

Работа 3.5.1

Изучение плазмы газового разряда в неоне

Пунов Дмитрий Викторович

Группа Б03-105

20 сентября 2022

г. Долгопрудный

# Аннотация

В работе исследуется газовый разряд в неоне. По полученным ВАХ разряда рассчитываются следующие параметры плазмы: температура, плазменная частота, радиус Дебая, среднее число ионов в дебаевской сфере.

## Введение

**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.

## Теоретические сведения

### 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)

$$\rho_e = -ne \cdot \exp\left(\frac{e\varphi}{kT_e}\right) \quad (2)$$

$$\rho_i = ne$$

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 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:

$$I_{e0} = \frac{n\langle v_e \rangle}{4} eS$$

$$I_{i0} = \frac{n\langle v_i \rangle}{4} eS \quad (6)$$

Где  $\langle v_e \rangle$  и  $\langle v_i \rangle$  – средние 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  $U_f$ .

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  $I_{eH}$  - электронный ток насыщения, а минимальный  $I_{iH}$  - ионный ток насыщения. Значение из эмпирической формулы Бомона:

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

## 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:

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

Аналогично через второй получим:

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

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

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока:

$$U = \frac{kT_e}{e} \ln\left(\frac{1 - I/I_{\text{ин}}}{1 + I/I_{\text{ин}}}\right), I = I_{\text{ин}} th \frac{eU}{2kT_e} \quad (10)$$

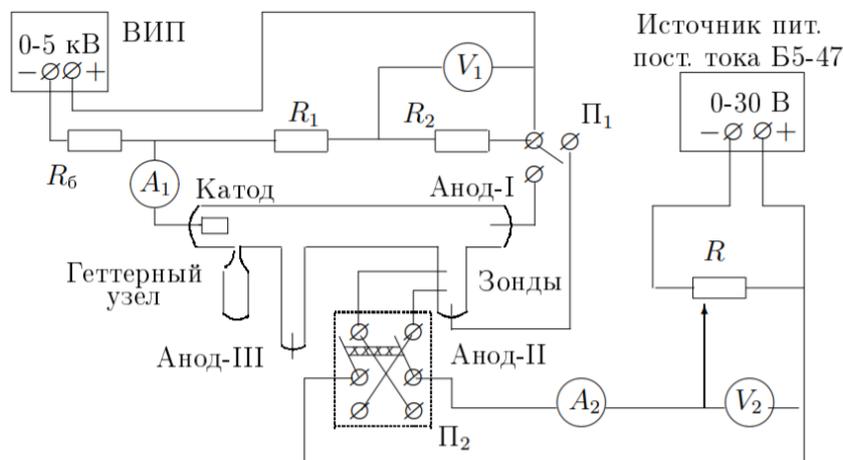
Реальная зависимость выглядит несколько иначе и описывается формулой:

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

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  $\tanh \alpha \approx \alpha$  при малых  $\alpha$  и  $A \rightarrow 0$  получим:

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

## Описание установки



Стеклянная газоразрядная трубка имеет холодный (не накаливаемый) полый катод, три анода и геттерный узел - стеклянный баллон, на внутреннюю поверхность которого напылена газопоглощающая плёнка. Трубка наполнена изотопом неона  $^{22}\text{Ne}$  при давлении 2 мм рт. ст.

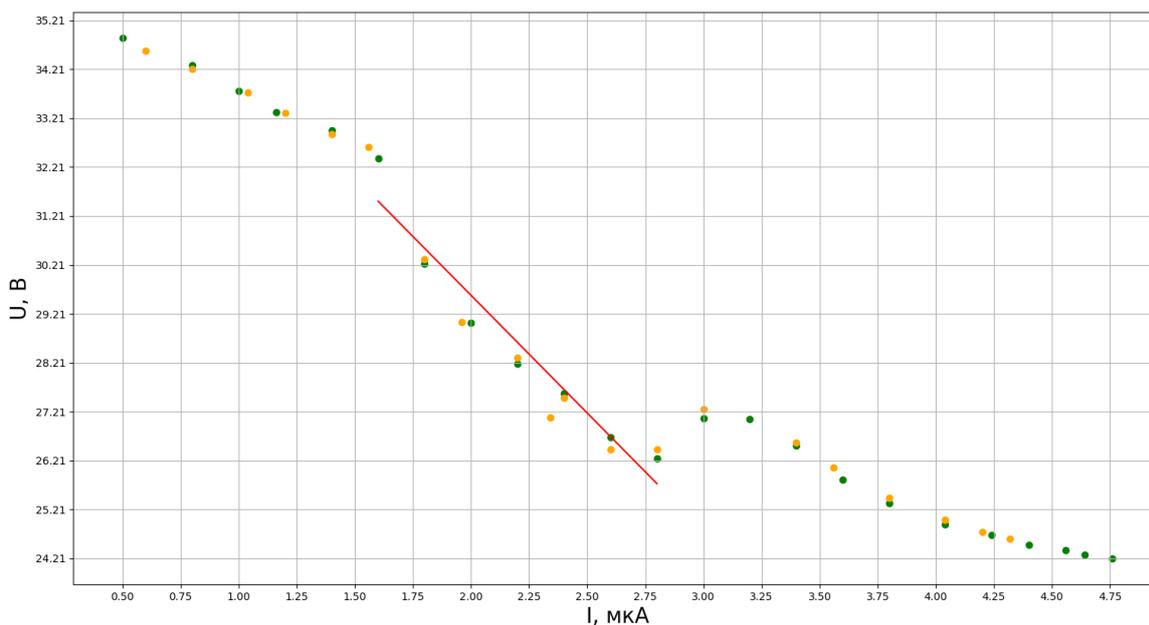
Катод и один из анодом (I и II) с помощью переключателя  $\Pi_1$  подключается через балластный резистор  $R_6 (\approx 450 \text{ кОм})$  к регулируемому ВИП с выходным напряжением до 5 кВ.

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  $\frac{R_1+R_2}{R_2} = 10$ .

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  $d = 0.2 \text{ мм}$  и имеют длину  $l = 5.2 \text{ мм}$ . 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  $A_2$ .

## Результаты измерений и обработка данных

С помощью вольтметра  $V_1$  и амперметра  $A_1$  снимаем вольт-амперную характеристику разряда  $I_p(U_p)$ . Ток разряда изменяем в диапазоне от 0,5 мА до 5 мА.



По наклону определили максимальное сопротивление заряда:  $39212 \pm 4812 \text{ Ом}$

С помощью вольтметра  $V_2$  и амперметра  $A_2$  сняли ВАХ двойного зонда  $I_2 = f(U_2)$  при фиксированном токе разряда  $I_p$  в трубке в диапазоне  $-25 \div 25 \text{ В}$ . Измерения провели для  $I_p = 5 \text{ мА}$ ,  $I_p = 3 \text{ мА}$ ,  $I_p = 1,5 \text{ мА}$ . Результаты занесём в таблицу 2.

Отцентрируем графики ( $I_0 = \frac{1}{2} \sum I$ ):

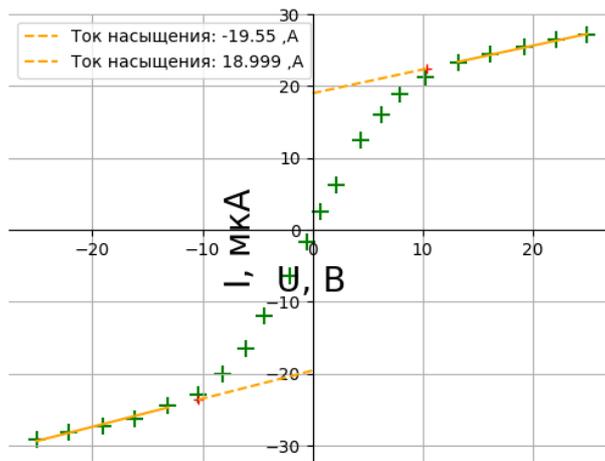


Рисунок 2. ВАХ (1,5 мА)

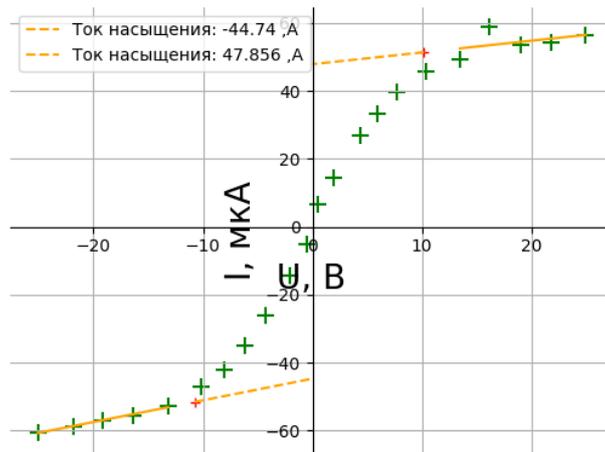


Рисунок 3. ВАХ (3 мА)

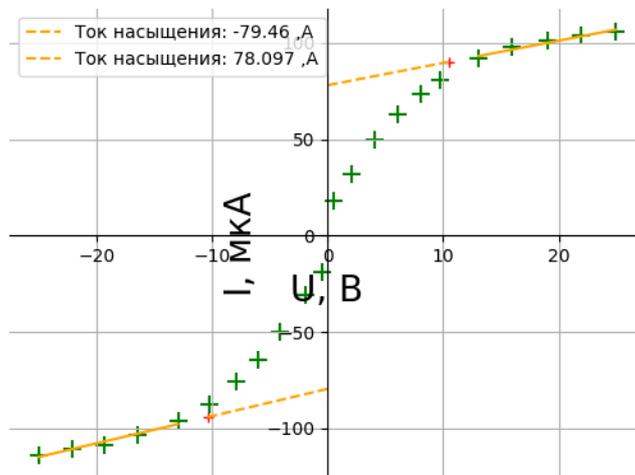
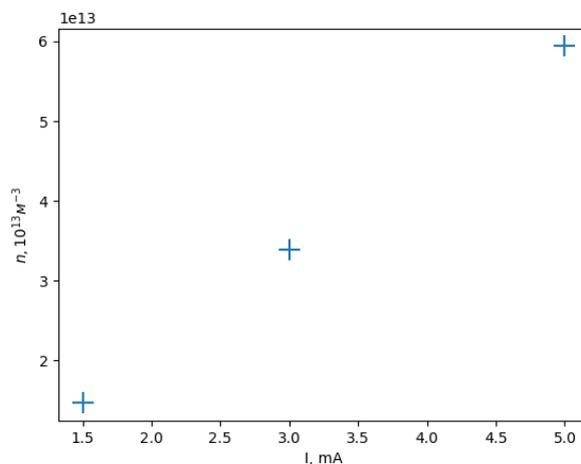
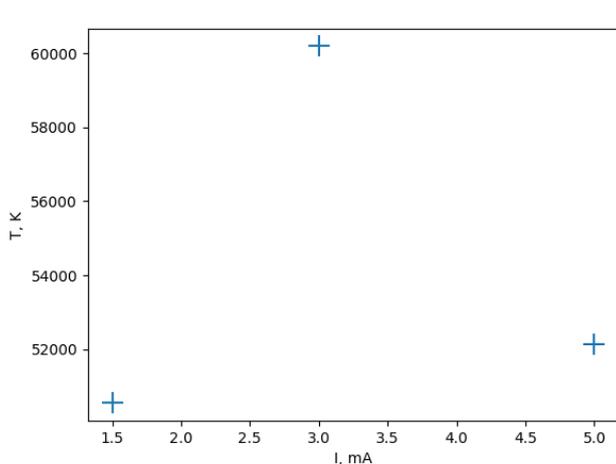


Рисунок 4. ВАХ (5 мА)

Считая концентрации ионов и электронов равными, найдём их, пользуясь формулой (7). Рассчитаем плазменную частоту  $\omega_p$  по формуле (5) и радиус Дебая  $r_D$ , среднее число ионов в дебаевской сфере  $N_D$  по формуле (4).

$I, \text{mA}$	$T_e, \text{эВ}$	$n_i, 10^{13}, \text{м}^{-3}$	$\omega, 10^5 \text{рад/с}$	$r_{De}, \text{м}^{-5}$	$r_D, \text{м}^{-5}$	$\langle N_D \rangle, 10^6$	$\alpha, 10^{-7}$
5,00	5,01	5,9	4,3	1,9	1,4	2,3	93
3,00	3,24	3,3	3,2	2,7	1,9	3,1	53
1,50	5,07	1,4	2,1	3,8	2,9	4,7	23



## Вывод

В ходе работы исследована плазма тлеющего газового разряда. Подтверждены экспериментальные зависимости. Полученные результаты совпадают с табличными для плазмы газового разряда.

# Данные экспериментов

$V_1, B$	$I_1, mA$	$V_1, B$	$I_1, mA$
34,85	0,5	24,37	4,56
34,3	0,8	24,61	4,32
33,76	1	24,75	4,2
33,33	1,16	24,99	4,04
32,96	1,4	25,45	3,8
32,39	1,6	26,07	3,56
30,24	1,8	26,57	3,4
29,02	2	27,09	2,34
28,19	2,2	27,26	3
27,59	2,4	26,43	2,8
26,69	2,6	26,44	2,6
26,25	2,8	27,49	2,4
27,08	3	28,31	2,2
27,06	3,2	29,04	1,96
26,51	3,4	30,33	1,8
25,82	3,6	32,62	1,56
25,33	3,8	32,88	1,4
24,91	4,04	33,32	1,2
24,68	4,24	33,74	1,04
24,48	4,4	34,22	0,8
24,29	4,64	34,59	0,6

Таблица 1. ВАХ одиночного зонда

$I_p, mA$	$V_2, B$	$I_2, mA$	$I_p, mA$	$V_2, B$	$I_2, mA$	$I_p, mA$	$V_2, B$	$I_2, mA$
5	24,98	105,85	3	24,98	56,46	1,5	24,98	27,17
	21,94	103,84		21,78	54,35		22,20	26,39
	19,09	101,27		19,03	53,45		19,30	25,41
	16,00	97,68		16,18	58,73		16,15	24,39
	13,10	91,76		13,00	49,26		13,22	23,29
	9,74	80,93		10,41	45,80		10,24	21,32
	8,10	73,68		7,77	39,75		7,97	18,88
	6,12	62,93		5,96	33,40		6,22	15,96
	4,10	49,76		4,39	26,79		4,39	12,55
	2,10	32,23		1,92	14,53		2,14	6,32
	0,50	18,01		0,55	6,48		0,69	2,60
	-25,00	-113,54		-25,10	-60,56		-25,10	-29,19
	-22,05	-110,88		-21,87	-58,70		-22,12	-28,19
	-19,31	-108,29		-19,14	-57,05		-19,07	-27,20
	-16,39	-103,44		-16,40	-55,78		-16,13	-26,18
	-12,91	-96,33		-13,20	-52,70		-13,12	-24,34
	-10,23	-87,22		-10,12	-47,06		-10,42	-22,97
	-7,88	-75,27		-8,10	-42,24		-8,17	-20,06

-6,00	-64,18
-4,10	-49,99
-1,90	-30,78
-0,50	-18,87

-6,16	-35,07
-4,26	-26,24
-2,11	-14,42
-0,50	-5,19

-6,08	-16,45
-4,37	-11,93
-2,02	-6,33
-0,50	-1,65

*Таблица 2. ВАХ двойного зонда*