

Московский физико-технический университет  
Физтех-школа радиотехники и компьютерных технологий

Лабораторная работа № 3.5.1

# Изучение плазмы газового разряда в неоне

Работу выполнил:  
Шурыгин Антон  
Б01-909

г. Долгопрудный

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

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

## 1 Краткая теория

Одним из самых простых методов исследования свойств плазмы является измерение электрических потенциалов с помощью зондов (небольших проводников, вводимых в плазму). В нашей работе используется двойной зонд. Его удобно использовать для нахождения различных параметров плазмы, таких как температура или концентрация частиц.

Рассчитаем величину тока, проходящего через двойной зонд вблизи точки  $I = 0$ . Напряжение  $U$  между зондами равно разности потенциалов на первом и втором:

$$U = U_2 - U_1 = (U_f + \Delta U_2) - (U_f + \Delta U_1) = \Delta U_2 - \Delta U_1 \quad (1)$$

Найдем ток, приходящий на первый электрод:

$$I_1 = I_{in} - I_{e0} \cdot \exp \frac{eU_1}{k_B T_e} = I_{in} - \left[ I_{e0} \cdot \exp \frac{eU_f}{k_B T_e} \right] \cdot \exp \frac{e\Delta U_1}{k_B T_e}$$

При  $\Delta U_1 = 0$  электронный и ионный ток компенсируют друг друга. Поэтому множитель, заключенный в квадратные скобки равен  $I_i$ . Поэтому

$$I_1 = I_{in} \left[ 1 - \exp \frac{eU_1}{k_B T_e} \right] \quad (2)$$

Аналогично для  $I_2$ . Так как зонды соединены последовательно, то  $I_1 = -I_2 = I$ . Тогда выразим  $U$

$$U = \Delta U_1 - \Delta U_2 = \frac{k_B T_e}{e} \ln \left( 1 - \frac{I}{I_{in}} \right) - \frac{k_B T_e}{e} \ln \left( 1 + \frac{I}{I_{in}} \right) = \frac{k_B T_e}{e} \ln \frac{I_{in} - I}{I_{in} + I}$$

Разрешив относительно  $I$ , получим

$$I_1 = I_{in} \exp \frac{eU}{2k_B T_e} \quad (3)$$

Продифференцировав по  $U$  в точке  $U = 0$ , получим

$$k_B T_e = \frac{1}{2} \frac{e I_{in}}{\frac{dI}{dU}} \quad (4)$$

Здесь  $\frac{dI}{dU}$  - наклон характеристики зонда вблизи начала координат, а  $I_{in}$

$$I_{in} = 0,4 n_i e S \sqrt{\frac{2 k_B T_e}{m_i}} \quad (5)$$

Плазменную частоту колебаний электронов можем рассчитать по формуле:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} = 5,6 \cdot 10^4 \sqrt{n_e \text{ см}^{-3}} \text{ рад/сек} \quad (6)$$

Дебаевский радиус  $R_D$ , приняв  $T_i \approx 300K$ , рассчитаем из формулы:

$$r_D = \sqrt{\frac{k T_i}{4\pi n_i e^2}} \text{ см} \quad (7)$$

Среднее число ионов в дебаевской сфере (должно быть  $N_D \gg 1$ ):

$$N_D = n_i \frac{4}{3} \pi r_D^3 \quad (8)$$

Степень ионизации плазмы можно оценить как:

$$\alpha = \frac{n_i}{n} \quad (9)$$

где  $n$  находится из уравнения  $P = nkT$  при  $P \approx 1$  мбар (при нормальных условиях  $n = N_L$ ,  $N_L$  - число Лошмидта).

Схема установки для исследования плазмы газового разряда в неоне представлена на рис.1

Стеклянная газоразрядная трубка имеет холодный полый катод, три анода, геттерный узел - стеклопоглощающая пленка. Трубка наполнена изотопом неона при давлении 2 мм. рт. ст.. Катод и один из анодов с помощью подключателя П1 подключаются через балластный резистор  $R_b$  ( $\approx 500$  кОм) к регулируемому высоковольтному ист. питания с вых. напряжением до нескольких киловольт.

При подключении к ВИП анода - 1 между ним и катодом возникает газовый разряд. Ток разряда измеряется миллиамперметром 1, падению напряжения на трубке вольтметром -  $V1$ , подключенным к трубке через высокоомный делитель напряжения с коэффициентом  $\frac{R_1+R_2}{R_1}$

При подключении к ВИП анода - 2 разряд возникает в пространстве между катодом и анодом - 2, где находится двойной зонд, используемый для диагностики плазмы положительного столба.

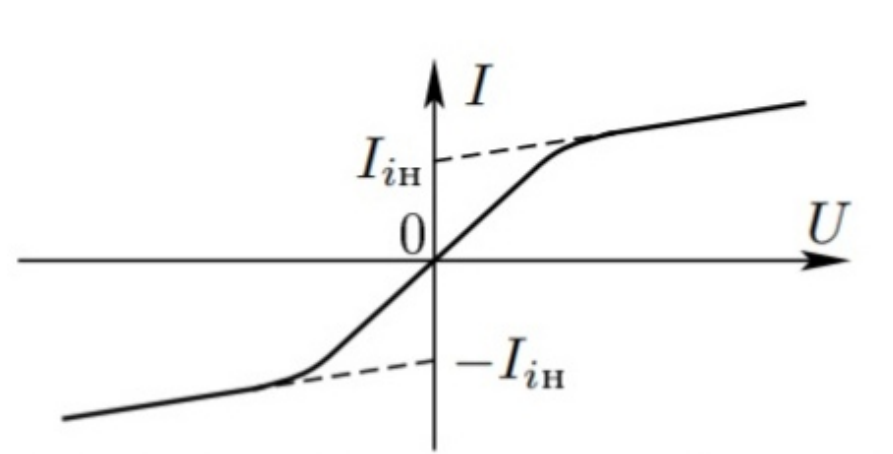


Рис. 1: Вольт-амперная характеристика двойного зонда

Таблица 1: Таблица с измерениями

V, volt	I, mkA	V, volt	I, mkA
34.43	0.5	27.26	4.4
33.14	0.76	27.27	3.76
32.04	1.24	27.47	3.2
30.1	1.64	28.09	2.62
28.79	2.36	29.22	2.14
27.94	2.86	30.05	1.78
27.59	3.34	32.05	1.22
27.4	3.72	33.83	0.62
27.36	4	-16.3	-32.75
27.41	4.36	-19.12	-33.95
27.38	4.96	-22.32	-35.38
27.22	5	-24.91	-36.43

## 2 Выполнение работы

Данные установки  $R_b = 450 \text{ kOm}$ ,  $d = 0.2 \text{ mm}$ ,  $l = 5.2 \text{ mm}$

### 2.1 Вольт-амперная характеристика разряда

Снимаем значения, составляем таблицу 1:

По полученным значениям строим график зависимости  $U(I)$  - вольт-амперную характеристику разряда.

По наклону касательной к графику определим максимальное дифферен-

pics/lab351\_pic1.png

Рис. 2: Схема установки для исследования газового разряда

циальное сопротивление разряда  $R_{max} \approx 2\ kOm$  :

## 2.2 Работа с зондом

Погрешность при данных измерениях - погрешность амперметра тока разряда -  $\sigma I_{raz} = 0.03\ mA$  Снимаем значения, составляем таблицу 2:

По полученным значениям строим графики зависимости  $I(U)$ :

Таблица 2: Таблица с измерениями

U1, volt	I1m mkA	U2, volt	I2, mkA	U3, volt	I3, mkA
24,91	24.89	24.91	90.91	24.91	52.54
21.36	23.94	21.33	91.09	21.79	50.64
18.86	23.31	18.27	89.2	18.03	48.38
15.37	22.38	14.59	84.05	14.92	46.37
11.85	20.93	10.5	71.16	12.31	43.62
8.76	17.79	9.14	64.39	9.76	38.86
7.27	15.28	8.3	59.41	6.17	26
6.23	13.09	7.49	53.87	5.36	21.92
5.26	10.62	7.65	55.04	4.26	15.8
4.26	7.88	6.69	48	2.69	6.12
3.53	5.62	5.36	36.81	2.04	1.81
2.44	1.83	4.13	25.11	1.78	0
1.94	0.16	1.78	0.41	-0.78	-15.4
-1.94	-13.21	-1.77	-29.95	-2.33	-25.6
-3.29	-17.49	-3.55	-47.48	-3.46	-32
-4.44	-20.5	-4.12	-52.58	-5.15	-40.43
-5.56	-23.08	-5.04	-60.34	-7.17	-48.21
-6.9	-25.48	-6.14	-68.57	-8.85	-52.74
-8.01	-27.04	-7.32	-76.24	-10.95	-56.71
-9.87	-29.14	-8.95	-84.92	-14.37	-60.63
-10.7	-29.81	-10.13	-90.05	-18.12	-63.58
-13.2	-31.35	-13.09	-99.2	-21.16	-65.62
-16.3	-32.75	-15.95	-104.67	-23.36	-67.18
-19.12	-33.95	-19.62	-108.4	-24.91	-68.31
-22.32	-35.38	-21	-109.22		
-24.91	-36.43	-24.91	-110.1		

pics/lab351\_0.jpg

Рис. 3: График зондовой характеристик  $i_{razr} = 5 \text{ mA}$

По графикам 1, 2, 3, 4 рассчитаем  $I$ , а так же  $\frac{dI}{dU}$ ,  $U = 0$ . Для этого проводим соответствующие ассимптоты и касательные. Сведем полученные результаты в таблицу 1:

Учтем погрешности.

**Теперь рассчитаем температуру электронов  $T_e$**  по формуле (?), а также  $n_e$  - концентрацию электронов в плазме по формуле Бома (?).

Построим график зависимости  $n_e = f(I_{razr})$

pics/lab351\_all.png

Рис. 4: Графики  $I(U)$  для трех разл. токов разряда. Зондовые характеристики

**Затем рассчитаем плазменную частоту колебаний электронов  $\omega_e$ ,** а так же дебаевский радиус экранирования (с учетом того, что температура ионов мала по сравнению с электронной).

**Теперь оценим среднее число ионов** в дебаевской среде  $N_D$ . Примем  $r_D \approx 10^{-3}m$  судя из расчетов. Тогда  $R_D \approx 10^8$  а также степень ионизации плазмы долю ионизированных атомов  $\alpha$  при учете, что давление в трубке  $P \approx 2 Torr$ . Сведем все полученные результаты в итоговую таблицу 5.



Таблица 3: Таблица для расчетов

$I_{razr}, mA$	$I_{iH}, mA$	$\frac{dI}{dU}, \frac{mA}{V}$
1.5	19	6.96
3.0	39	32
5.0	73	82

Таблица 4: Таблица для расчетов

$I_{razr}, mA$	$kT_e, el \cdot Volt$	$n_e \cdot 10^{15}, m^{-3}$	$T_e, K \cdot 10^4$	$\sigma T_e, K \cdot 10^4$
1.5	1.36	26.3	1.6	0.18
3.0	0.64	44	0.7	0.08
5.0	0.44	77	0.5	0.06

Таблица 5: Таблица для расчетов

$I_{razr}, mA$	$\omega_p, \cdot 10^{11}, \frac{rad}{sec}$	$r_D \cdot 10^{-2}, cm$	$N_D$	$\alpha \cdot 10^{-7}$
1.5	0.87	0.21	387	4.60
3.0	1.56	0.16	171	7.81
5.0	2.18	0.13	92	13.6

pics/lab351\_1.5.png

Рис. 5: График зондовой характеристик  $i_{razr} = 1,5 \text{ mA}$

### 3 Вывод

В данной работе мы изучили вольт-амперную характеристику тлеющего разряда. Затем занялись изучением свойств плазмы методом зондовых характеристик.

В этом пункте мы получили, что температура электронов у нас порядка  $T_e \approx 10^4 \text{ K}$ , тогда  $kT_e \approx 1 \text{ eV}$ .

pics/lab351\_3.png

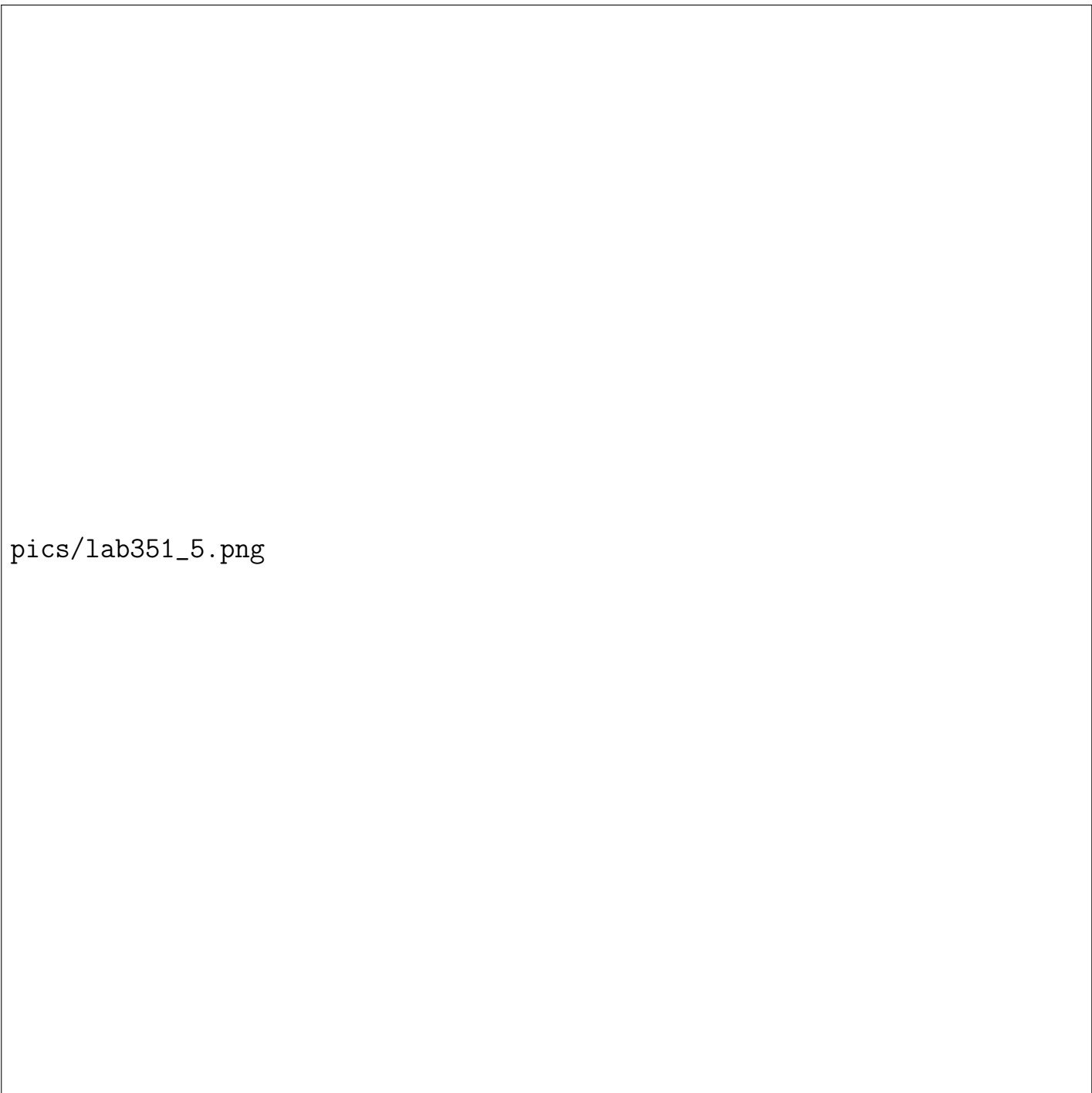
Рис. 6: График зондовой характеристик  $i_{razr} = 3 \text{ mA}$

Концентрация электронов в плазме получилась порядка  $n_e \approx 10^{16}$ .

Плазменная частота колебаний получилась порядка  $\omega_p \approx 10^{16} \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$ .

Дебаевский радиус получили  $r_D \approx 10^{-3} \text{ m}$ , среднее число ионов в дебаевской сфере много больше единицы (см. таблицу 5).

Полученные значения близки к табличным.



pics/lab351\_5.png

Рис. 7: График зондовой характеристик  $i_{razr} = 5 \text{ mA}$

Р»РхР,,РчCF РчРγР«CΓCS.png

Рис. 8: График зависимости  $n_e I_{razr}$