

Лабораторная работа №3.5.1  
Изучение плазмы газового разряда в неоне

Рожков А. В.

25 сентября 2024 г.

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

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

# 1 Теория

## 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

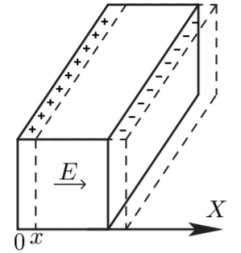
$$N_D = n \frac{4}{3} \pi r_D^3. \quad (4)$$

Теперь выделим параллелепипед с плотностью  $n$  электронов, 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:

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

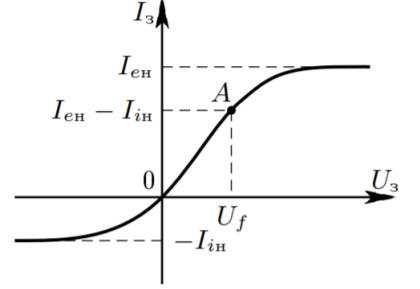
где  $\langle v_e \rangle$  и  $\langle v_i \rangle$  – средние скорости электронов и ионов,  $S$  – площадь зонда,  $n$  – плотность электронов и ионов. Скорости электронов много больше скорости ионов, поэтому  $I_{i0} \ll I_{e0}$ . Зонд будет заряжаться до некоторого равновесного напряжения  $-U_f$  – *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  $I_{eн}$  – электронный ток насыщения, а минимальное  $I_{iн}$  – ионный ток насыщения. Значение из эмпирической формулы Бомона:

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



## 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

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

Аналогично через второй получим

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

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

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

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

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока

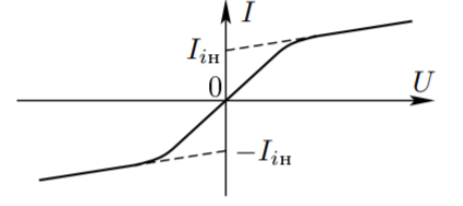
$$U = \frac{kT_e}{e} \ln \frac{1 - I/I_{iн}}{1 + I/I_{iн}}, I = I_{iн} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e}. \quad (10)$$

Реальная зависимость выглядит несколько иначе и описывается формулой

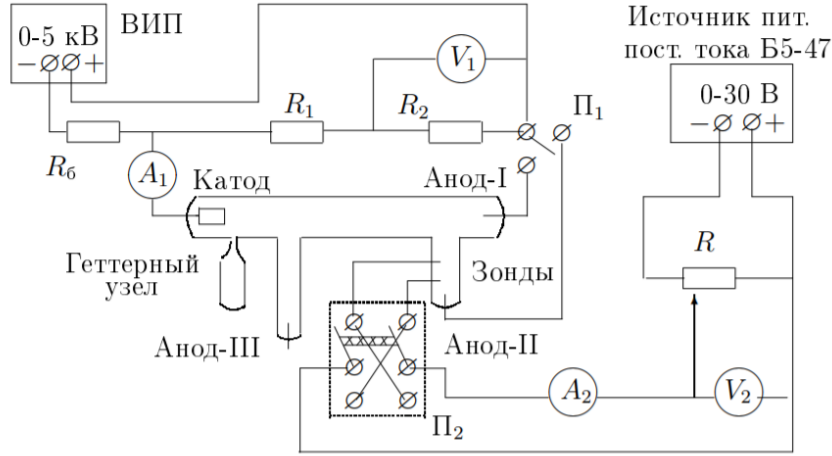
$$I = I_{\text{ин}} \text{th} \frac{eU}{2kT_e} + AU. \quad (11)$$

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

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



## 2 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  $^{22}\text{Ne}$  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  $A_2$ .

## 3 Ход работы

### 3.1 ВАХ разряда

Построим ВАХ разряда

$$R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} = (-3.06 \pm 0.12) \text{ кОм}$$

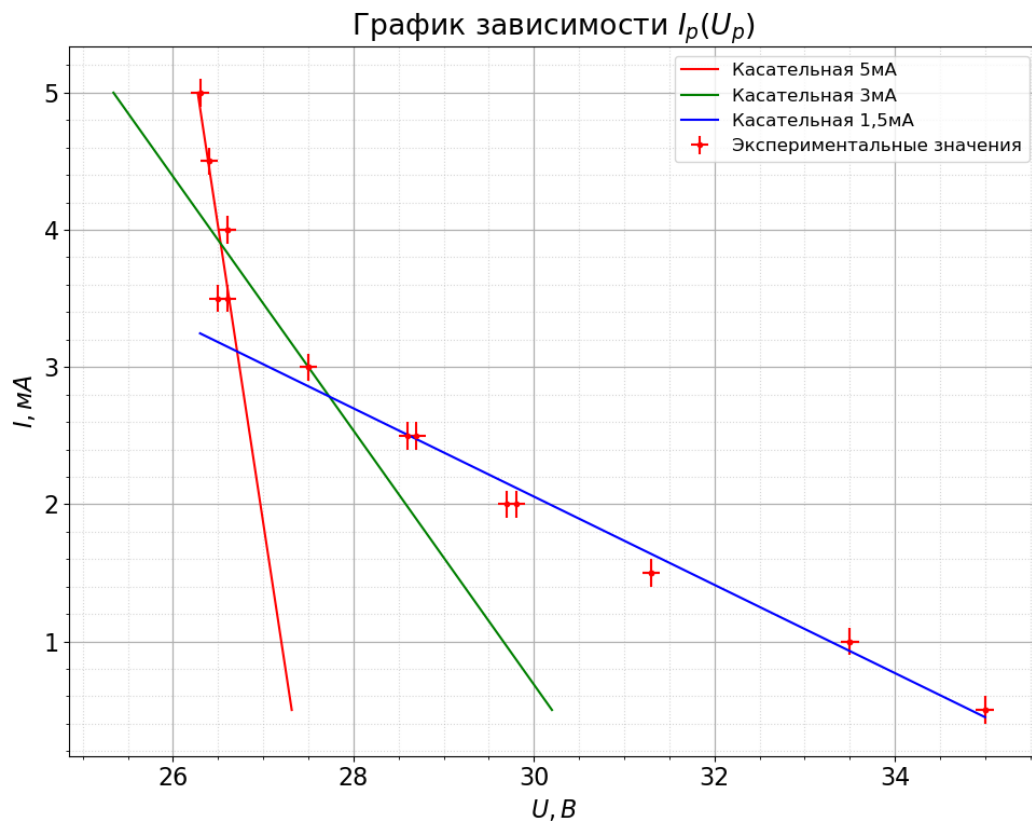


Рис. 1: ВАХ разряда  $I_p(U_p)$

Как видим по рисунку 2, наш график соответствует участку ДГ - поднормальному тлеющему разряду.

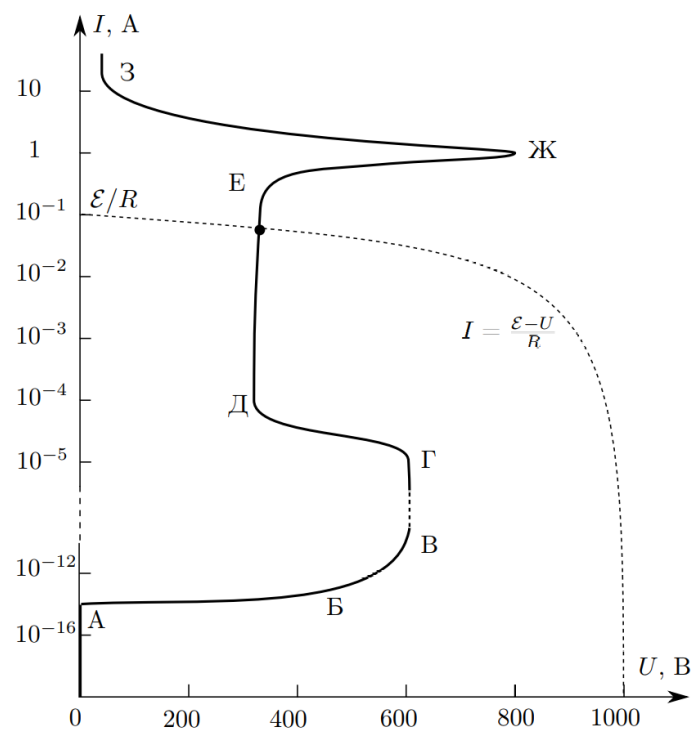


Рис. 2: ВАХ разряда

## 3.2 Зондовые характеристики

Построим ВАХ зондов для различных значений тока разряда. На графиках представлены отцен-трированные по вертикали значения. Также проведены асимптоты

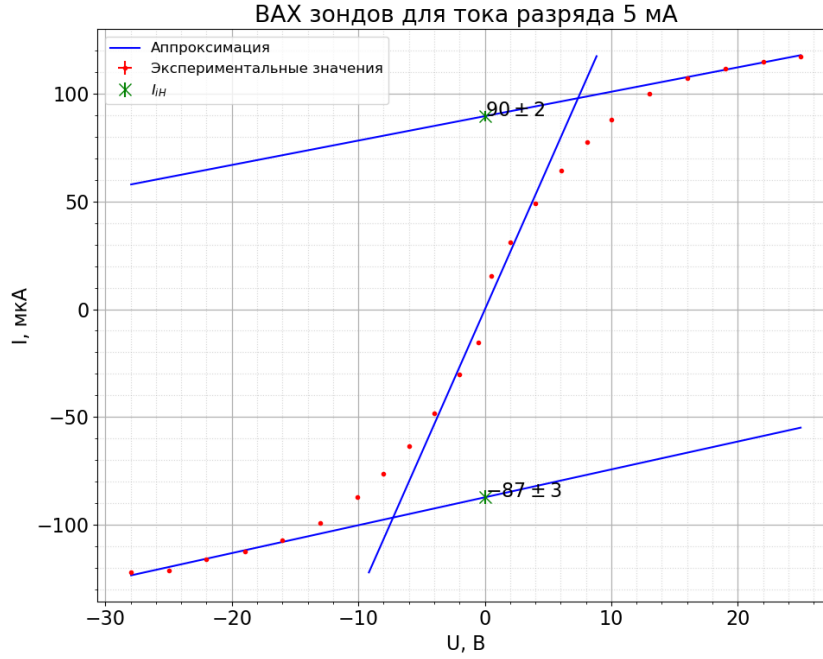


Рис. 3: ВАХ зонда  $I(U)$  притока разряда 5 мА

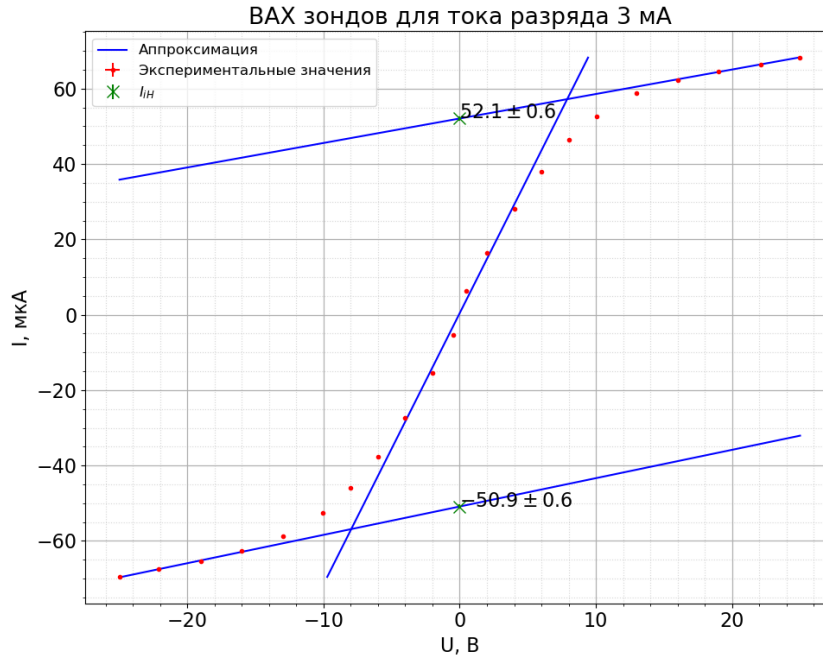


Рис. 4: ВАХ зонда  $I(U)$  притока разряда 3 мА

Из точек пересечения асимптот с осью  $U = 0$  найдём  $I_{iH}$ . Также определим  $\frac{dI}{dU}$  в окрестности точки  $U = 0$ . При помощи этого рассчитаем температуру электронов.

$$kT_{e1} = \frac{1}{2} \frac{eI_{iH}}{\frac{dI}{dU}|_{U_0=0}}$$

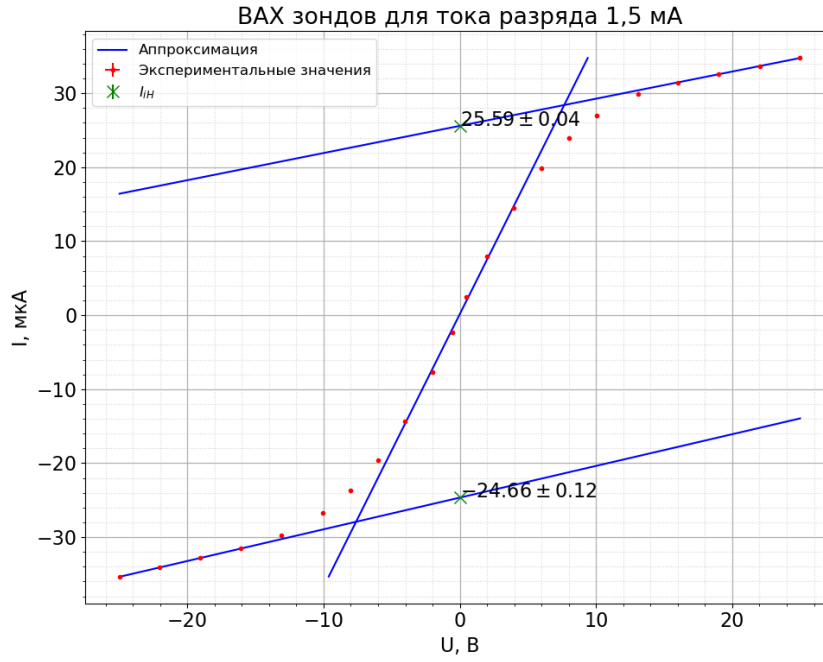


Рис. 5: ВАХ зонда  $I(U)$  при токе разряда 1,5 мА

Также температуру электронов можно найти из разности напряжений в точках 1 и 2, где 1 - точка пересечения асимптоты с осью  $U = 0$ ; 2 - точка пересечения горизонтали из точки 1 с касательной к графику в  $(0, 0)$ .

$$kT_{e2} = \frac{\Delta U_e}{2}$$

В таблице 1 видим, что  $kT_{e1}$  совпали. Для дальнейших расчётов будем использовать  $kT_{e1}$ , так как она имеет меньшую погрешность.

Найдём также температуру электронов в кельвинах. Энергии 1 эВ соответствует температура  $T \simeq 11800^\circ K$ .

$I_{\text{разр}}$	5 мА	3 мА	1,5 мА
$R_{\text{диф}}, \text{кОм}$	$0.17 \pm 0.05$	$0.9 \pm 0.2$	$3.06 \pm 0.12$
$I_i H, \text{мкА}$	$88 \pm 3$	$51.5 \pm 0.8$	$25.1 \pm 0.5$
$\Delta U, В$	$7 \pm 2$	$7.2 \pm 0.8$	$6.8 \pm 0.4$
$kT_{e1}, \text{эВ}$	$3.3 \pm 0.7$	$3.6 \pm 0.4$	$3.4 \pm 0.2$
$kT_{e2}, \text{эВ}$	$3.3 \pm 0.8$	$3.6 \pm 0.4$	$3.4 \pm 0.2$
$T_e, K$	$39000 \pm 8000$	$42000 \pm 4000$	$40000 \pm 2000$

Таблица 1: Промежуточные результаты

Полные результаты дальнейших расчётов представлены в таблице 2.

Полагая концентрацию электронов  $n_e$  равной концентрации  $n_i$ , рассчитаем её:

$$n_e = \frac{I_{iH}}{0.4eS} \sqrt{\frac{m_i}{2kT_e}},$$

где  $S = \pi dl$  - площадь поверхности зонда ( $d = 0.2$  мм,  $l = 5.2$  мм),  $m_i = 22 \cdot 1.66 \cdot 10^{-27}$  кг - масса иона неона.

Плазменная частота колебаний электронов:

$$\omega_p = 5.6 \cdot 10^4 \sqrt{n_e} \frac{\text{рад}}{\text{сек}}$$

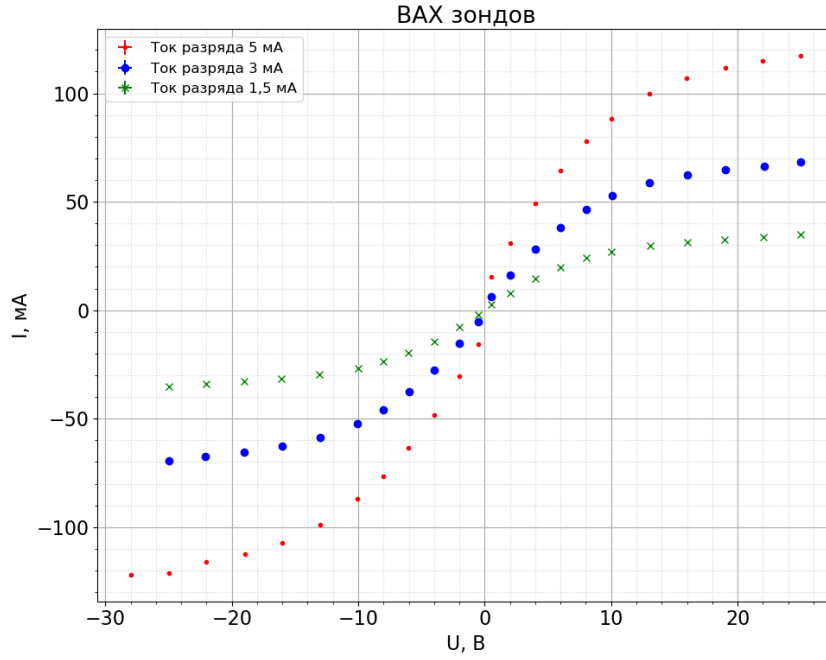


Рис. 6: ВАХ зонда  $I(U)$

При падении на волну электромагнитных волн будут проходить частоты более  $\omega_p$ .  
Электронная поляризационная длина  $r_{De}$ :

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

Дебаевский радиус ( $T_i \simeq 300^\circ K$ ):

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

Плазму можно считать квазинейтральной, так как линейные размеры трубки много меньше поляризационной длины  $r_{De}$

Среднее число ионов в дебаевской сфере:

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

Плазму можно считать идеальной, так как число Дебая на порядок больше 1.

Степень ионизации плазмы (доля ионизированных атомов  $\alpha$ ):

$$\alpha = \frac{n_i}{n},$$

где  $n$  - общее число частиц в единице объёма  $P = nkT_i$

## 4 Вывод

Изучили вольт-амперную характеристику тлеющего разряда, изучили свойства плазмы методом зондовых характеристик.

Плазму можно считать квазинейтральной, так как линейные размеры трубки много меньше поляризационной длины  $4.8 \text{ см}^{-3} > r_{De}$

Плазму можно считать идеальной, так как число Дебая ( $N_D > 25$ ) на порядок больше 1.



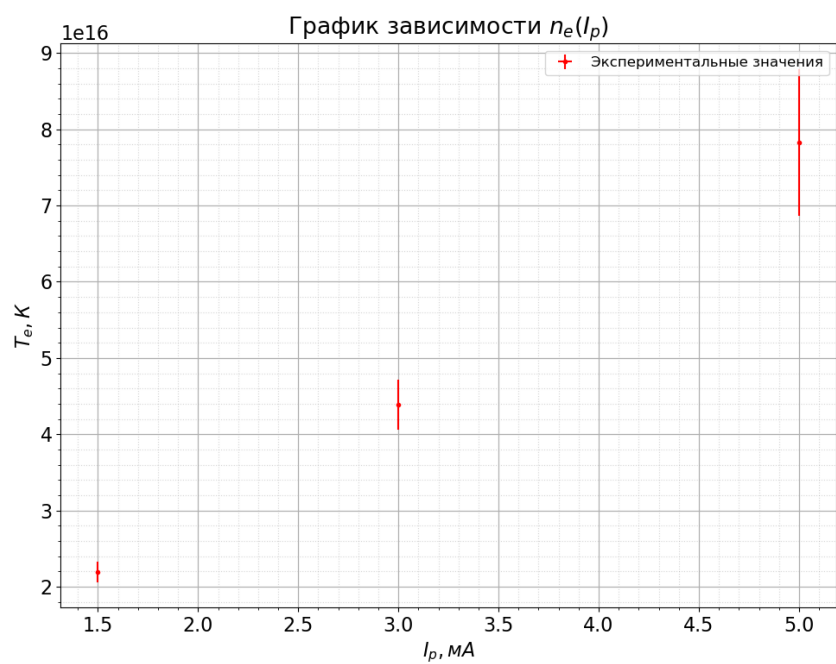


Рис. 7: Зависимость  $T_e(I_p)$

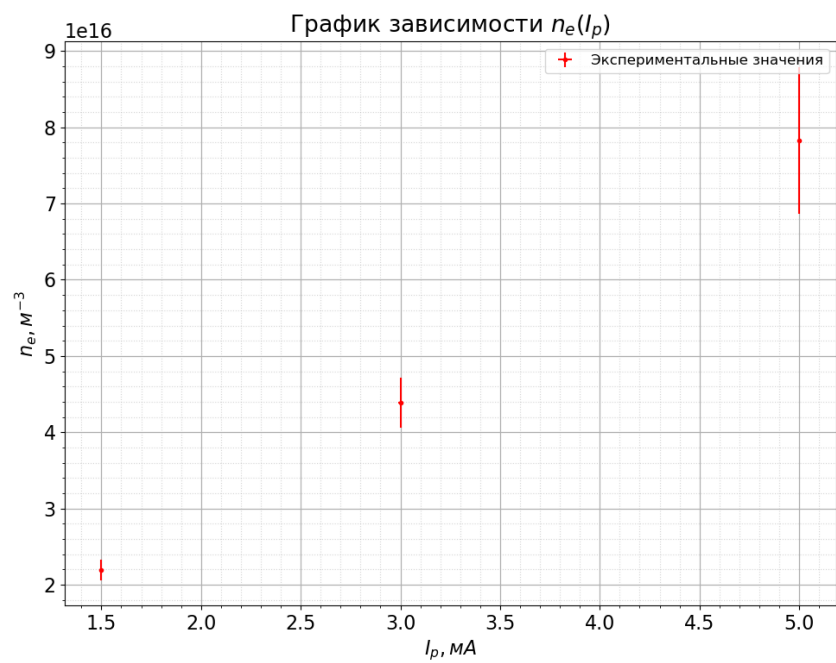


Рис. 8: Зависимость  $n_e(I_p)$

$I_{\text{разр}}$	5 мА	3 мА	1,5 мА
$R_{\text{диф}}, \text{кОм}$	$0.17 \pm 0.05$	$0.9 \pm 0.2$	$3.06 \pm 0.12$
$I_i H, \text{мкА}$	$88 \pm 3$	$51.5 \pm 0.8$	$25.1 \pm 0.5$
$\Delta U, \text{В}$	$7 \pm 2$	$7.2 \pm 0.8$	$6.8 \pm 0.4$
$kT_{e1}, \text{эВ}$	$3.3 \pm 0.7$	$3.6 \pm 0.4$	$3.4 \pm 0.2$
$kT_{e2}, \text{эВ}$	$3.3 \pm 0.8$	$3.6 \pm 0.4$	$3.4 \pm 0.2$
$T_e, \text{К}$	$39000 \pm 8000$	$42000 \pm 4000$	$40000 \pm 2000$
$n_e, 10^{-9} \text{см}^{-3}$	$78 \pm 10$	$44 \pm 3$	$22 \pm 1$
$\omega_p, 10^9 \frac{\text{рад}}{\text{сек}}$	$15.7 \pm 1.0$	$11.7 \pm 0.4$	$8.3 \pm 0.2$
$r_{De}, 10^{-3} \text{см}$	$4.8 \pm 0.6$	$6.7 \pm 0.4$	$9.3 \pm 0.4$
$r_D, 10^{-3} \text{см}$	$0.42 \pm 0.03$	$0.57 \pm 0.02$	$0.80 \pm 0.02$
$N_D$	$25 \pm 3$	$33 \pm 3$	$47 \pm 3$
$\alpha, 10^{-7}$	$12 \pm 1$	$6.7 \pm 0.5$	$3.3 \pm 0.2$

Таблица 2: Результаты расчётов