

Лабораторная работа № 3.5.1
Изучение плазмы газового разряда в неоне

Струков О. И.
Б04-404

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

В работе используются: Стеклоанная газоразрядная трубка, наполненная изотопом неона, высоковольтный источник питания (ВИП), источник питания постоянного тока, делитель напряжения, резистор, потенциометр, амперметры, вольтметры, переключатели.

Теоретическая часть

Плазма

Плазма газового разряда — это частично ионизированный газ, образующийся при прохождении электрического тока через газовую среду. В ионизированном газе поле ионов экранируется электронами. Для поля \mathbf{E} и плотности заряда ρ :

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

а с учётом сферической симметрии:

$$\frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\varphi}{dr} = -4\pi\rho. \quad (1)$$

Плотности заряда электронов и ионов:

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

В приближении $\frac{e\varphi}{kT_e} \ll 1$ получим

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

где $r_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi ne^2}}$ — радиус Дебая. Число ионов в сфере такого радиуса:

$$N_D = \frac{4}{3} \pi r_D^3 n. \quad (4)$$

Смещение электронов на x создаёт поле, вызывающее колебания:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{ne^2}{m}x.$$

Отсюда *плазменная частота*:

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

Одиночный зонд

При внесении в плазму зонда на него поступают токи:

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

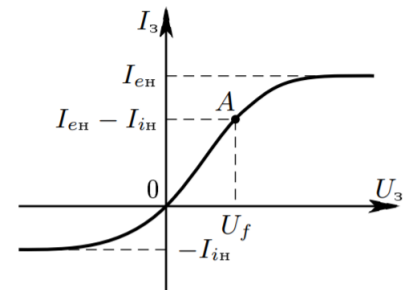
Скорости электронов много больше, поэтому $I_{i0} \ll I_{e0}$. Зонд заряжается до плавающего потенциала $-U_f$.

Электронный ток:

$$I_e = I_0 \exp\left(-\frac{eU_f}{kT_e}\right).$$

При подаче на зонд потенциала U_3 измеряют ток I_3 . Максимальный ток $I_{eн}$ — электронный ток насыщения, минимальный $I_{iн}$ — ионный. По формуле Бомы:

$$I_{iн} = 0,4neS\sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}. \quad (7)$$



Двойной зонд

Двойной зонд – два одинаковых зонда с разностью потенциалов меньше U_f . При малых токах ионные токи компенсируются. Для потенциалов:

$$U_1 = -U_f + \Delta U_1, \quad U_2 = -U_f + \Delta U_2.$$

Токи через зонды:

$$I_1 = I_{\text{ин}} \left(1 - \exp \left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e} \right) \right), \quad I_2 = I_{\text{ин}} \left(1 - \exp \left(\frac{e\Delta U_2}{kT_e} \right) \right). \quad (8)$$

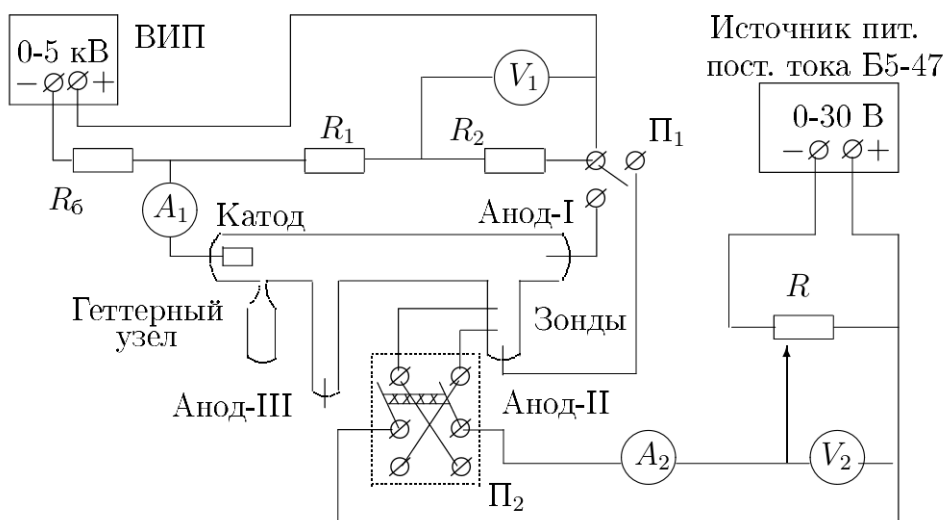
При $I_1 = -I_2 = I$ получаем:

$$U = \frac{kT_e}{e} \ln \frac{1 - I/I_{\text{ин}}}{1 + I/I_{\text{ин}}}, \quad I = I_{\text{ин}} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e}. \quad (9)$$

Реальная зависимость:

$$I = I_{\text{ин}} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e} + AU. \quad (10)$$

Экспериментальная установка



Газоразрядная трубка с холодным катодом наполнена неоном при давлении 2 мм рт. ст. Катод и анод подключаются через балластный резистор $R_6 \approx 450 \text{ кОм}$ к ВИП (до 5 кВ). Ток разряда измеряется миллиамперметром A_1 , напряжение на трубке – вольтметром V_1 через делитель с коэффициентом 10.

При подключении к аноду-II разряд возникает в области с двойным зондом. Зонды из молибденовой проволоки ($d = 0,2 \text{ мм}$, $l = 5,2 \text{ мм}$) подключены к источнику питания через потенциометр. Напряжение измеряется вольтметром V_2 , ток – мультиметром A_2 .

Ход работы

Вольт-амперная характеристика разряда

1. После ознакомления с теорией и установкой было определено напряжение зажигания разряда при плавном увеличении напряжения ВИП, которое составило $U_{\text{зж}} \approx 150 \text{ В}$.
2. После этого с помощью вольтметра 1 и амперметра 1 была снята ВАХ разряда, которая представлена на графике:

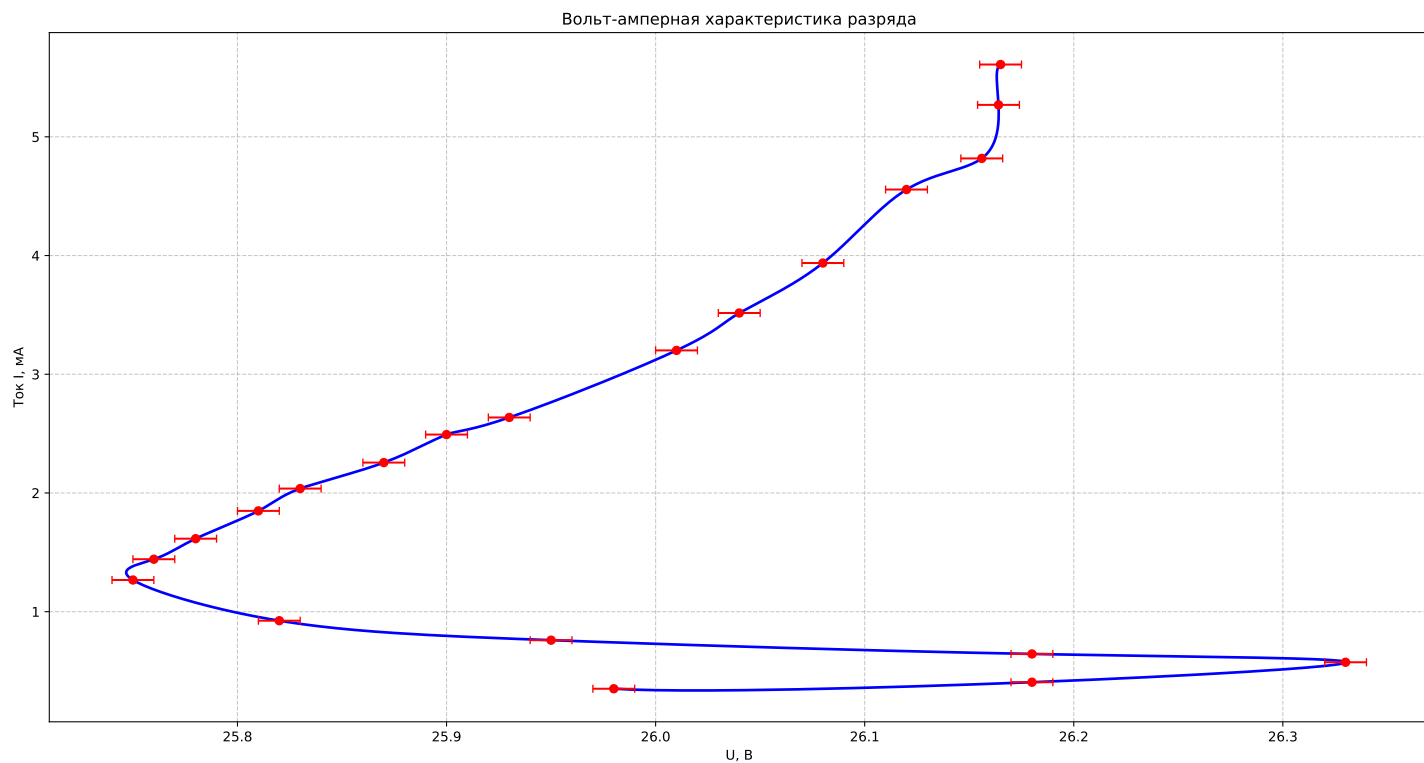


Рис. 1: Вольт-амперная характеристика разряда с погрешностями

3. По минимальному углу наклона участка кривой, соответствующего поднормальному тлеющему газовому разряду, определено максимальное дифференциальное сопротивление разряда $R = (2,1 \pm 0,3) \text{ кОм}$.

Зондовые характеристики

1. С помощью мультиметров A_2 и V_2 были сняты ВАХ двойного зонда при фиксированных силах тока разряда 5,167 мА, 3,048 мА и 1,672 мА. По полученным зависимостям были построены графики зависимости $I(U)$, а также определены токи насыщения $I_{\text{н}}$ из пересечений асимптоты к току насыщения с осью $U = 0$.

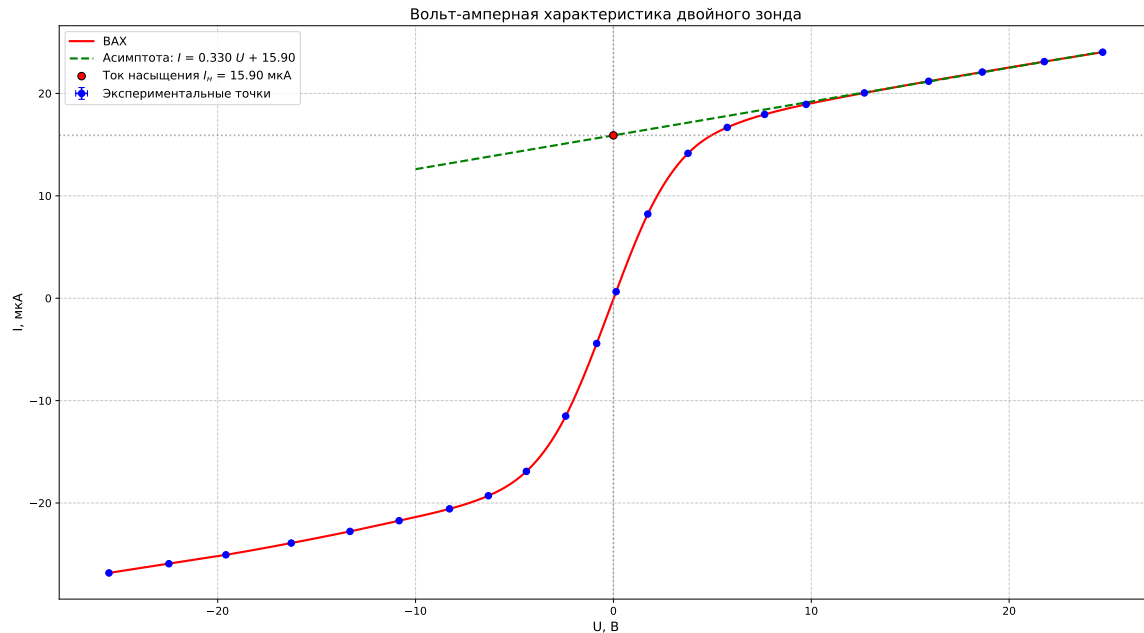


Рис. 2: ВАХ зонда при токе разряда $I_p = 5,167$ мА

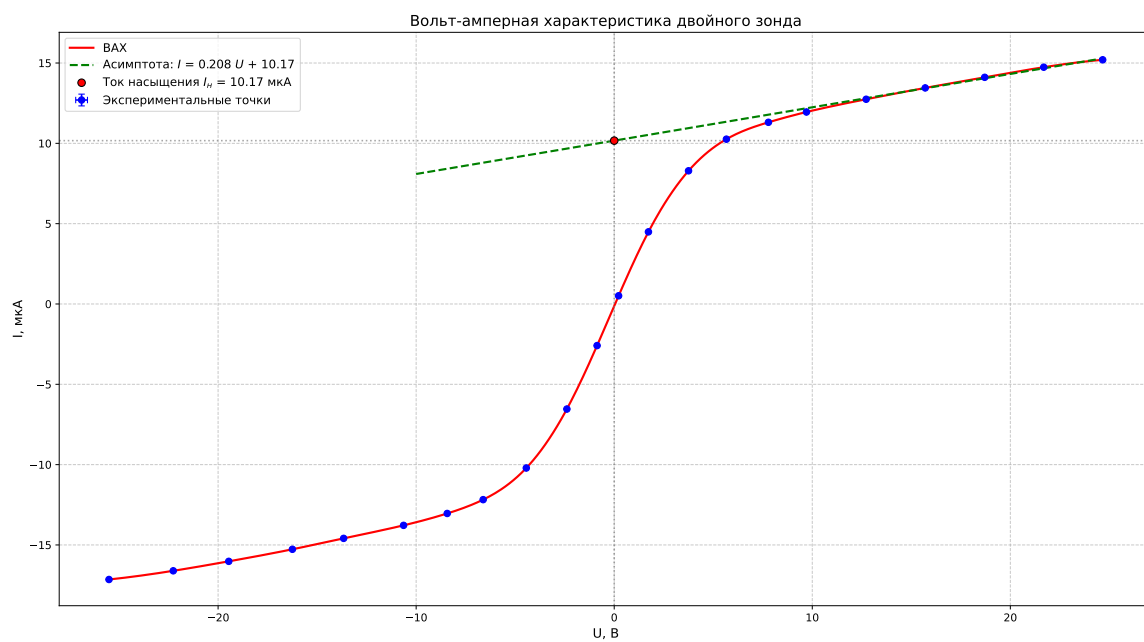


Рис. 3: ВАХ зонда при токе разряда $I_p = 3,048$ мА

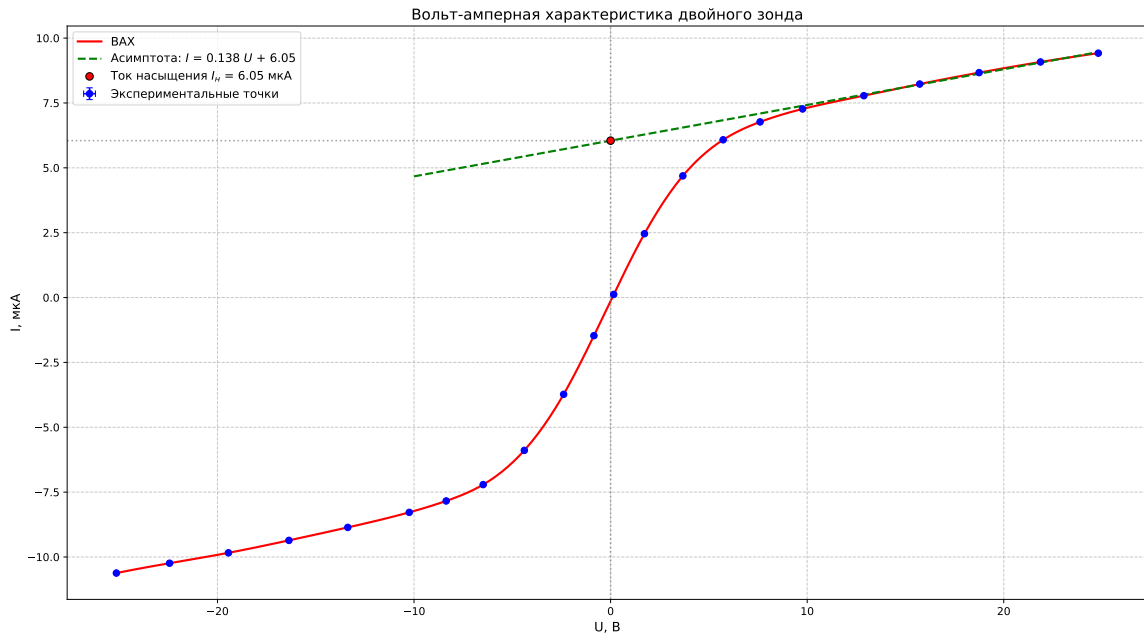


Рис. 4: ВАХ зонда при токе разряда $I_p = 1,672$ мА

2. Для каждой зависимости были дополнительно определены $\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0}$ — наклоны характеристик в начале координат. По полученным значениям с помощью следующей формулы была определена температура электронов в каждом случае:

$$kT_e = \frac{1}{2} \frac{eI_{\text{н}}}{\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0}}$$

I_p , мА	$I_{\text{н}}$, мкА	$\left. \frac{dI}{dU} \right _{U=0}$, мкА/В	T_e , 10^3 К	kT_e , эВ
5,167	$15,9 \pm 0,7$	$5,15 \pm 0,03$	$17,90 \pm 0,79$	$1,54 \pm 0,07$
3,048	$10,2 \pm 0,3$	$2,85 \pm 0,02$	$20,75 \pm 0,53$	$1,79 \pm 0,05$
1,672	$6,1 \pm 0,1$	$1,58 \pm 0,01$	$22,38 \pm 0,49$	$1,93 \pm 0,04$

3. Из точек пересечения горизонталей, проведённых из точек пересечения асимптот к току насыщения с осью $U = 0$, с кривой зависимости были определены значения ΔU , с помощью которых были определены энергии и температуры электронов:

$$kT_e = \frac{\Delta U}{2} \quad (\text{эВ})$$

I_p , мА	ΔU , В	kT_e , эВ	T_e , 10^3 К
5,167	$4,95 \pm 0,21$	$2,48 \pm 0,11$	$28,78 \pm 1,28$
3,048	$5,54 \pm 0,16$	$2,77 \pm 0,08$	$32,14 \pm 0,93$
1,672	$5,66 \pm 0,09$	$2,83 \pm 0,05$	$32,84 \pm 0,58$

4. Все три зондовые характеристики были изображены на одном графике:

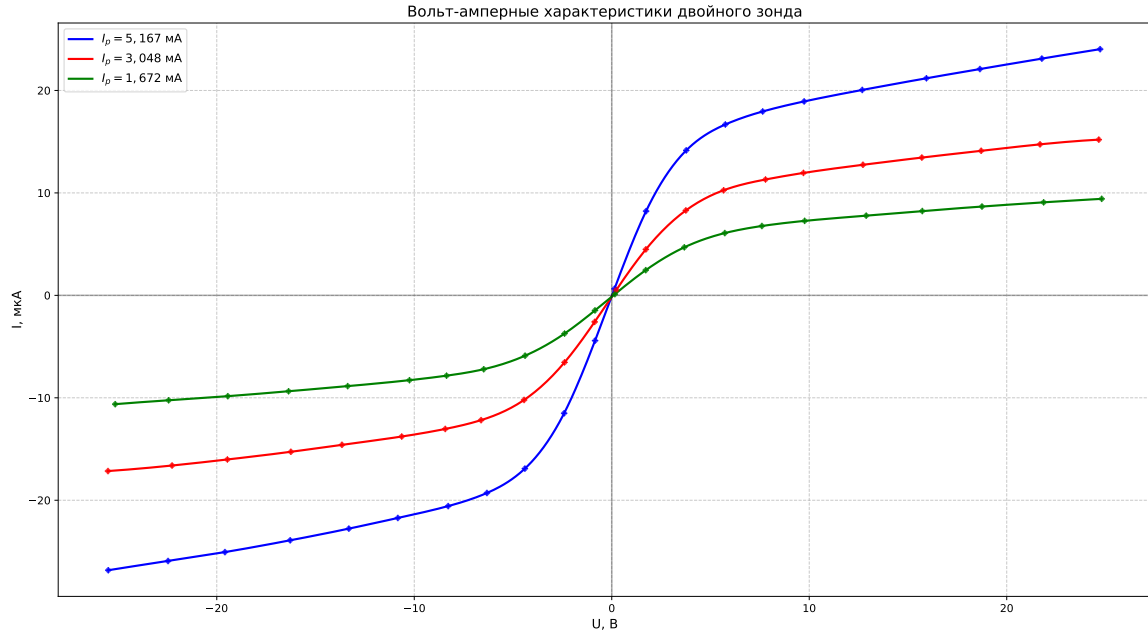


Рис. 5: ВАХ двойного зонда для трёх рассматриваемых токов разряда

5. По формуле Бома была рассчитана концентрация электронов n_e , исходя из предположения, что она равна концентрации ионов n_i :

$$I_{\text{и}} = 0,4n_e e S \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}} \Rightarrow n_e = \frac{I_{\text{и}}}{0,4eS \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}}$$

Здесь $m_i = 22 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг — масса иона неона, $S = \pi dl \approx 3,27 \cdot 10^{-6}$ м² — площадь поверхности зонда.

6. Была рассчитана плазменная частота колебаний электронов по формуле

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} = 5,6 \cdot 10^4 \sqrt{n_e} \text{ рад/сек} \quad [\text{СГС}]$$

7. Рассчитана электронная поляризационная длина r_{De} по формуле

$$r_{De} = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e e^2}} \text{ см} \quad [\text{СГС}]$$

8. Рассчитан дебаевский радиус экранирования r_D , учитывая, что $T_e \gg T_i$, а температура ионов равна комнатной ($T_i \simeq 300$ К).

$$r_D = \sqrt{\frac{kT_i}{4\pi n_e e^2}} \text{ см} \quad [\text{СГС}]$$

9. Оценено среднее число ионов в дебаевской сфере

$$N_D = \frac{4}{3}\pi r_D^3 n_i \quad [\text{СГС}]$$

10. Оценена степень ионизации плазмы α при условии того, что давление в трубке $P \simeq 2$ Торр:

$$\alpha = \frac{n_i}{n}, \quad n = \frac{P}{kT_i}$$

Все результаты представлены в таблице:

I_p , мА	n_e , 10^{15} м ⁻³	ω_p , 10^9 рад/с	r_{De} , 10^{-5} м	r_D , 10^{-6} м	N_D	α , 10^{-8}
5,167	$16,3 \pm 0,8$	$7,14 \pm 0,25$	$9,2 \pm 0,5$	$9,4 \pm 0,5$	57 ± 5	3,4
3,048	$9,89 \pm 0,35$	$5,57 \pm 0,14$	$12,4 \pm 0,4$	$12,0 \pm 0,4$	78 ± 4	2,0
1,672	$5,85 \pm 0,12$	$4,28 \pm 0,06$	$16,4 \pm 0,3$	$15,6 \pm 0,3$	93 ± 3	1,2

11. Построены графики зависимостей электронной температуры и концентрации от тока разряда. На втором графике наблюдается линейная зависимость:

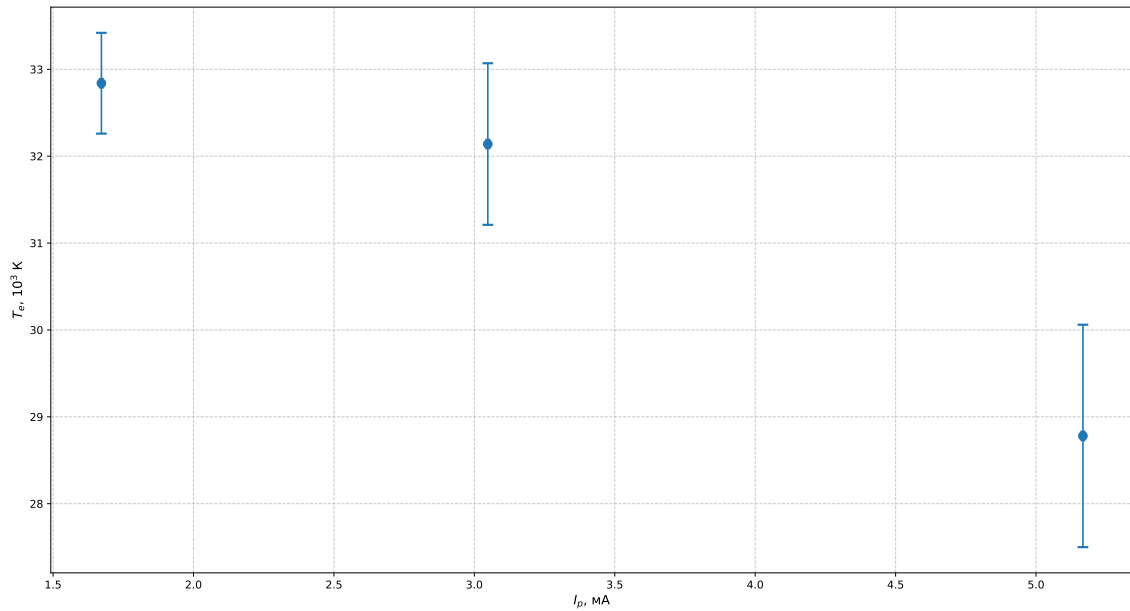


Рис. 6: зависимость электронной температуры от тока разряда

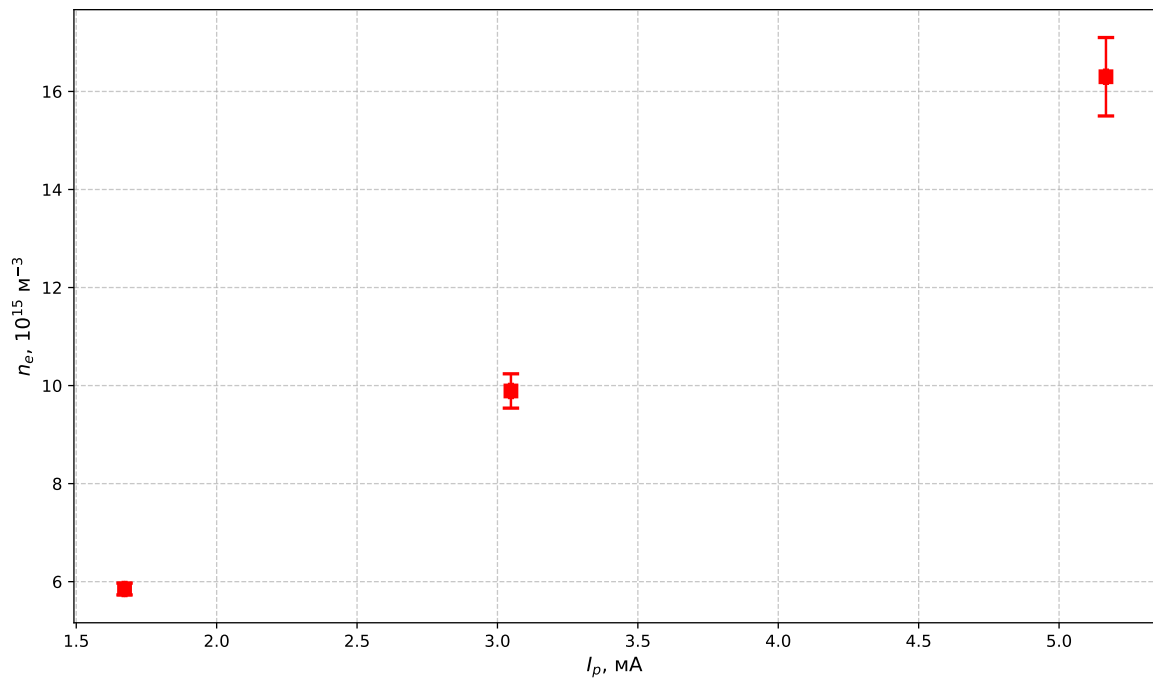


Рис. 7: зависимость электронной концентрации от тока разряда

Выводы

В результате выполнения работы были сняты вольтамперные и зондовые характеристики тлеющего разряда, рассчитаны электронные температуры при разных токах разряда, а также другие основные параметры плазмы, оценены их погрешности. Все полученные значения выглядят достоверно.

Поскольку линейные размеры плазмы \gg её поляризационной длины, плазму можно считать квазинейтральной. Полученные числа Дебая > 1 , поэтому плазму можно рассматривать как идеальный газ.