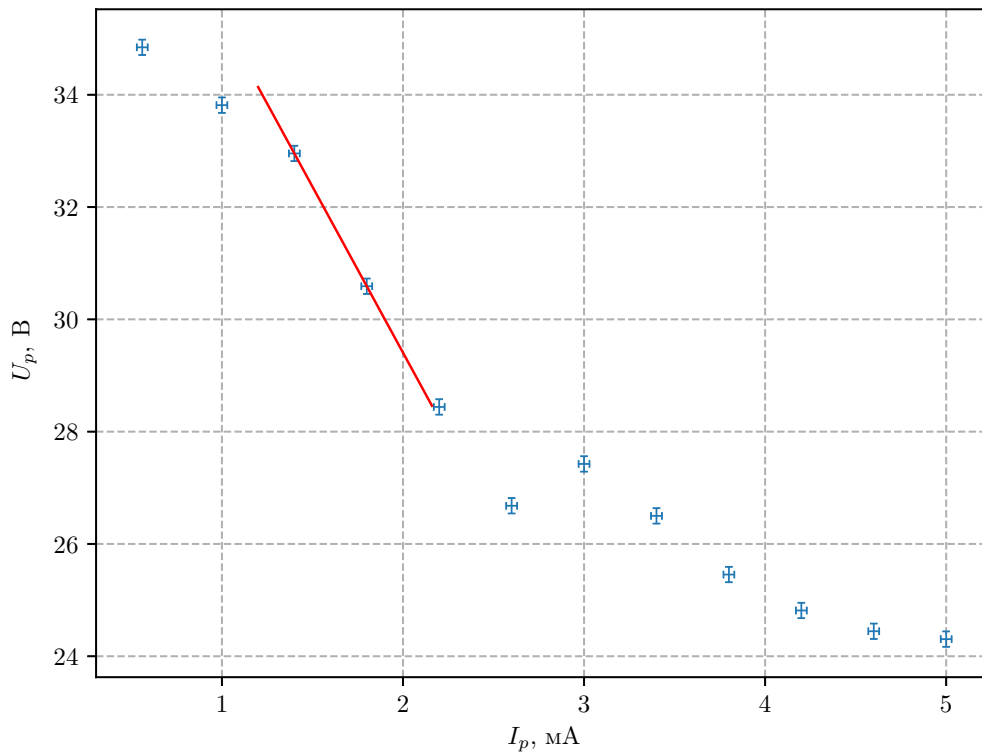


Рис. 5: ВАХ разряда

Максимальное дифференциальное сопротивление заряда $R_{\text{диф}} = (5.9 \pm 0.2) \cdot 10^3 \text{ Ом}$
 4) GPS : $U_2 = 25$, GDM : $U = 24.98$

Проведем серию измерений для вольт-амперной характеристики двойного зонда при различных разрядных токах (табл. 2).

$I_p = 5 \text{ мА}$											
$U_3, \text{ В,}$	24.958	22.011	19.046	15.860	13.170	10.000	8.088	5.962	3.9183	2.1389	0.6032
$I_3, \text{ мкА}$	107.91	104.46	101.80	98.96	94.37	85.33	76.10	64.40	49.85	35.11	21.29
$-U_3, \text{ В,}$	0.5530	2.0379	4.0678	6.091	8.044	9.971	13.028	16.000	19.148	22.083	24.964
$-I_3, \text{ мкА}$	9.01	33.30	51.12	65.72	77.45	87.38	98.40	105.13	109.91	113.03	115.68
$I_p = 3 \text{ мА}$											
$U_3, \text{ В,}$	25.045	22.088	19.035	16.232	13.060	10.138	8.112	5.965	3.9684	2.0783	0.6441
$I_3, \text{ мкА}$	58.00	56.39	54.73	53.11	50.58	46.46	41.64	34.58	25.83	15.91	6.96
$-U_3, \text{ В,}$	0.6429	2.0515	4.0726	6.000	8.005	9.999	13.047	16.156	18.909	22.112	24.988
$-I_3, \text{ мкА}$	5.03	14.23	25.45	34.30	41.69	47.12	52.38	55.17	56.92	58.73	60.37
$I_p = 1.5 \text{ мА}$											
$U_3, \text{ В,}$	24.991	21.953	19.000	16.032	13.161	10.042	7.944	5.955	3.9200	1.9521	0.5289
$I_3, \text{ мкА}$	27.61	26.64	25.73	24.79	23.63	21.52	19.13	15.97	11.71	6.39	2.18
$-U_3, \text{ В,}$	0.5345	2.0794	4.1773	6.079	7.989	10.249	13.350	16.303	18.987	22.242	24.967
$-I_3, \text{ мкА}$	1.81	6.29	12.01	16.23	19.60	22.46	24.75	26.07	26.96	28.01	28.90

Таблица 2: Зондовые характеристики при разных токах

08.10.22.
Решим

Теперь отобразим данные на графиках и определим I_{in} и производную в нуле.

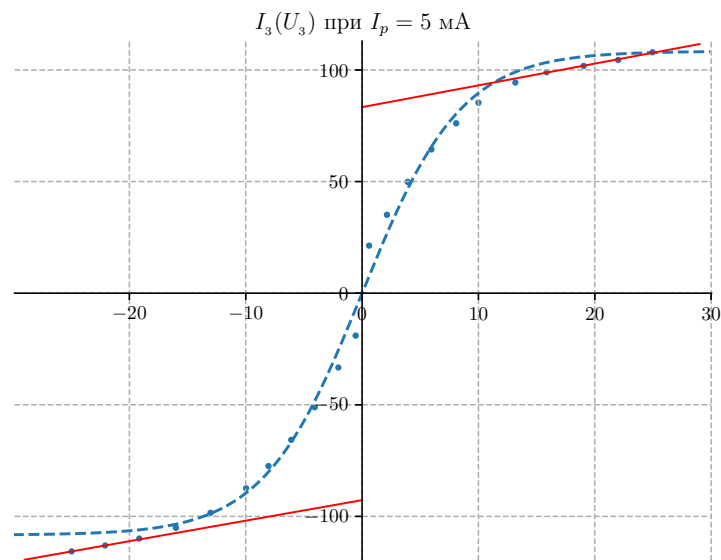
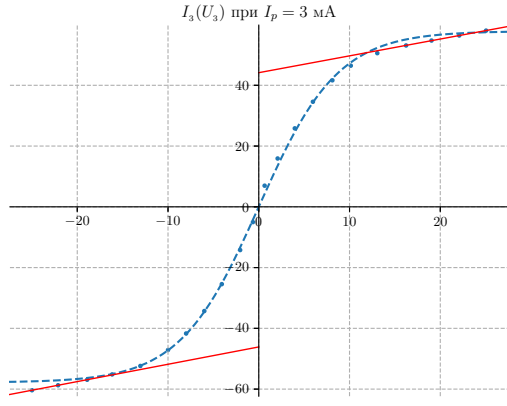
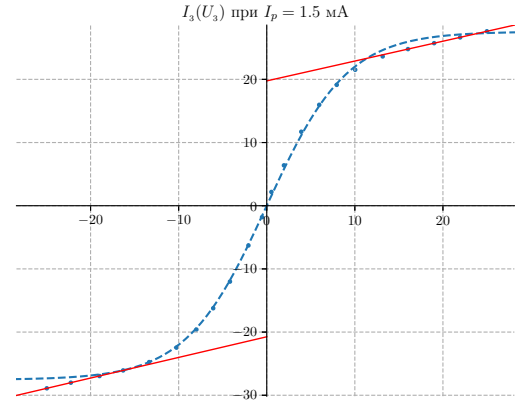


Рис. 6: ВАХ двойного зонда при $I_p = 5 \text{ мА}$



(a) ВАХ двойного зонда при $I_p = 3$ мА



(b) ВАХ двойного зонда при $I_p = 1.5$ мА

Также изобразим все ВАХ на одном графике (рис. 7)

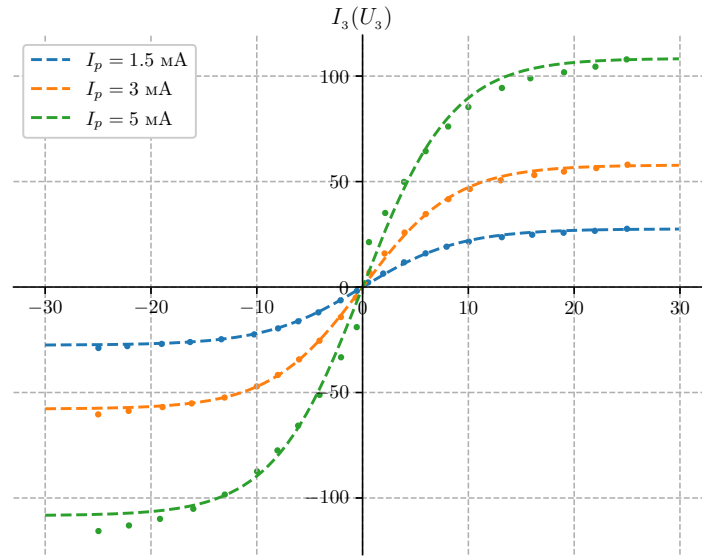


Рис. 7: ВАХ двойного зонда при различных токах

Как видно из графиков, ионный ток насыщения различен для половин графиков выше и ниже нуля, поэтому будем брать его усредненное значение.

$$I_{ин}(5\text{мА}) = 88.0 \pm 4.7 \text{ мкА}, I_{ин}(3\text{мА}) = 45.1 \pm 1.0 \text{ мкА}, I_{ин}(1.5\text{мА}) = 20.3 \pm 0.5 \text{ мкА}$$

Теперь из (12) можем вычислить температуру электронов T_e .

Также из (7) рассчитаем концентрацию ионов n_i , полагая ее равной концентрации электронов n_e .

Из (5) получим плазменную частоту колебаний электронов ω_p

Рассчитаем электронную поляризационную длину r_{De} , радиус Дебая r_D и по формуле (4) вычислим среднее число ионов в сфере такого радиуса $\langle N_D \rangle$. Степень ионизации α получим по соотношению $\alpha = n_i/n$, где n – общее число частиц в единице объема (давление $P = nkT_i \approx 1\text{мбар}$). Все результаты занесем в таблицу 3.

I_p , мА	$T_e, 10^4$, К	$n_e, 10^{13} \text{ м}^{-3}$	$\omega_p, 10^3 \frac{\text{рад}}{\text{сек}}$	$r_{De}, 10^{-4} \text{ м}$	$r_D, 10^{-4}$	$\langle N_D \rangle, 10^3$	$\alpha, 10^{-6}$
5	1.7 ± 0.1	6.0 ± 0.5	4.6 ± 0.2	3.4 ± 0.2	1.5 ± 0.1	0.85 ± 0.24	14 ± 2
3	2.4 ± 0.5	2.6 ± 0.3	3.0 ± 0.2	6.2 ± 0.5	2.2 ± 0.1	1.2 ± 0.3	8.6 ± 0.7
1.5	3.9 ± 0.1	0.91 ± 0.03	1.8 ± 0.1	13.5 ± 0.4	3.8 ± 0.1	2.1 ± 0.3	4.9 ± 0.3

Таблица 3: Вычисленные характеристики

Подведение итогов

В ходе работы снята вольт-амперная характеристика тлеющего разряда и зондовые характеристики при разных токах разряда. По результатам измерений рассчитаны концентрация и температура электронов в плазме, плазменная частота, поляризационная длина, дебаевский радиус экранирования и степень ионизации.

По полученным значениям характеристик можно заключить, что плазма не является квазинейтральной, т.к. электронная поляризационная длина не сильно превосходит дебаевский радиус. При этом плазму можно считать идеальным газом, в связи с тем, что число Дебая сильно превосходит единицу.