

Работа 3.5.1  
Изучение плазмы газового разряда в неоне

Шарапов Денис, Зелёный Николай, Б05-005

**Содержание**

1	Аннотация . . . . .	2
2	Теоретические сведения . . . . .	2
2.1	Плазма . . . . .	2
2.2	Одиночный зонд . . . . .	3
2.3	Двойной зонд . . . . .	3
2.4	Установка . . . . .	4
3	Результаты измерений и обработка данных . . . . .	5
3.1	Вольт-амперная характеристика разряда . . . . .	5
3.2	Зондовые характеристики . . . . .	6
4	Вывод . . . . .	8

## 1 Аннотация

**Цель работы:** изучить вольт-амперную характеристику тлеющего разряда и свойства плазмы методом зондовых характеристик.

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

## 2 Теоретические сведения

### 2.1 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

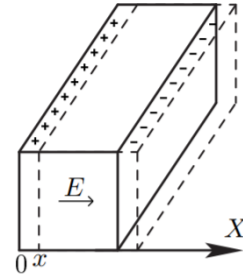
$$N_D = n \frac{4}{3} \pi r_D^3. \quad (4)$$

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:

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



## 2.2 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:

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

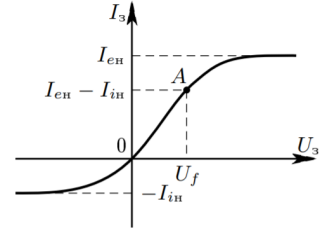
где  $\langle v_e \rangle$  и  $\langle v_i \rangle$  – средние скорости электронов и ионов,  $S$  – площадь зонда,  $n$  – плотность электронов и ионов. Скорости электронов много больше скорости ионов, поэтому  $I_{i0} \ll I_{e0}$ . Зонд будет заряжаться до некоторого равновесного напряжения  $U_f$  – *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:

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



## 2.3 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

$$\begin{aligned} U_1 &= -U_f + \Delta U_1, \\ U_2 &= -U_f + \Delta U_2. \end{aligned}$$

Между зондами  $U = U_2 - U_1 = \Delta U_2 - \Delta U_1$ . Через первый электрод

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

Аналогично через второй получим

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

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

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

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

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока

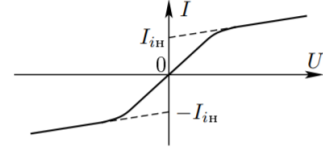
$$U = \frac{kT_e}{e} \ln \frac{1 - I/I_{in}}{1 + I/I_{in}}, I = I_{in} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e}. \quad (10)$$

Реальная зависимость выглядит несколько иначе и описывается формулой

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

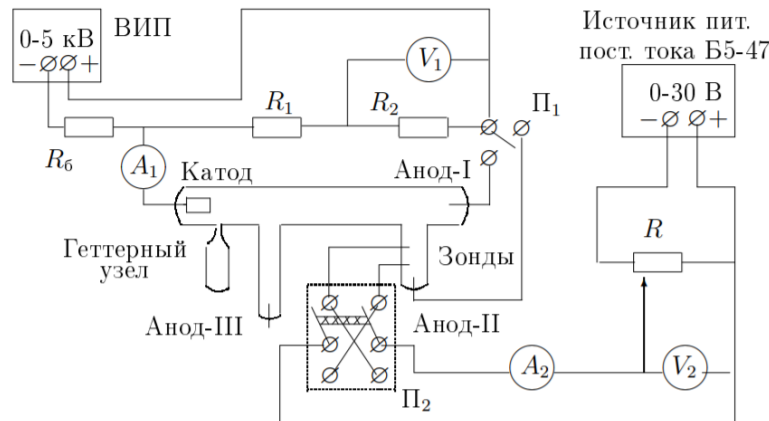
Из этой формулы можно найти формулу для  $T_e$ : для  $U = 0$  мы найдём  $I_{in}$ , продифференцируем в точке  $U = 0$  и с учётом  $\operatorname{th} \alpha \approx \alpha$  при малых  $\alpha$  и  $A \rightarrow 0$  получим:

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



## 2.4 Установка

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  ${}^2\text{Ne}$  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 Результаты измерений и обработка данных

#### 3.1 Вольт-амперная характеристика разряда

Плавное увеличение выходное напряжение ВИП, определим напряжение зажигания разряда  $U_{\text{зж}} = 30,9 \pm 0,2 \text{ В}$ .

С помощью вольтметра  $V_1$  и амперметра  $A_1$  снимем вольт-амперную характеристику (ВАХ) разряда  $U_p(I_p)$  (1 дел = 0,04 мА). Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1: Результаты измерений для ВАХ

Возрастание		Убывание	
$I$ , дел	$U$ , В	$I$ , дел	$U$ , В
31	32,09	83	27,10
36	31,76	77	27,05
40	31,33	69	27,00
46	30,06	61	28,42
50	29,64	59	28,70
55	29,15	54	29,21
59	28,76	48	29,70
65	28,25	42	30,67
71	27,84	36	32,07
77	27,61	31	32,84
84	27,33	22	32,85
89	27,16	16	35,04
94	27,08	11	65,96

По полученной таблице построим график зависимости  $U_p(I_p)$  (погрешности меньше цены деления осей).

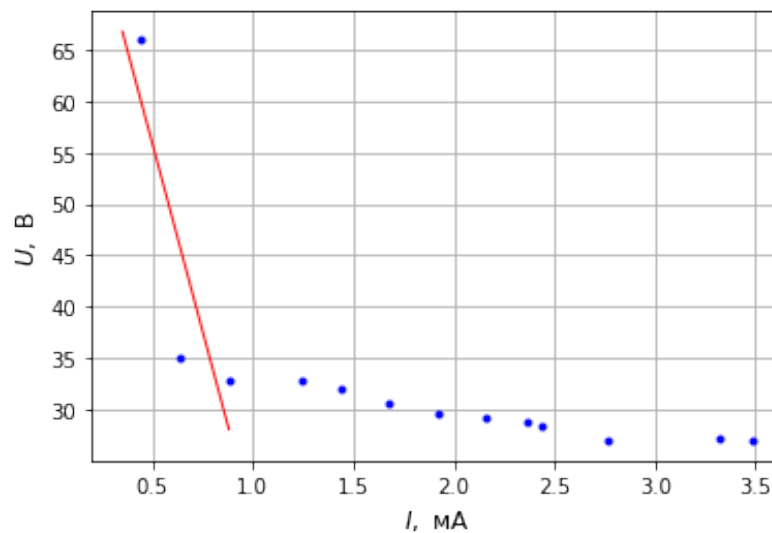


Рис. 1: График зависимости  $U_p(I_p)$

По наклону прямой определим максимальное дифференциальное сопротивление разряда:

$$R_{\text{диф}} = -(7,3 \pm 2,1) \cdot 10^4 \text{ Ом}.$$

### 3.2 Зондовые характеристики

Снимем зондовые характеристики при токах разряда, равных 5, 3, 1,5 мА. Результаты измерений запишем в таблицу 3. Получим зависимость  $I_3(U_3)$ .

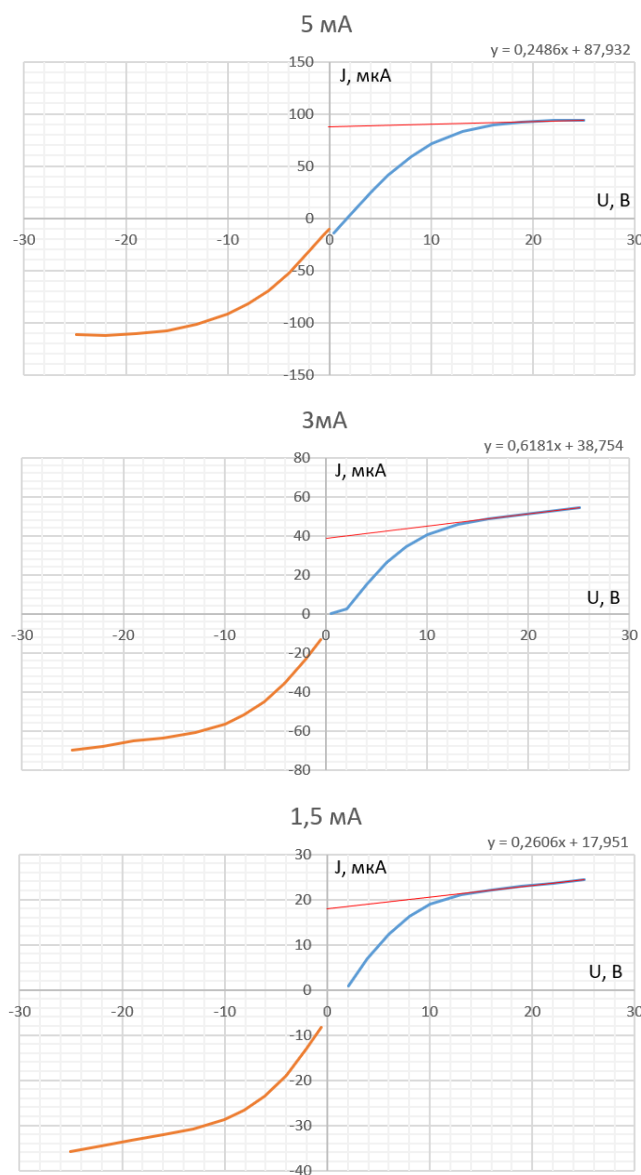


Рис. 2: Графики зависимости  $I_3(U_3)$  при различных  $I_p$

Используя данные из таблицы 3, получим величины, определяемые формулами (3), (4), (5), (7), и (12). Результаты внесём в таблицу 2.

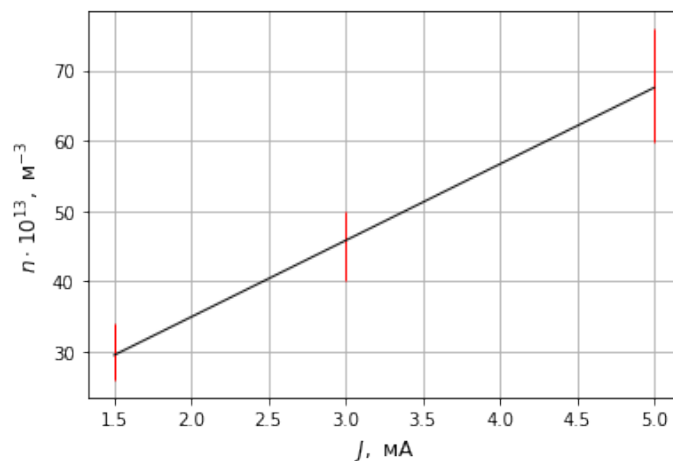
Таблица 2: Результаты измерения величин

$J_{ин}, \text{мкА}$	$T \cdot 10^3, \text{К}$	$n \cdot 10^{13}, \text{м}^{-3}$	$\omega \cdot 10^4, \text{рад/с}$	$r_{D_e} \cdot 10^{-2}, \text{см}$	$r_D \cdot 10^{-3}, \text{см}$
$87,60 \pm 1,10$	$50,4 \pm 5,0$	$67,9 \pm 8,0$	$1,45 \pm 0,10$	$4,35 \pm 0,3$	5,64
$38,80 \pm 0,04$	$22,4 \pm 3,0$	$45,0 \pm 5,0$	$1,18 \pm 0,08$	$5,35 \pm 0,5$	4,62
$18,00 \pm 0,10$	$10,3 \pm 3,0$	$30 \pm 4,0$	$0,56 \pm 0,04$	$6,55 \pm 0,8$	8,49

Таблица 2: Продолжение

$N \cdot 10^5$	$\alpha \cdot 10^{-11}$
2,34	2,52
2,89	1,67
3,53	1,12

По таблице 2 построим график зависимости  $n_e(I_p)$ .

Рис. 3: График зависимости  $U_p(I_p)$ Таблица 3: Результаты измерений зависимости  $I_z(U_z)$ 

1,5 мА		3 мА		5 мА	
$U$ , В	$I$ , мкА	$U$ , В	$I$ , мкА	$U$ , В	$I$ , мкА
25,067	24,5	25,11	54,28	25	94
22,064	23,67	22,046	52,37	22,07	93,7
18,93	22,9	19,043	50,53	18,83	92,48
16,097	22,15	16,064	48,67	16,096	89,48
13,035	21,15	13,069	45,97	13,065	83
10,005	18,95	10,041	40,72	10,022	71,27
8,039	16,31	7,922	34,24	8,02	59,45
6	12,22	6,048	26,17	5,697	41,16
3,94	6,83	4,07	15,37	4,15	26,35
2,07	0,8	2,05	2,3	2,03	3,56
-25	-35,9	0,54	-0,08	0,46	-14,48
-22	-34,66	-25	-70,23	-24,9	-111,4
-19,044	-33,41	-22	-68	-22,055	-112,4
-16,019	-32,13	-19	-65	-18,994	-111,05
-13,081	-30,79	-16,086	-63,6	-16	-108
-10,007	-28,74	-12,9	-60,98	-13,022	-102,11
-8,07	-26,66	-9,9	-56,5	-10,007	-92,14
-6,074	-23,55	-8,052	-52	-8,041	-82,5
-4,005	-18,94	-6,085	-45,22	-6,017	-69,2
-2,03	-13,21	-4,03	-35,65	-3,99	-52,2
-0,56	-8,23	-2,02	-23,67	-2,01	-32,48

## 4 Вывод

В ходе работы была изучена вольт-амперная характеристика тлеющего разряда, были изучены свойства плазмы методом зондовых характеристик.

При изучении ВАХ были определены напряжение зажигания в лампе и максимальное дифференциальное сопротивление заряда.

При изучении зондовых характеристик были получены три графика зависимости  $I_z(U_z)$  при различных  $I_p$  (5, 3, 1,5 мА). С их помощью были получены значения величины  $I_{in} = J_{in}$ .