

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
«МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

Лабораторная работа 3.5.1  
«Изучение плазмы газового разряда в неоне»

Овсянников Михаил Александрович  
студент группы Б01-001  
2 курс ФРКТ

г. Долгопрудный  
2021 г.

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

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

## Экспериментальная установка

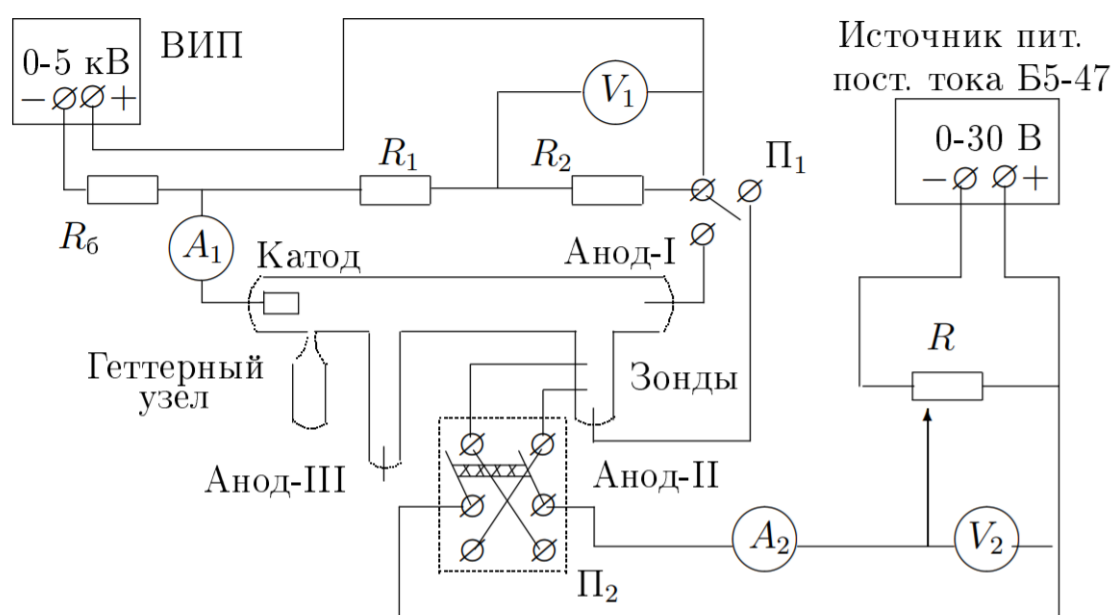


Рис. 1. Установка

Схема установки для исследования плазмы газового разряда в неоне представлена на рисунке 1. Стеклянная газоразрядная трубка имеет холодный (ненагреваемый) полый катод, три анода и геттерный узел - стеклянный баллон, на внутреннюю поверхность которого напылена газопоглощающая пленка (геттер). Трубка наполнена изотопом неона  $^{22}\text{Ne}$  при давлении 2 мм. рт. ст. Катод и один из анодов с помощью переключателя  $\Pi_1$  подключается через балластный резистор  $R_6 \sim 450 \text{ кОм}$  к регулируемому высоковольтному источнику питания (ВИП) с высоким напряжением до 5 кВ.

При подключении к ВИП анода-I между ним и катодом возникает газовый разряд.

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  $d = 0,2$  мм и имеют длину  $l = 5,2$  мм.

### **Выпишем все формулы, необходимые в данной работе**

Электронную температуру можно будет найти из соотношения:

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

Концентрацию электронов  $n_e$  можно определить, используя формулу Бома:

$$I_{iH} = 0,4n_e eS \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}. \quad [\text{СИ}]$$

Плазменная частота колебаний электронов находится по формуле:

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

Электронная поляризационная длина  $r_{De}$  вычисляется по формуле:

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

По следующей формуле можно найти дебаевский радиус экранирования  $r_D$  при комнатной температуре  $T_i \approx 300$  К:

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

Среднее число ионов в дебаевской сфере:

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

Степень ионизации плазмы:

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

где  $n = \frac{P}{kT_i}$ ,  $P \approx 2$  торр.

## Ход работы

Зафиксируем параметры установки:

$d = 0,2$  мм - диаметр зонда;

$l = 5,2$  мм - длина зонда;

$L = 35,5$  мм - длина трубки.

Напряжение зажигания:  $U = 1540$  В.

Теперь снимем вольт-амперную характеристику нашего разряда. Результаты занесем в таблицу 1.

$I$ , мА	$U$ , В
0,4	246,89
0,8	232,19
1,2	225,26
1,6	210,07
2,0	177,87
2,4	161,35
2,8	150,36
3,2	144,13
3,6	139,51
4,0	136,99
4,4	135,45
4,8	133,70
5,2	131,81
5,6	130,55

Таблица 1. ВАХ разряда

Строим график  $I(U)$ .

Из него получаем  $R_{\text{диф}} = \left( \frac{dU}{dI} \right)_{\text{max}} = 80500 \text{ Ом}$

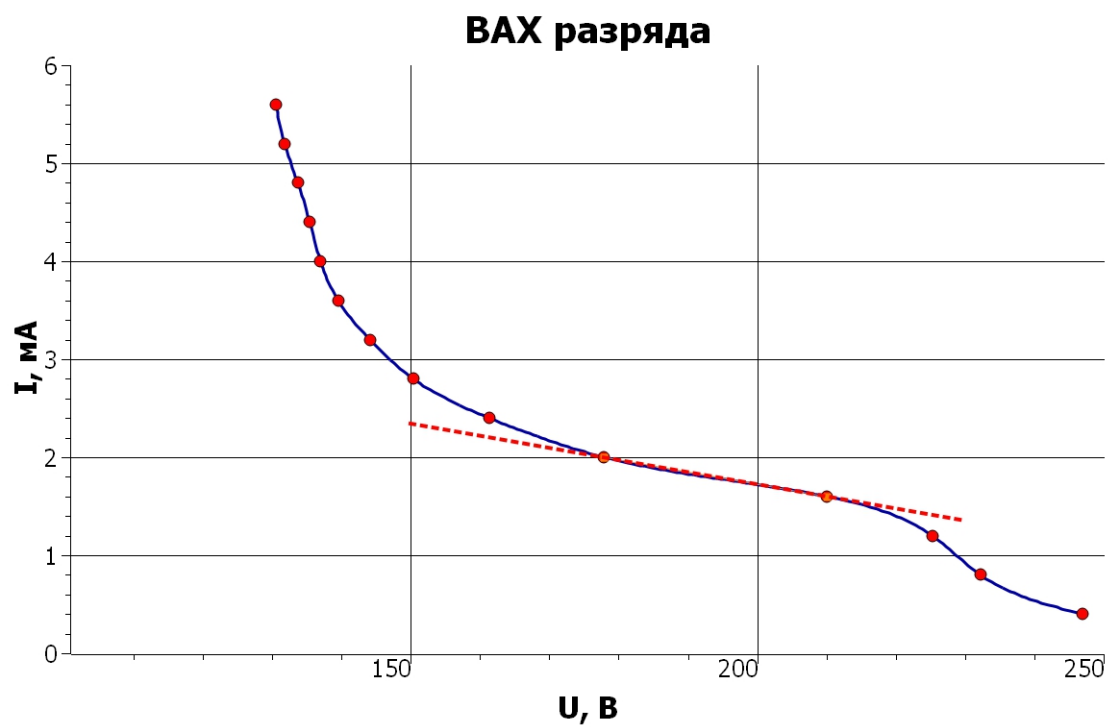


Рис. 2. ВАХ разряда

Как видно, мы находимся на участке ГД ВАХ газового разряда:

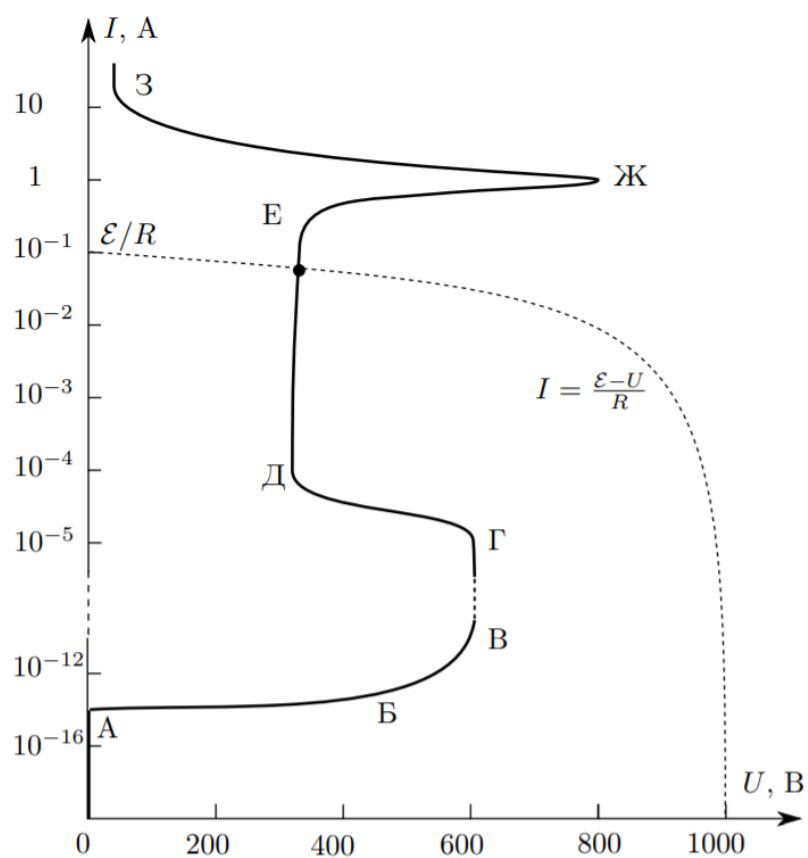


Рис. 3. ВАХ газового разряда

Построим зондовые характеристики для разных токов разряда.

1)  $I_p = 5$  мА.

Положительная ветвь		Отрицательная ветвь	
$U$ , В	$I$ , мкА	$U$ , В	$I$ , мкА
31,61	97,58	-0,01	0,00
30,90	97,01	-0,02	-0,06
29,97	96,03	-0,02	-0,10
29,08	95,10	-0,03	-0,21
28,07	94,06	-0,05	-0,52
27,02	93,01	-0,09	-0,94
25,99	91,74	-0,12	-1,37
23,04	88,61	-0,15	-1,74
20,03	85,46	-0,21	-2,35
17,03	82,19	-0,30	-3,38
14,04	77,78	-0,45	-4,98
11,00	71,12	-0,60	-6,55
8,02	60,07	-0,80	-8,60
5,01	42,71	-1,00	-10,59
4,03	35,49	-2,51	-24,80
3,01	27,33	-4,00	-38,44
2,03	18,86	-6,02	-54,71
1,01	9,57	-9,02	-82,66
0,72	6,96	-12,05	-102,58
0,63	6,10	-15,03	-108,53
0,51	4,99	-18,11	-112,56
0,39	3,78	-21,05	-115,69
0,30	2,86	-24,08	-118,84
0,15	1,34	-27,02	-121,91
0,07	0,60	-29,06	-124,03
0,01	0,00	-31,61	-126,76

Таблица 2. Зондовая характеристика при  $I_p = 5$  мА

Получаем следующий график:

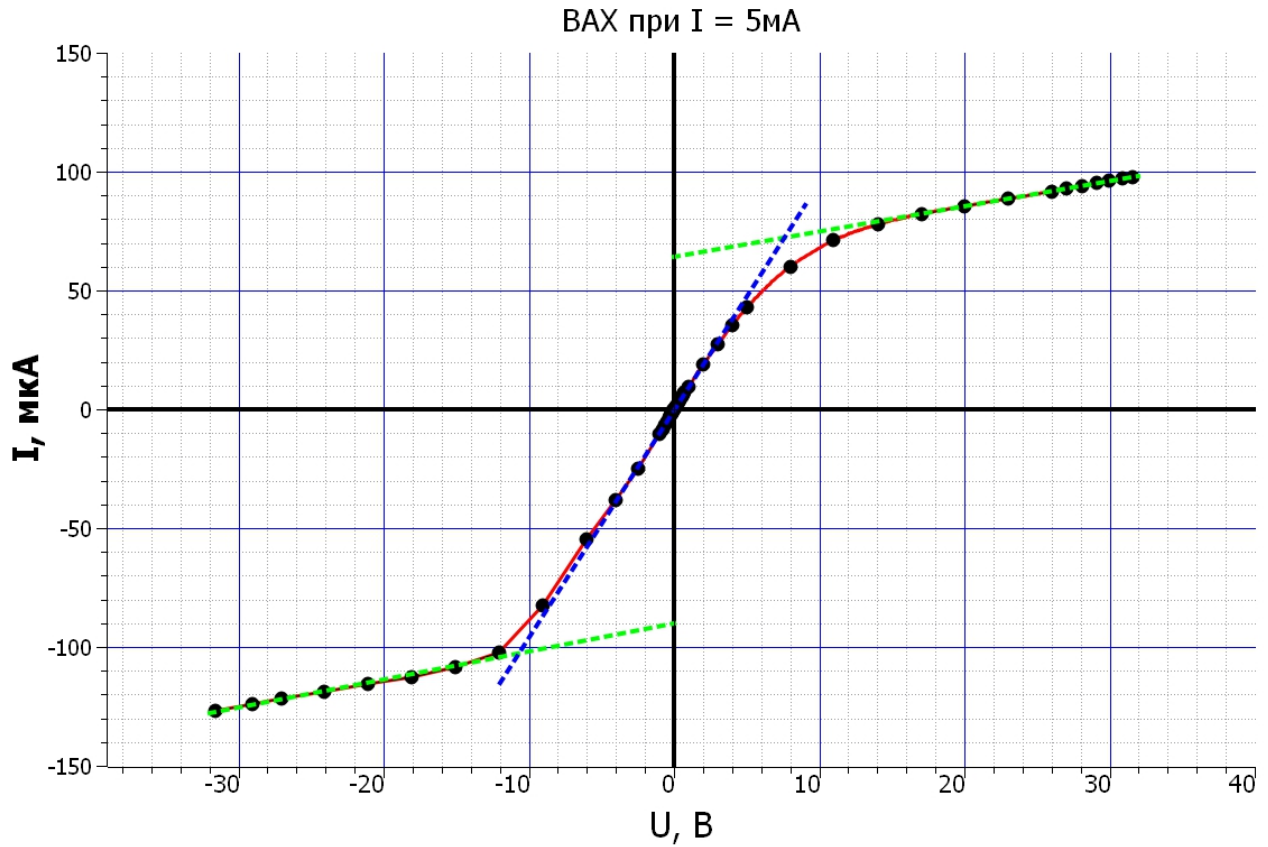


Рис. 4. ВАХ зонда при  $I_p = 5 \text{ мА}$

Из графика находим  $\overline{I_{iH}} = 77,15 \text{ мкА}$ ;  $\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0} = 9,56 \frac{\text{мкА}}{\text{В}}$ .

Откуда сразу можно рассчитать:

$$kT_e = 4,04 \text{ эВ}$$

$$n_e = \frac{5 I_{iH}}{2 e S} \sqrt{\frac{m_i}{2 k T_e}} \approx 6,2 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3} = 6,2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$$

$$\omega_p = 5,6 \cdot 10^4 \sqrt{n_e} \approx 1,4 \cdot 10^{10} \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$r_{D_e} = 6,0 \cdot 10^{-3} \text{ см}$$

$$r_D = 4,8 \cdot 10^{-4} \text{ см}$$

$$N_D = 29$$

$$\alpha = 9,6 \cdot 10^{-7}$$

2)  $I_p = 3$  мА.

Положительная ветвь		Отрицательная ветвь	
$U$ , В	$I$ , мкА	$U$ , В	$I$ , мкА
30,04	58,91	-0,02	0,00
28,96	58,11		
28,08	57,48	-0,04	0,05
27,01	56,71		
25,02	55,31	-0,06	-0,20
22,99	53,87		
21,03	52,50	-0,10	-0,57
19,08	51,15		
17,07	49,75	-2,01	-13,20
14,98	48,20		
13,08	46,56	-3,00	-19,30
11,02	44,17		
8,95	40,58	-5,02	-30,35
7,05	35,70		
5,03	28,25	-5,97	-34,87
3,52	21,12		
3,02	18,40	-9,00	-45,4
2,25	15,51		
2,07	12,71	-12,01	-50,82
1,80	11,20		
1,60	10,05	-15,03	-53,60
1,40	8,84		
1,20	7,61	-17,98	-55,38
1,00	6,29		
0,80	5,04	-21,04	-57,12
0,50	2,86		
0,40	2,35	-23,99	-58,84
0,25	1,40	-27,09	-60,65
0,10	0,29	-30,13	-62,57
0,05	0,00	-31,61	-63,53

Таблица 3. Зондовая характеристика при  $I_p = 3$  мА

Получаем следующий график:



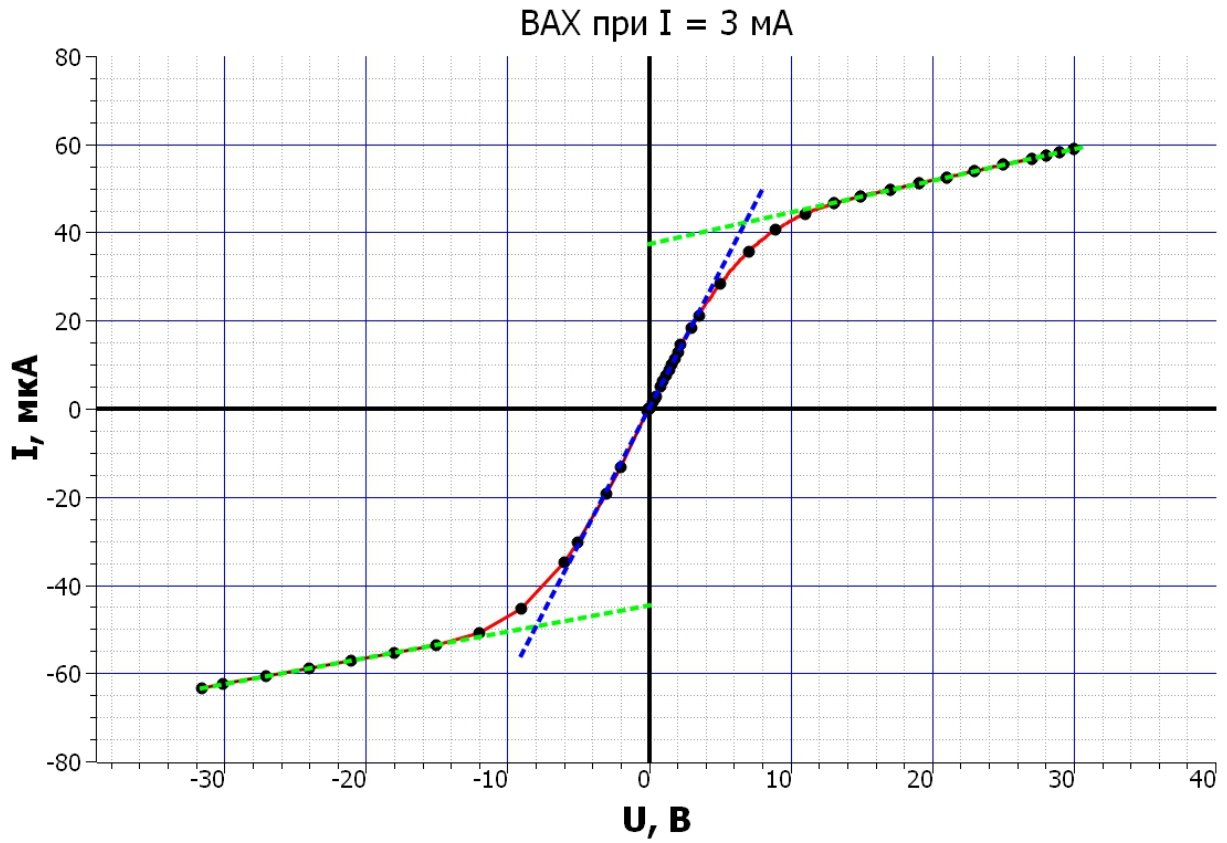


Рис. 5. ВАХ зонда при  $I_p = 3 \text{ мА}$

Из графика получаем:  $\overline{I_{\text{ин}}} = 41,02 \text{ мкА}$ ;  $\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0} = 6,22 \frac{\text{мкА}}{\text{В}}$ .

Сразу считаем:

$$kT_e = 3,30 \text{ эВ}$$

$$n_e = 3,7 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$$

$$\omega_p = 1,1 \cdot 10^{10} \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$r_{D_e} = 7,0 \cdot 10^{-3} \text{ см}$$

$$r_D = 6,2 \cdot 10^{-4} \text{ см}$$

$$N_D = 37$$

$$\alpha = 5,7 \cdot 10^{-7}$$

3)  $I_p = 1,5 \text{ мА}$ .

Положительная ветвь		Отрицательная ветвь	
$U, \text{ В}$	$I, \text{ мкА}$	$U, \text{ В}$	$I, \text{ мкА}$
31,60	32,69	-0,01	0,00
30,03	32,03	-0,02	-0,08
29,00	31,58	-0,05	-0,23
28,01	31,14	-0,10	-0,37
27,04	30,72	-0,20	-0,74
25,06	29,86	-0,29	-1,11
22,08	28,59	-0,50	-1,86
19,00	27,28	-1,01	-3,69
16,05	26,01	-2,01	-7,22
12,98	24,60	-2,50	-8,89
10,07	22,72	-3,01	-10,55
7,06	19,19	-3,50	-12,10
3,99	12,91	-4,00	-13,58
3,01	10,15	-7,01	-20,89
2,50	8,64	-10,03	-25,21
2,00	7,05	-13,00	-27,22
1,51	5,29	-16,02	-28,17
1,00	3,61	-19,06	-28,95
0,50	1,85	-22,00	-29,68
0,30	1,13	-25,01	-30,40
0,20	0,77	-28,06	-31,34
0,10	0,37	-29,04	-31,62
0,01	0,00	-30,04	-31,92
		-31,60	-32,39

Таблица 4. Зондовая характеристика при  $I_p = 1,5 \text{ мА}$

Снова строим график:

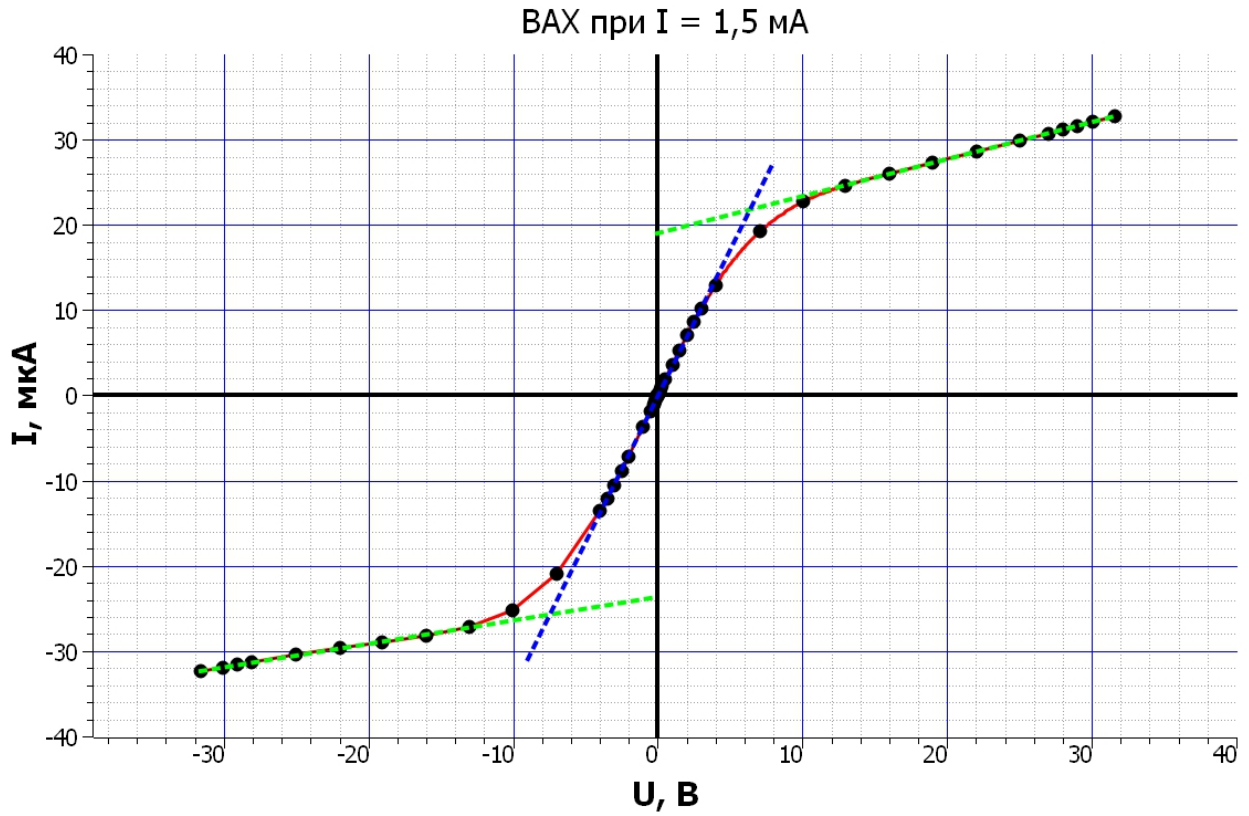


Рис. 6. ВАХ зонда при  $I_p = 1,5 \text{ мА}$

Из графика находим:  $\overline{I_{\text{ин}}} = 21,38 \text{ мкА}$ ;  $\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0} = 3,43 \frac{\text{мкА}}{\text{В}}$ .

И считаем:

$$kT_e = 3,12 \text{ эВ}$$

$$n_e = 2,0 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3} = 2,0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$$

$$\omega_p = 0,8 \cdot 10^{10} \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$r_{D_e} = 9,3 \cdot 10^{-3} \text{ см}$$

$$r_D = 8,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}$$

$$N_D = 51$$

$$\alpha = 3,1 \cdot 10^{-7}$$

Итак, основываясь на полученных данных и рассчитанных величинах, можно с уверенностью сказать, что:

- 1)  $L \gg r_{De} \Rightarrow$  плазму можно считать квазинейтральной
- 2)  $N_D \gg 1 \Rightarrow$  плазму можно считать идеальной

Теперь построим графики  $T_e(I_p)$  и  $n_e(I_p)$ .  
Первый,  $T_e(I_p)$ :

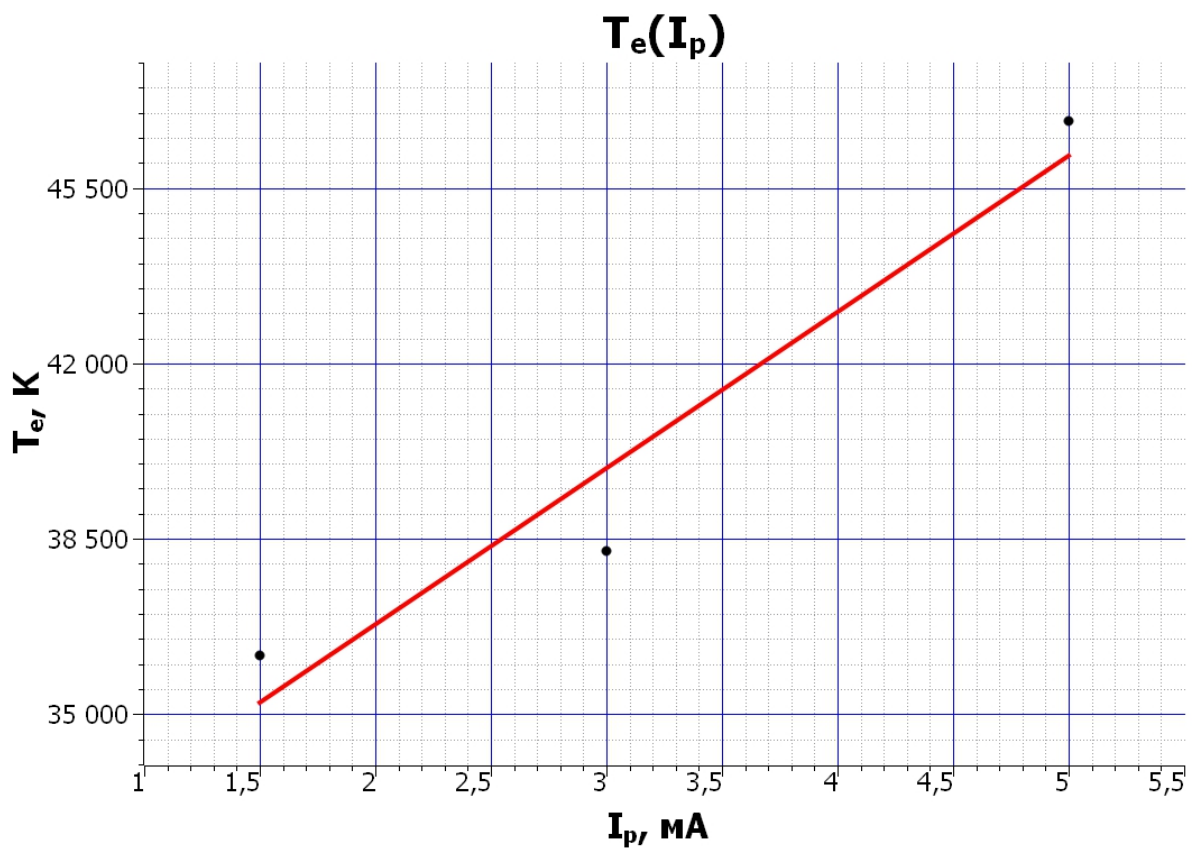


Рис. 7. Зависимость  $T_e(I_p)$

График должен описывать линейную зависимость, однако тут это не совсем так. Он не совсем линейный - это связано с неточностью измерений.

Теперь построим  $n_e(I_p)$ :

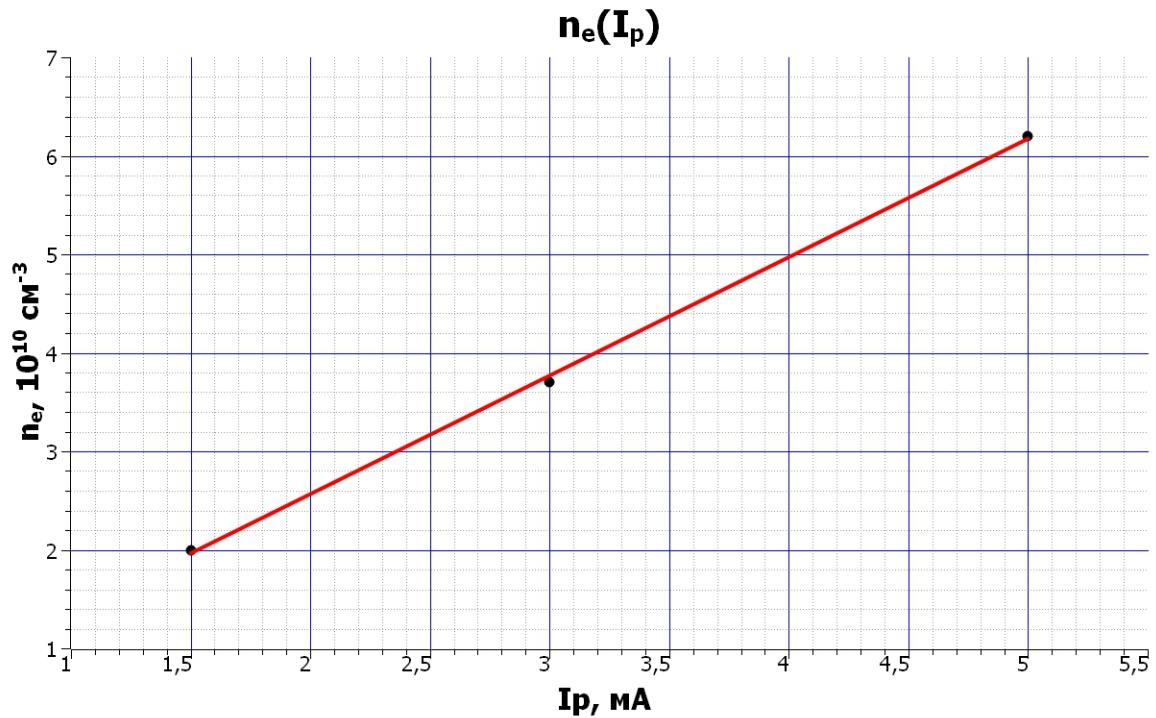


Рис. 8. Зависимость  $n_e(I_p)$

Этот график должен описывать линейную зависимость. На этот раз удачно - видно невооруженным глазом, что зависимость является линейной.

Напоследок, сведем все полученные и рассчитанные величины в одну табличку:

$R_{\text{диф}}, \text{ Ом}$	$I_p, \text{ мА}$	$kT_e, \text{ эВ}$	$n_e, 10^{10} \text{ см}^{-3}$	$\omega_p, 10^{10} \text{ рад/с}$	$r_{D_e}, 10^{-3} \text{ см}$	$r_D, 10^{-4} \text{ см}$	$N_D$	$\alpha, 10^{-7}$
80500	5	4,04	6,2	1,4	6,0	4,8	29	9,6
	3	3,30	3,7	1,1	7,0	6,2	37	5,7
	1,5	3,12	2,0	0,8	9,3	8,5	51	3,1

Таблица 5. Итоговая таблица

**Вывод:** в работе была изучена вольт-амперная характеристика тлеющего разряда и изучены свойства плазмы методом зондовых характеристик. Была продемонстрирована зависимость следующих величин от тока разряда  $I_p$ : электронная температура  $T_e$ , концентрация электронов  $n_e$ , плазменная частота их колебаний  $\omega_p$ , электронная поляризационная длина  $r_{De}$ , дебаевский радиус экранирования  $r_D$ , число Дебая  $N_D$  и степень ионизации плазмы  $\alpha$ . Помимо этого, было найдено максимальное дифференциальное сопротивление плазмы  $R_{\text{диф}} = 80500$  Ом. Также в работе было получено, что плазму при этих условиях и величинах можно считать квазинейтральной и идеальной. Все ошибки связаны с неточностью измерений.