

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3.5.1

# Изучение плазмы газового разряда в неоне.

выполнил студент 924 группы ФОПФ

Панферов Андрей

Долгопрудный, 2020 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 (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

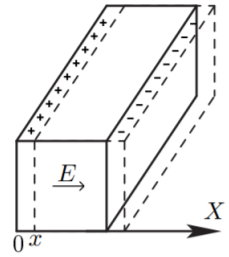
$$\varphi = \frac{Ze}{r} e^{-r/r_D}, \quad (3)$$

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 электронов и ионов:

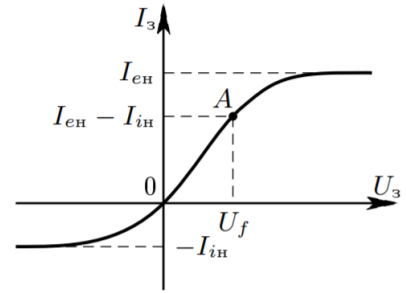
$$\begin{aligned} I_{e0} &= \frac{n\langle v_e \rangle}{4} eS, \\ I_{i0} &= \frac{n\langle v_i \rangle}{4} eS, \end{aligned} \quad (6)$$

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  $U_3$  на зонд и снимать значение зондового тока  $I_3$ . Максимальное значение тока  $I_{eн}$  – электронный ток насыщения, а минимальное  $I_{иn}$  – ионный ток насыщения. Значение из эмпирической формулы Бомона:



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

## 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

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

Аналогично через второй получим

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

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

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

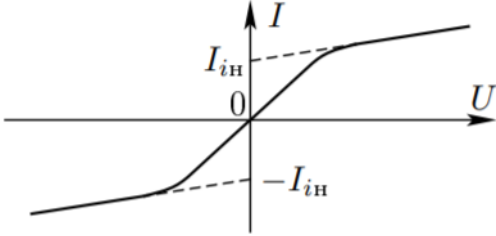
$$\Delta U_2 = \frac{kT_e}{e} \ln \left( 1 + \frac{I}{I_{in}} \right)$$

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

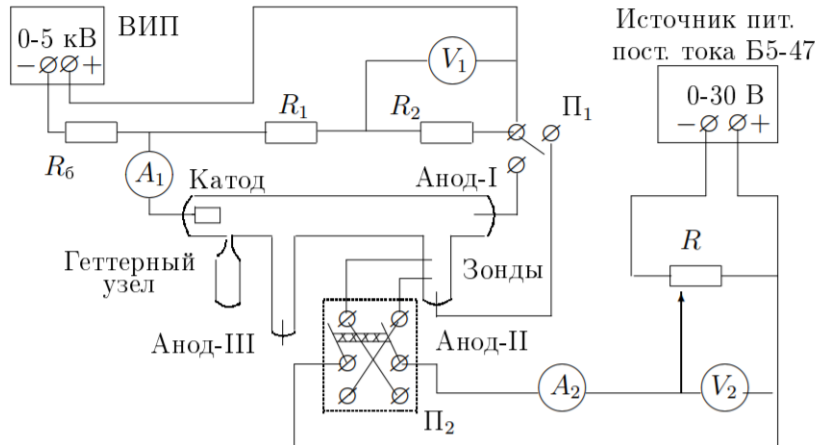
$$I = I_{in} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e} + AU. \quad (11)$$



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:

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

## Описание установки



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  $^{22}\text{Ne}$  при давлении 2 мм рт. ст. Катод и один из анодом (I и II) с помощью переключателя  $\Pi_1$  подключается через балластный резистор  $R_6$  ( $\approx 450$  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  $(R_1 + R_2)/R_2 = 10$ .

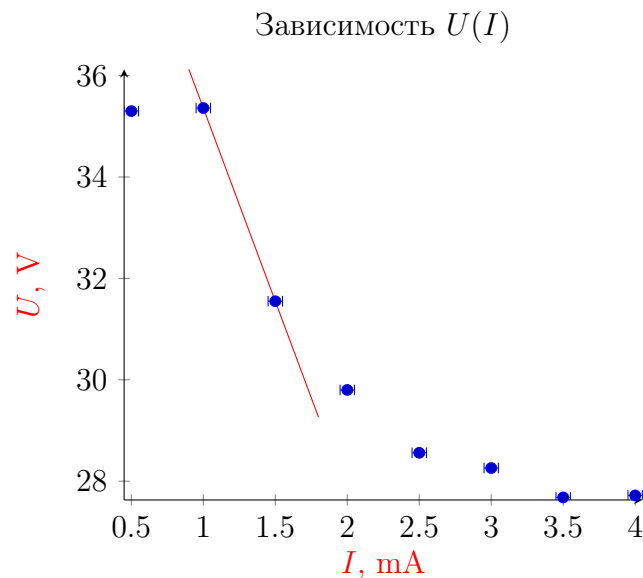
При подключении к ВИП анода-II разряд возникает в пространстве между катодом и анодом-II, где находятся двойной зонд, используемый для диагностики плазмы положительного столба. Зонды изготовлены из молибденовой проволоки диаметром  $d = 0.2$  мм и имеют длину  $l = 5.2$  мм. Они подключены к источнику 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  $A_2$ .

## Ход работы

Измеряем напряжение зажигания в лампе:  $U_{\text{зак}} = 25.7 \pm 0.2$  В.

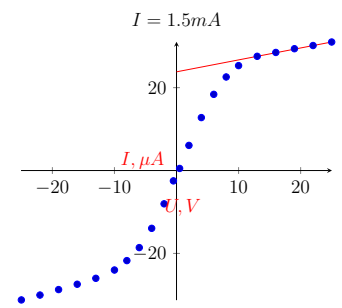
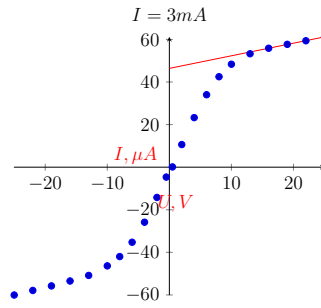
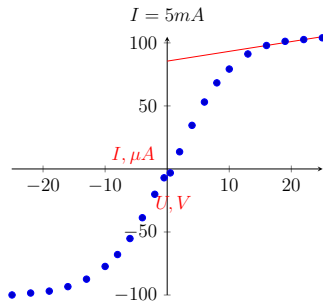
С помощью вольтметра  $V_1$  и амперметра  $A_1$  снимаем ВАХ разряда  $U_1 = f(I_p)$  для тока в диапазоне  $0.5 \div 5$  мА (см. Таблица 1). Построим график:



По наклону определим максимальное сопротивление заряда (с учётом того, что вольтметр подключен через делитель напряжения с коэффициентом 10):  $R_{\text{max}} = (7.6 \pm 0.2) \cdot 10^4 \Omega$ .

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 отцентрированными  $\left(I_0 = \frac{1}{2} \sum I\right)$ :



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	$T_e$ , $10^3$ К	$n_e$ , $10^{14}$ м $^{-3}$	$\omega_p$ , $10^4$ рад/с	$r_D$ , $10^{-4}$ м	$N_D$ , $10^5$	$\alpha$ , $10^{-7}$
5.0	$55 \pm 6$	$9.9 \pm 8$	$1.87 \pm 0.10$	$5.1 \pm 0.3$	5.5	75
3.0	$47 \pm 4$	$5.8 \pm 4$	$1.26 \pm 0.08$	$6.2 \pm 0.5$	5.7	37
1.5	$45 \pm 4$	$3.1 \pm 2$	$1.04 \pm 0.05$	$8.3 \pm 0.8$	7.4	19

## Вывод

Полученные результаты по порядку совпадают с табличными ([Wikipedia](#)). Все зависимости имеют именно такой вид, как предсказывала теория.

## Результаты измерений

$U_1$ , В	27.72	27.68	28.26	28.56	29.8	31.55	35.36	35.3
$I_p$ , мА	4.00	3.50	3.00	2.50	2.00	1.50	1.00	0.50

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

$5mA$		$3mA$		$1.5mA$	
$I_2, \mu A$	$U_2, V$	$I_2, \mu A$	$U_2, V$	$I_2, \mu A$	$U_2, V$
90.14	25	52.29	25	25.39	25
91.15	22	50.46	22	24.54	22
89.75	19	48.79	19	23.77	19
86.45	16	46.96	16	22.87	16
79.72	13	44.36	13	21.94	13
67.76	10	39.45	10	19.69	10
56.81	8	33.58	8	16.95	8
41.61	6	25.12	6	12.76	6
23.11	4	14.37	4	7.15	4
2.13	2	1.72	2	0.44	2
-14.6	0.5	-8.79	0.5	-5.12	0.5
-18.5	-0.5	-13.55	-0.5	-8.12	-0.5
-31.56	-2	-23.12	-2	-13.66	-2
-50.17	-4	-34.75	-4	-19.57	-4
-66.67	-6	-44.15	-6	-24.22	-6
-79.37	-8	-50.89	-8	-27.36	-8
-88.8	-10	-55.26	-10	-29.63	-10
-98.88	-13	-59.74	-13	-31.63	-13
-104.83	-16	-62.36	-16	-33.06	-16
-108.37	-19	-64.67	-19	-34.35	-19
-109.9	-22	-66.8	-22	-35.67	-22
-109.44	-25	-68.95	-25	-36.85	-25

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