

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3.5.1

Изучение плазмы газового разряда в неоне

выполнил студент 006 группы ФЭФМ
Штрайх Роберт

Долгопрудный, 2021 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, источник питания постоянного тока, делитель напряжения, резистор, потенциометр, амперметры, вольтметры, переключатели.

1 Теоретическое введение

Плазма

В ионизированном газе поле ионов «экранируется» электронами. Для поля \mathbf{E} и плотности ρ 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

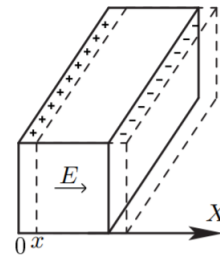
$$\varphi = \frac{Ze}{r} e^{-r/r_D}, \quad (3)$$

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

$$N_D = n \frac{4}{3} \pi r_D^2. \quad (4)$$

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:

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

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:

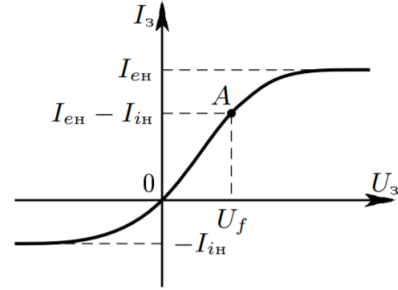
$$\begin{aligned} I_{e0} &= \frac{n\langle v_e \rangle}{4} eS, \\ I_{i0} &= \frac{n\langle v_i \rangle}{4} eS, \end{aligned} \quad (6)$$

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_z на зонд и снимать значение зондового тока I_z . Максимальное значение тока I_{en} – электронный ток насыщения, а минимальное I_{in} – ионный ток насыщения. Значение из эмпирической формулы Бомона:



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

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

$$I_1 = I_{\text{ин}} + I_{e1} = I_{\text{ин}} - \frac{1}{4} n e S \langle v_e \rangle \exp\left(-\frac{e U_f}{k T_e}\right) \exp\left(\frac{e \Delta U_1}{k T_e}\right) = I_{\text{ин}} \left(1 - \exp\left(\frac{e \Delta U_1}{k T_e}\right)\right). \quad (8)$$

Аналогично через второй получим

$$I_2 = I_{\text{ин}} \left(1 - \exp\left(\frac{e \Delta U_2}{k T_e}\right)\right) \quad (9)$$

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

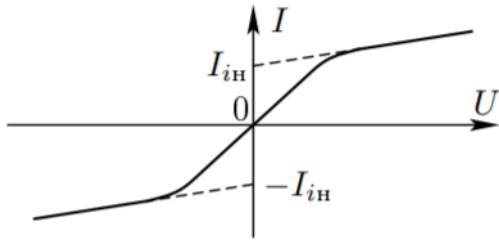
$$\Delta U_1 = \frac{k T_e}{e} \ln \left(1 - \frac{I}{I_{\text{ин}}}\right)$$

$$\Delta U_2 = \frac{k T_e}{e} \ln \left(1 + \frac{I}{I_{\text{ин}}}\right)$$

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока

$$U = \frac{k T_e}{e} \ln \frac{1 - I/I_{\text{ин}}}{1 + I/I_{\text{ин}}}, I = I_{\text{ин}} \operatorname{th} \frac{e U}{2 k T_e}. \quad (10)$$

Реальная зависимость выглядит несколько иначе и описывается формулой



$$I = I_{\text{ин}} \operatorname{th} \frac{e U}{2 k T_e} + A U. \quad (11)$$

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 $\operatorname{th} \alpha \approx \alpha$ при малых α и $A \rightarrow 0$ получим:

$$k T_e = \frac{1}{2} \frac{e I_{\text{ин}}}{\frac{d I}{d U}|_{U=0}}. \quad (12)$$

2 Экспериментальная установка

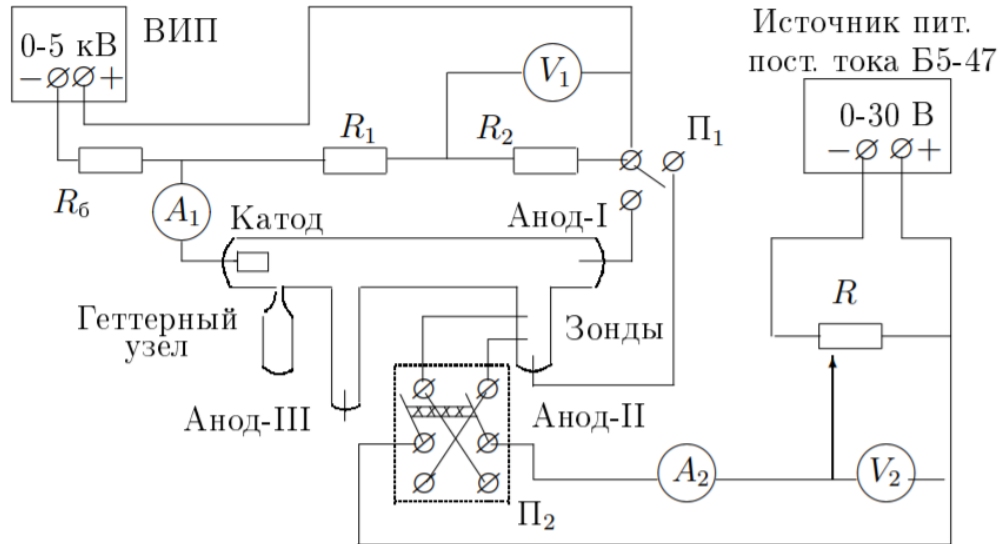


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Схема установки для исследования плазмы газового разряда в неоне представлена на рис. 1. Стеклообразная газоразрядная трубка имеет холодный (не нагреваемый) 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 или II) с помощью переключателя Π_1 подключаются через балластный резистор R (~ 500 кОм) к регулируемому высоковольтному источнику питания (ВИП) с выходным напряжением до нескольких киловольт.

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 – вольтметром V_1 , подключённым к трубке через высокоомный (несколько десятков МОм) делитель напряжения с коэффициентом $(R_1 + R_2)/R_2$.

При подключении к ВИП анода-II разряд возникает в пространстве между катодом и анодом-II, где находится двойной зонд, используемый для диагностики плазмы положительного столба. Зонды изготовлены из молибденовой проволоки диаметром d и имеют длину l . Они подключены к источнику питания 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 вольтметром V_2 . Для измерения зондового тока используется микроамперметр A_2 . Анод-III в нашей работе не используется.

3 Ход работы

Измерим вольт-амперную характеристику разряда и данные занесём в таблицу 1:

Таблица 1: ВАХ разряда

I , мА	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2	3,6	4	4,4	4,8
U , В	344,2	334,3	297,6	231,82	205,5	197,5	191,2	180	171,2	166,6	163
I , мА	4,8	4,4	4	3,6	3,2	2,8	2,4	2	1,6	1,2	0,8
U , В	163	166,6	171,8	180,3	191,1	194,36	204,3	226	296,5	331,8	342,96

По данным таблицы построим график 2. Оценим максимальное дифференциальное сопротивление заряда:

$$R_{\text{диф}} = dU/dI$$

$$R_{\text{диф}} = (-18,3 \pm 0,2) \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

Параметры зонда: $d = 0.2$ мм, $l = 5.2$ мм Измерим его ВАХ при фиксированных токах разряда I_p . Занесём данные в таблицы 2 – 4:

Таблица 2: $I = 1.5$ мА

I , мкА	27,78	26,84	25,88	24,89	23,57	21,5	19,16	16	11,8	6,48	0,25
U , В	25	22	19	16	13	10	8	6	4	2	0
I , мкА	0,25	-6,19	-11,81	-16,32	-19,84	-22,4	-24,7	-26,026	-27,11	-28,13	-29,07
U , В	0	-2	-4	-6	-8	-10	-13	-16	-19	-22	-25

Таблица 3: $I = 3$ мА

I , мкА	58,06	56,41	54,79	53	50,62	46,16	41,28	34,58	25,76	14,8	3,34
U , В	25	22	19	16	13	10	8	6	4	2	0
I , мкА	-2,79	-13,53	-24,82	-34,34	-42,2	-47,47	-52,35	-55,33	-57,2	-58,36	-60,66
U , В	0	-2	-4	-6	-8	-10	-13	-16	-19	-22	-25

Таблица 4: I = 5 мА

I , мкА	108,58	106,34	103,53	99,88	93,84	84,74	75,68	64,19	49,15	32,88	18,92
U , В	25	22	19	16	13	10	8	6	4	2	0
I , мкА	-15	-32,71	-50	-65,15	-77,8	-88,03	-98,21	-104,92	-109,4	-112,57	-115,31
U , В	0	-2	-4	-6	-8	-10	-13	-16	-19	-22	-25

По данным таблиц построим зондовые характеристики $I(U)$.

По каждой из зондовых характеристик (3 – 5) определим ионный ток насыщения I_{in} по пересечению асимптот к графику с осью координат.

Таблица 5: Токи насыщения

	I=1.5 мА	I=3 мА	I=5 мА
I_{in} , мкА	$18,57 \pm 0.2$	$39,71 \pm 0.1$	$71,23 \pm 0.2$

По каждой из зондовых характеристик определим наклон характеристики $(dI/dU)_{U=0}$ (рис. 3 – 5).

Таблица 6: Наклоны характеристики

	I=1.5 мА	I=3 мА	I=5 мА
dI/dU , мкА/В	3.24 ± 1.03	6.77 ± 1.41	16.36 ± 2.09

Определим температуру электронов T_e :

$$kT_e = \frac{1}{2} \frac{eI_{in}}{\frac{dI}{dU}}$$

Таблица 7: Температура электронов

	I=1.5 мА	I=3 мА	I=5 мА
T_e , эВ	2.87 ± 0.86	2.93 ± 0.59	2.18 ± 0.39

Рассчитаем концентрацию электронов в плазме:

$$I_{in} = 0.4n_e e S \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}$$

$S = \pi \cdot d \cdot l$ – площадь поверхности зонда.
 $m_i = 22 \cdot 1.66 \cdot 10^{-27}$ кг – масса иона неона

Таблица 8: Концентрация электронов

	I=1.5 мА	I=3 мА	I=5 мА
$n_e \cdot 10^{16}, \text{м}^{-3}$	1.75 ± 0.23	3.72 ± 0.29	7.73 ± 0.56

Рассчитаем плазменную частоту колебаний электронов:

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

Таблица 9: Частота колебаний

	I=1.5 мА	I=3 мА	I=5 мА
$\omega_p \cdot 10^9, \text{с}^{-1}$	7.4 ± 0.5	10.8 ± 0.7	155.7 ± 7.1

Рассчитаем электронную поляризационную длину r_{De} :

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

Таблица 10: Электронная поляризационная длина

	I=1.5 мА	I=3 мА	I=5 мА
$r_{De} \cdot 10^{-3}, \text{см}$	9.61 ± 1.14	6.59 ± 0.65	4.57 ± 0.35

Рассчитаем дебаевский радиус экранирования r_D :

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

Таблица 11: Дебаевский радиус экранирования

	I=1.5 мА	I=3 мА	I=5 мА
$r_D \cdot 10^{-4}$, см	9.04 ± 0.48	6.20 ± 0.27	4.30 ± 0.13

Оценим среднее число ионов в дебаевской сфере:

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

$$N_D \sim 10^{-2}$$

Оценим степень ионизации плазмы, считая $P \simeq 2$ торр:

$$\alpha = n_e \frac{kT_e}{P}$$

Таблица 12: Степень ионизации плазмы

	I=1.5 мА	I=3 мА	I=5 мА
$\alpha \cdot 10^{-7}$	2.7 ± 0.5	5.8 ± 1.3	12.0 ± 2.7

Построим графики зависимостей $n_e(I)$, $T_e(I)$ (рис. 7 и рис. 8)

4 Выводы

1. Изучили вольт-амперную характеристику тлеющего заряда, изучили свойства плазмы методом зондовых характеристик;
2. Рассчитали важные характеристики плазмы: плазменную частоту электронов ω_p , электронную поляризационную длину r_{De} и дебаевский радиус экранирования r_D ;
3. Получили зависимости $n_e(I)$, $T_e(I)$.

5 Приложение

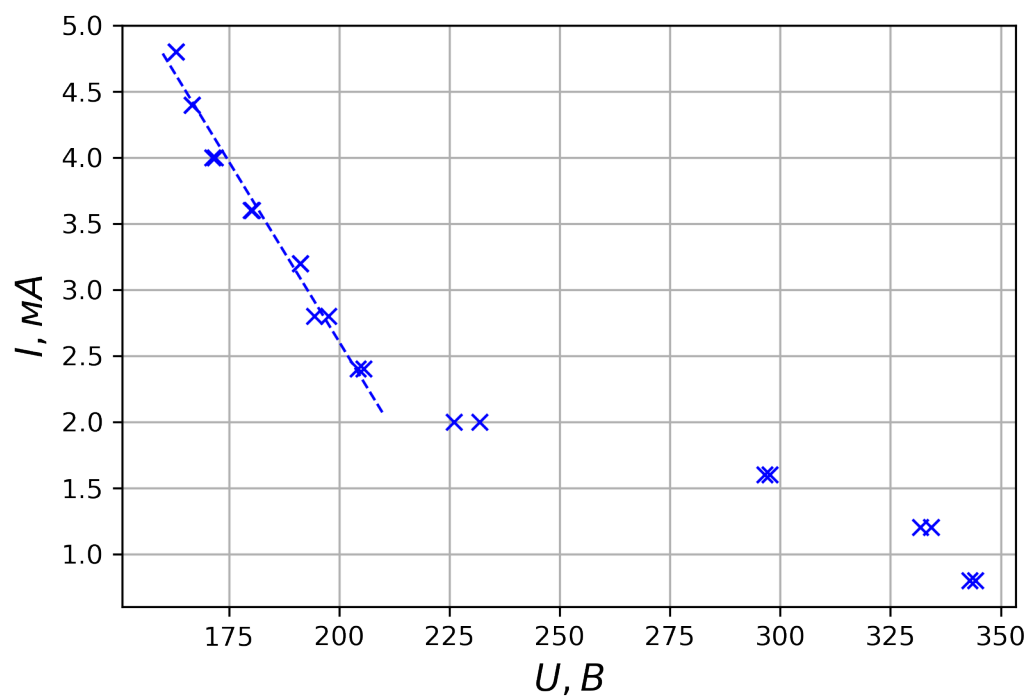


Рис. 2: ВАХ разряда

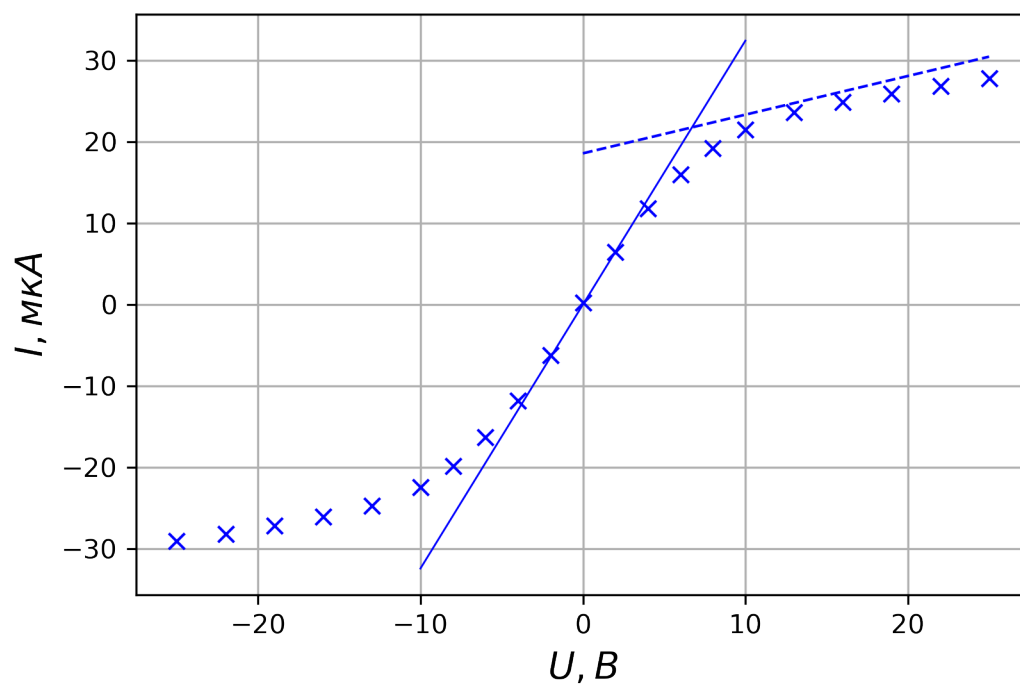


Рис. 3: Зондовая характеристика для $I = 1.5 \text{ mA}$

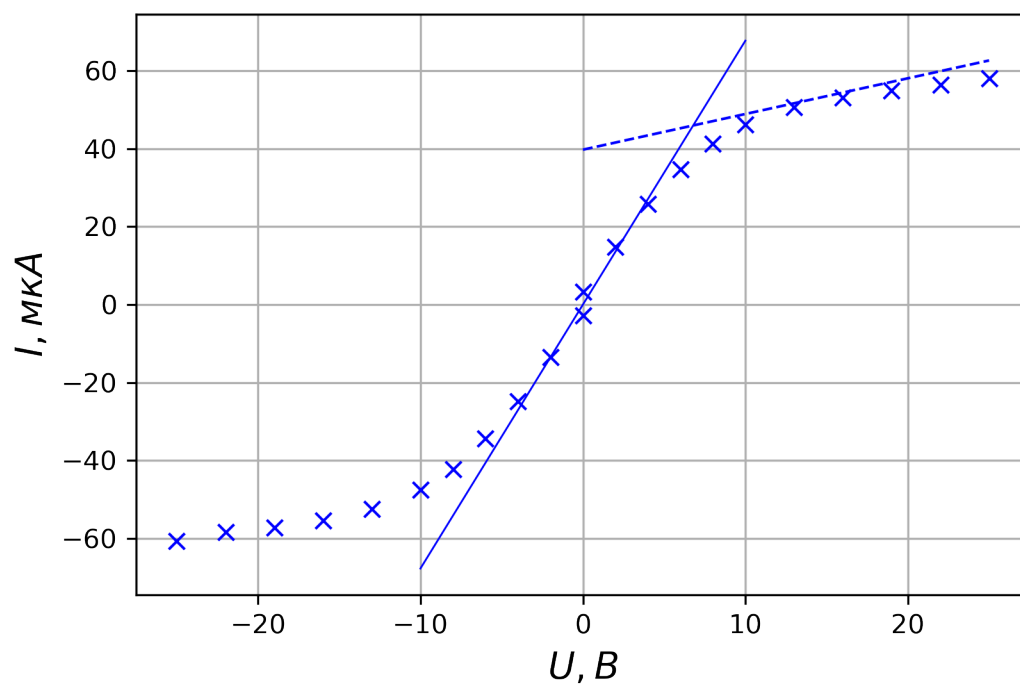


Рис. 4: Зондовая характеристика для $I = 3$ мА

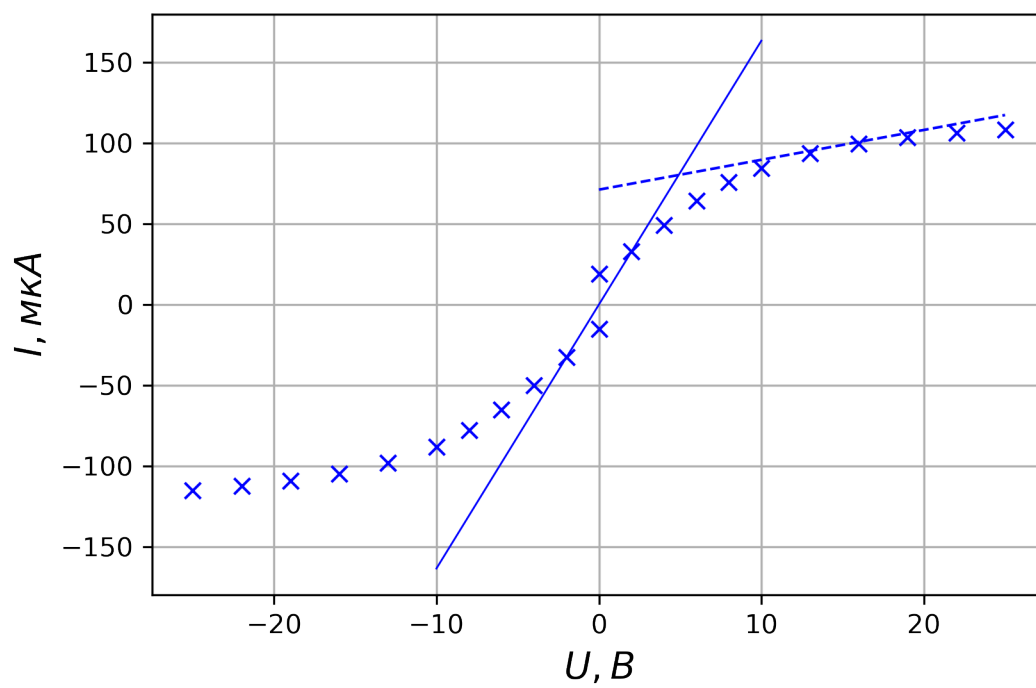


Рис. 5: Зондовая характеристика для $I = 5 \text{ mA}$

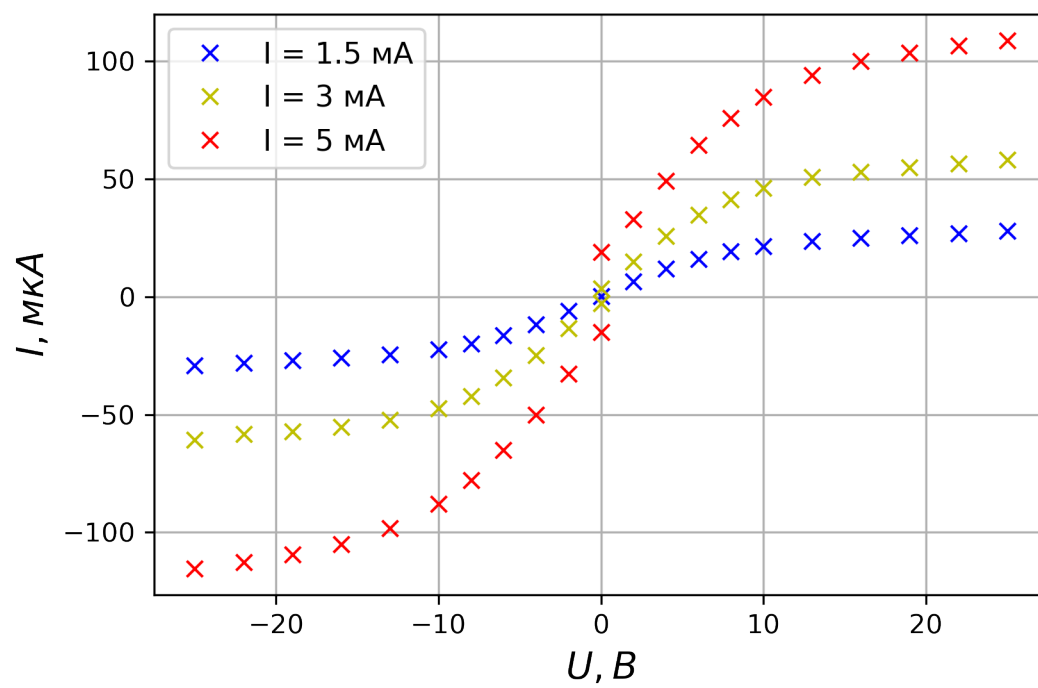


Рис. 6: Зондовые характеристики

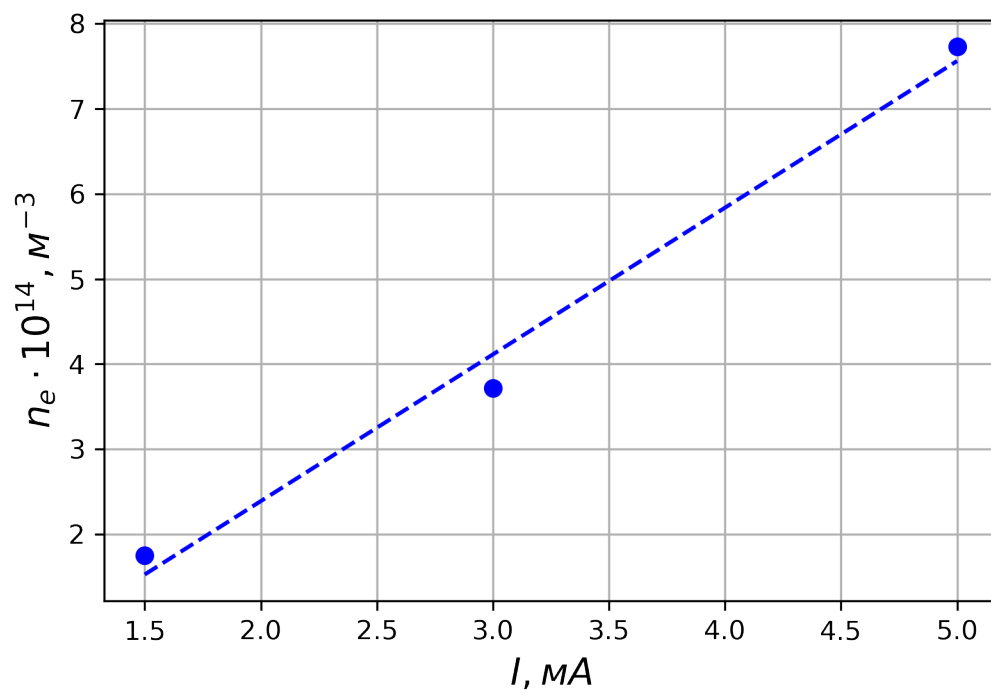


Рис. 7: Зависимость $n_e(I)$

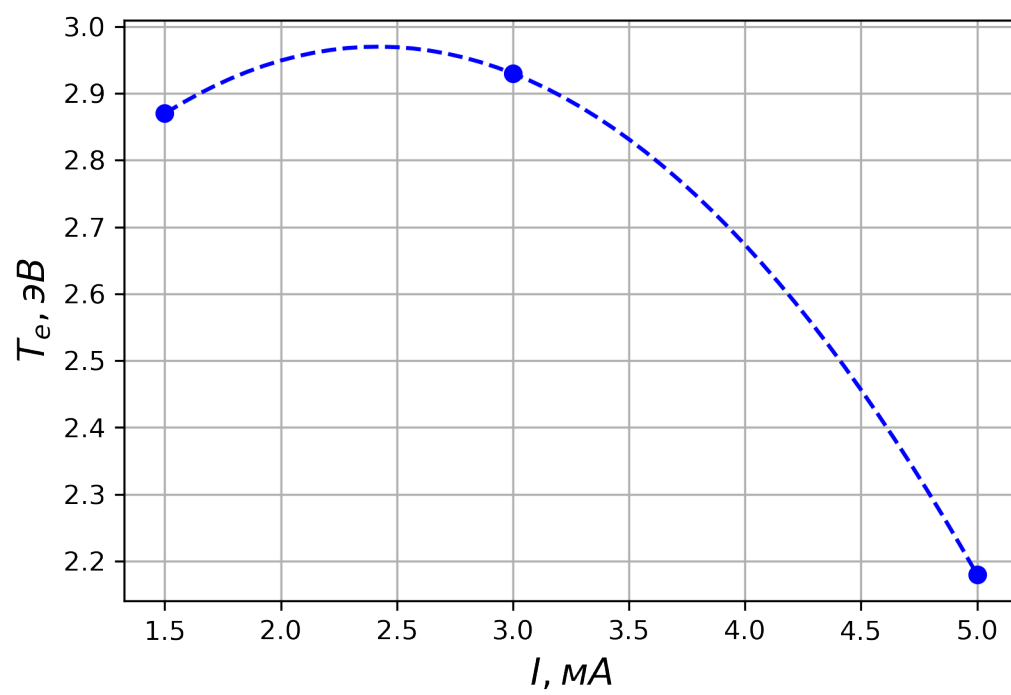


Рис. 8: Зависимость $T_e(I)$