

Лабораторная работа 3.5.1. Изучение плазмы газового разряда в неоне.

Комкин Михаил, Б01-303

13 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:

$$\begin{aligned} I_{e0} &= \frac{n \langle v_e \rangle}{4} e S, \\ I_{i0} &= \frac{n \langle v_i \rangle}{4} e S, \end{aligned} \tag{1}$$

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_{en} – электронный ток насыщения, а минимальное I_{in} – ионный ток насыщения. Значение из эмпирической формулы Бомона:

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

Электронный ток насыщения можно определить по тепловому движению:

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

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

$$I_1 = I_{in} + I_{e1} = I_{in} - \frac{1}{4}neS\langle v_e \rangle \exp\left(-\frac{eU_f}{kT_e}\right) \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e}\right) = I_{in} \left(1 - \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e}\right)\right). \quad (3)$$

Аналогично через второй получим

$$I_2 = I_{in} \left(1 - \exp\left(\frac{e\Delta U_2}{kT_e}\right)\right) \quad (4)$$

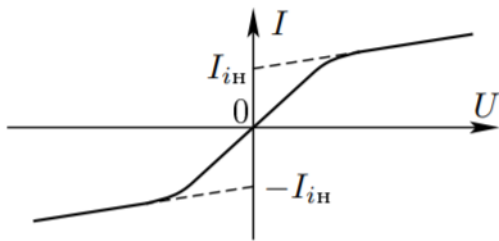
Из (7) и (8) с учётом последовательного соединения зондов ($I_1 = -I_2 = I$):

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

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

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока

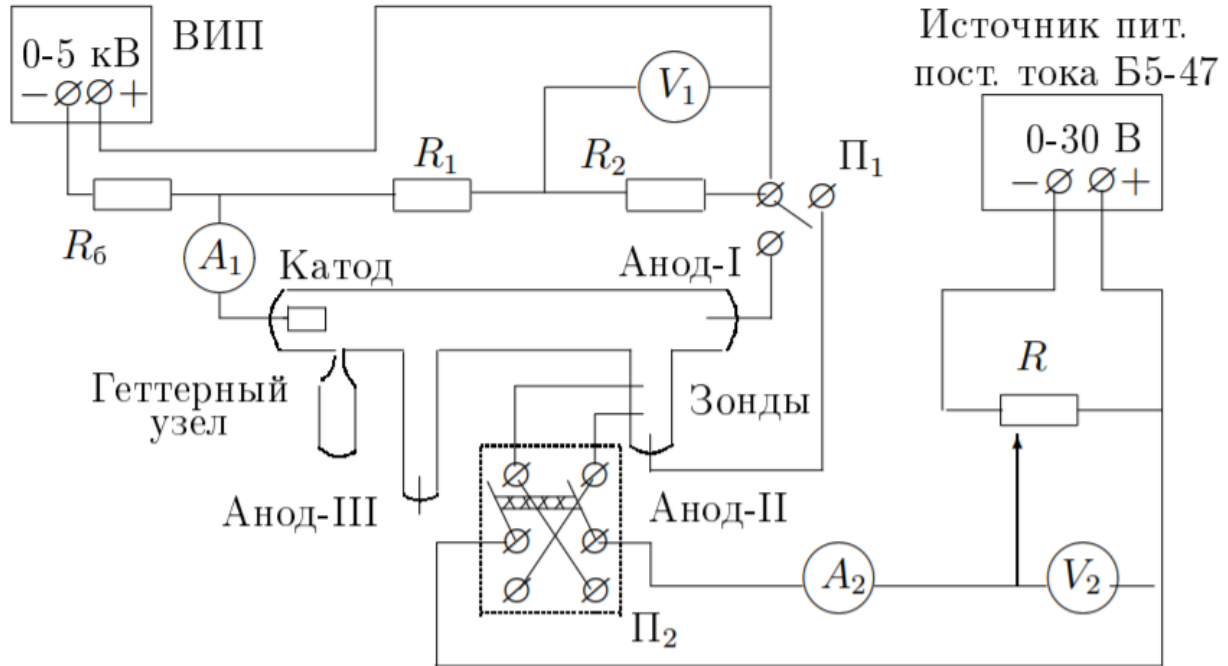
$$U = \frac{kT_e}{e} \ln \frac{1 - I/I_{in}}{1 + I/I_{in}}, \quad I = I_{in} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e}. \quad (5)$$



Зависимость выглядит примерно так. Из формулы можно найти формулу для T_e : для $U = 0$ мы найдём $I_{иn}$, продифференцируем в точке $U = 0$ и с учётом $\text{th } \alpha \approx \alpha$ при малых α и $A \rightarrow 0$ получим:

$$kT_e = \frac{1}{2} \frac{eI_{иn}}{\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0}}. \quad (6)$$

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 ^{22}Ne 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

Измеряем напряжение зажигания в лампе: $U_{\text{зж}} \approx 217 \text{ В}$.

Снимаем ВАХ газового разряда:

$I, \text{ мА}$	0,506	0,991	1,505	2,014	2,506	3,004	3,507	3,999	4,518
$U, \text{ В}$	35,07	33,50	30,86	29,47	28,48	27,54	26,90	26,98	27,25

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

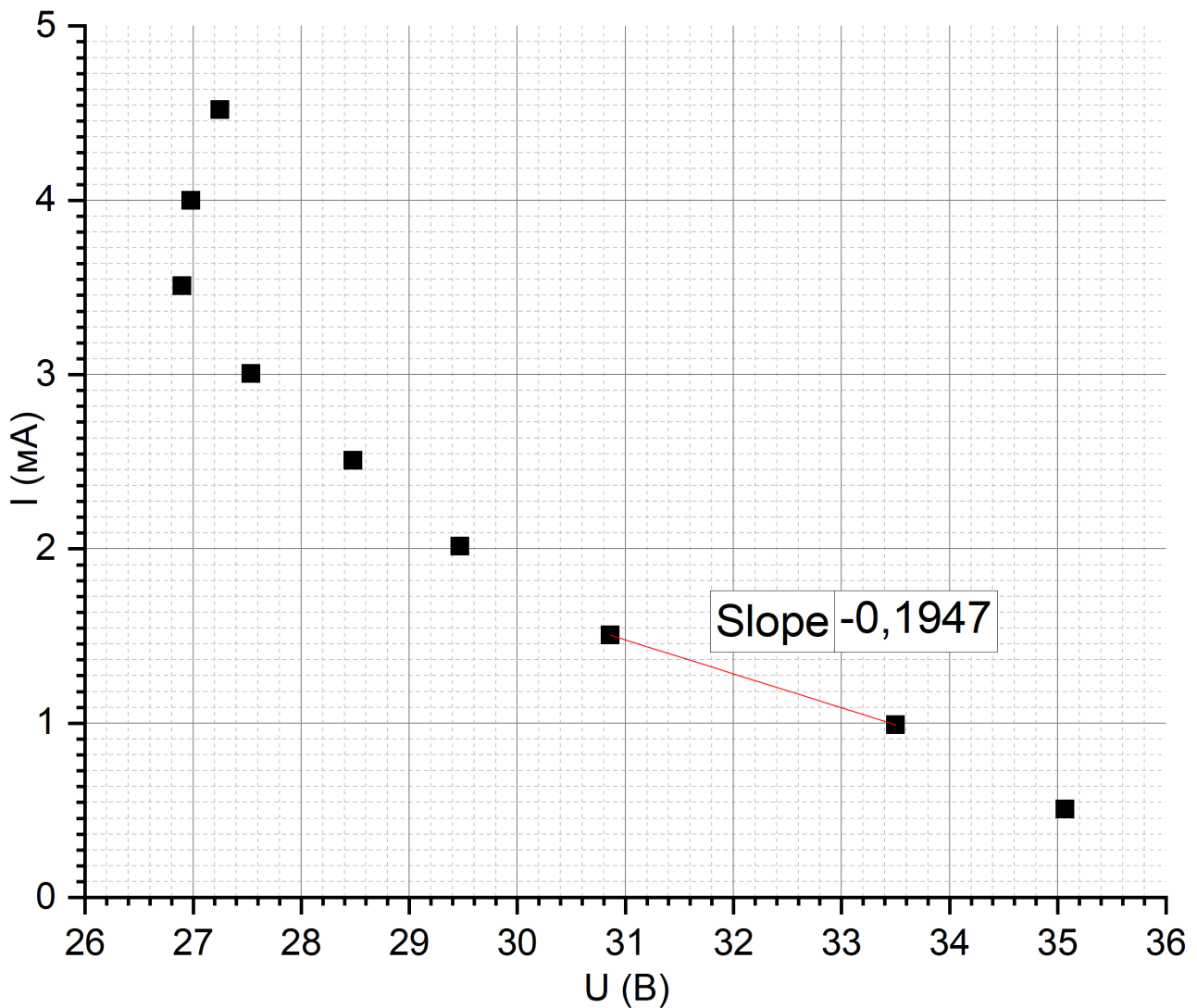
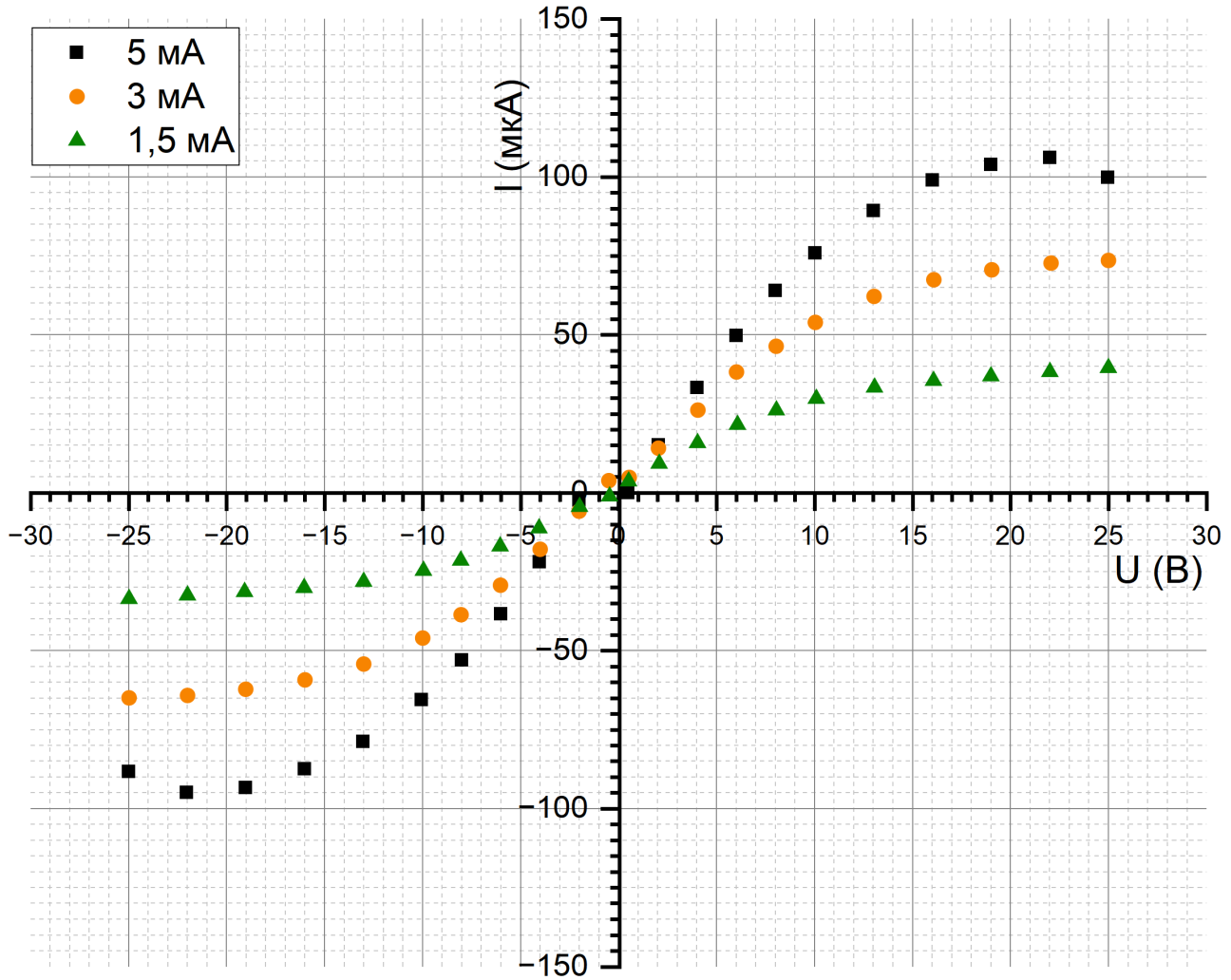


Рис. 1: ВАХ газового разряда в неоне

В схеме напряжение снимается с делителя напряжений с коэффициентом 10, поэтому $R_{\text{диф}} \approx 5,14 \cdot 10^4 \text{ Ом}$. Наш график соответствует участку поднормального тлеющего разряда (см. приложение к лабораторной работе), а при токе $I \approx 3,5 \text{ мА}$ 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 фиксированного тока 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.

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
3.02	66.0 ± 3.3	5.7 ± 0.3	3.95 ± 0.21	11.2 ± 0.3	8.92 ± 0.24	6.01 ± 0.16
1.52	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

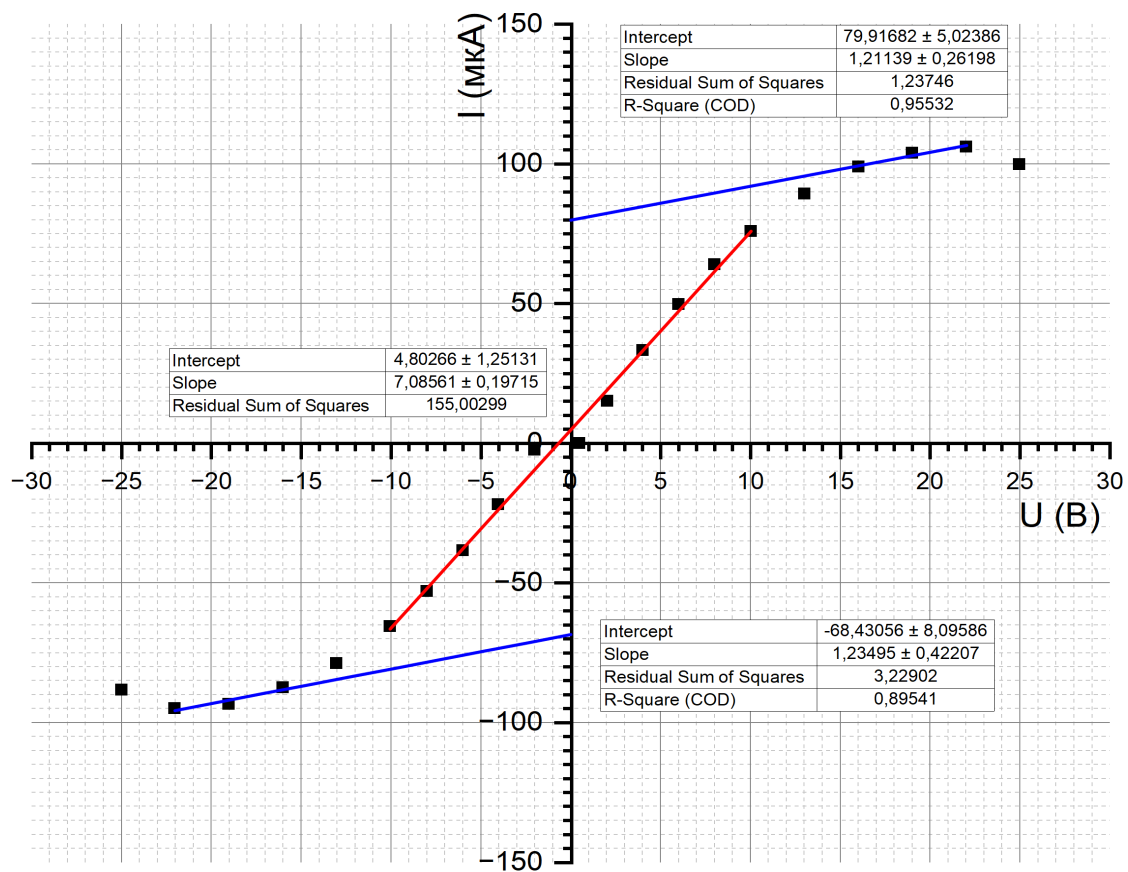


Рис. 2: ВАХ зонда при $I_p = 5,02$ мА

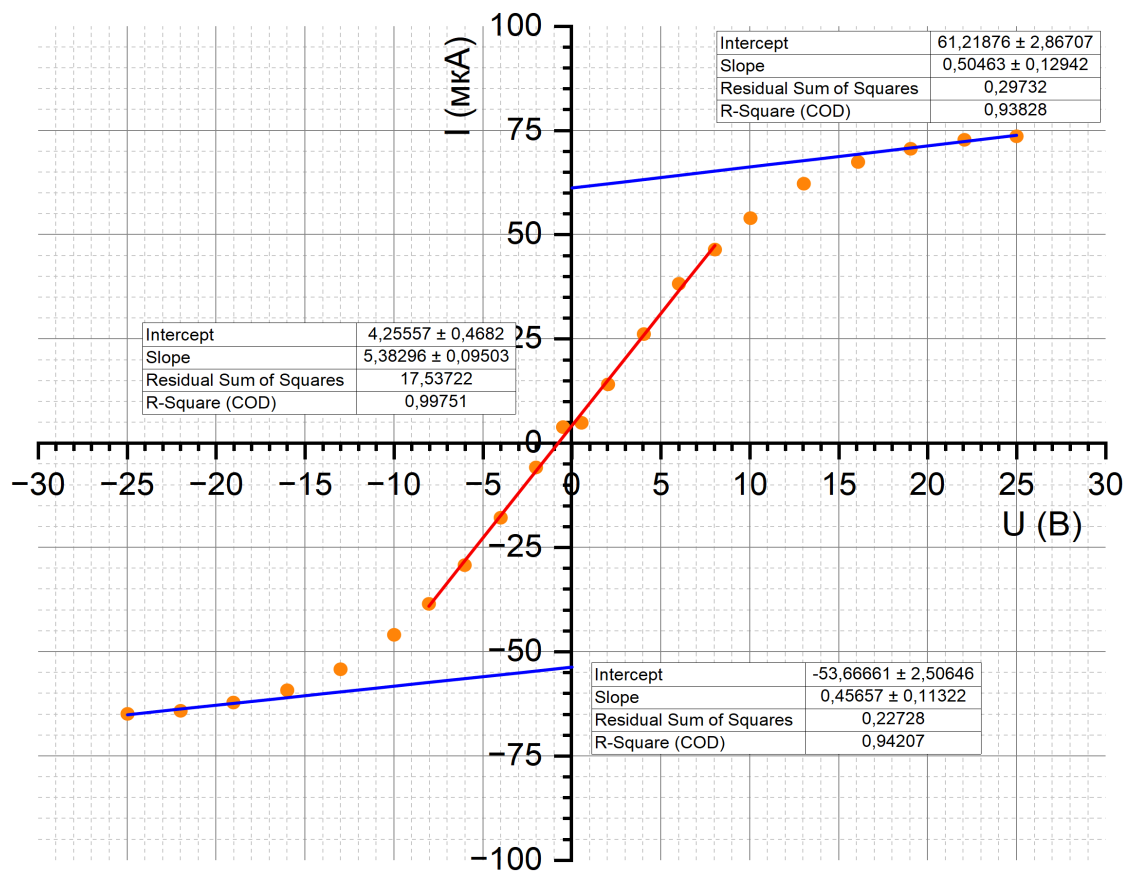


Рис. 3: ВАХ зонда при $I_p = 3,02$ мА

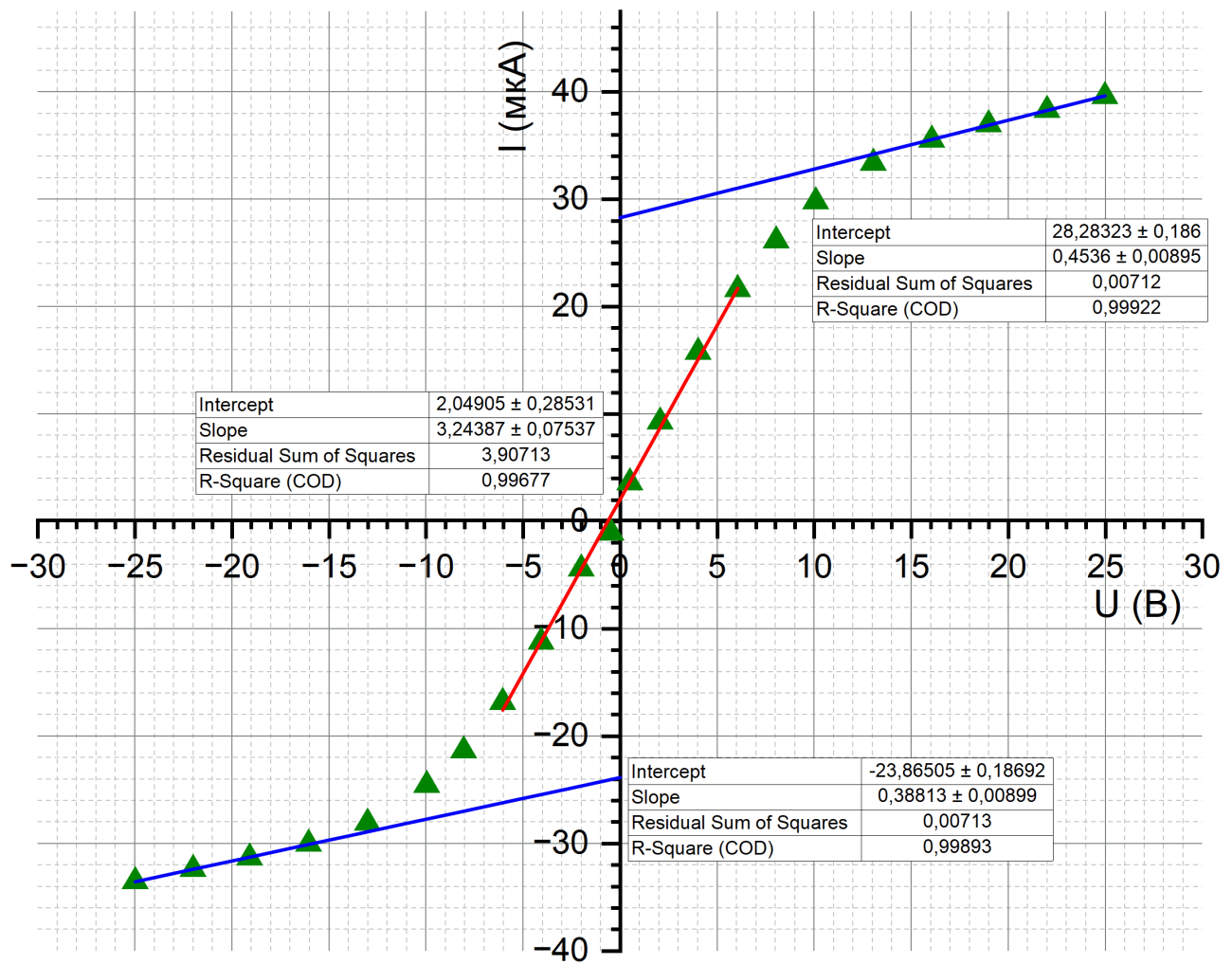


Рис. 4: ВАХ зонда при $I_p = 1,52$ мА

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

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	$\alpha, 10^{-7}$
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

Относительные погрешности вычисленных величин показаны в процентах в таблице :

$I_p, \text{мА}$	T_e	kT_e	n_e	ω_p	r_{De}	r_D	N_D	α
5.02	6.9	6.9	7.2	3.6	3.6	3.6	12.9	7.2
3.02	5.0	5.0	5.3	2.7	2.7	2.7	9.6	5.3
1.52	2.4	2.4	1.4	0.7	0.7	0.7	2.5	1.4

Таблица 3: Относительные погрешности величин в процентах

Построим графики $T_e(I_p)$ и $n(I_p)$:

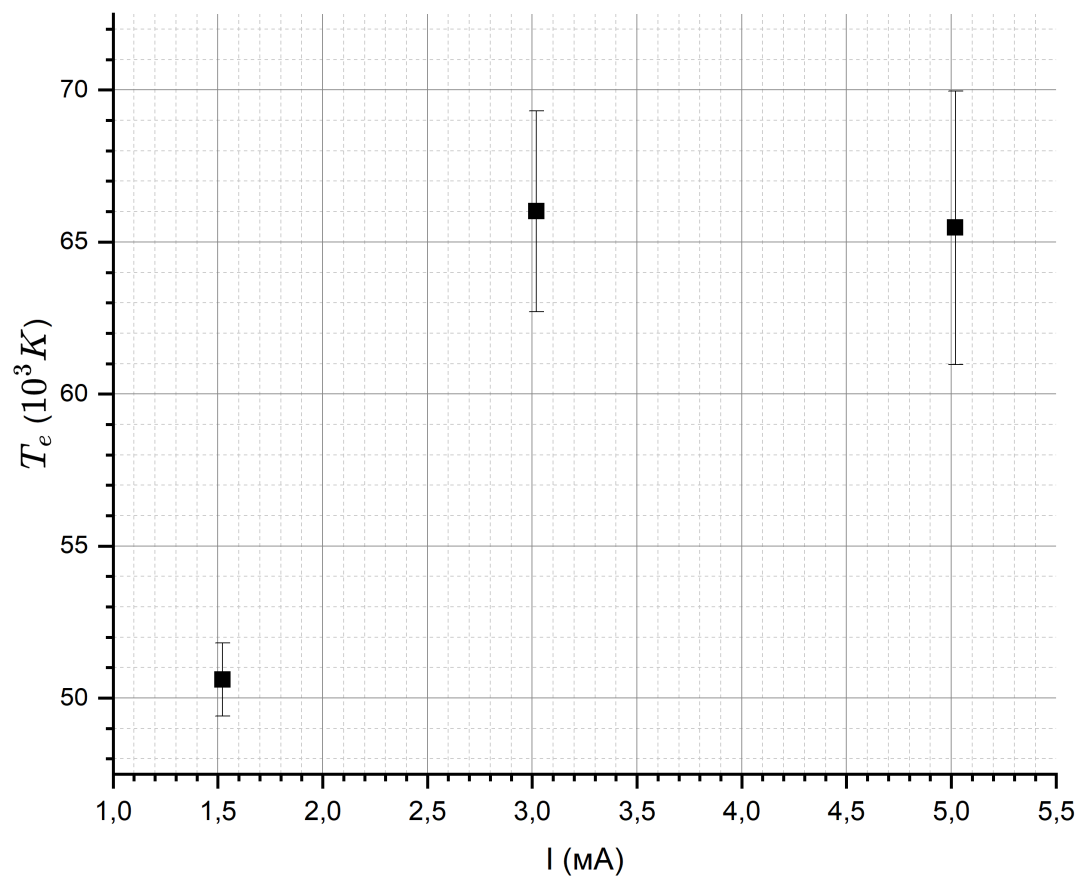


Рис. 5: Зависимость $T_e(I_p)$

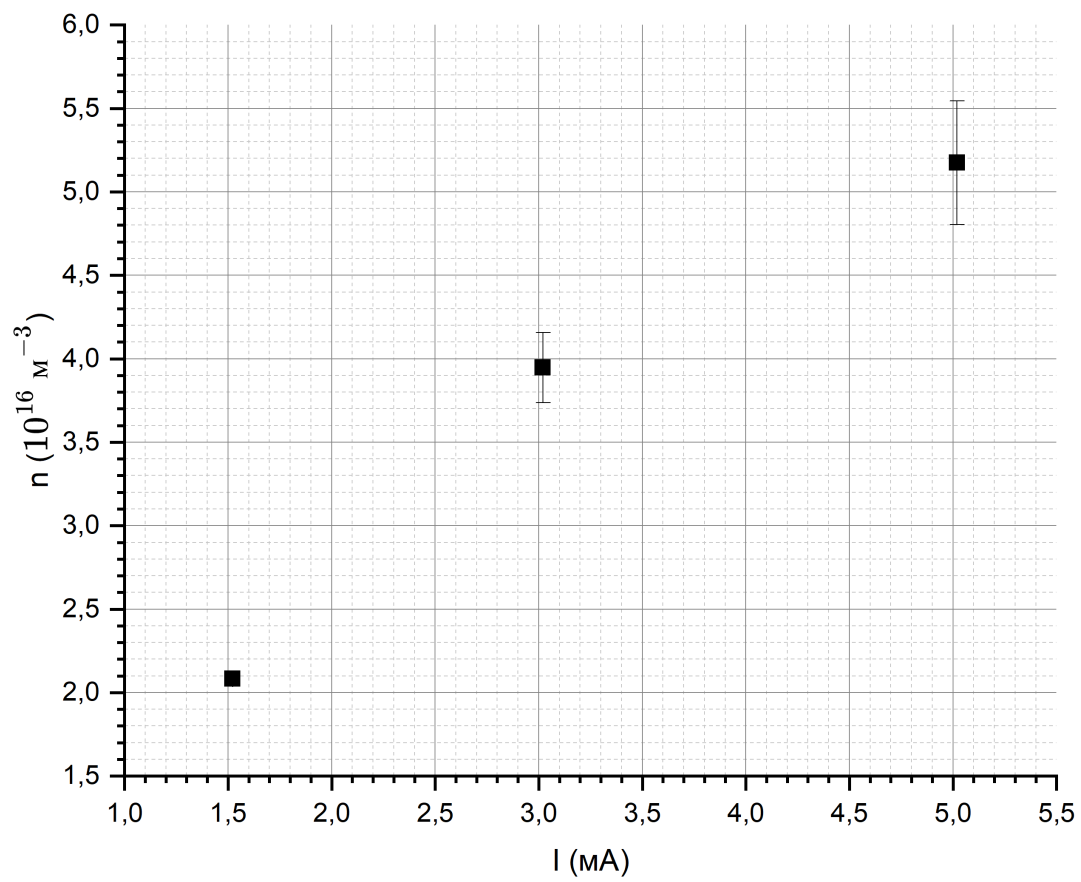


Рис. 6: Зависимость $n(I_p)$

В обоих случаях в пределах погрешности зависимости можно назвать возрастающими. Концентрация электронов возрастает при повышении тока, потому что больше молекул газа ионизируется, так как выше электрическое поле, выше скорость электронов и больше столкновений. Температура электронов возрастает, но зависимость не близка к линейной.

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 $N_D > 30 \gg 1$.