

# Отчет о выполнении лабораторной работы 3.5.1

## Изучение плазмы газового разряда в неоне.

Севастьян Черняков и Георгий Чирков

ФУПМ МФТИ, 10.10.2023

**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.

## Теория

### 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:

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

## Одиночный зонд

При внесении в плазму уединённого проводника – *зонда* – с потенциалом, изначально равным потенциалу точки плазмы, в которую его помещают, на него поступают токи электронных 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

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

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 ( $I_1 = -I_2 = I$ ):

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

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

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока

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

Реальная зависимость выглядит несколько иначе и описывается формулой

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

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

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

## Ход работы

Измеряем напряжение зажигания в лампе:  $\langle U_{\text{заж}} \rangle = 211 \pm 1$  В.

С помощью вольтметра  $V_1$  и амперметра  $A_1$  снимаем ВАХ разряда  $U_1 = f(I_p)$  для тока в диапазоне  $0.5 \div 5$  мА (см. Таблица 1). Построим график:

Рис. 1: Вольт-амперная характеристика разряда.

По наклону определим максимальное сопротивление заряда (с учётом того, что вольтметр подключен через делитель напряжения с коэффициентом 10):  $R_{\text{max}} = (8.5 \pm 0.2) \cdot 10^4$  Ом.

С помощью вольтметра  $V_2$  и амперметра  $A_2$  снимем ВАХ двойного зонда  $I_2 = f(U_2)$  при фиксированного тока разряда  $I_p$  в трубке в диапазоне  $-25 \div 25$  В, процессе измерений меняя полярность зонда при нулевом токе. Измерения проведём для  $I_p = 5$  мА,  $I_p = 3$  мА и  $I_p = 1.5$  мА (Таблица 2).

Результаты измерений представим на графиках с отцентрованными  $\left(I_0 = \frac{1}{2} \sum I\right)$ :

Приближая кривые формулой  $I = Ath(BU) + CU$ , найдём токи насыщения  $I_{\text{ин}}$  и температуры электронов  $T_e$ .

Считая концентрации ионов и электронов равными, найдём их, пользуясь формулой (7). Рассчитаем плазменную частоты  $\omega_p$  по формуле (5) и радиус Дебая  $r_D$ , оценим среднее число ионов в дебаевской сфера  $N_D$  по формуле (4) и степень ионизации  $\alpha$ , приняв  $P \approx 1$  мбар, и занесём все результаты в таблицу.

$I_p$ , мА	$T_e$ , $10^4$ К	$n_e$ , $10^{15} \text{ м}^{-3}$	$\omega_p$ , $10^4$ рад/с	$r_D$ , $10^{-5}$ см	$N_D$	$\alpha$ , $10^{-7}$
5.0	$41 \pm 4$	$58 \pm 6$	$144 \pm 10$	$49 \pm 3$	30	24
3.0	$42 \pm 4$	$33 \pm 4$	$107 \pm 9$	$66 \pm 5$	40	13
1.5	$41 \pm 6$	$16 \pm 2$	$75 \pm 8$	$94 \pm 10$	57	7

## Результаты измерений

$U_1$ , В	23.9	24.15	24.35	24.4	24.81	25.40	26.20	27.71	30.92	34.19	35.09
$I_p$ , мА	4.60	4.04	3.56	3.12	2.80	2.36	2.00	1.56	1.20	0.80	0.52

Таблица 1: Зависимость  $U_1 = f(I_p)$ .

$I_p = 5.0$ мА		$I_p = 3.0$ мА		$I_p = 1.5$ мА	
$U_2$ , В	$I_2$ , мкА	$U_2$ , В	$I_2$ , мкА	$U_2$ , В	$I_2$ , мкА
25	102	-25	-65.42	25	39.27
22	106	-22	-64.26	22	37.92
19	104.4	-19	-62.38	19	36.62
16	99.7	-16	-59.58	16	35.18
13	90.4	-13	-55.88	13	33.18
10	77	-10	-46.63	10	29.53
8	65.2	-8	-39.23	8	26.28
6	51.5	-6	-29.8	6	21.91
4	34.5	-4	-18.4	4	16.01
2	16	-2	-6.29	2	9.32
0	0	0	0	0	0
-2	-3.88	2	14.81	-2	-4.94
-4	-22.2	4	27.08	-4	-11.55
-6	-39.75	6	38.18	-6	-17.1
-8	-54.63	8	47.57	-8	-21.5
-10	-66.44	10	54.94	-10	-24.67
-13	-79.83	13	63.07	-13	-27.95
-16	-89	16	68.06	-16	-29.75
-19	-93.12	19	71.08	-19	-30.97
-22	-95.55	22	73.16	-22	-32.1
-25	-90.28	25	74.42	-25	-33.2

Таблица 2: Зависимость  $I_2 = f(U_2)$ .