

# Отчет о выполнении лабораторной работы 3.5.1

## Изучение плазмы газового разряда в неоне.

Фитэль Алёна, Попеску Полина  
группа Б06-103

15 сентября 2024 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  $\rho$  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

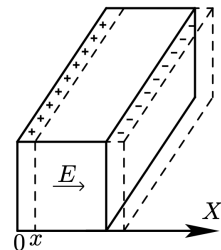
$$\varphi = \frac{Ze}{r} e^{-r/r_D}, \quad (3)$$

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:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n e^2}{m}}. \quad (5)$$

**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:

$$I_{иn} = 0.4neS\sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}.$$

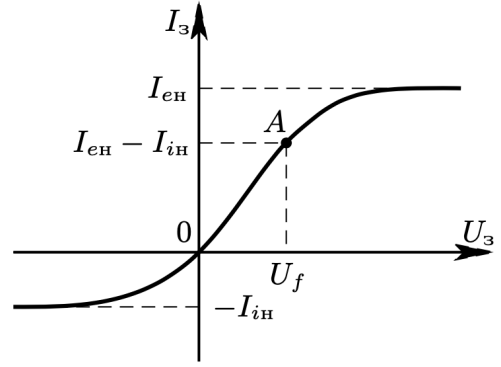


Рис. 2: Вольт-амперная характеристика одиночного зонда

**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 ( $I_1 = -I_2 = I$ ):

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

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

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока

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

Реальная зависимость выглядит несколько иначе и описывается формулой

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

Рис. 3: Вольт-амперная характеристика двойного зонда

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

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

## 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  $^{22}\text{Ne}$  при давлении 2 мм рт. ст. Катод и один из анодов (I или II) с помощью переключателя  $\Pi_1$  подключаются через балластный резистор  $R_\sigma$  ( $\sim 450$  кОм) к регулируемому высоковольтному источнику питания (ВИП) с выходным напряжением до 5 кВ.

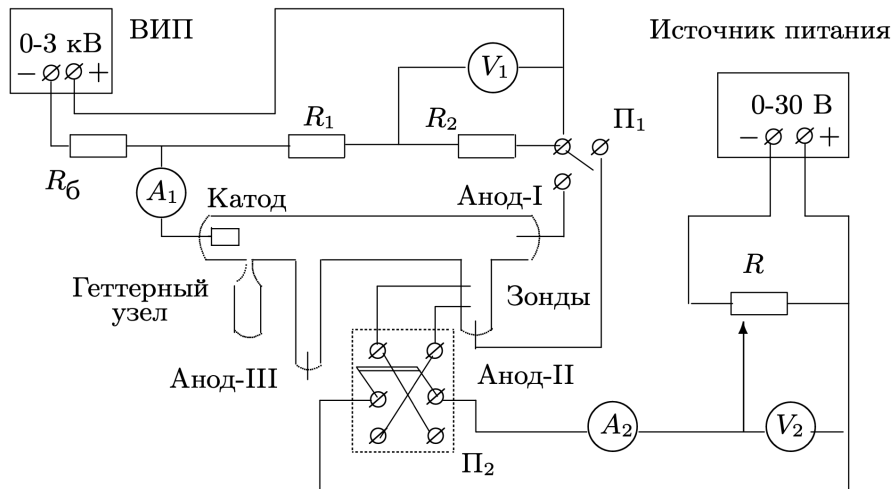


Рис. 4: Схема установки для исследования газового разряда

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  $\Pi_2$  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  $V_2$ (GDM). Для измерения зондового тока используется мультиметр  $A_2$ (GDM). Анод-III в нашей работе не используется.

## Результаты измерений и обработка данных

Для начала, плавно увеличивая напряжение на ВИП определим напряжение зажигания разряда  $U_{\text{зж}} = 31.68\text{В}$ .

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	1.5	2.0	2.5	3	3.5	4	4.5
$U_p \downarrow$ , В	31.69	30.44	28.38	27.65	27.25	27.15	27.18
$U_p \uparrow$ , В	31.58	29.37	28.11	27.56	27.23	27.16	27.18

Таблица 1: Вольт-амперная характеристика разряда

Изобразим полученные данные на графике (рис. 5)

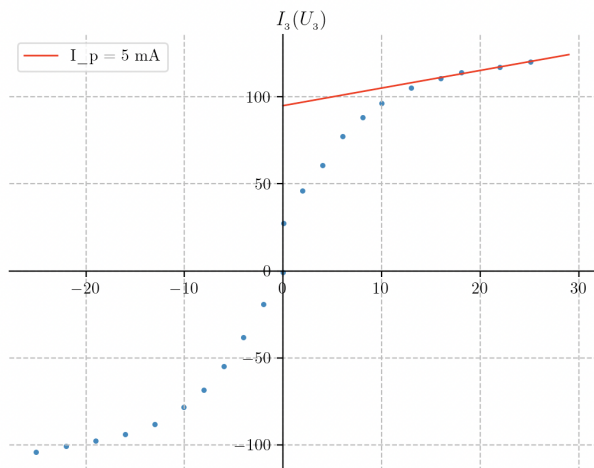
4) GPS :  $U_2 = 25$ , GDM :  $U = 24.98$

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

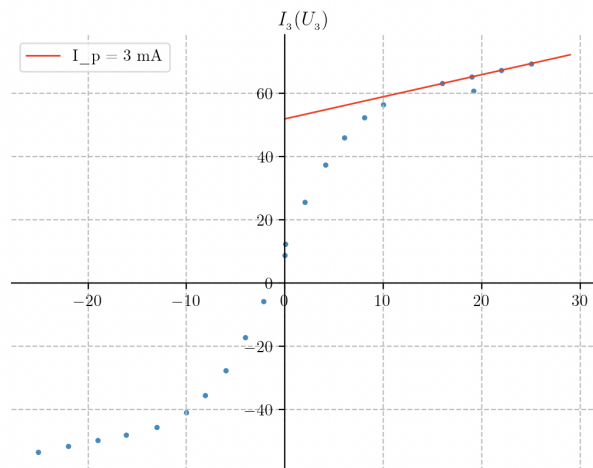
$I_p = 5 \text{ mA}$											
$U_3, \text{ B}$	25.081	22.006	18.079	16.009	13.019	10.014	8.060	6.030	4.007	1.997	0.052
$I_3, \text{ мкА}$	120.20	117.17	114.15	110.51	105.10	96.53	88.30	77.24	60.83	46.01	27.36
$-U_3, \text{ B}$	25.064	22.002	19.010	16.040	13.043	10.071	8.053	6.022	4.006	1.986	0.014
$-I_3, \text{ мкА}$	104.11	100.86	97.73	94.01	88.11	78.39	68.45	55.01	38.19	19.26	0.73
$I_p = 4 \text{ mA}$											
$U_3, \text{ B}$	25.068	22.105	19.010	16.094	13.028	10.224	8.028	6.112	4.060	1.996	0.028
$I_3, \text{ мкА}$	92.48	89.86	87.25	84.08	80.25	75.37	68.72	60.50	48.76	33.92	17.46
$-U_3, \text{ B}$	25.069	22.064	19.102	16.119	13.025	10.193	8.018	6.162	4.121	2.019	0.030
$-I_3, \text{ мкА}$	75.98	73.44	71.02	68.31	64.33	57.87	49.80	40.17	26.55	9.84	-7.43
$I_p = 3 \text{ mA}$											
$U_3, \text{ B}$	25.065	21.977	19.012	16.002	13.150	10.024	8.092	6.065	4.097	1.997	0.019
$I_3, \text{ мкА}$	69.52	67.35	65.31	63.17	60.74	56.61	52.44	46.02	37.43	25.67	12.47
$-U_3, \text{ B}$	25.068	22.035	19.009	16.129	13.040	10.050	8.086	6.026	4.006	2.154	0.018
$-I_3, \text{ мкА}$	53.36	51.52	49.74	48.00	45.55	40.83	35.54	27.52	17.21	5.81	-8.84
$I_p = 2 \text{ mA}$											
$U_3, \text{ B}$	25.069	22.129	19.174	16.212	13.041	10.030	8.006	6.084	4.084	2.051	0.018
$I_3, \text{ мкА}$	46.43	44.91	43.39	41.83	40.09	37.57	34.81	30.94	25.28	17.72	8.54
$-U_3, \text{ B}$	25.069	22.046	18.983	16.006	13.058	10.028	8.065	5.990	4.143	2.037	0.020
$-I_3, \text{ мкА}$	33.01	31.87	30.76	29.68	28.33	25.48	22.19	17.03	10.82	2.03	-7.33
$I_p = 1 \text{ mA}$											
$U_3, \text{ B}$	25.069	22.135	19.076	16.085	12.995	10.018	8.051	6.020	4.186	2.040	0.017
$I_3, \text{ мкА}$	24.85	23.94	23.00	22.08	21.04	19.57	18.04	15.81	13.12	9.10	4.59
$-U_3, \text{ B}$	25.069	22.076	19.010	16.041	13.005	10.032	8.072	6.039	4.091	2.065	0.012
$-I_3, \text{ мкА}$	15.91	15.47	15.01	14.54	13.90	12.40	10.59	7.90	4.55	0.36	-4.33

Таблица 2: Зондовые характеристики при разных токах

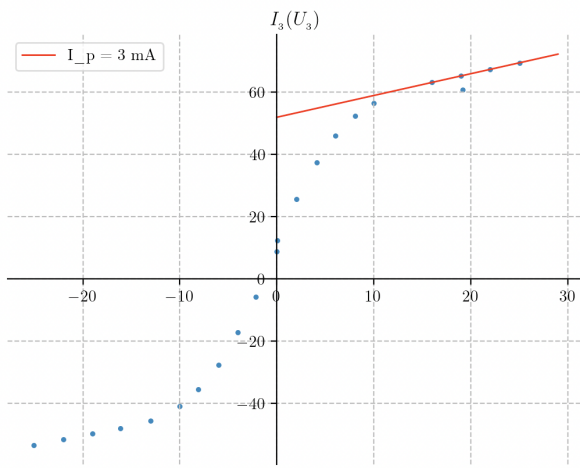
Теперь отобразим данные на графиках и определим  $I_{iH}$  и производную в нуле.



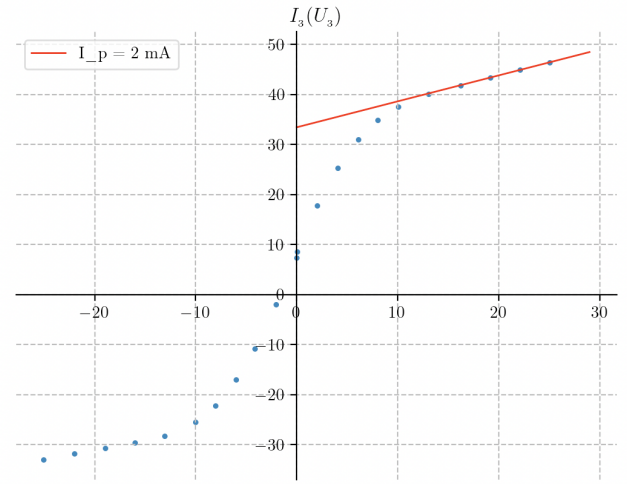
(а) ВАХ двойного зонда при  $I_p = 5 \text{ mA}$



(б) ВАХ двойного зонда при  $I_p = 4 \text{ mA}$



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



(d) ВАХ двойного зонда при  $I_p = 2$  мА

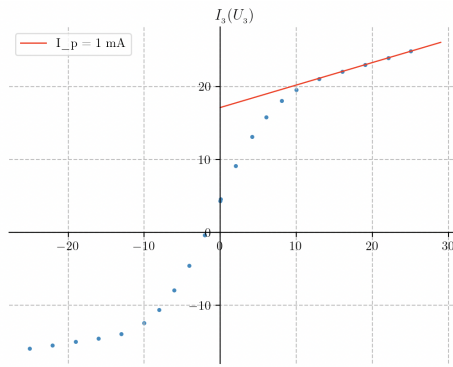


Рис. 5: ВАХ двойного зонда при  $I_p = 1$  мА

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

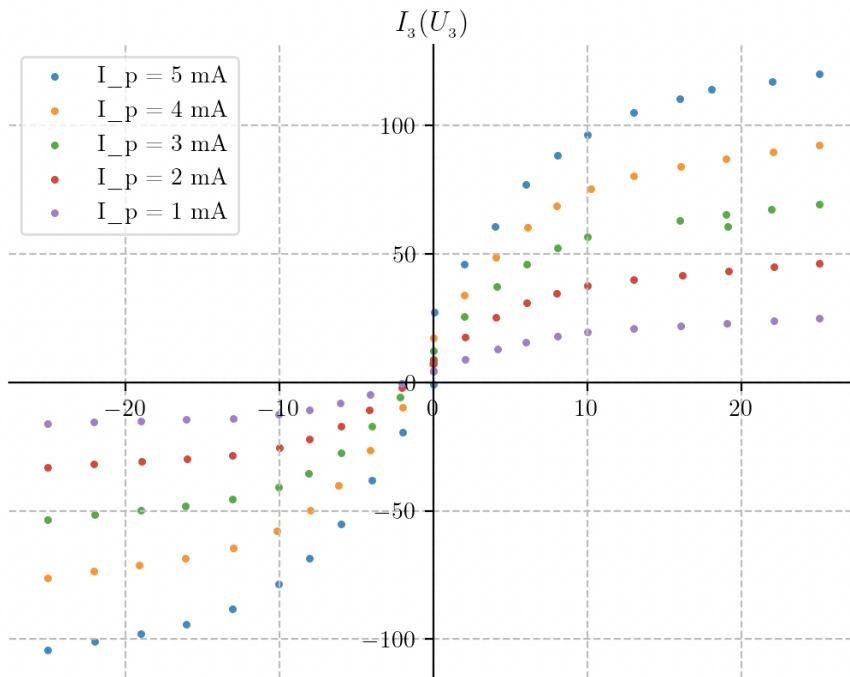


Рис. 6: ВАХ двойного зонда при различных токах

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  $\omega_p$

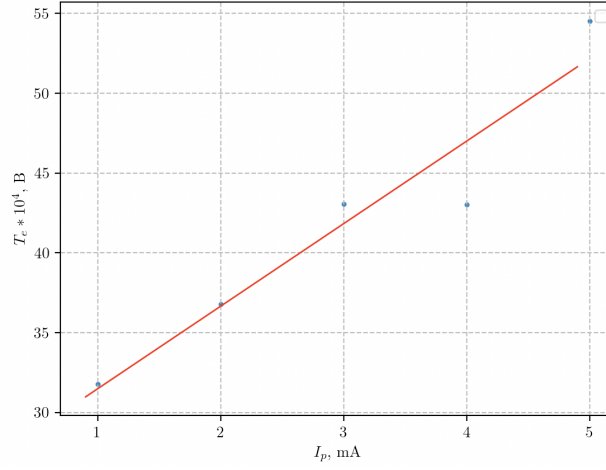


Рис. 7: График зависимости  $T_e(I_p)$

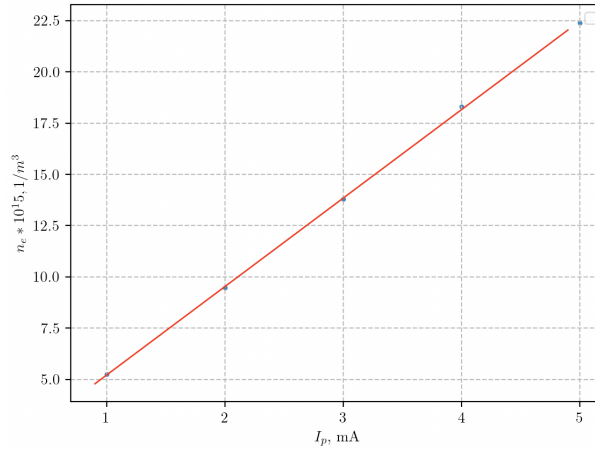


Рис. 8: График зависимости  $n_e(I_p)$

Расчитаем 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  $\alpha$  получим по соотношению  $\alpha = n_i/n$ , где  $n$  – общее число частиц в единице объема (давление  $P = nkT_i \approx 1$  мбар). Все результаты занесем в таблицу 3.

$I_p$ , mA	$I_n$ , mA	$\frac{dI}{dU} _{U=0}$ , $\frac{\text{mA}}{\text{B}}$	$T_e$ , $10^4$ , K	$n_e$ , $10^{15} \text{ м}^{-3}$	$\omega_p$ , $10^3 \frac{\text{рад}}{\text{сек}}$	$r_{De}$ , $10^{-4} \text{ см}$	$\langle N_D \rangle$ , $10^4$ частиц	$\alpha$ , $10^{-10}$
5	95 ± 4	1,01 ± 0,5	54 ± 3	22,4	8,9	7,6 ± 0,1	41 ± 1	8,37 ± 0,6
4	69 ± 3	0,93 ± 0,4	43 ± 3	18,3	8,0	8,3 ± 0,1	45 ± 2	6,81 ± 0,5
3	52 ± 3	0,70 ± 0,4	43 ± 3	13,8	6,9	9,6 ± 0,1	52 ± 2	5,12 ± 0,05
2	33 ± 2	0,52 ± 0,2	36 ± 2	9,5	5,7	11,7 ± 0,1	62 ± 2	3,52 ± 0,04
1	17 ± 2	0,31 ± 0,2	32 ± 2	5,24	4,3	15,6 ± 0,1	84 ± 3	1,95 ± 0,04

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.