

Лабораторная работа № 3.5.1 "Изучение плазмы газового разряда в неоне"

Кирилл Шевцов Б03-402

16.09.2025

Цель работы

Изучить вольт-амперную характеристику тлеющего разряда, изучить свойства плазмы методом зондовых характеристик.

Оборудование

Стеклянная газоразрядная трубка, наполненная неонам, источник напряжения, делитель напряжения, потенциометр, амперметр, вольтметры, амперметры, переключатели.

Лабораторная установка

Стеклянная газоразрядная трубка имеет ненагреваемый полый катод, три анода и геттерный узел - стеклянный баллон, на внутреннюю поверхность которого напылена газопоглощающая плёнка (геттер). Трубка наполнена изотопом неона при давлении 2 мм. рт. столба. Катод и один из анодов с помощью переключателя P_1 подключаются через балластный резистор R_b к регулируемому ВИП. При подключении первого анода к ВИП, между ним и катодом возникает газовый разряд. Ток раз-

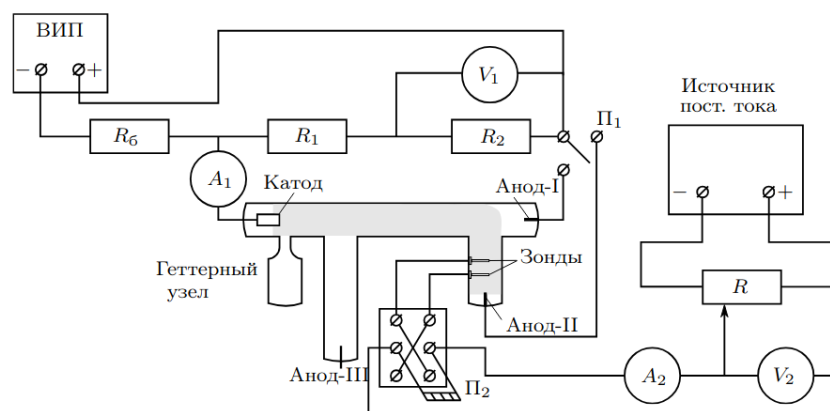


Рис. 1: установка для исследования газового разряда

ряда измеряется амперметром A_1 , падение напряжения - на вольтметре V_1 , подключенным к трубке через делитель напряжения с коэффициентом, равным $\alpha = R_1 + R_2/R_2 = 10$. При подключении к ВИП второго анода, возникает газовый разряд между катодами и вторым анодом, где находится двойной зонд, необходимый для диагностики плазмы. Третий анод в работе не используется.

Необходимые формулы

Частота коллективных колебаний электронов (или плазменная частота) относительно квазинейтрального состояния (то есть такого состояния, при котором равна нулю средняя плотность заряда):

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} \quad (1)$$

колебания, описываемые плазменной частотой, называют ленгмюровскими.

Важнейший плазменный параметр, задающий характерный пространственный масштаб многих плазменных явления - дебаевский радиус:

$$r_D = \sqrt{\frac{k_B T_e}{4\pi n_e e^2}} \quad (2)$$

Эти два параметра представляют собой две важные характеристики плазмы, определяющие временной и пространственный масштабы коллективного движения электронов относительно ионов.

Замечание: если плазма неравновесная, различают два типа дебаевской длины: электронную (слева) и ионную (справа), $T_e \neq T_i$:

$$r_{De} = \sqrt{\frac{k_B T_e}{4\pi n_e e^2}} \quad r_{Di} = \sqrt{\frac{k_B T_i}{4\pi n_i e^2}} \quad (3)$$

Выражение, определяющее энергию кулоновского взаимодействия частиц в плазме:

$$\varphi(r) = -\frac{q}{r_0} \exp\left(-\frac{r}{r_D}\right) \quad (4)$$

где $\varphi_0 = q/r_0 = \varphi(r=0)$.

Плотность энергии кулоновского взаимодействия зарядов в плазме:

$$\omega = -\frac{1}{2} n_i \frac{q^2}{r_D} \quad (5)$$

В сравнении полученной кулоновской энергии с тепловой $l \sim n_i kT$:

$$\frac{l}{\omega} \sim \frac{kT r_D}{q^2} = 4\pi n_i r_D^3 \quad (6)$$

Отсюда выражение для числа заряженных частиц в сфере дебаевского радиуса (дебаевской сфере):

$$N_D = \frac{4}{3} \pi n_i r_D^3 \quad (7)$$

Оценка тока насыщения для ионов, согласно полуэмпирическому соотношению Д. Бомома:

$$I_{in} \sim 0.4 n_i e S \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}} \quad (8)$$

Зависимость тока от напряжения для ВАХ газового разряда:

$$I = I_0 t h \frac{eU}{2k_B T_e} \quad (9)$$

Эту формулу можно использовать для определения температуры электронов по вольт-амперной характеристике двойного зонда. По пересечению асимптот с вертикальной осью можно определить ток насыщения I_{in} , а затем и концентрацию заряженных частиц в плазме.

Измерения и снятие данных

1. Напряжение зажигания плазмы $U_0 = (152,52 \pm 0,1)\text{В}$
2. С помощью вольтметра V_1 и амперметра A_1 измерим ВАХ газового разряда $I(U)$.

$I_p \uparrow$, мА	U_p , В	$I_p \downarrow$, мА	U_p , В
0.543	26.89	4.790	26.80
0.730	26.51	4.417	26.78
1.143	26.30	4.055	26.76
1.479	26.35	3.788	26.74
1.800	26.40	3.472	26.71
2.105	26.48	3.162	26.66
2.520	26.55	2.873	26.61
2.837	26.62	2.503	26.54
3.128	26.67	2.165	26.47
3.524	26.72	1.803	16.41
3.829	26.75	1.507	26.35
4.150	26.77	1.197	26.31
4.477	26.79	0.817	26.41
4.727	26.80	0.665	26.65
5.050	26.81	0.538	26.90

Таблица 1: Снятие ВАХ газового разряда в неоне

3. График участка вольт-амперной характеристики газового разряда.

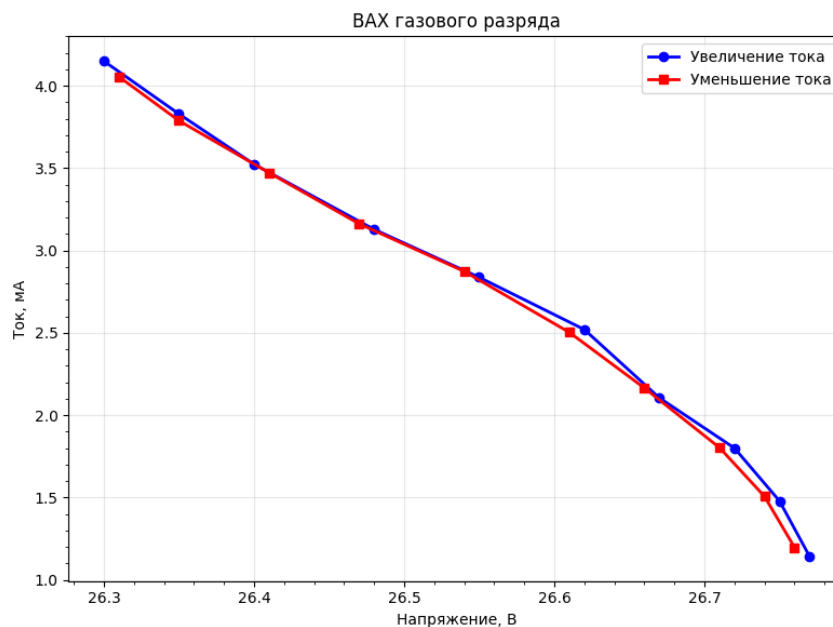


Рис. 2: Вах газового разряда

Построенный график соответствует участку поднормального тлеющего разряда.

Дифференциальное сопротивление газового разряда $R_0 = \frac{dU}{dI} = -2000.29 \text{ Ом} \sim -2 \text{ кОм}$

4. ВАХ двойного зонда, при фиксированном токе разряда I_p .

I_p , мА	5.000 ± 0.001										
I , мА	22.98	22.10	21.17	20.25	19.26	18.17	17.25	15.88	12.90	6.89	0.07
U , В	24.99	22.07	19.02	16.11	13.08	10.11	8.09	6.08	4.03	2.06	0.55
I , мА	-2.66	-6.74	-12.96	-15.90	-17.13	-18.19	-19.38	-20.37	-21.34	-22.33	-23.18
U , В	0.00	2.02	4.07	6.20	8.08	10.13	13.04	16.04	19.08	22.19	24.99
I_p , мА	4.005 ± 0.001										
I , мА	19.67	18.97	18.12	17.35	16.50	15.54	14.70	13.42	10.85	5.61	0.12
U , В	24.99	22.11	19.09	16.12	13.09	10.07	8.01	6.01	4.08	2.08	0.60
I , мА	-0.15	-5.71	-10.78	-13.37	-14.62	-15.34	-16.29	-17.17	-18.00	-18.76	-19.56
U , В	0.6	2.11	4.08	6.07	8.19	10.02	13.01	16.10	19.14	22.08	25.00
I_p , мА	3.101 ± 0.001										
I , мА	15.92	15.31	14.65	14.00	13.28	12.37	11.68	10.45	8.05	3.98	0.05
U , В	24.99	22.02	19.09	16.22	13.12	10.12	8.10	6.03	4.04	2.07	0.58
I , мА	-0.04	-3.82	-8.03	-10.41	-11.56	-12.26	-13.07	-13.75	-14.42	-15.07	-15.70
U , В	0.58	2.01	4.06	6.07	8.12	10.10	13.24	16.09	19.11	22.18	24.99
I_p , мА	1.513 ± 0.001										
I , мА	9.05	8.65	8.27	7.82	7.42	6.93	6.42	5.52	4.07	1.94	0.13
U , В	24.99	22.01	19.06	16.04	13.09	10.12	8.09	5.97	4.02	2.11	0.56
I , мА	-0.13	-1.88	-4.06	-5.52	-6.37	-6.84	-7.34	-7.73	-8.16	-8.56	-8.95
U , В	0.56	2.06	4.05	6.03	8.09	10.14	13.18	16.10	19.06	22.02	24.99

Таблица 2: Вольт-Амперная характеристика двойного зонда

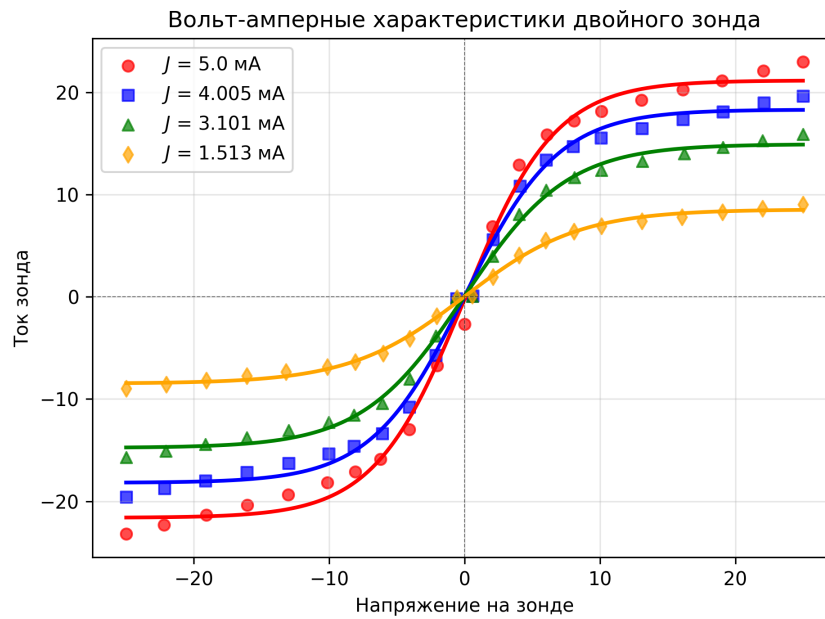


Рис. 3: Вах двойного зонда

5. Ионный ток насыщения I_{in} , $I(U) = A \cdot th(BU)$

I_p , мА	$A = I_{in}$, мА	dI/dU , мА/В	$B = e/2kT_e$, 1/В
5.000	21.40 ± 0.10	3.20 ± 0.01	0.149 ± 0.010
4.005	18.26 ± 0.10	2.64 ± 0.01	0.145 ± 0.010
3.101	14.86 ± 0.10	1.96 ± 0.01	0.132 ± 0.010
1.513	8.52 ± 0.10	1.01 ± 0.01	0.100 ± 0.010

Таблица 3: Аппроксимация и соответствие коэффициентов для зависимости $I(U)$

6. Температура электронов T_e , концентрацию n_e электронов для заданных токов разряда.

$$T_e = \frac{e}{2kB} \quad n_i = \frac{2.5I_{in}}{e\pi dl} \sqrt{\frac{m_i}{2kT_e}}, \quad \Delta T_e = 0.1 \cdot T_e$$

Данные	Результаты вычислений			
I_p , мА	5.000	4.005	3.101	1.513
T_e , К	38726 ± 3876	39864 ± 3986	43882 ± 4388	49158 ± 4915
$n_e \cdot 10^{10}$, 1/см ³	9.550 ± 0.010	8.030 ± 0.010	6.230 ± 0.010	3.370 ± 0.010

Таблица 4: расчеты температур и концентрации электронов в плазме

7. Плазменная частота колебаний ω_p , поляризационная длина r_{De} и дебаевский радиус экранирования r_D для заданных токов разряда. Температура ионов для участка тлеющего разряда $T_i = 300$ К, $T_e/T_i \sim 40$

Данные	Результаты вычислений			
I_p , мА	5.000	4.005	3.101	1.513
$\omega_p \cdot 10^{10}$, Гц	1.720	1.580	1.39	1.02
$r_{De} \cdot 10^{-3}$, см	4.300	4.800	5.700	8.300
$r_D \cdot 10^{-4}$, см	6.700	7.580	9.012	13.00

Таблица 5: расчеты дебаевских длин и плазменной частоты

8. Число ионов в дебаевской сфере N_D .

Данные	Результаты вычислений			
$n_e \cdot 10^{10}$, 1/см ³	9.550	8.030	6.230	3.370
$r_{De} \cdot 10^{-3}$, см	4.300	4.800	5.700	8.300
N_D	31.80	26.74	20.70	11.22

Таблица 6: расчет количества ионов в дебаевской сфере

9. Степень ионизации плазмы, считаем давление в трубке $P \approx 2$ торр.

Данные	Результаты вычислений			
$n_e \cdot 10^{10}$, 1/см ³	9.550	8.030	6.230	3.370
$\alpha \times 10^{-6}$	2.55	2.20	1.88	1.44

Таблица 7: расчет степени ионизации плазмы

10. Графики зависимости $T_e(I_p)$, $n_e(I_p)$.

Вывод

В ходе работы были изучены свойства плазмы и работа двойного зонда.

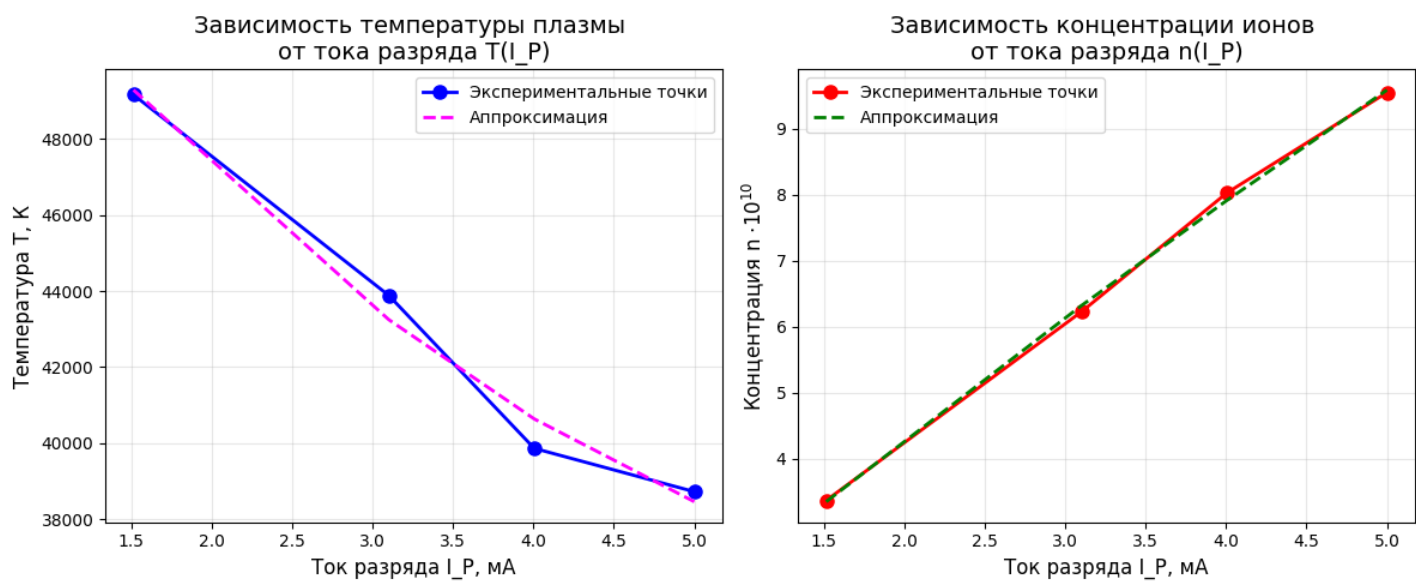


Рис. 4: Зависимости температуры плазмы разряда и концентрации ионов от тока