

# Отчет о выполнении лабораторной работы 3.5.1

## Изучение плазмы газового разряда в неоне

Костылев Влад, Б01-208

16 декабря 2023 г.

### Аннотация

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

**В работе используются:** стеклянная газоразрядная трубка, наполненная неоном; высоковольтный источник питания; источник питания постоянного тока; делитель напряжения; потенциометр; амперметры; вольтметры; переключатели.

## 1 Теоретическая справка

### Введение

Как известно, вещество может находиться в трёх агрегатных состояниях — твёрдом, жидком и газообразном, причём эти состояния последовательно сменяются по мере возрастания температуры. Если и дальше нагревать газ, 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. Если степень ионизации газа (отношение числа ионизованных атомов к их полному числу) оказывается достаточно велика, то такой газ может обладать качественно новыми свойствами. Поведение заряженных частиц приобретает коллективный характер, так что описание свойств среды не может быть сведено к описанию обычного газа, содержащего некоторое количество отдельных заряженных частиц. Такое состояние ионизованного газа называется **плазмой**. Плазму называют также четвёртым состоянием вещества.

При этом частицы в плазме стремятся распределиться в пространстве таким образом, чтобы средняя плотность заряда была равна нулю. Равенство концентраций положительных и отрицательных частиц — квазинейтральность — нарушается, как правило, лишь в микроскопических масштабах из-за тепловых флуктуаций.

### Плазма

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

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

Для одномерного случая:

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi \Rightarrow \frac{d^2\varphi}{dx^2} = -4\pi\rho. \quad (1)$$

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

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

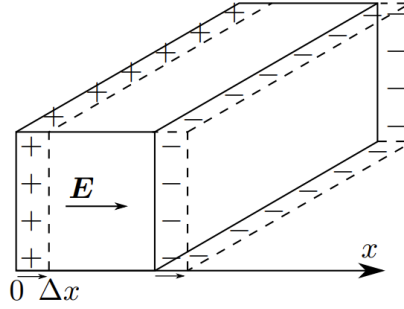
Тогда из (1) в предположении  $\frac{e\varphi}{kT_e} \ll 1$  получим

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

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, 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:

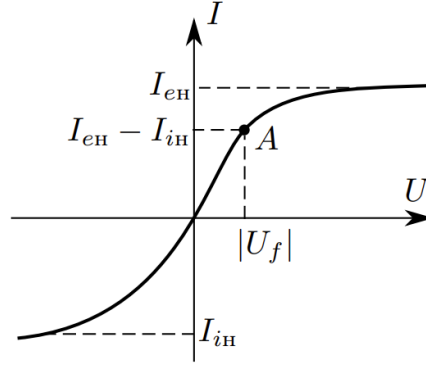
$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi ne^2}{m}}. \quad (5)$$

## 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:

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

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  $I_{eH}$  – электронный ток насыщения, а минимальное  $I_{iH}$  – ионный ток насыщения. Значение из эмпирической формулы Бомона:

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

## 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

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

Аналогично через второй получим

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

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

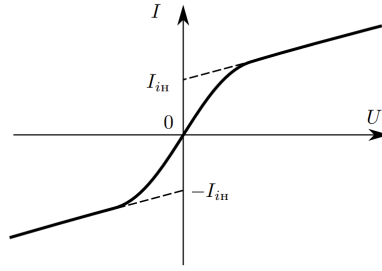
$$\Delta U_1 = \frac{kT_e}{e} \ln\left(1 - \frac{I}{I_{iH}}\right)$$

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

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока

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

Реальная зависимость выглядит несколько иначе и описывается формулой



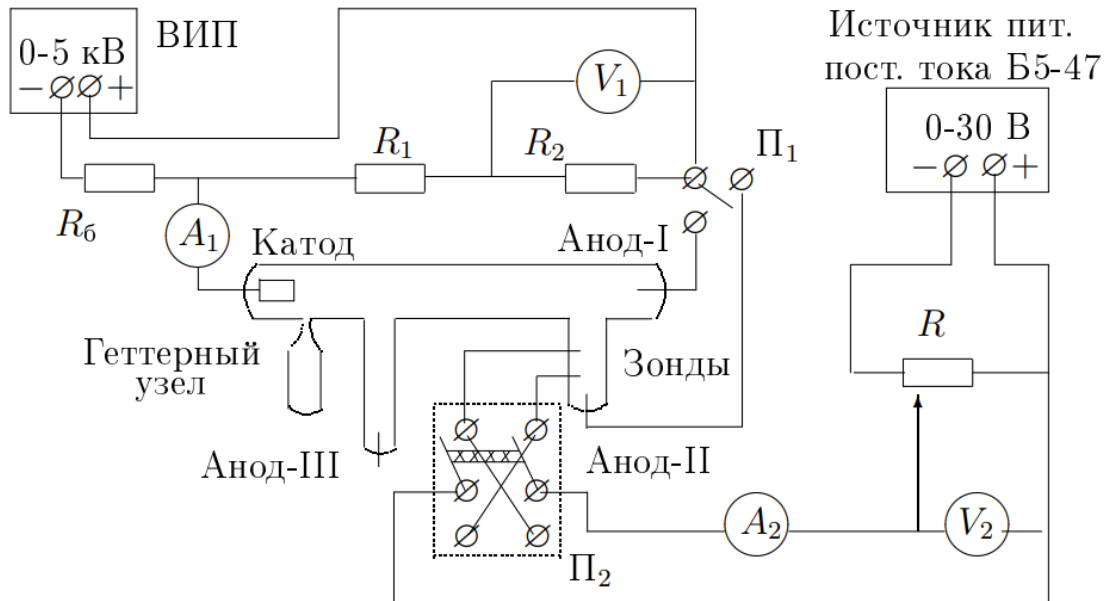
$$I = I_{in} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e} + AU. \quad (11)$$

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

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

## Описание установки

Стеклянная газоразрядная трубка имеет холодный (не накаливаемый) 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 и II) с помощью переключателя  $\Pi_1$  подключается через балластный резистор  $R_6$  ( $\approx 450$  кОм) к регулируемому ВИП с выходным напряжением до 5 кВ.



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 находятся 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  $V_2$ . Для измерения зондового тока используется мультиметр  $A_2$ .

## 2 Используемое оборудование

**В работе используются:** стеклянная газоразрядная трубка, наполненная неоном; высоковольтный источник питания; источник питания постоянного тока; делитель напряжения; потенциометр; амперметры; вольтметры; переключатели.

## 3 Результаты измерений и обработка данных

### 1. Вольт-амперная характеристика разряда

Напряжение зажигания разряда:

$$U_{\text{заж}} = (215,1 \pm 0,1) \text{ В}$$

Теперь построим вольт-амперную характеристику разряда (С помощью вольтметра  $V_1$  и амперметра  $A_1$ ) в диапазоне от 0,5 мА до 5 мА по току.

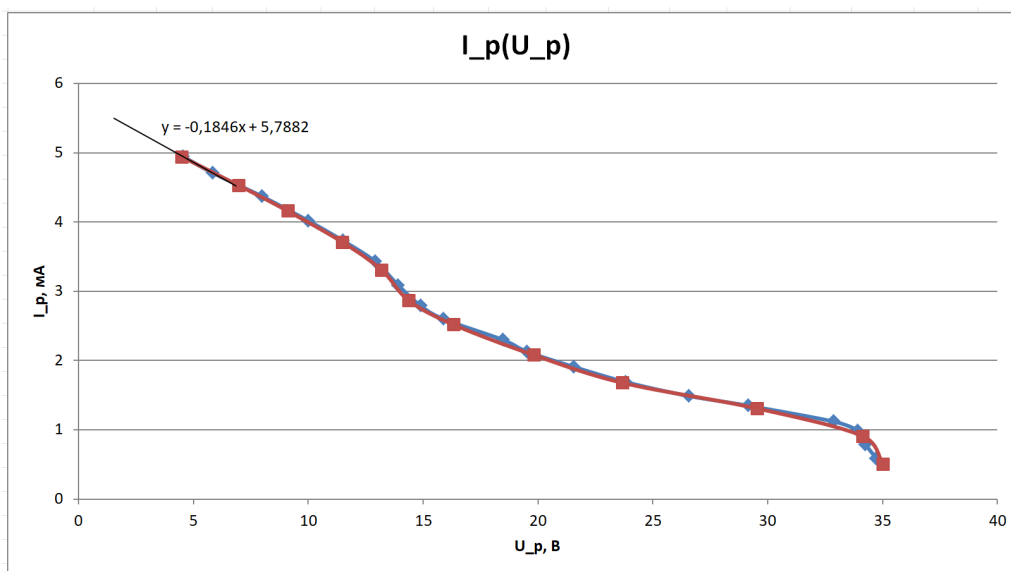
При нарастании тока получаем следующее:

<b>I<sub>p</sub>, мА</b>	0,59	0,79	0,99	1,12	1,35	1,49	1,69	1,91	2,13	2,3	2,6	2,79	3,09	3,43	3,73	4,02	4,37	4,71	4,95
<b>U<sub>p</sub>, В</b>	34,73	34,26	33,91	32,88	29,15	26,56	23,83	21,57	19,52	18,48	15,89	14,9	13,91	12,92	11,52	10	8	5,84	4,54

При убывании:

<b>I<sub>p</sub>, мА</b>	4,94	4,53	4,16	3,71	3,31	2,87	2,52	2,08	1,68	1,31	0,91	0,5
<b>U<sub>p</sub>, В</b>	4,51	6,97	9,11	11,49	13,19	14,37	16,32	19,83	23,68	29,54	34,14	35,03

Изобразим на одном графике (убывание - красное, нарастание - синее):



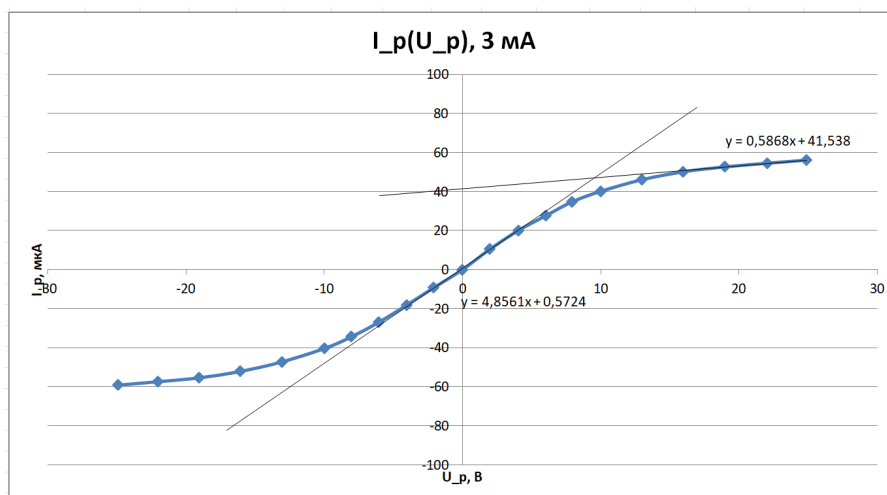
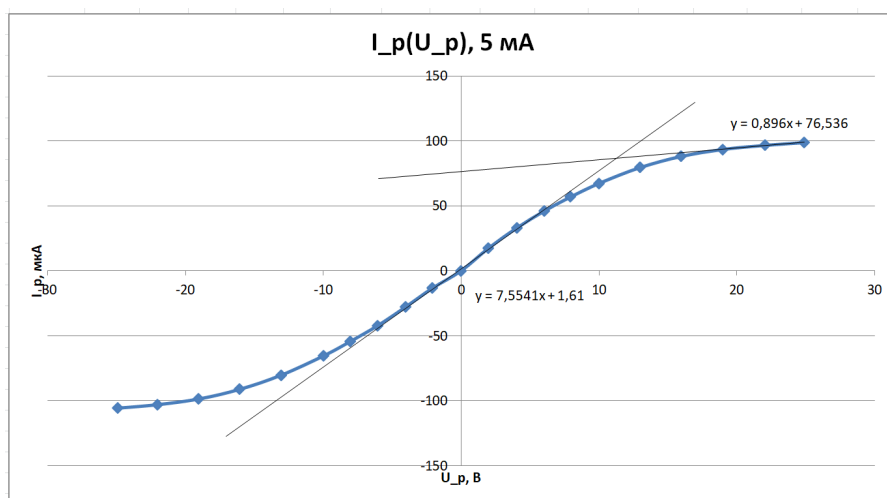
Из графика найдем максимальное дифференциальное сопротивление разряда:

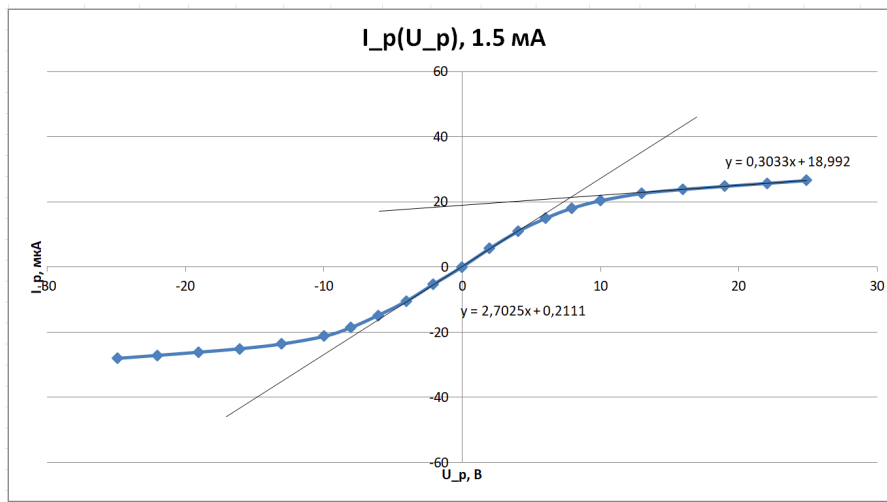
$$R_{\partial u \phi} = \frac{1}{0,1846} * 10^3 = (5,42 \pm 0,31) \kappa O_M$$

## 2. Зондовые характеристики

Теперь установим максимально допустимый разрядный ток  $I_p \approx 5 \text{ mA}$ , а на зонде установим максимальное напряжение  $U_3 \approx 25 \text{ B}$ .

Далее построим вольт-амперную характеристику двойного зонда  $I_3(U_3)$  в диапазоне от  $-U_3^{max}$  до  $U_3^{max}$  при фиксированном токе разряда  $I_p$ . Проведём данные измерения при трёх различных значениях тока разряда 1,5 мА, 3,0 мА и 5,0 мА. Отцентрируем кривую.

[illegible]



Найдем для каждого тока  $I_{in}$ :

$$5.0 mA : I_{in} = (76,54 \pm 2,37) \mu A$$

$$3.0 mA : I_{in} = (41,54 \pm 2,23) \mu A$$

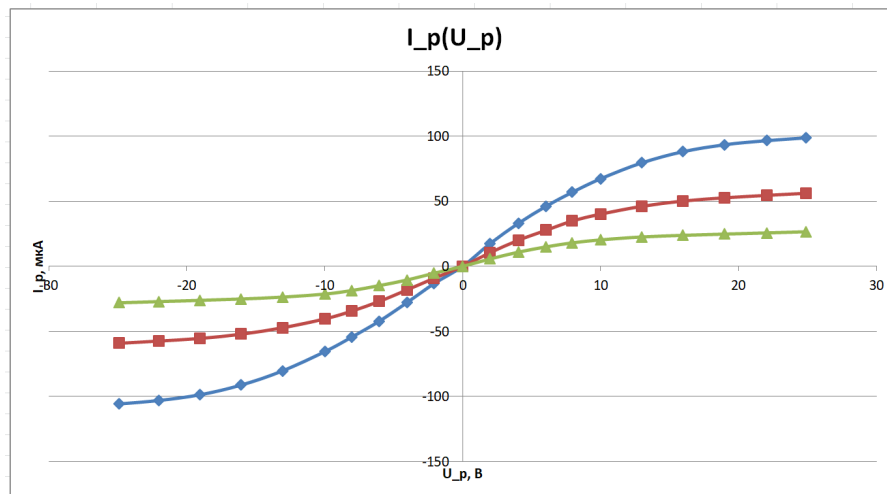
$$1.5 mA : I_{in} = (18,99 \pm 1,64) \mu A$$

Теперь найдем температуру электронов по формуле (12):

$$5.0 mA : T_e = (5,87 \pm 0,41) * 10^4 K$$

$$3.0 mA : T_e = (4,96 \pm 0,52) * 10^4 K$$

$$1.5 mA : T_e = (4,07 \pm 0,38) * 10^4 K$$



Полагая, что  $n_e = n_i$ , найдем  $n_e$ , из формулы:

$$n_e = \frac{I_{in}}{0,4eS\sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}}$$

$$S = \pi dl = 3,27 * 10^{-6} m^2 \quad m_i = 22 * 1,66 * 10^{-27} kg$$

Тогда:

$$5.0 mA : n_e = (5,49 \pm 0,62) * 10^{16} m^{-3}$$

$$3.0 mA : n_e = (3,24 \pm 0,57) * 10^{16} m^{-3}$$

$$1.5\text{mA} : n_e = (1,64 \pm 0,35) * 10^{16} \text{м}^{-3}$$

Рассчитаем плазменную частоту колебаний электронов по следующей формуле:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} = 5,6 * 10^4 \sqrt{n_e} [CGC]$$

$$5.0\text{mA} : \omega_p = (1,31 \pm 0,10) * 10^6 \text{рад/с}$$

$$3.0\text{mA} : \omega_p = (1,01 \pm 0,09) * 10^6 \text{рад/с}$$

$$1.5\text{mA} : \omega_p = (0,72 \pm 0,08) * 10^6 \text{рад/с}$$

Теперь рассчитаем электронную поляризационную длину по формуле:

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

$$5.0\text{mA} : r_{De} = (67,7 \pm 4,26) * 10^{-6} \text{м}$$

$$3.0\text{mA} : r_{De} = (81,1 \pm 5,61) * 10^{-6} \text{м}$$

$$1.5\text{mA} : r_{De} = (103,2 \pm 5,91) * 10^{-6} \text{м}$$

рассчитаем дебаевский радиус, по похожей формуле, только  $T_i \approx 300\text{K}$ :

$$5.0\text{mA} : r_D = (4,84 \pm 0,23) * 10^{-6} \text{м}$$

$$3.0\text{mA} : r_D = (6,30 \pm 0,31) * 10^{-6} \text{м}$$

$$1.5\text{mA} : r_D = (8,86 \pm 0,34) * 10^{-6} \text{м}$$

Оценим среднее число ионов в дебаевской сфере:

$$N_D = \frac{4}{3} \pi r_D^3 n_i$$

$$5.0\text{mA} : N_D = 26$$

$$3.0\text{mA} : N_D = 34$$

$$1.5\text{mA} : N_D = 48$$

I <sub>p</sub> , мА	T <sub>e</sub> , 10 <sup>4</sup> *K	n <sub>e</sub> , 10 <sup>16</sup> *м <sup>-3</sup>	w <sub>p</sub> , 10 <sup>6</sup> *рад/с	R <sub>De</sub> , 10 <sup>-6</sup> *м	R <sub>D</sub> , 10 <sup>-6</sup> *м	N <sub>D</sub>	a
5	5,87	5,49	1,31	67,7	4,84	26	9
3	4,96	3,24	1,01	81,1	6,3	34	5
1,5	4,07	1,64	0,72	103,2	8,86	48	3

## 4 Заключение

В заключение можно сказать, что в данной лабораторной работе мы изучили вольт-амперную характеристику тлеющего разряда, а также свойства плазмы методом зондовых характеристик.