

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа аэрокосмических технологий

Лабораторная работа №3.5.1
Изучение плазмы газового разряда в неоне

Работу выполнил
Лохматов Арсений Игоревич
Козярский Алексей Сергеевич
Б03-303



Долгопрудный, 2024

1 Теоретическая часть

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

1.1 Экспериментальная установка

Схема установки исследования плазмы газового разряда в неооне изображена на рисунке 1. Стеклянная газоразрядная трубка имеет ненагреваемый полый катод, который остаётся холодным, 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 подключается через балластный резистор R_6 (~ 450 кОм) к регулируемому высоковольтному источнику питания (ВИП) с выходным напряжением до 5 кВ.

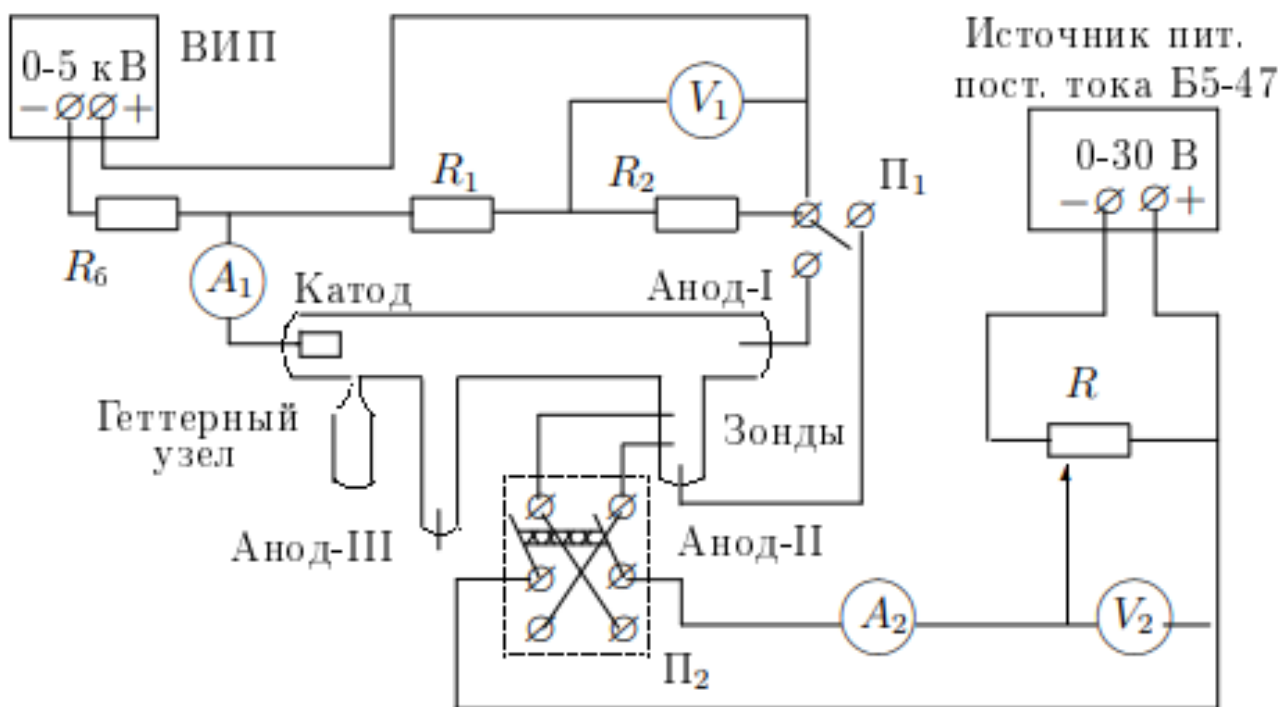


Рис. 1: Схема установки

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 , 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 измеряется с помощью дискретного переключателя V выходного напряжения источника питания и потенциометра R , а измеряется цифровым вольтметром V_2 (GDM). Для измерения зондового тока используется мультиметр A_2 (GDM). Анод-III в нашей работе не используется.

2 Задание

В работе предлагается снять вольт-амперную характеристику тлеющего разряда и зондовые характеристики при разных токах разряда и по результатам измерений рассчитать концентрацию и температуру электронов в плазме, плазменную частоту, поляризационную частоту, поляризационную длину, дебаевский радиус экранирования и степень ионизации.

2.1 Вольт-амперная характеристика разряда

1. Подготовили приборы к работе: работаем с анодом-I (переключатель на анод-I), выходное напряжение (ВИП) сделали равным нулю (ручка регулирования в крайнем левом положении), включили (ВИП) в сеть. Познакомились с правилами работы с мультиметром. Подготовили к работе мультиметр V_1 : включили его в сеть, установили автоматический режим измерения постоянного напряжения. Плавно увеличивая выходное напряжение (ВИП), определили напряжения зажигания разряда $U_{\text{зж}}$.

$$U_{\text{зж}} = 242.5 \text{ В}$$

2. С помощью вольтметра V_1 и амперметра A_1 сняли вольт-амперную характеристику разряда $I_p(U_p)$. Ток разряда I_p изменяли в диапазоне от 0.5 мА до 5 мА. Провели измерения как при нарастании, так и при убывании тока. Результаты занесли в таблицу 1.

Возрастание тока			Убывание тока		
	I_p , мА	U_p , В		I_p , мА	U_p , В
1	0.5248	35.001	1	5.0002	5.355
2	0.8153	34.249	2	4.7068	6.996
3	1.1061	33.361	3	4.4015	8.811
4	1.4093	28.703	4	4.1046	10.302
5	1.7078	23.956	5	3.8057	11.788
6	2.0065	21.245	6	3.5096	13.134
7	2.3067	19.252	7	3.2047	14.011
8	2.5994	16.597	8	2.9035	14.953
9	2.9065	15.053	9	2.6062	16.361
10	3.2042	14.422	10	2.3051	18.873
11	3.5090	13.444	11	2.0228	20.777
12	3.8036	12.088	12	1.7033	23.792
13	4.1026	10.545	13	1.4021	28.433
14	4.4092	8.942	14	1.1023	33.295
15	4.7086	7.072	15	0.8065	34.378
16	5.0059	5.416	16	0.5089	35.144

Таблица 1: Вольт-амперная характеристика разряда

2.2 Зондовые характеристики

1. Уменьшили напряжение (ВИП) до нуля, перевели переключатель Π_1 на анод-II, переключатель Π_2 переключили на +. Подготовили к работе мультиметры A_2 и V_2 , включили приборы в сеть. На A_2 установили автоматический режим измерения постоянного тока в мкА. На V_2 установили автоматический режим измерения напряжения в вольтах.
2. Плавно увеличивая напряжения (ВИП) до возникновения разряда и установили разрядный ток $I_p \sim 5$ мА. Включили в сеть источник питания *GPS*, нажали кнопку *OUTPUT*, установили произвольный ток, затем напряжение $U_2 \sim$ В. При помощи потенциометра R установили на зонде максимальное напряжение $U_2 \sim$ В.
3. С помощью мультиметров A_2 и V_2 снимем вольт-амперную характеристику двойного зонда $I_3(U_3)$ при фиксированном токе разряда I_p .

Проделаем те же действия при токах разряда, равных 3 и 1.5 мА. Результаты занесём в таблицу 2.

$I_p = 5$ мВ			$I_p = 3$ мВ			$I_p = 1.5$ мВ		
	U_3 , мА	I_3 , В		U_3 , мА	I_3 , В		U_3 , мА	I_3 , В
1	25.013	109.24	1	24.821	64.989	1	25.077	32.33
2	22.085	107.02	2	22.102	63.009	2	22.044	31.24
3	19.062	103.55	3	19.085	61.079	3	19.114	30.20
4	16.024	97.79	4	16.012	58.708	4	16.133	29.08
5	13.004	88.89	5	13.061	55.042	5	13.087	27.45
6	10.258	77.93	6	9.989	48.482	6	10.081	24.59
7	8.066	67.42	7	8.064	42.235	7	8.025	21.55
8	6.077	56.33	8	6.052	33.997	8	6.083	17.64
9	4.1406	44.93	9	3.991	23.381	9	4.094	12.44
10	2.0787	30.42	10	2.091	12.038	10	2.121	6.06
11	0.0007	12.93	11	0.002	1.008	11	0.03	0.87
12	-0.0020	-11.70	12	-0.041	-7.004	12	-0.032	-5.003
13	-2.0112	-27.06	13	-2.075	-20.21	13	-2.087	-10.31
14	-4.1820	-43.05	14	-4.083	-32.16	14	-3.992	-16.58
15	-6.106	-55.27	15	-6.124	-42.46	15	-6.143	-22.26
16	-8.051	-66.53	16	-8.099	-50.47	16	-8.022	-26.27
17	-10.085	-77.62	17	-10.047	-56.66	17	-10.017	-29.37
18	-13.071	-91.03	18	-13.031	-63.23	18	-13.054	-32.55
19	-16.078	-101.64	19	-16.082	-67.24	19	-16.079	-34.42
20	-19.096	-109.30	20	-19.186	-69.82	20	-19.043	-35.76
21	-22.175	-114.04	21	-22.134	-71.78	21	-22.092	-37.07
22	-25.018	-116.71	22	-25.016	-73.69	22	-25.033	-38.85

Таблица 2: Зондовая характеристика

4. Перевели ручки регулировки источника питания к минимальным значениям отключим приборы. Запишем параметры зондов.

$$d = 0.2 \text{ мм}; \quad l = 5.2 \text{ мм}$$

2.3 Обработка результатов

1. Построим вольт-амперную характеристику разряда в координатах $I_p(U_p)$.

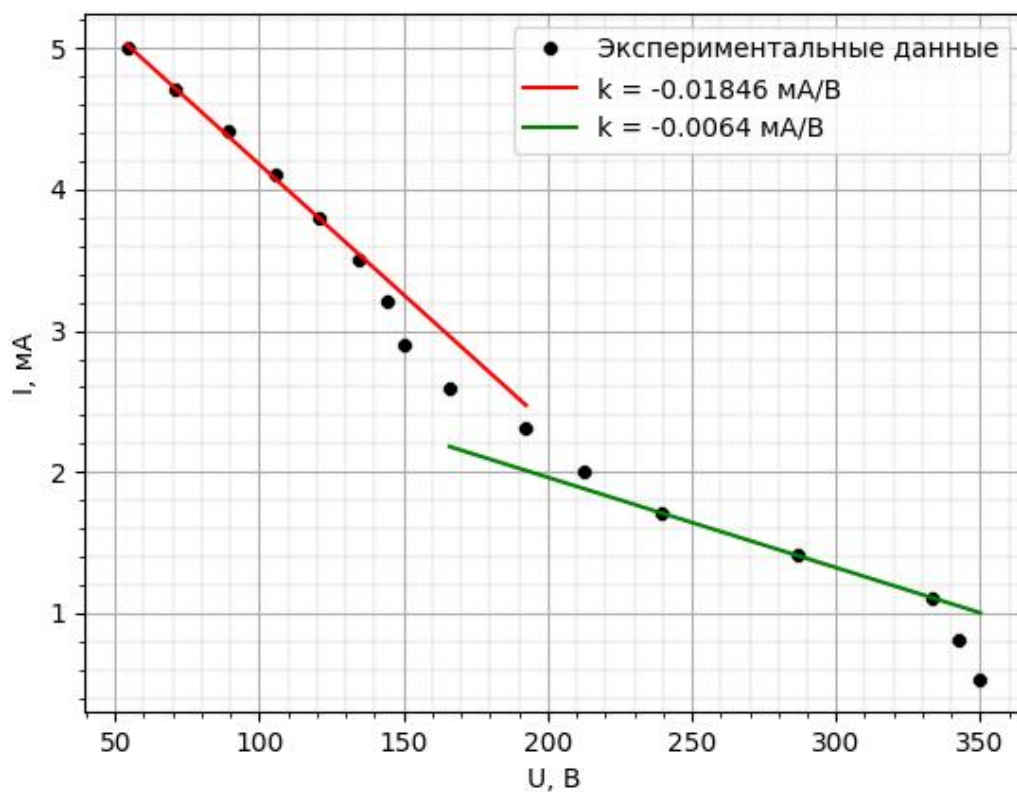


Рис. 2: График зависимости $I_p(U_p)$ на повышении напряжения

$$R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} = \frac{1}{k}, \quad \sigma_R = R \frac{\sigma_k}{k}$$

$$k_1 = -(0.01846 \pm 0.00044) \frac{\text{mA}}{\text{V}} \Rightarrow R_{\text{max}} = -\frac{1}{0.01846 \cdot 10^{-3}} = -(5.42 \pm 0.13) \cdot 10^4 \text{ Ом} (\varepsilon = 2.38\%)$$

$$k_2 = -(0.00640 \pm 0.00006) \frac{\text{mA}}{\text{V}} \Rightarrow R_{\text{min}} = -\frac{1}{0.0064 \cdot 10^{-3}} = -(15.63 \pm 0.15) \cdot 10^4 \text{ Ом} (\varepsilon = 0.94\%)$$

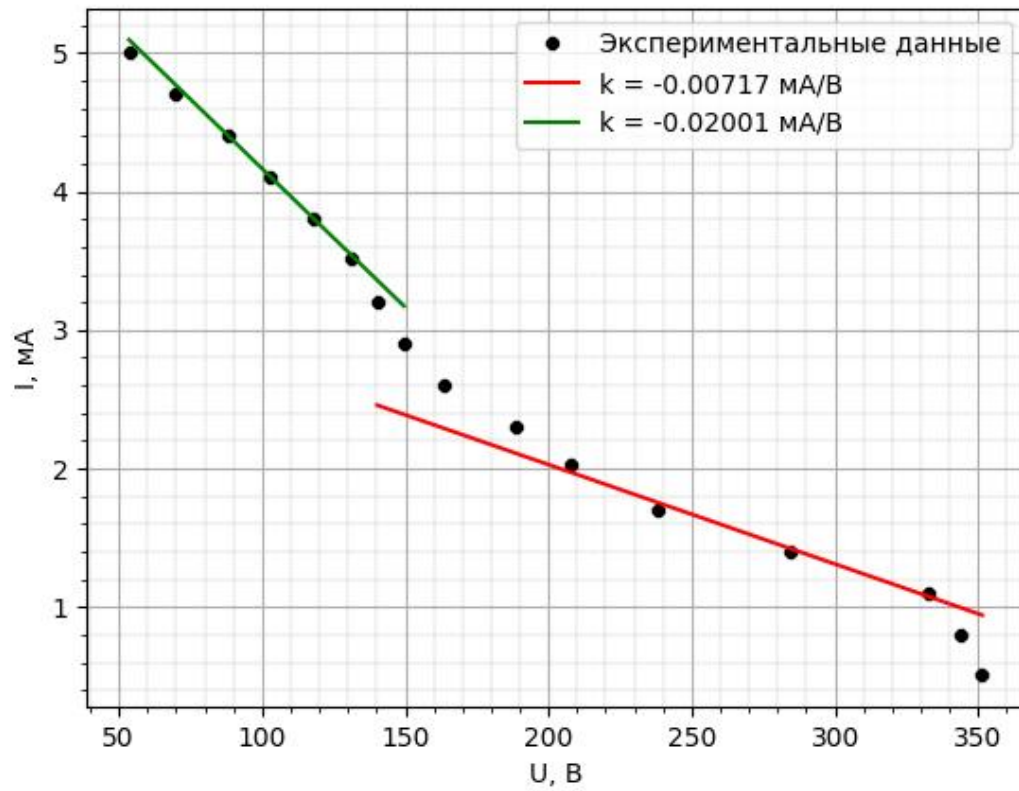


Рис. 3: График зависимости $I_p(U_p)$ на понижении напряжения

$$k_3 = -(0.02001 \pm 0.00006) \frac{\text{mA}}{\text{B}} \Rightarrow R_{max} = -\frac{1}{0.02001 \cdot 10^{-3}} = -(4.99 \pm 0.02) \cdot 10^4 \text{ Ом} (\varepsilon = 0.29\%)$$

$$k_4 = -(0.00717 \pm 0.0006) \frac{\text{mA}}{\text{B}} \Rightarrow R_{min} = -\frac{1}{0.00717 \cdot 10^{-3}} = -(13.95 \pm 1.17) \cdot 10^4 \text{ Ом} (\varepsilon = 8.37\%)$$

2. Построим зондовые характеристики для разных токов разряда, отцентрируем кривые и используем их для определения температуры электронов T_e .

$$kT_e = \frac{1}{2} \frac{eI_{in}}{\frac{dI}{dU}|_{U=0}}, \quad kT_e = \frac{\Delta U}{2}$$

Оценим погрешности.

$$\sigma_{kT_e} = (kT_e) \sqrt{\left(\frac{\sigma_{I_i}}{I_i}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\frac{dI}{dU}}}{\frac{dI}{dU}}\right)^2}, \quad \sigma_{kT_e} = (kT_e) \frac{\sigma_{\Delta U}}{\Delta U}$$

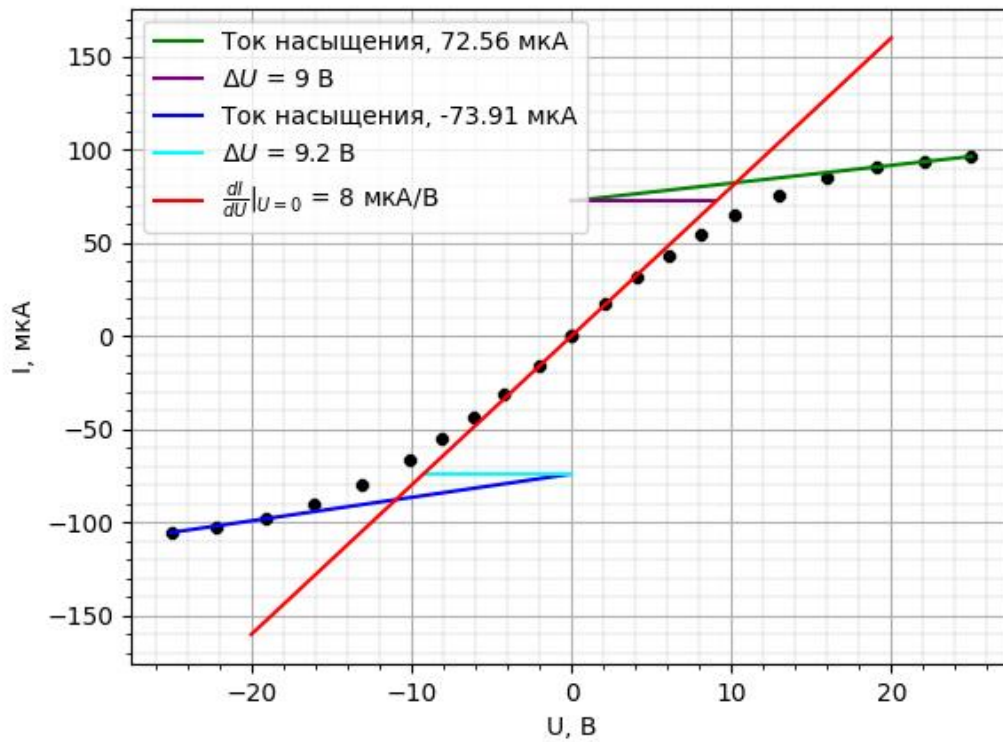


Рис. 4: Зондовая характеристика $I_{раз} = 5$ мА

$I_{i\text{сред}}, \text{ мкА}$	$\sigma_{I_i}, \text{ мкА}$	$\Delta U_{\text{сред}}, \text{ В}$	$\sigma_{\Delta U}, \text{ В}$	$\frac{dI}{dU} _{U=0}, \frac{\text{мкА}}{\text{В}}$	$\sigma, \frac{\text{мкА}}{\text{В}}$
73.235	3.169	9.1	0.01	8	0.01
$(kT_e)_1, \text{ эВ}$	$\sigma_{kT_e}, \text{ эВ}$	$(kT_e)_2, \text{ эВ}$	$\sigma_{kT_e}, \text{ эВ}$	$T_1, \cdot 10^3 \text{ К}$	$T_2, \cdot 10^3 \text{ К}$
4.58	0.21	4.550	0.005	53.101	52.754

Таблица 3: Результаты вычислений

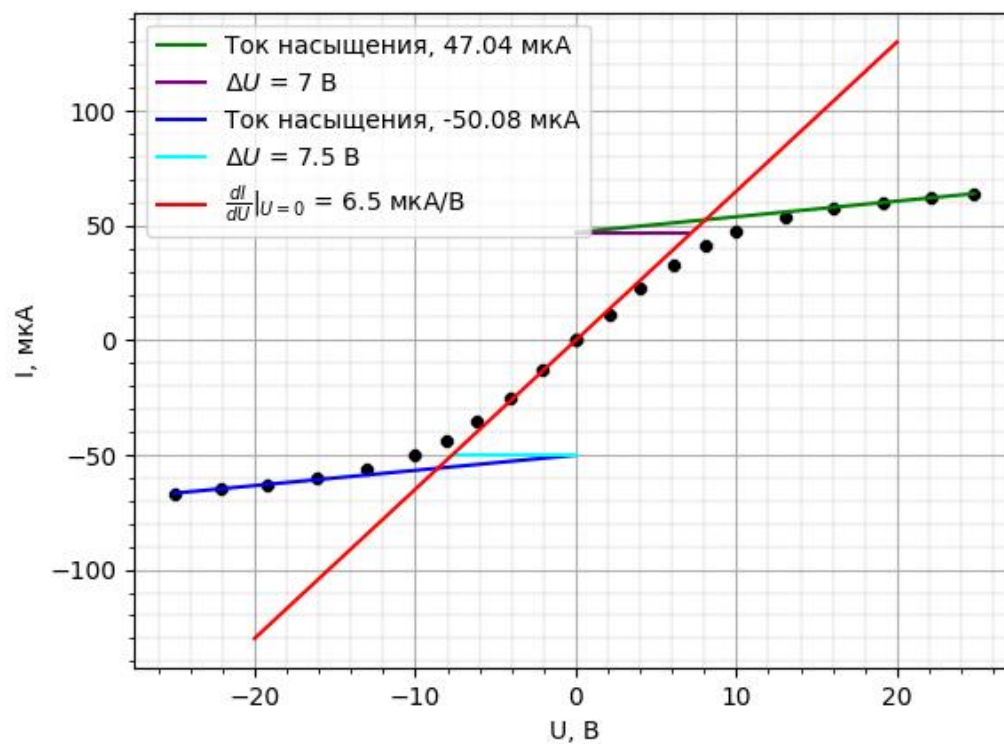


Рис. 5: Зондовая характеристика $I_{\text{раз}} = 3$ мА

$I_{i\text{сред}}, \text{ мкА}$	$\sigma_{I_i}, \text{ мкА}$	$\Delta U_{\text{сред}}, \text{ В}$	$\sigma_{\Delta U}, \text{ В}$	$\frac{dI}{dU} _{U=0}, \frac{\text{мкА}}{\text{В}}$	$\sigma, \frac{\text{мкА}}{\text{В}}$
48.560	0.289	7.25	0.01	6.5	0.01
$(kT_e)_1, \text{ эВ}$	$\sigma_{kT_e}, \text{ эВ}$	$(kT_e)_2, \text{ эВ}$	$\sigma_{kT_e}, \text{ эВ}$	$T_1, \cdot 10^3 \text{ К}$	$T_2, \cdot 10^3 \text{ К}$
3.741	0.023	3.625	0.005	43.374	42.029

Таблица 4: Результаты вычислений

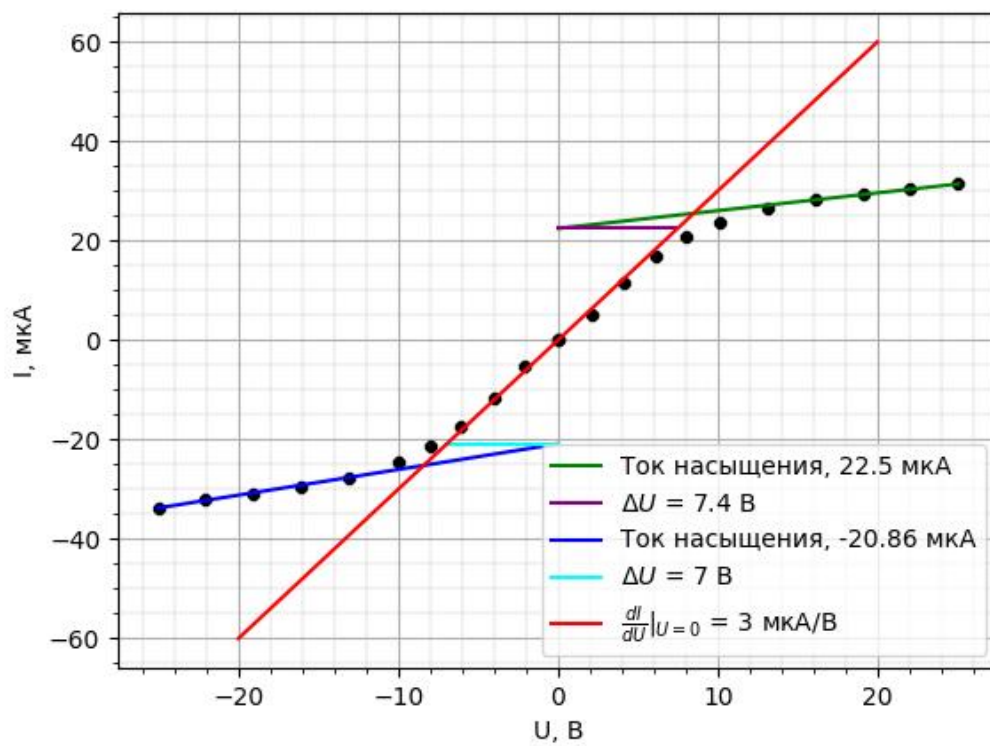


Рис. 6: Зондовая характеристика $I_{\text{раз}} = 1.5$ мА

$I_{i\text{сред}}, \text{ мкА}$	$\sigma_{I_i}, \text{ мкА}$	$\Delta U_{\text{сред}}, \text{ В}$	$\sigma_{\Delta U}, \text{ В}$	$\frac{dI}{dU} _{U=0}, \frac{\text{мкА}}{\text{В}}$	$\sigma, \frac{\text{мкА}}{\text{В}}$
21.68	0.58	7.2	0.01	3	0.01
$(kT_e)_1, \text{ эВ}$	$\sigma_{kT_e}, \text{ эВ}$	$(kT_e)_2, \text{ эВ}$	$\sigma_{kT_e}, \text{ эВ}$	$T_1, \cdot 10^3 \text{ К}$	$T_2, \cdot 10^3 \text{ К}$
3.612	0.097	3.600	0.005	41.878	41.739

Таблица 5: Результаты вычислений

3. Построим на одном листе Семейство отцентрованных зондовых характеристик $I_3(U_3)$.

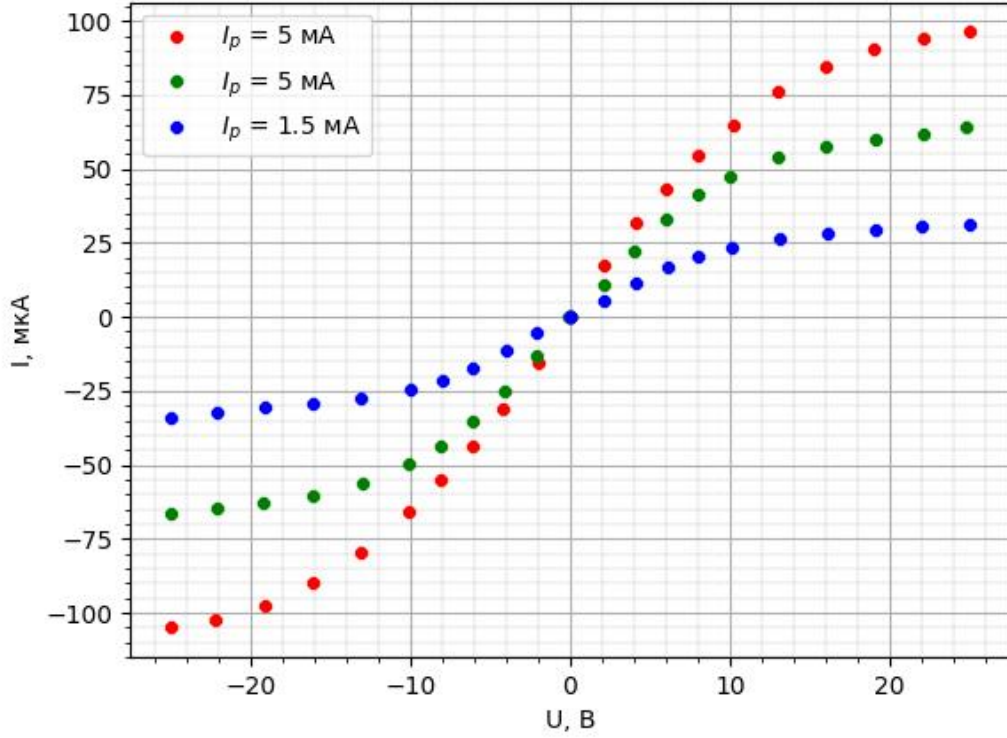


Рис. 7: Семейство отцентрованных зондовых характеристик $I_3(U_3)$

4. Полагая $n_e = n_i = n$, найдём эту концентрацию, используя формулу Бома:

$$I_{ин} = 0.4n_e e S \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}},$$

где $S = \pi \cdot d \cdot l = \pi \cdot 0.2 \cdot 5.2 \cdot 10^{-6} = 3.27 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ – площадь поверхности зонда;

$m_i = 22 \cdot 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ – масса иона неона.

$$\Rightarrow n_e = \frac{I_{ин}}{0.4eS} \sqrt{\frac{m_i}{2kT_e}}; \sigma_{n_e} = n_e \sqrt{\left(\frac{\sigma_{I_{ин}}}{I_{ин}}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{\sigma_{T_e}}{T_e}\right)^2}$$

$I_{разр}, \text{ мА}$	$I_{ин}, \text{ мкА}$	$\sigma_{I_{ин}}, \text{ мкА}$	$T_e, \cdot 10^3 \text{ К}$	$\sigma_{T_e}, \cdot 10^3 \text{ К}$	$n_e, \cdot 10^{16} \frac{\text{част}}{\text{м}^3}$	$\sigma_{n_e}, \cdot 10^{16} \frac{\text{част}}{\text{м}^3}$
5	73.235	3.169	52.928	0.058	5.533	0.239
3	48.560	0.289	42.702	0.059	4.084	0.024
1.5	21.68	0.58	41.809	0.058	1.843	0.049

Таблица 6: Результаты вычислений

5. Рассчитаем плазменную частоту колебаний электронов по формуле

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} = 5.6 \cdot 10^4 \sqrt{n_e} \frac{\text{рад}}{\text{сек}}; \sigma_{\omega_p} = \omega_p \frac{1}{2} \frac{\sigma_{n_e}}{n_e}$$

Через такую плазму при падении на неё электромагнитного излучения пройдут только те частоты, которые больше плазменной.

$I_{\text{разр}}, \text{ мА}$	$n_e, \cdot 10^{16} \frac{\text{част}}{\text{м}^3}$	$\sigma_{n_e}, \cdot 10^{16} \frac{\text{част}}{\text{м}^3}$	$\omega_p, \cdot 10^{13} \frac{\text{рад}}{\text{сек}}$	$\sigma_{\omega_p}, \cdot 10^{13} \frac{\text{рад}}{\text{сек}}$
5	5.533	0.239	1.317	0.028
3	4.084	0.024	1.132	0.003
1.5	1.843	0.049	0.760	0.010

Таблица 7: Результаты вычислений

Рассчитаем электронную поляризационную длину r_{De} по формуле

$$r_{De} = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e e^2}}; \sigma_{r_{De}} = r_{De} \sqrt{\left(\frac{1}{2} \frac{\sigma_{T_e}}{T_e}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{\sigma_{n_e}}{n_e}\right)^2}$$

$I_{\text{разр}}, \text{ мА}$	$T_e, \cdot 10^3 \text{ К}$	$\sigma_{T_e}, \cdot 10^3 \text{ К}$	$n_e, \cdot 10^{16} \frac{\text{част}}{\text{м}^3}$	$\sigma_{n_e}, \cdot 10^{16} \frac{\text{част}}{\text{м}^3}$	$r_{De}, \text{ мкм}$	$\sigma_{r_{De}}, \text{ мкм}$
5	52.928	0.058	5.533	0.239	6.408	0.138
3	42.702	0.059	4.084	0.024	6.697	0.020
1.5	41.809	0.058	1.843	0.049	9.865	0.131

Таблица 8: Результаты вычислений

Поскольку электронная поляризационная длина намного меньше линейных размеров плазмы, поэтому мы можем считать её **квазинейтральной**.

Рассчитаем дебаевский радиус экранирования r_D , используя следующую формулу, где $T_e \gg T_i$, а температура ионов равно комнатной ($T_i = 300\text{К}$)

$$r_D = \sqrt{\frac{kT_i}{4\pi n_e e^2}}, \sigma_{r_D} = r_D \frac{1}{2} \frac{\sigma_{n_e}}{n_e}$$

$I_{\text{разр}}, \text{ мА}$	$n_e, \cdot 10^{16} \frac{\text{част}}{\text{м}^3}$	$\sigma_{n_e}, \cdot 10^{16} \frac{\text{част}}{\text{м}^3}$	$r_D, \text{ мкм}$	$\sigma_{r_D}, \text{ мкм}$
5	5.533	0.239	4.82	0.11
3	4.084	0.024	5.60	0.01
1.5	1.843	0.049	8.35	0.01

Таблица 9: Результаты вычислений

6. Оценим среднее число ионов в дебаевской сфере

$$N_D = \frac{4}{3} \pi r_D^3 n_i; \sigma_{N_D} = N_D \sqrt{\left(3 \cdot \frac{\sigma_{r_D}}{r_D}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{n_i}}{n_i}\right)^2}$$

$I_{\text{разр}}, \text{ мА}$	$n_e, \cdot 10^{16} \frac{\text{част}}{\text{м}^3}$	$\sigma_{n_e}, \cdot 10^{16} \frac{\text{част}}{\text{м}^3}$	$r_D, \text{ мкм}$	$\sigma_{r_d}, \text{ мкм}$	N_D	σ_{N_D}
5	5.533	0.239	4.82	0.11	26	2
3	4.084	0.024	5.60	0.01	30	0
1.5	1.843	0.049	8.35	0.01	45	1

Таблица 10: Результаты вычислений

Поскольку мы получили, что $N_D \gg 1$, то есть выполняется условие идеальной плазмы, то нашу плазму можно считать **идеальной**.

7. Оценим степень ионизации плазмы (долю ионизированных атомов α), если давление в трубке $P = 2$ торр: $\alpha = n_i/n$, где n – общее число частиц в единицу объёма.

$$P = nkT_i \longleftrightarrow n = \frac{P}{kT_i}; \quad \sigma_n = n \frac{\sigma_{T_i}}{T_i}$$

$I_{\text{разр}}, \text{ мА}$	$T_e, \cdot 10^3 \text{ К}$	$n_e, \cdot 10^{16} \frac{\text{част}}{\text{м}^3}$	$\sigma_{n_e}, \cdot 10^{16} \frac{\text{част}}{\text{м}^3}$	$n, \cdot 10^{20}$	$\sigma_n, \cdot 10^{20}$	$\alpha, \cdot 10^{-4}$	$\sigma_\alpha, \cdot 10^{-4}$
5	52.928	5.533	0.239	3.656	0.004	1.513	0.065
3	42.702	4.084	0.024	4.531	0.006	0.901	0.005
1.5	41.809	1.843	0.049	4.628	0.006	0.398	0.011

Таблица 11: Результаты вычислений

8. Построим графики зависимостей электронной температуры и концентрации электронов от тока разряда $T_e(I_p)$ и $n_e(I_p)$.

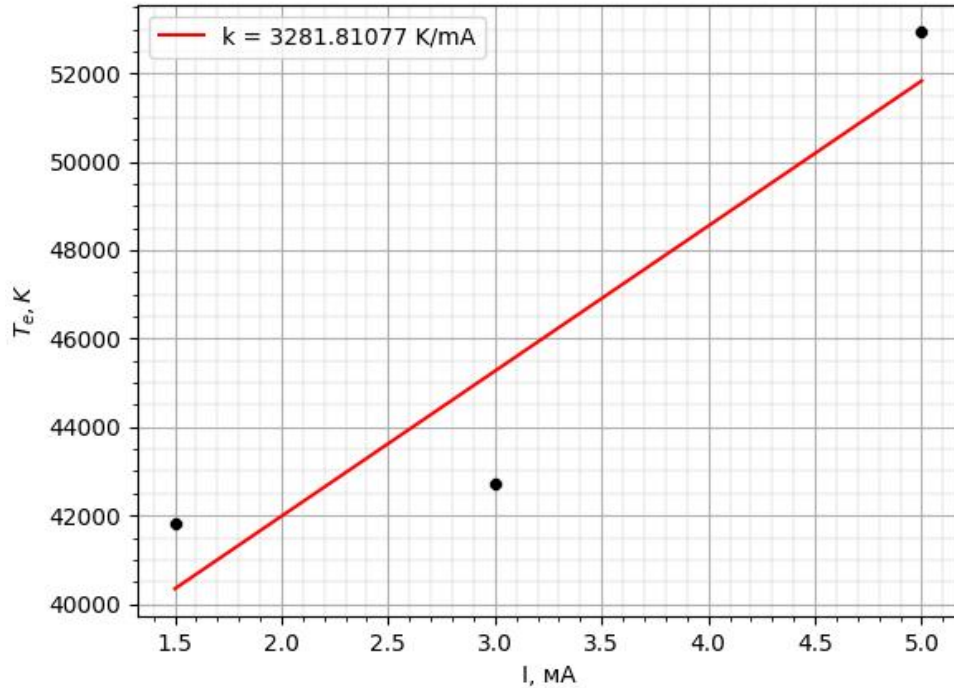


Рис. 8: График зависимости электронной температуры от тока разряда $T_e(I_p)$

Видим, что скорее всего в обоих случаях зависимость линейная, но по трём точкам сказать точно нельзя!

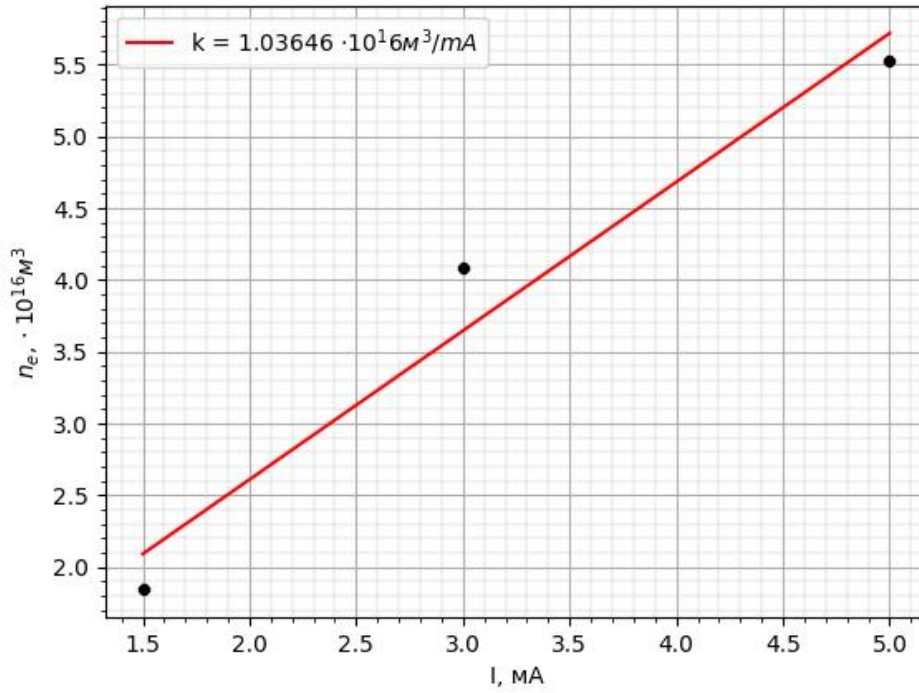


Рис. 9: График зависимости концентрации электронов от тока разряда $n_e(I_p)$

3 Подведение итогов и выводы

В этой лабораторной работе мы изучали плазму газового разряда в неоне, проверили свойство квазистатичности плазмы, а так же является ли наша плазма идеальной или нет.

При разных токах разряда мы определили несколько характеристик плазмы, которые представлены в таблице 12.

I_p , мА	kT_e , эВ	n_e , см ⁻³	ω_p , рад/сек	r_{De} , см	r_D , см	N_D	α
5	4.58	$5.533 \cdot 10^{16}$	$1.317 \cdot 10^{13}$	$6.408 \cdot 10^{-4}$	$4.82 \cdot 10^{-4}$	26	$1.513 \cdot 10^{-4}$
3	3.741	$4.084 \cdot 10^{16}$	$1.132 \cdot 10^{13}$	$6.697 \cdot 10^{-4}$	$5.60 \cdot 10^{-4}$	30	$0.901 \cdot 10^{-4}$
1.5	3.612	$1.843 \cdot 10^{16}$	$0.760 \cdot 10^{13}$	$9.865 \cdot 10^{-4}$	$8.35 \cdot 10^{-4}$	45	$0.398 \cdot 10^{-4}$

Таблица 12: Сводная таблица

Полученные результаты совпадают по порядку с табличными. Так же были оценены погрешности найденных величин.