

# Работа 3.5.1

## Изучение плазмы газового разряда в неоне

Шелихов Дмитрий  
Группа Б01-305

19 ноября 2024 г.

**Цель работы:** Снять вольт-амперную характеристику тлеющего разряда и зондовые характеристики при разных токах разряда и по результатам измерений рассчитать концентрацию и температуру электронов в плазме, плазменную частоту, поляризационную длину, дебаевский радиус экранирования и степень ионизации.

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

**Экспериментальная установка**

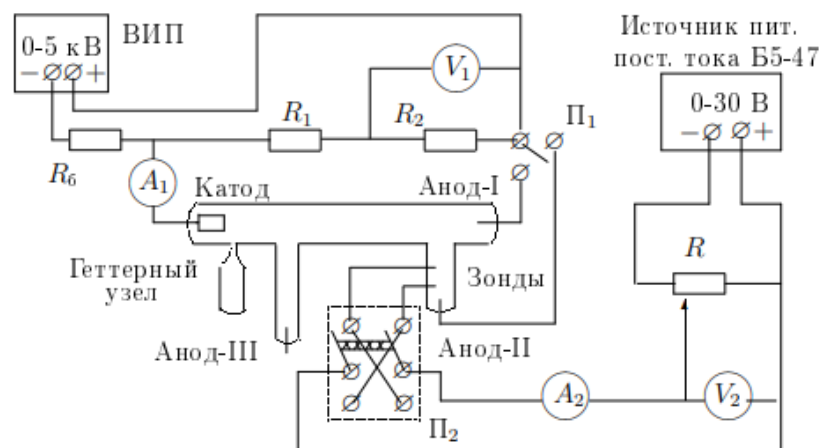


Рис. 1: Схема установки для исследования газового разряда

Стеклянная газоразрядная трубка имеет холодный (ненагреваемый) 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. При подключении к ВИП анода 1 между ним и катодом возникает газовый разряд. Ток разряда и падение напряжения измеряются с помощью мультиметров ( $A_1$  и  $U_1$  соотв.). При подключении к ВИП анода 2 разряд возникает в пространстве между катодом и анодом 2, где находится двойной зонд, используемый для диагностики плазмы положительного столба.

Переключатель П2 позволяет менять полярность напряжения на зондах.

Зонд изготовлен из молибденовой проволоки диаметром  $d$  и имеют длину  $l$ .

### Ход работы:

#### I. Вольт-амперная характеристика разряда:

1) Подготовим приборы к работе:

- Установим переключатель П1 в положение "Анод 1".
- Поставим ручку регулировки выходного напряжения ВИП в крайнее левое положение и включим прибор в сеть
- Подготовим к работе мультиметр V1

Плавно увеличивая выходное напряжение ВИП, определим напряжение зажигания разряда  $U_{\text{зж}}$  (показания вольтметра V1 перед зажиганием)

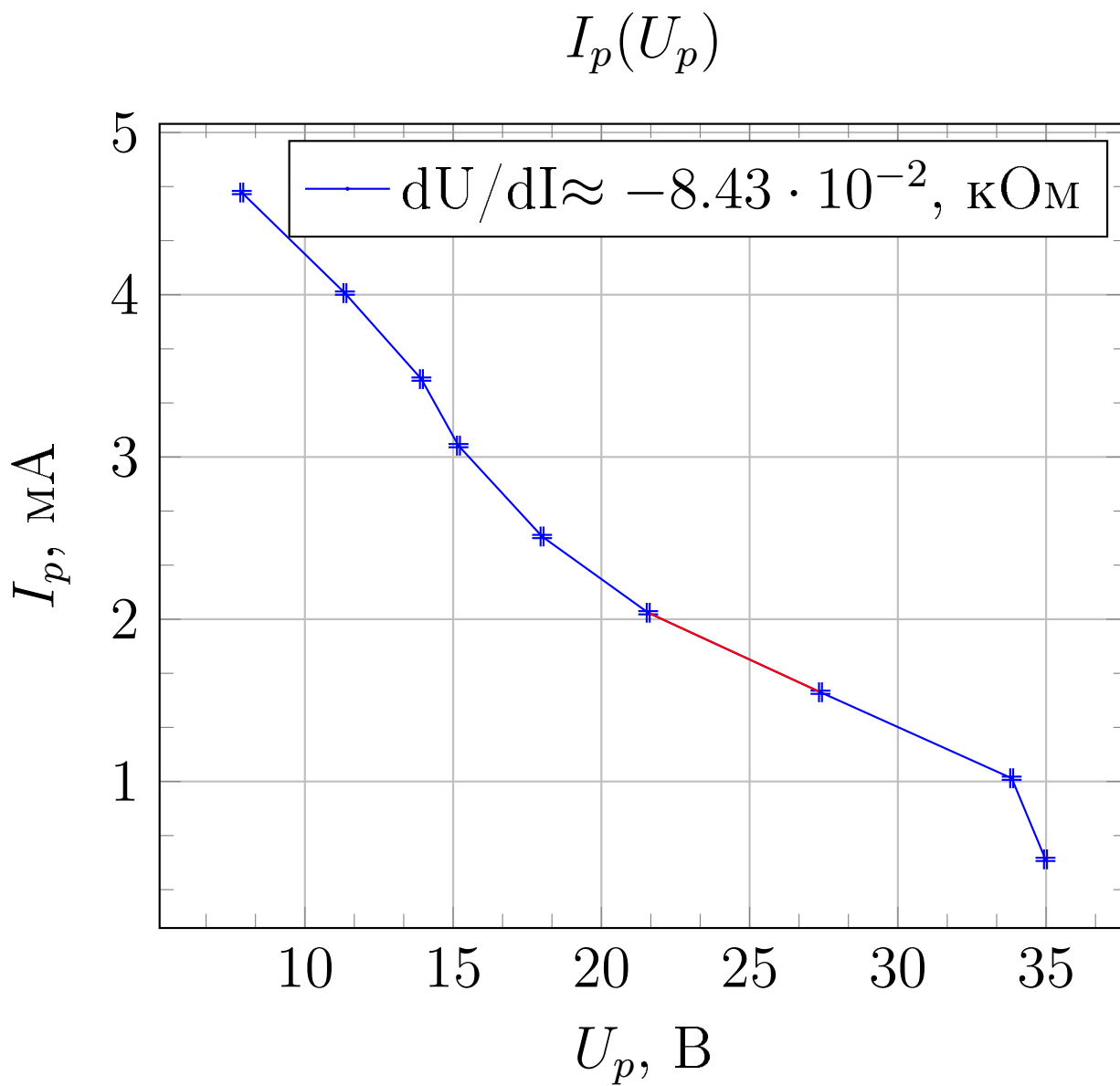
$U_{\text{зж}} \approx 220 \text{ В}$
---------------------------------------

2) С помощью вольтметра  $V_1$  и амперметра  $A_1$  снимем вольт-амперную характеристику разряда  $I_p(U_p)$ . Ток разряда  $I_p$  будем изменять в диапазоне от 0,5 мА до  $\approx 5$  мА.

При нарастании тока	
$U_p, \text{ В}$	$I_p, \text{ мА}$
$34.93 \pm 0.05$	$0.53 \pm 0.01$
$33.02 \pm 0.05$	$1.19 \pm 0.01$
$28.44 \pm 0.05$	$1.51 \pm 0.01$
$21.88 \pm 0.05$	$2.03 \pm 0.01$
$17.95 \pm 0.05$	$2.54 \pm 0.01$
$15.62 \pm 0.05$	$3.02 \pm 0.01$
$14.00 \pm 0.05$	$3.51 \pm 0.01$
$11.16 \pm 0.05$	$4.08 \pm 0.01$
$8.73 \pm 0.05$	$4.50 \pm 0.01$

При убывании тока	
$U_p, \text{ В}$	$I_p, \text{ мА}$
$7.87 \pm 0.05$	$4.63 \pm 0.01$
$11.35 \pm 0.05$	$4.01 \pm 0.01$
$13.93 \pm 0.05$	$3.48 \pm 0.01$
$15.18 \pm 0.05$	$3.07 \pm 0.01$
$18.00 \pm 0.05$	$2.51 \pm 0.01$
$21.58 \pm 0.05$	$2.04 \pm 0.01$
$27.39 \pm 0.05$	$1.55 \pm 0.01$
$33.84 \pm 0.05$	$1.02 \pm 0.01$
$34.98 \pm 0.05$	$0.52 \pm 0.01$

3) Построим вольт-амперную характеристику разряда в координатах  $I_p(U_p)$ . Данные возьмем при убывании тока.

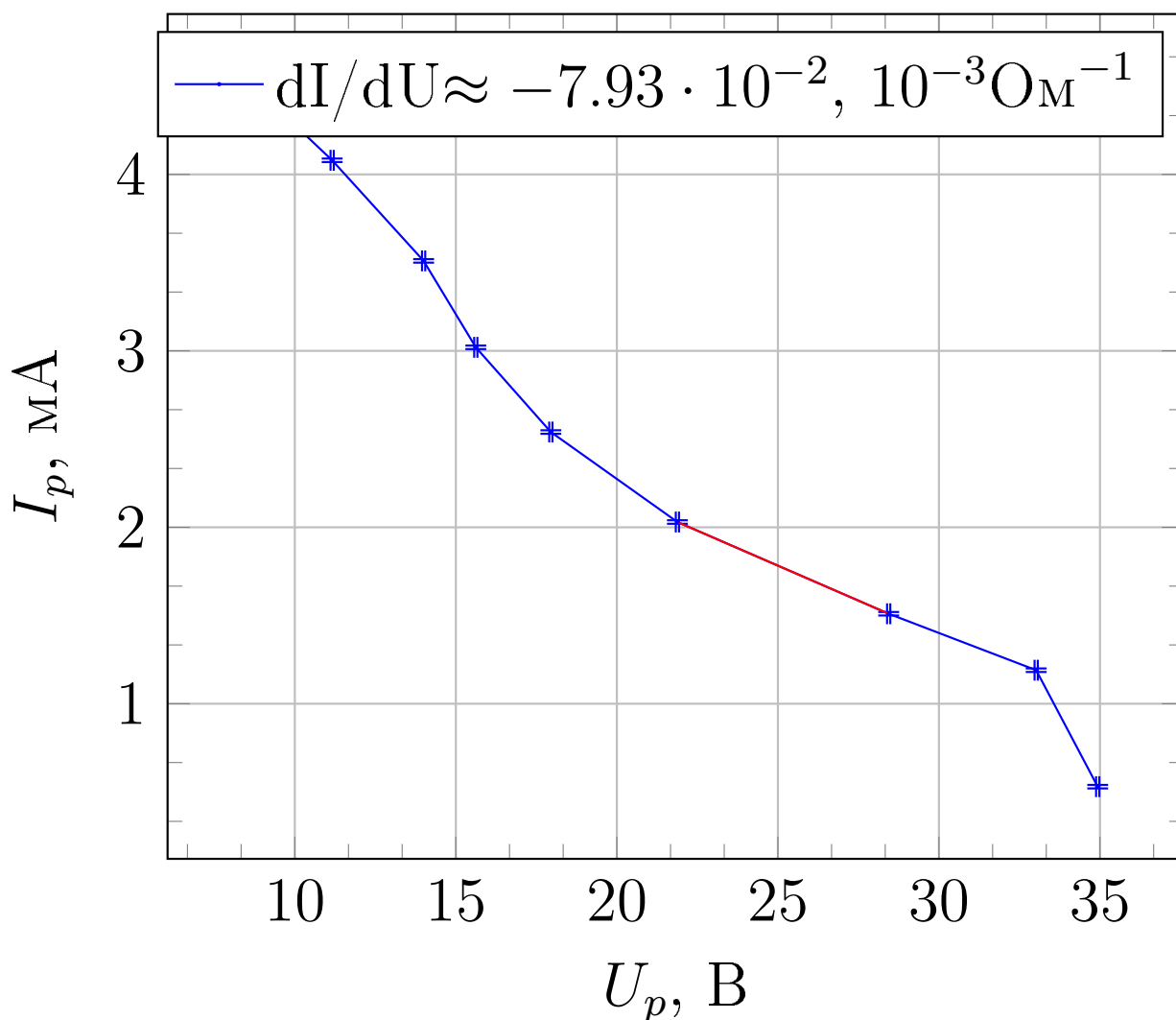


По наклону кривой определим максимальное дифференциальное сопротивление разряда  $R_{\text{диф}} = dU/dI$ . Для этого возьмём участок графика, с наименьшим наклоном.

$$R_{\text{диф}} = (11.9 \pm 0.7) \text{ kOhm}$$

Проделаем то же самое для данных при возрастании тока:

$$I_p(U_p)$$



Аналогично выбираем часть графика с наименьшим наклоном и находим  $R_{\text{диф}}$ :

$$R_{\text{диф}} = (12.6 \pm 0.7) \text{ кОм}$$

Таким образом получаем 2 значения для  $R_{\text{диф}}$ , которые совпадают в пределах абсолютной погрешности. Усредним значение и далее будем использовать именно его:

$R_{\text{диф}}^{\text{нараст}}, \text{кОм}$	$R_{\text{диф}}^{\text{убыв}}, \text{кОм}$	$R_{\text{диф}}^{\text{сред}}, \text{кОм}$
$12.6 \pm 0.7$	$11.9 \pm 0.7$	$12.3 \pm 0.7$

Полученный график соответствует поднормальному участку ВАХ (см. приложение в учебнике). При токе  $I_p \approx 4.5 \text{ мА}$  кривая переходит в вертикальный участок ГВ графика из приложения (темный таунсендовский разряд. Токи и степень ионизации еще малы, чтобы вызвать свечение, но критерий Таунсенда выполнен).

#### Зондовые характеристики

4) Уменьшим напряжение ВИП до нуля и переведем П1 в положение "Анод 2 П2 в положение "+". Подготовим мультиметры А2 и U2, включим приборы в сеть.

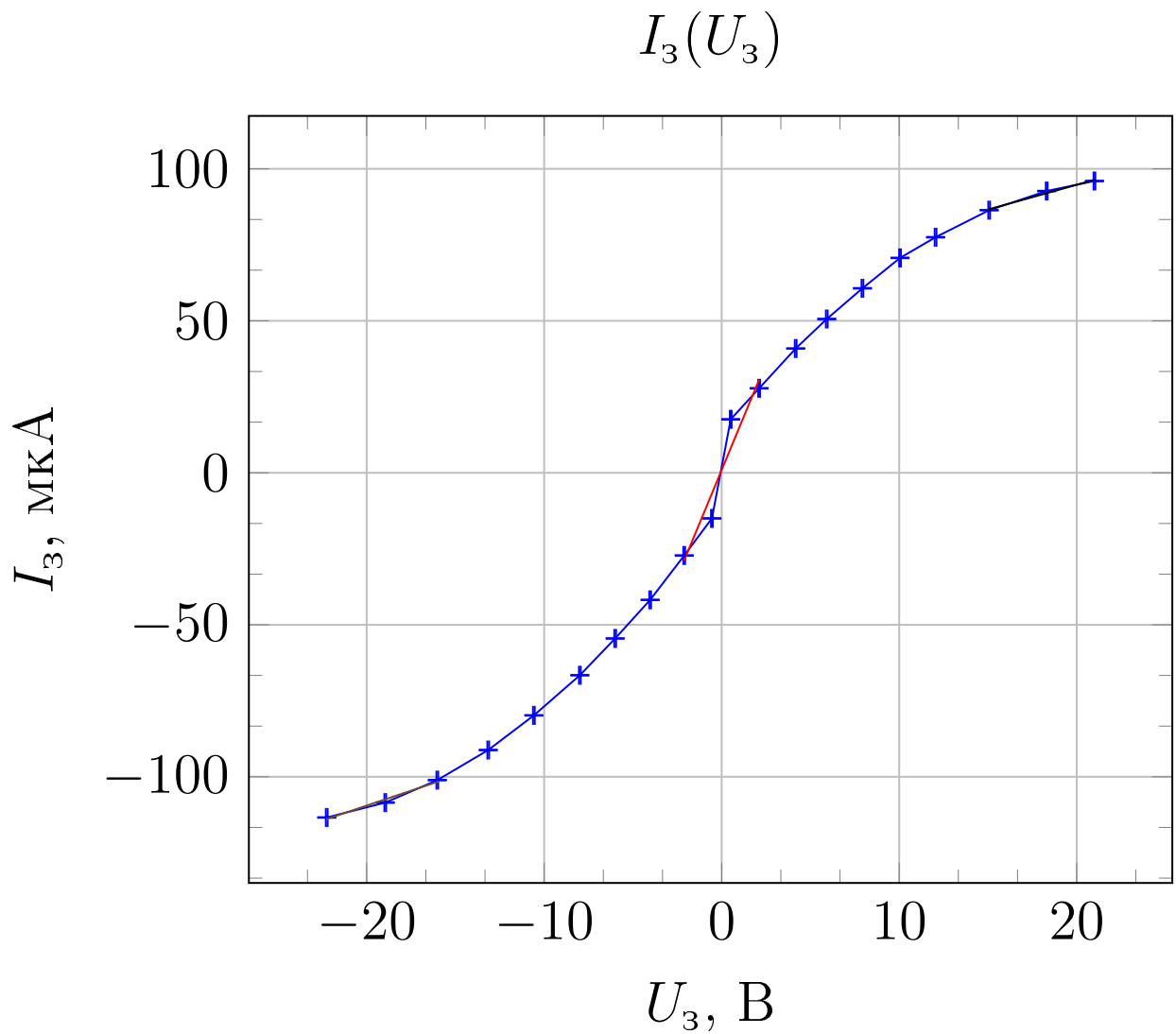
5) Плавное увеличение напряжения на ВИП дойдем до возникновения разряда и установим разрядный ток  $I_p = (4.73 \pm 0.01) \text{ мА}$ . Включим в сеть источник питания GPS и установим на нем напряжение  $U_2 \approx 25 \text{ В}$ . При помощи потенциометра установим на зонде

максимальное напряжение  $U_2 \approx 25\text{В}$ .

6) С помощью мультиметров  $A_2$  и  $U_2$  снимем ВАХ двойного зонда  $I_3(U_3)$  (в диапазоне  $+25\text{В}$  до  $-25\text{В}$ ) при фиксированном токе разряда  $I_p$ .

$U_3, \text{В}$	$I_3, \text{мкА}$	$I_p, \text{мА}$
$-25.01 \pm 0.05$	$-115.9 \pm 0.1$	$4.73 \pm 0.01$
$-22.25 \pm 0.05$	$-113.4 \pm 0.1$	
$-18.95 \pm 0.05$	$-108.5 \pm 0.1$	
$-16.02 \pm 0.05$	$-101.1 \pm 0.1$	
$-13.15 \pm 0.05$	$-91.2 \pm 0.1$	
$-10.58 \pm 0.05$	$-79.8 \pm 0.1$	
$-7.99 \pm 0.05$	$-66.6 \pm 0.1$	
$-6.00 \pm 0.05$	$-54.5 \pm 0.1$	
$-4.03 \pm 0.05$	$-41.8 \pm 0.1$	
$-2.11 \pm 0.05$	$-27.2 \pm 0.1$	
$-0.55 \pm 0.05$	$-15.0 \pm 0.1$	
$0.51 \pm 0.05$	$17.6 \pm 0.1$	
$2.11 \pm 0.05$	$27.8 \pm 0.1$	
$4.17 \pm 0.05$	$40.9 \pm 0.1$	
$5.92 \pm 0.05$	$50.6 \pm 0.1$	
$7.93 \pm 0.05$	$60.7 \pm 0.1$	
$10.05 \pm 0.05$	$70.7 \pm 0.1$	
$12.05 \pm 0.05$	$77.5 \pm 0.1$	
$15.07 \pm 0.05$	$86.4 \pm 0.1$	
$18.31 \pm 0.05$	$92.7 \pm 0.1$	
$21.00 \pm 0.05$	$96.0 \pm 0.1$	

7) Построим зондовую характеристику, предварительно отцентрировав кривую ( $I_0 = \Sigma I/2$ ). Найдем ток насыщения  $I_{\text{н}}$  из пересечения асимптоты к верхней и нижней части графика с осью  $U = 0$ , а также величину  $\frac{dI}{dU}$  при  $U = 0$ .



Откуда:

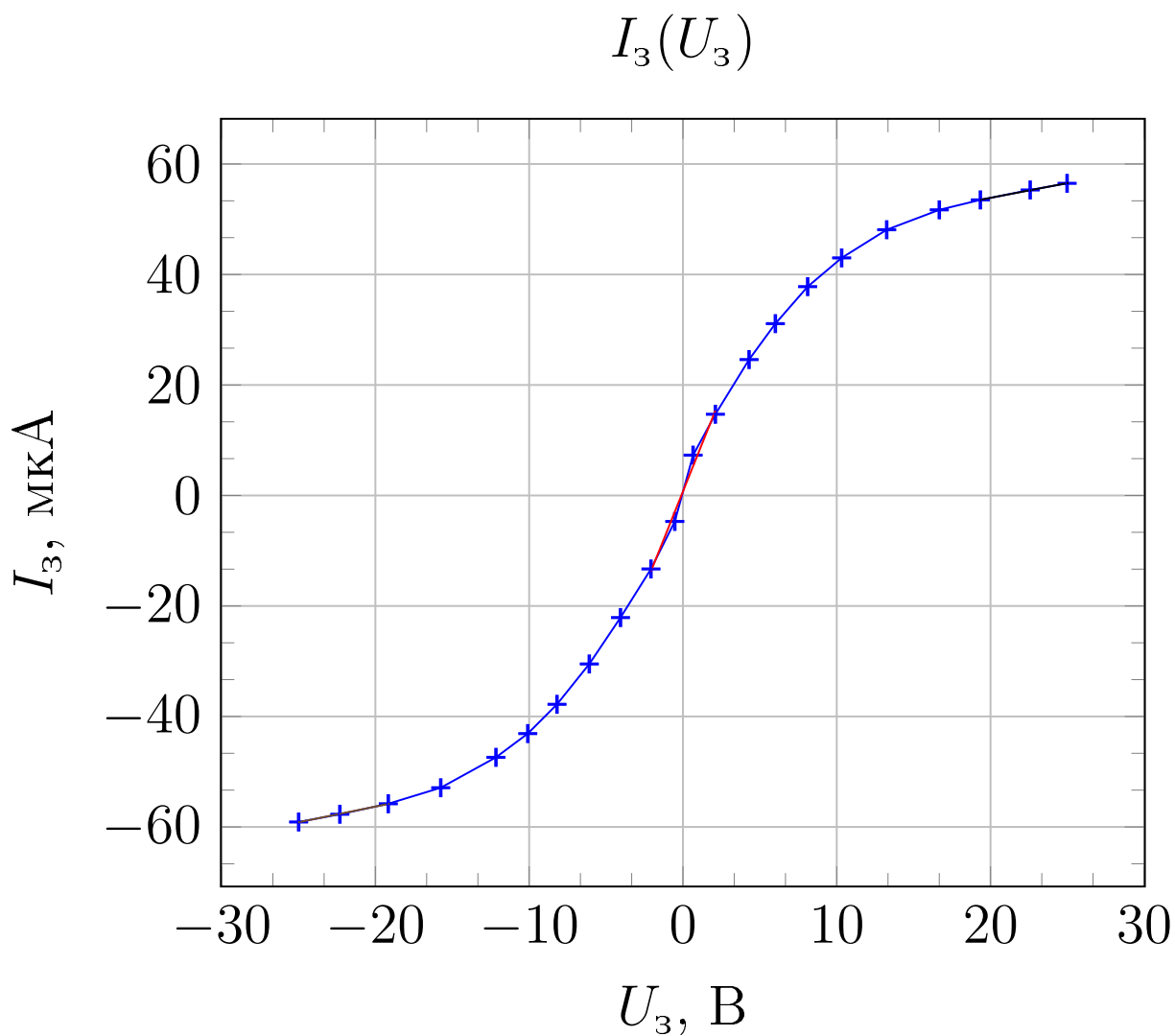
$\frac{dI}{dU}, \text{ мкА/В}$	$I_{\text{ин}}^{\text{асимптота снизу}}, \text{ мкА}$	$I_{\text{ин}}^{\text{асимптота сверху}}, \text{ мкА}$	$I_p, \text{ мА}$
$14.08 \pm 0.61$	$-70.2 \pm 2.8$	$62.2 \pm 2.6$	$4.73 \pm 0.01$

Усредним полученное значение для  $I_{\text{ин}}$ :  $(66.2 \pm 2.7) \text{ мкА}$ .

Определим  $\Delta U$  между точками 1 и 2:  $\Delta U = 4.42 \pm 0.38 \text{ В}$ .

8) Аналогичные измерения сделаем для токов разряда  $I_p = (2.99 \pm 0.01) \text{ мА}$  и  $I_p = (1.49 \pm 0.01) \text{ мА}$ .

$U_3$ , B	$I_3$ , мкА	$I_p$ , мА
-24.99 ± 0.05	-59.1 ± 0.1	2.99 ± 0.01
-22.31 ± 0.05	-57.7 ± 0.1	
-19.16 ± 0.05	-55.8 ± 0.1	
-15.75 ± 0.05	-52.9 ± 0.1	
-12.16 ± 0.05	-47.4 ± 0.1	
-10.09 ± 0.05	-43.1 ± 0.1	
-8.19 ± 0.05	-37.8 ± 0.1	
-6.09 ± 0.05	-30.5 ± 0.1	
-4.06 ± 0.05	-22.1 ± 0.1	
-2.08 ± 0.05	-13.3 ± 0.1	
-0.53 ± 0.05	-4.7 ± 0.1	
0.66 ± 0.05	7.3 ± 0.1	
2.11 ± 0.05	14.7 ± 0.1	
4.30 ± 0.05	24.6 ± 0.1	
6.01 ± 0.05	31.1 ± 0.1	
8.11 ± 0.05	37.8 ± 0.1	
10.32 ± 0.05	43.0 ± 0.1	
13.25 ± 0.05	48.1 ± 0.1	
16.67 ± 0.05	51.7 ± 0.1	
19.34 ± 0.05	53.5 ± 0.1	
22.58 ± 0.05	55.3 ± 0.1	
24.98 ± 0.05	56.5 ± 0.1	



Откуда:

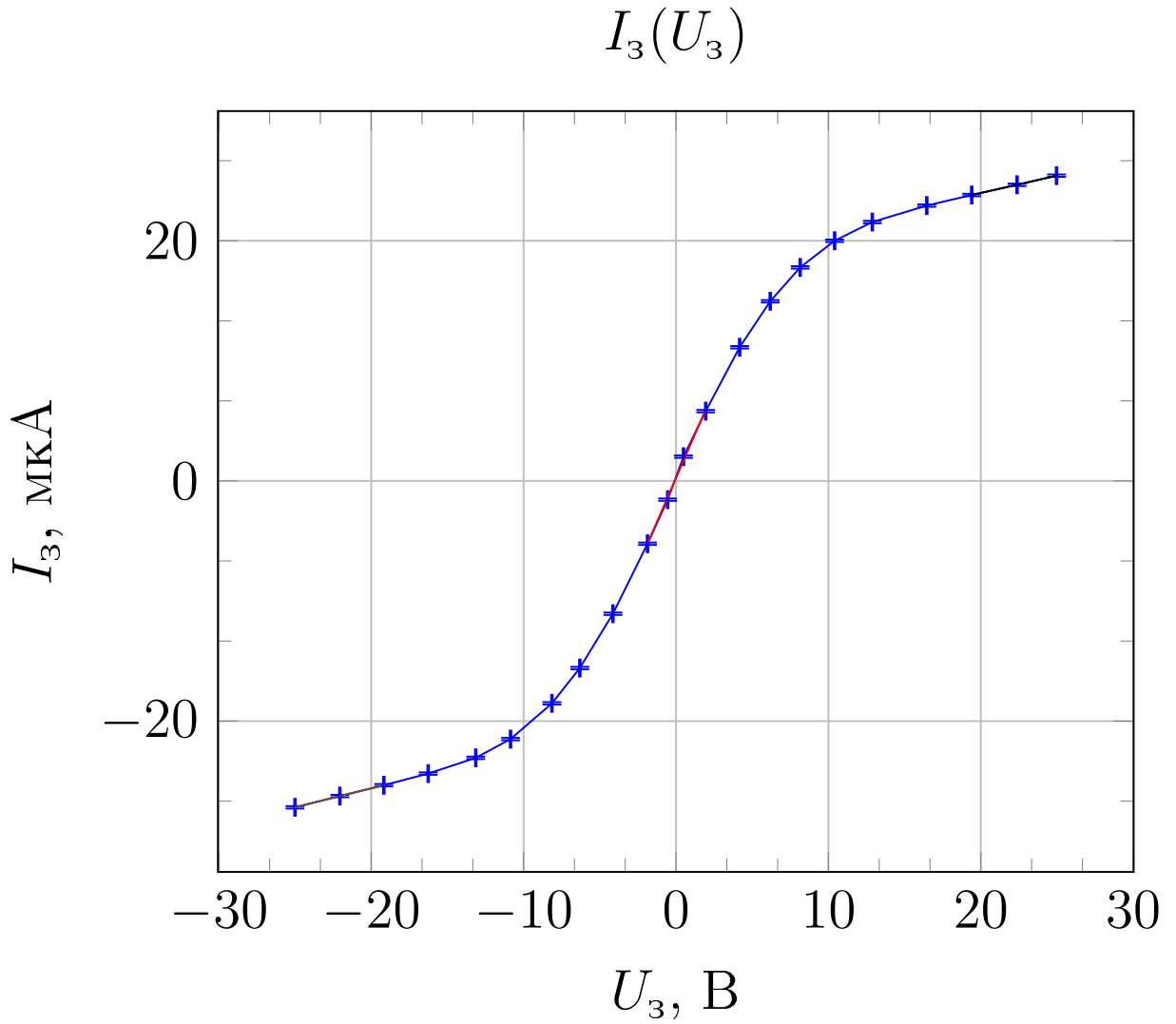
$\frac{dI}{dU}, \text{ мкА/В}$	$I_{iн}^{\text{асимптота снизу}}, \text{ мкА}$	$I_{iн}^{\text{асимптота сверху}}, \text{ мкА}$	$I_p, \text{ мА}$
$6.94 \pm 0.30$	$-45.0 \pm 1.8$	$43.2 \pm 1.8$	$2.99 \pm 0.01$

Усредним полученное значение для  $I_{iн}$ :  $(44.1 \pm 1.8) \text{ мкА}$ .

Определим  $\Delta U$  между точками 1 и 2:  $\Delta U = 6.90 \pm 0.59 \text{ В}$ .



$U_3$ , B	$I_3$ , mA	$I_p$ , mA
-25.00 $\pm$ 0.05	-27.2 $\pm$ 0.1	1.49 $\pm$ 0.01
-22.06 $\pm$ 0.05	-26.2 $\pm$ 0.1	
-19.17 $\pm$ 0.05	-25.3 $\pm$ 0.1	
-16.26 $\pm$ 0.05	-24.4 $\pm$ 0.1	
-13.14 $\pm$ 0.05	-23.1 $\pm$ 0.1	
-10.86 $\pm$ 0.05	-21.5 $\pm$ 0.1	
-8.14 $\pm$ 0.05	-18.5 $\pm$ 0.1	
-6.31 $\pm$ 0.05	-15.6 $\pm$ 0.1	
-4.14 $\pm$ 0.05	-11.1 $\pm$ 0.1	
-1.87 $\pm$ 0.05	-5.2 $\pm$ 0.1	
-0.55 $\pm$ 0.05	-1.6 $\pm$ 0.1	
0.49 $\pm$ 0.05	2.0 $\pm$ 0.1	
1.95 $\pm$ 0.05	5.8 $\pm$ 0.1	
4.18 $\pm$ 0.05	11.1 $\pm$ 0.1	
6.18 $\pm$ 0.05	15.0 $\pm$ 0.1	
8.15 $\pm$ 0.05	17.8 $\pm$ 0.1	
10.41 $\pm$ 0.05	20.0 $\pm$ 0.1	
12.88 $\pm$ 0.05	21.6 $\pm$ 0.1	
16.46 $\pm$ 0.05	22.9 $\pm$ 0.1	
19.40 $\pm$ 0.05	23.8 $\pm$ 0.1	
22.38 $\pm$ 0.05	24.7 $\pm$ 0.1	
24.97 $\pm$ 0.05	25.4 $\pm$ 0.1	



Откуда:

$\frac{dI}{dU}, \text{ мкА/В}$	$I_{\text{ин}}^{\text{асимптота снизу}}, \text{ мкА}$	$I_{\text{ин}}^{\text{асимптота сверху}}, \text{ мкА}$	$I_p, \text{ мА}$
$2.93 \pm 0.13$	$-19.3 \pm 0.8$	$18.2 \pm 0.8$	$1.49 \pm 0.01$

Усредним полученное значение для  $I_{\text{ин}}$ :  $(18.8 \pm 0.8) \text{ мкА}$ .

Определим  $\Delta U$  между точками 1 и 2:  $\Delta U = 7.59 \pm 0.65 \text{ В}$

9) Занесем данные, необходимые для расчёта  $T_e$ ,  $n_e$ ,  $r_D$ ,  $r_{De}$ ,  $\omega_p$ ,  $N_D$ ,  $\alpha$  в таблицу:

$I_p, \text{ мА}$	$\frac{dI}{dU} _{U=0}, \text{ мкА/В}$	$I_{\text{ин}}, \text{ мкА}$	$\Delta U, \text{ В}$	d, мм	l, мм
$4.73 \pm 0.01$	$14.08 \pm 0.61$	$66.2 \pm 2.7$	$4.42 \pm 0.38$	0,2	5,2
$2.99 \pm 0.01$	$6.94 \pm 0.30$	$44.1 \pm 1.8$	$6.90 \pm 0.59$		
$1.49 \pm 0.01$	$2.93 \pm 0.13$	$18.8 \pm 0.8$	$7.59 \pm 0.65$		

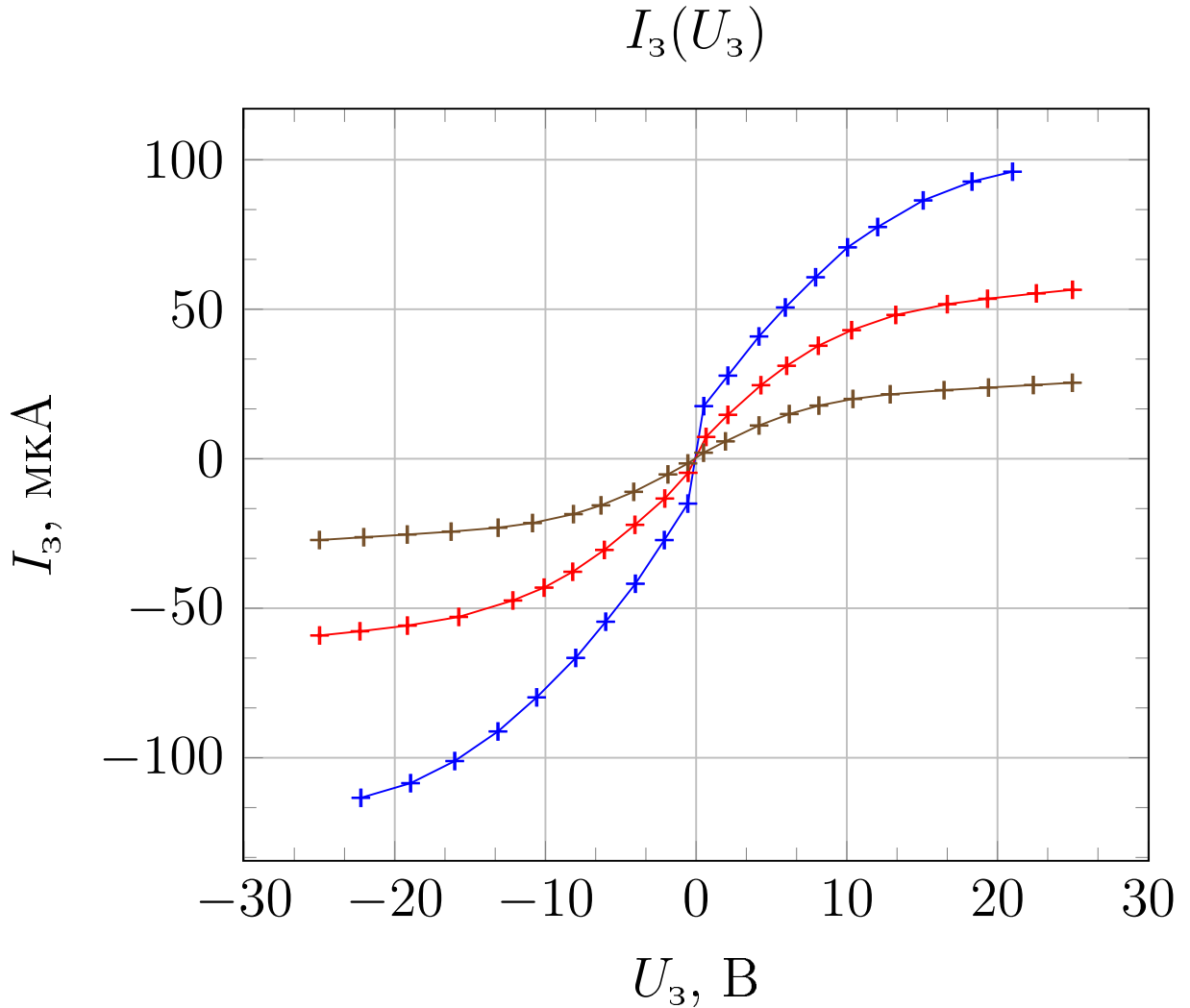
10) Рассчитаем температуру электронов  $T_e$  по формулам:

$$T_e = \frac{1}{2k} \frac{eI_{\text{ин}}}{\frac{dI}{dU}|_{U=0}} (1)$$

$$kT_e = \Delta U / 2.9 (2)$$

$I_p$ , мА	$T_e^{(1)}$ , $10^4\text{K}$	$T_e^{(2)}$ , $10^4\text{K}$	$T_e^{\text{cp}}$ , $10^4\text{K}$
$4.73 \pm 0.01$	$2.7 \pm 0.2$	$2.6 \pm 0.2$	$2.7 \pm 0.2$
$2.99 \pm 0.01$	$3.7 \pm 0.3$	$4.0 \pm 0.3$	$3.9 \pm 0.3$
$1.49 \pm 0.01$	$3.7 \pm 0.3$	$4.4 \pm 0.4$	$4.1 \pm 0.4$

11) Построим семейство зондовых характеристик  $I_3(U_3)$  на одном листе:



12) Полагая концентрацию элеткронов  $n_e$  равной концентрации ионов  $n_i$ , определим её, используя формулу Бома:

$$I_i = 0,4n_e e S \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}$$

Где  $S = \pi dl$  - площадь поверхности зонда,  $m_i = 22 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}$  кг - масса иона неона.

$I_p$ , мА	$S$ , мм <sup>2</sup>	$n_e$ , $10^{16}\text{м}^{-3}$
$4.73 \pm 0.01$	3.27	$7.0 \pm 0.5$
$2.99 \pm 0.01$		$3.9 \pm 0.3$
$1.49 \pm 0.01$		$1.6 \pm 0.1$

13) Рассчитаем плазменную частоту колебаний электронов по формуле:

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

$I_p, \text{ мА}$	$\omega_p, 10^9 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$
$4.73 \pm 0.01$	$14.8 \pm 0.5$
$2.99 \pm 0.01$	$11.1 \pm 0.4$
$1.49 \pm 0.01$	$7.1 \pm 0.2$

При падении на плазму электромагнитного излучения, через неё пройдут волны с частотами превышающими  $\omega_p$ .

14) Рассчитаем электронную поляризационную длину  $r_{De}$  по формуле:

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

А также дебаевский радиус экранирования  $r_D$  используя формулу:

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

Где  $T_e \gg T_i$ ,  $T_i \approx 300\text{K}$  - температура ионов приблизительно равна комнатной

$I_p, \text{ мА}$	$r_{De}, \text{ мкм}$	$r_D, \text{ мкм}$
$4.73 \pm 0.01$	$43 \pm 3$	$4.5 \pm 0.1$
$2.99 \pm 0.01$	$69 \pm 5$	$6.1 \pm 0.1$
$1.49 \pm 0.01$	$111 \pm 9$	$9.5 \pm 0.1$

Из полученных значений  $r_D$  ( $\approx 10^{-4} - 10^{-3}$  см) видим, что плазму можно считать квазинейтральной.

15) Оценим среднее число ионов в дебаевской сфере:

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

$I_p, \text{ мА}$	$N_D$
$4.73 \pm 0.01$	$27 \pm 4$
$2.99 \pm 0.01$	$37 \pm 5$
$1.49 \pm 0.01$	$57 \pm 5$

$N_D \gg 1$ , поэтому плазму можно считать идеальной.

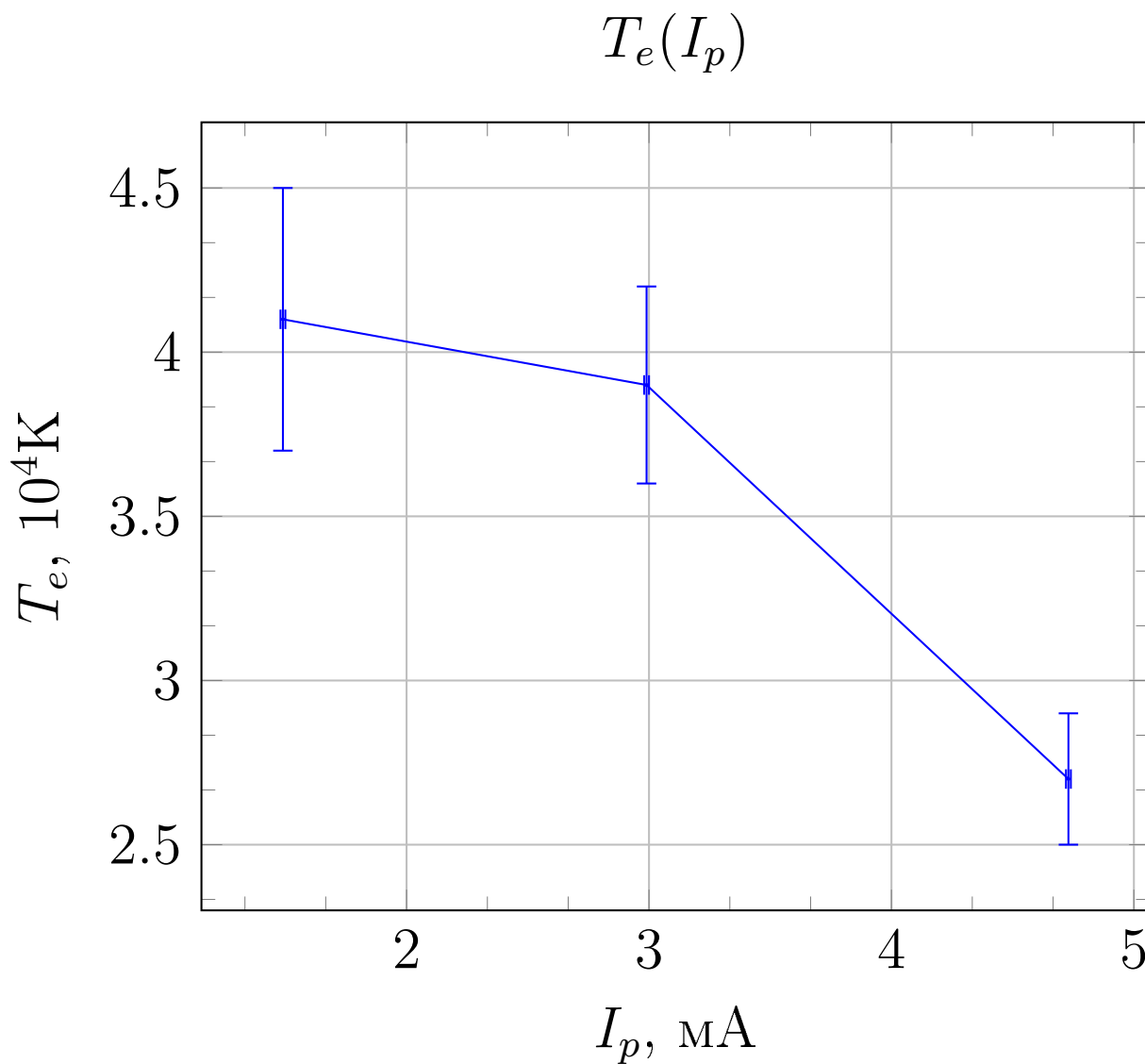
16) Оценим степень ионизации плазмы (долю ионизированных атомов  $\alpha$ ), если давление в трубке  $P \approx 2$  торр (2 мм.рт.ст.):

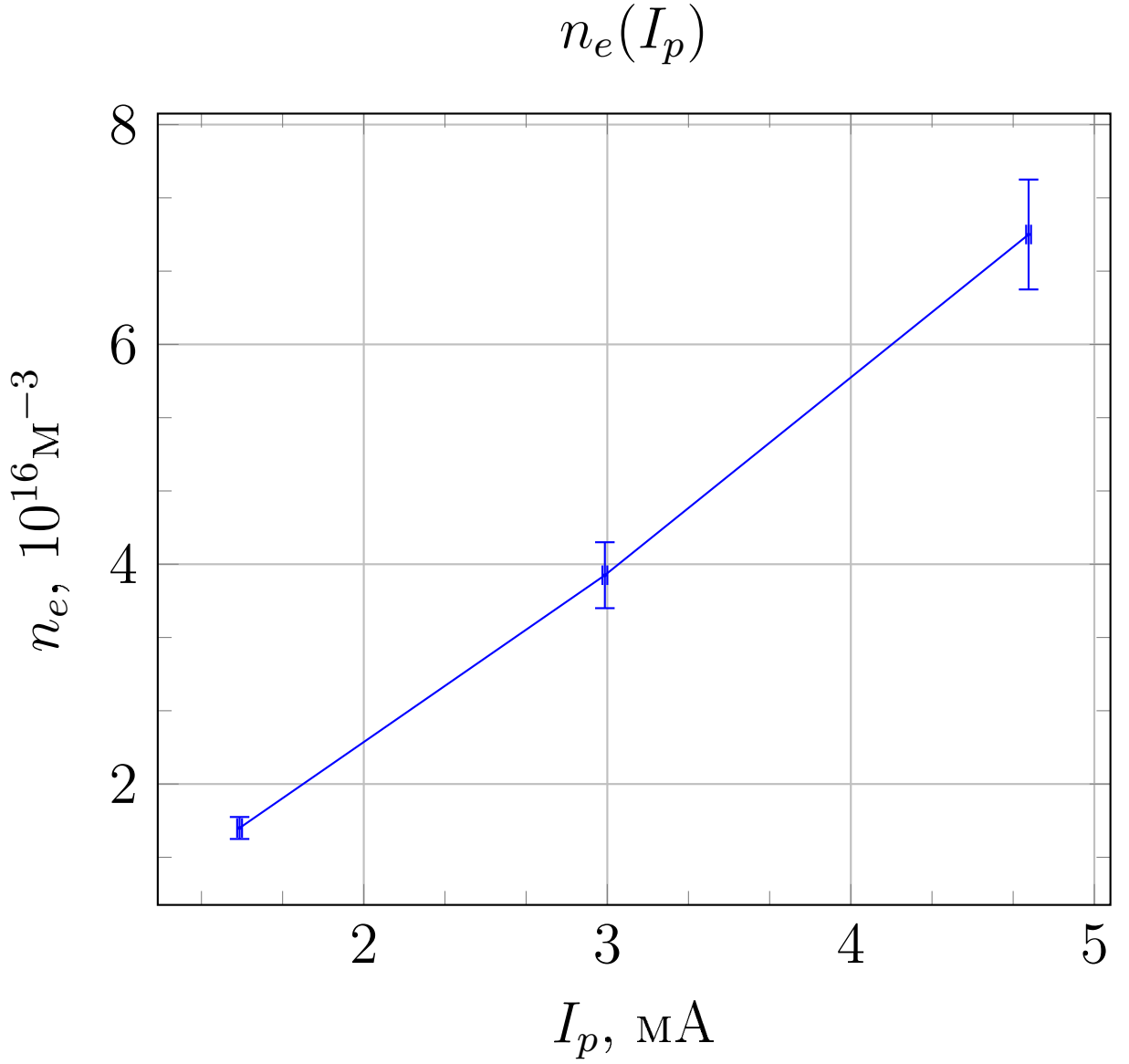
$$\alpha = \frac{n_i}{n}, \text{ где } n - \text{общее число частиц в единице объема } (P = nkT_i)$$

$I_p$ , мА	$\alpha$ , $10^{-7}$
$4.73 \pm 0.01$	$10.9 \pm 0.8$
$2.99 \pm 0.01$	$6.1 \pm 0.5$
$1.49 \pm 0.01$	$2.5 \pm 0.2$

При нормальных условиях ( $P = 1$  атм = 760 мм.рт.ст.,  $T = 273,15$  К)  $n = N_L$  - число Лошмидта.

17) Построим графики зависимостей электронной температуры и концентрации электронов от тока разряда:  $T_e(I_p)$ ,  $n_e(I_p)$ .





Откуда видим, что график  $T_e(I_p)$  обладает большой погрешностью и конкретных выводов сделать нельзя. Из графика  $n_e(I_p)$  видим, что концентрация электронов возрастает при увеличении тока разряда, поскольку чем выше электрическое поле, тем больше скорость электронов, а значит больше столкновений с молекулами газа, то есть ионов становится больше.

### Вывод

Результаты измерений:

$I_p$ , мА	$T_e$ , $10^4$ К	$n_e$ , $10^{16} \text{ м}^{-3}$	$\omega_p$ $10^9 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$r_{De}$ , мкм	$r_D$ , мкм	$N_D$	$\alpha$ , $10^{-7}$
$4.73 \pm 0.01$	$2.7 \pm 0.2$	$7.0 \pm 0.5$	$14.8 \pm 0.5$	$43 \pm 3$	$4.5 \pm 0.1$	$27 \pm 4$	$10.9 \pm 0.8$
$2.99 \pm 0.01$	$3.9 \pm 0.3$	$3.9 \pm 0.3$	$11.1 \pm 0.4$	$69 \pm 5$	$6.1 \pm 0.1$	$37 \pm 5$	$6.1 \pm 0.5$
$1.49 \pm 0.01$	$4.1 \pm 0.4$	$1.6 \pm 0.1$	$7.1 \pm 0.2$	$111 \pm 9$	$9.5 \pm 0.1$	$57 \pm 5$	$2.5 \pm 0.2$