

Лабораторная работа 3.5.1

Сидорчук Максим Б01-304

21 декабря 2024 г.

Теория

Плазма

Из-за теплового движения в плазме электроны могут смещаться относительно ионов и образовывать неоднородности. В этих неоднородностях возникает электрическое поле, которое стремится восстановить баланс, из-за чего происходят колебания с частотой

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}}$$

За характерное время колебаний электроны за счет теплового движения смещаются на

$$r_D \sim \frac{v_e}{\omega_p} = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e e^2}}$$

r_D - дебаевский радиус, k - константа Больцмана.

Если поместить в плазму пробную (допустим, положительную) частицу, то электроны будут скапливаться около этой частицы, экранируя её поле. Потенциал точечного заряда будет иметь в плазме следующий вид:

$$\varphi(r) = \frac{q}{r} e^{-\frac{r}{r_D}}$$

где $r_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e e^2}}$ - радиус Дебая в случае равновесной плазмы. Если температуры электронов и ионов сильно отличаются, то следует определять отдельно величину радиуса экранирования для электронов и для ионов. Итоговый радиус будет

$$r_D = (r_{De}^{-2} + r_{Di}^{-2})^{-1/2}$$

То есть если $T_i \ll T_e$, то $r_D \approx r_{Di}$

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:

$$I_{e0} = \frac{n\langle v_e \rangle}{4} eS,$$

$$I_{i0} = \frac{n\langle v_i \rangle}{4} eS,$$

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

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

Электронный ток насыщения можно определить по тепловому движению:

$$I_{ен} = \frac{n_e S}{4} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}}$$

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

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

Аналогично через второй получим

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

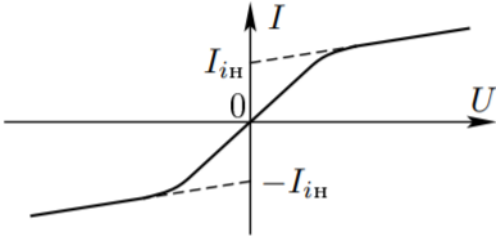
Из (7) и (8) с учётом последовательного соединения зондов ($I_1 = -I_2 = I$):

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

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

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока

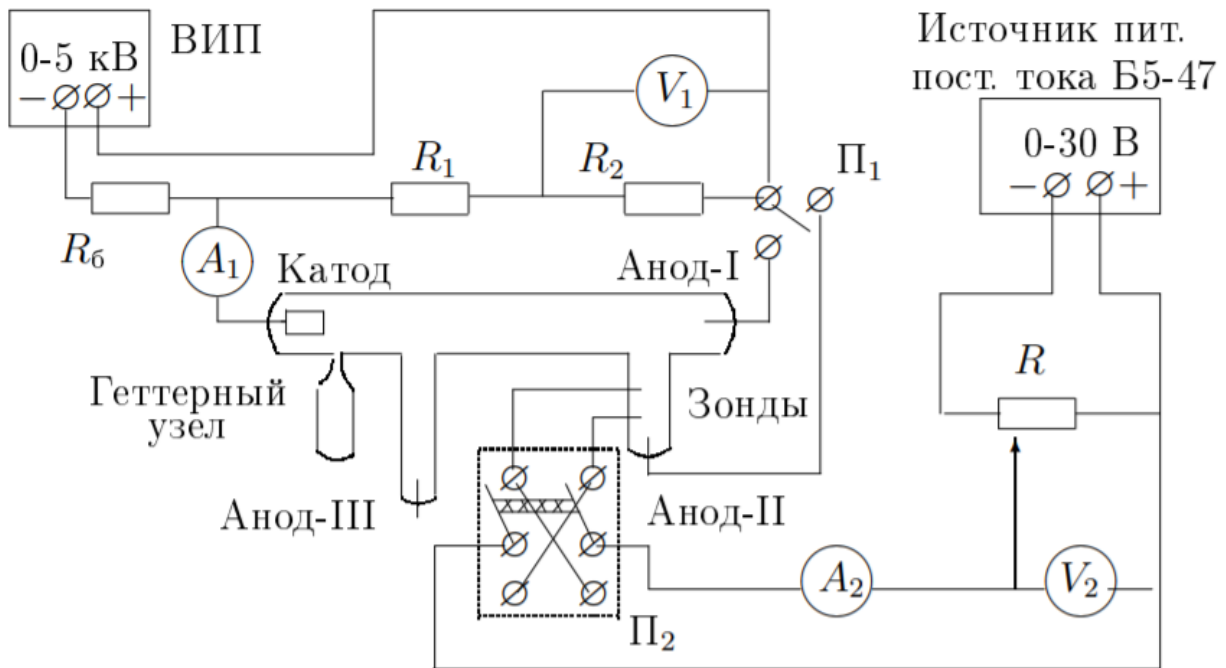
$$U = \frac{kT_e}{e} \ln \frac{1 - I/I_{in}}{1 + I/I_{in}}, \quad I = I_{in} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e}.$$



Зависимость выглядит примерно так. Из 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 α и $A \rightarrow 0$ получим:

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

Описание установки



Стеклянная газоразрядная трубка имеет холодный (ненакаливаемый) полый катод, три анода и *геттерный* узел – стеклянный баллон, на внутреннюю поверхность которого напылена газопоглощающая плёнка (*геттер*). Трубка наполнена изотопом неона ^2Ne при давлении 2 мм рт. ст. Катод и один из анодов (I и II) с помощью переключателя Π_1 подключается через балластный резистор R_6 (≈ 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 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 . Для измерения зондового тока используется мультиметр A_2 .

Ход работы

0.1 Одиночный зонд

Измеряем напряжение зажигания в лампе: $U_{\text{зж}} \approx 215$ В.
Снимаем ВАХ газового разряда:

I , мА	U , В
0.305	360.00
0.463	351.76
0.587	348.60
0.705	344.47
0.795	341.13
0.904	335.13
1.061	317.66
1.208	294.55
1.390	272.79
1.590	259.60
1.810	248.95
2.001	240.16
2.532	223.12
3.019	207.42
3.520	199.40
4.047	196.35
4.516	192.93
5.007	189.70

Построим АВХ и определим максимальное дифференциальное сопротивление разряда $R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI}$. Оно будет соответствовать участку с максимальным (по модулю) наклоном графика UI :

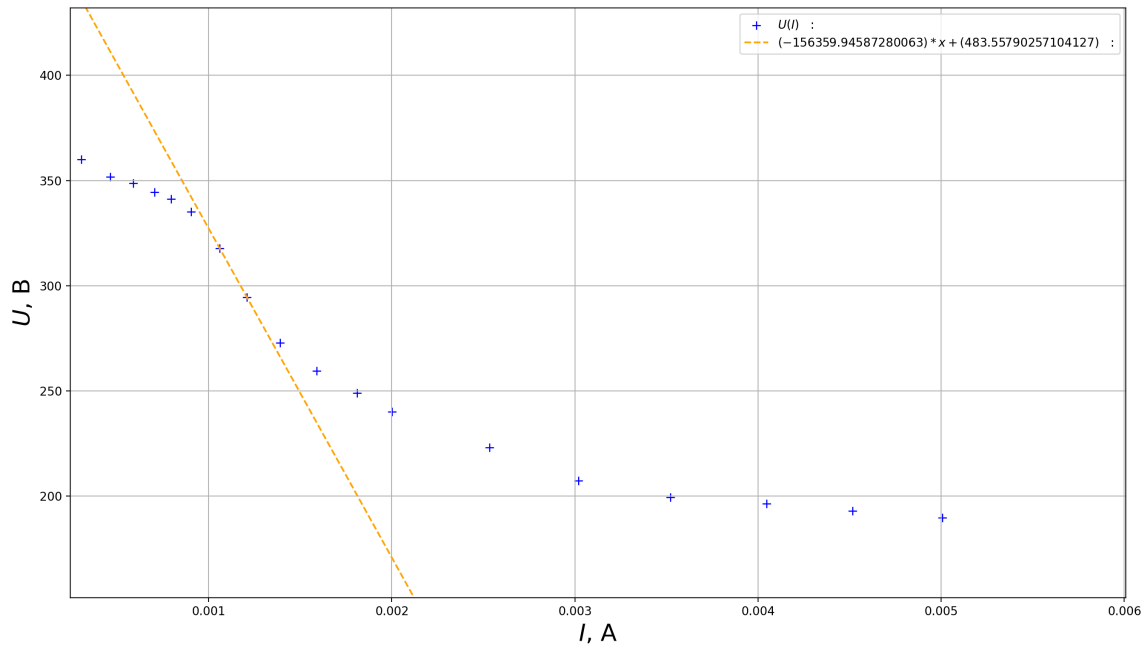
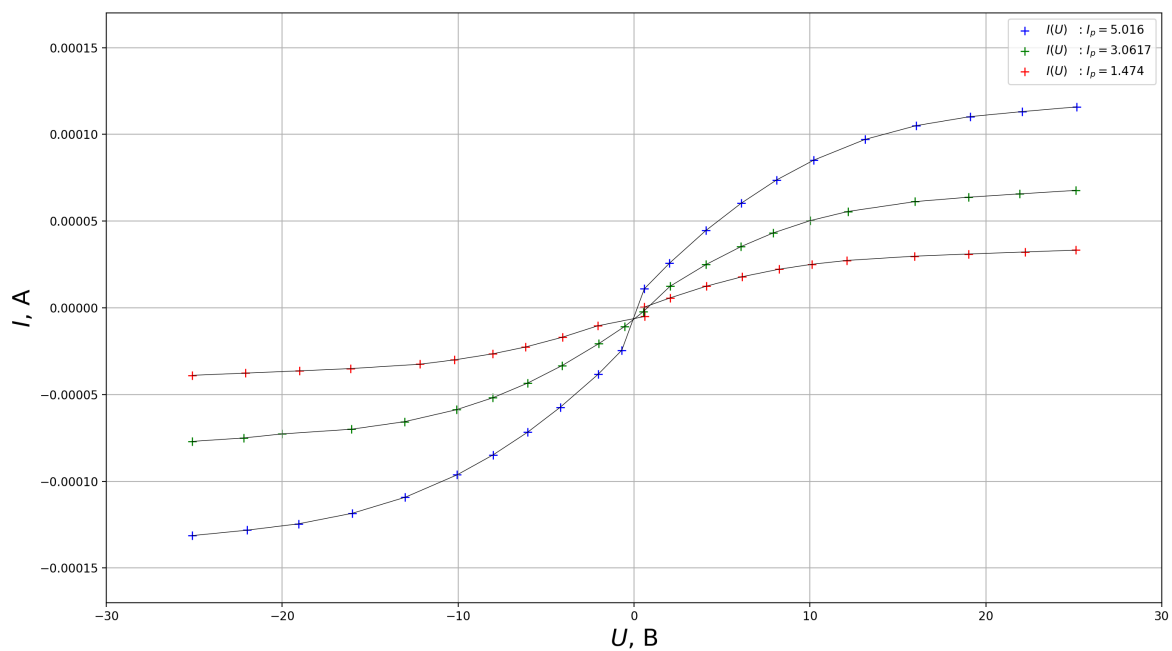


Рис. 1: АВХ газового разряда в неоне

Получаем (с учетом делителя и порядка величин) $R_{\text{диф}} \approx 1.56 \cdot 10^5$ Ом. Наш график соответствует участку поднормального тлеющего разряда (см. приложение к лабораторной работе), а при токе $I \approx 3$ мА он начинает переходить в нормальный тлеющий разряд.

С помощью вольтметра V_2 и амперметра A_2 снимем ВАХ двойного зонда $I_2 = f(U_2)$ при фиксированном токе разряда I_p в трубке в диапазоне $-25 \div 25$ В, процессе измерений меняя полярность зонда при нулевом токе. Измерения проведём для $I_p = 5,02$ мА, $I_p = 3,02$ мА и $I_p = 1,522$ мА.



Видно, что чем меньше ток, тем менее крутая кривая получается. Проанализируем графики по отдельности, чтобы найти их наклон в начале и пересечение асимптот с осью ординат. Данные будем заносить в таблицу. Ионный ток насыщения определим через асимптоты, затем по наклону кривой в точке $U = 0$ найдем концентрацию электронов в плазме.

При токе $I_p = 5,02$ мА первая и последняя точка несколько выбиваются из зависимости, скорее всего, потому что I_p изменялся во время проведения эксперимента и к концу измерений на этом токе бл $I_p = 5,078$ мА. Эти точки мы убрали из рассмотрения. В оставшихся измерениях ток I_p менялся не очень сильно. В дальнейших измерениях будем брать значения тока насыщения ионов, измеренные по верхней ветке.

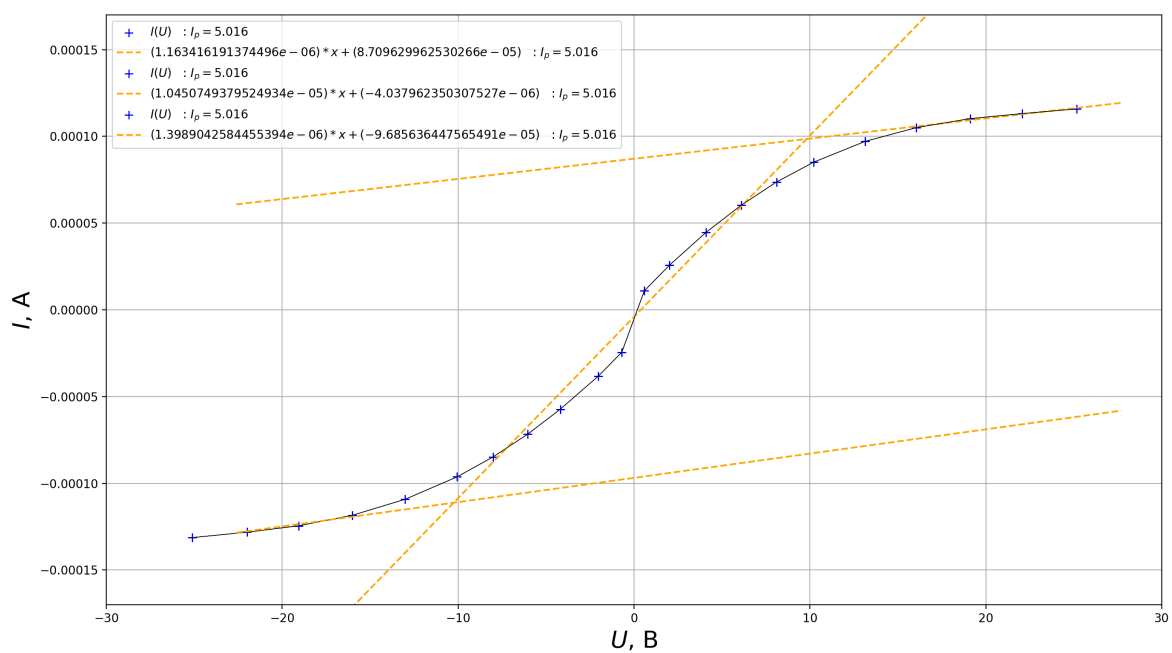


Рис. 2: ВАХ зонда при $I_p = 5,02$ мА

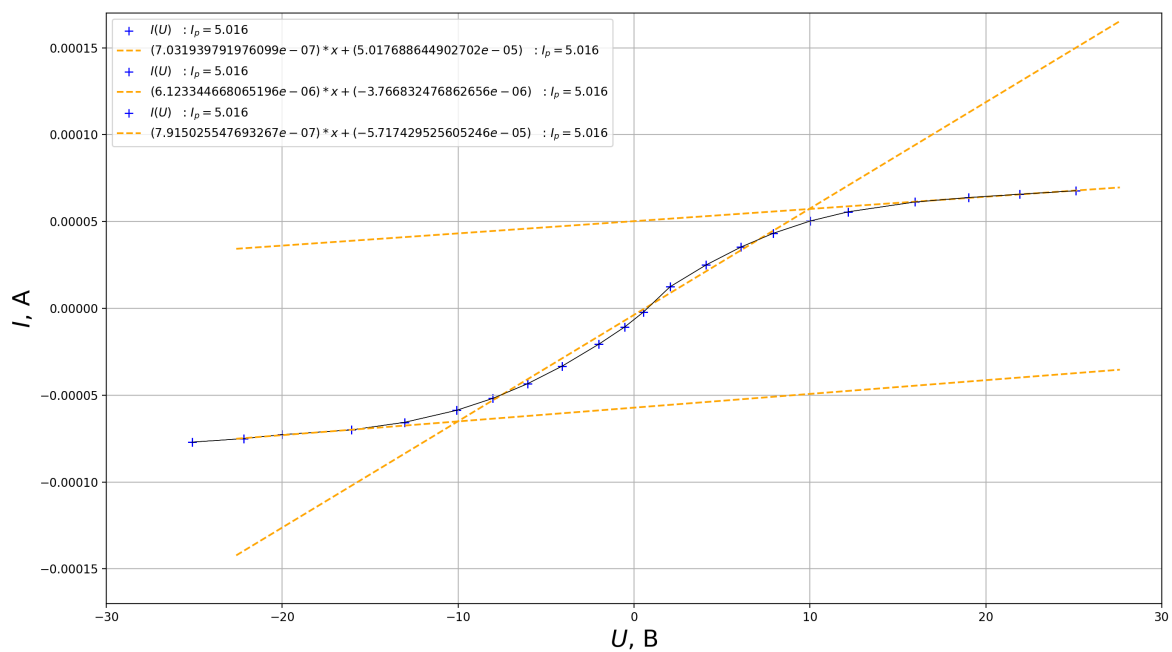


Рис. 3: ВАХ зонда при $I_p = 3,06$ мА

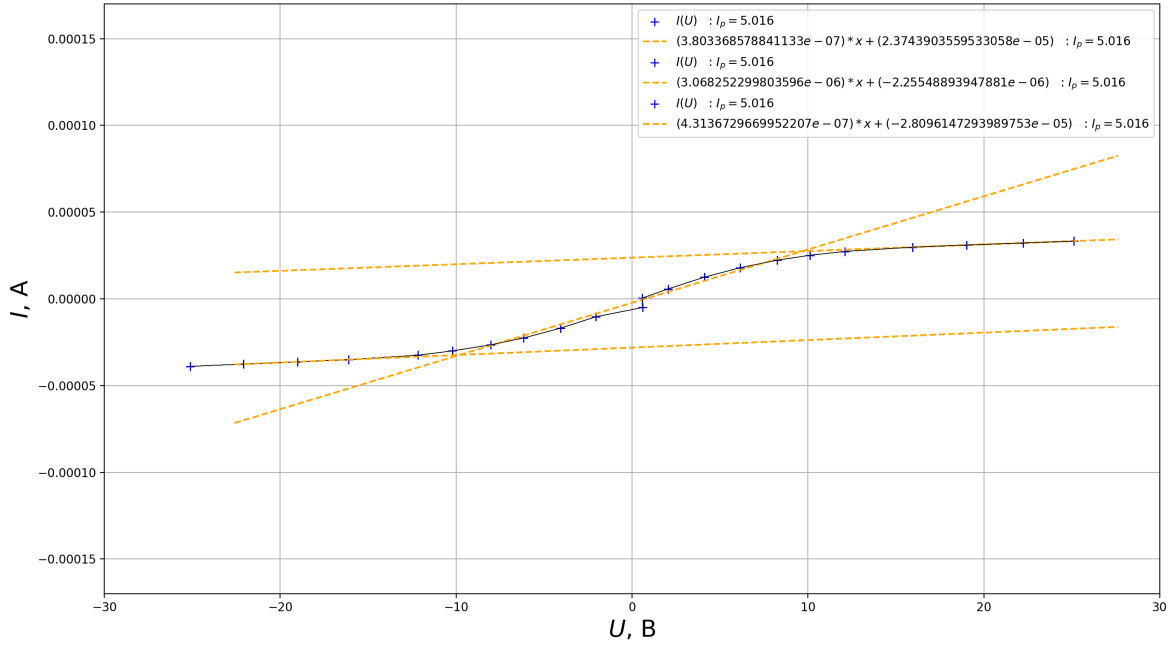


Рис. 4: ВАХ зонда при $I_p = 1,47$ мА

I_p , мА	T_e , 10^3 К	kT_e , эВ	n_e , 10^{16} м $^{-3}$	ω_p , $10^9 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	r_{De} , 10^{-3} см	r_D , 10^{-4} см
5.02	65.5 ± 4.5	5.6 ± 0.4	5.17 ± 0.37	12.8 ± 0.5	7.76 ± 0.28	5.25 ± 0.19
3.06	66.0 ± 3.3	5.7 ± 0.3	3.95 ± 0.21	11.2 ± 0.3	8.92 ± 0.24	6.01 ± 0.16
1.47	50.6 ± 1.2	4.4 ± 0.1	2.08 ± 0.03	8.1 ± 0.1	10.75 ± 0.07	8.28 ± 0.06

Таблица 1: Результаты вычислений

r_D рассчитываем в предположении, что $T_i \ll T_e$, $T_i \approx 300\text{K}$.

Степень ионизации α рассчитаем из условия, что $P \approx 2$ торр. $\alpha = \frac{n_i}{n}$, где $P = nkT_i$

I_p , мА	N_D	α , 10^{-7}
5.02	31.4 ± 4.1	8.03 ± 0.58
3.02	35.9 ± 3.4	6.13 ± 0.33
1.52	49.4 ± 1.2	3.23 ± 0.04

Таблица 2: Результаты вычислений

Вывод

В данной лабораторной работе мы исследовали состояние плазмы в тлеющем газовом разряде с помощью двойного зонда. Полученные результаты сходятся с указанными в лабораторной

работе по порядку. Плазму в тлеющем разряде можно с хорошей точностью назвать идеальной, так как $N_D > 30 \gg 1$.