

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 неоном, 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-

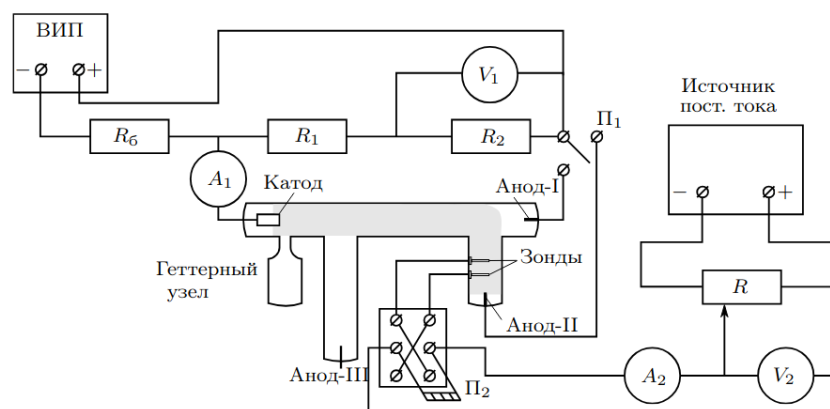


Рис. 1: установка для исследования газового разряда

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), в понимании, что их температуры различны $T_e \neq T_i$:

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

Поэтому иногда дебаевский радиус называют поляризационной длиной.

Выражение, определяющее энергию кулоновского взаимодействия частиц в плазме:

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

где $\varphi_0 = q/\tilde{r}$ - потенциал одного иона.

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:

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

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

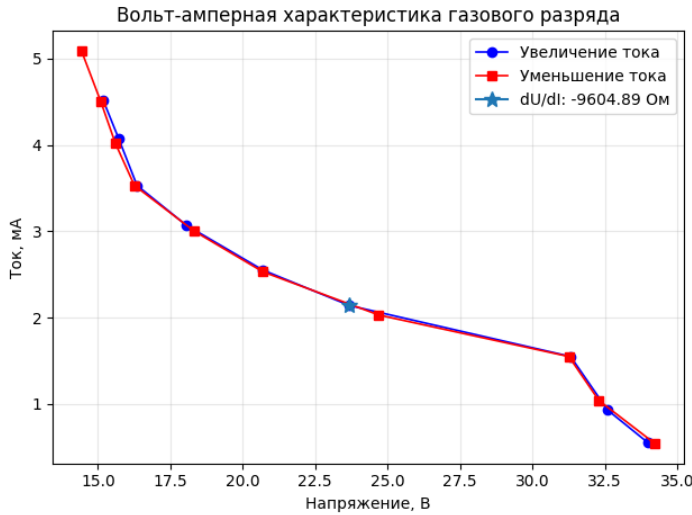
1. Настроим установку для ВАХ газового разряда согласно инструкции, плавно увеличивая напряжение на ВИП, запишем напряжение зажигания, показание вольтметра V_1 . показания выходного напряжения U_{out} , входного $U_{in} = \alpha U_{out}$:

| | | | | |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Номер измерения | 1 | 2 | 3 | 4 |
| $U_{out}, \text{В}$ | 152.52 | 149.54 | 152.51 | 152.53 |
| $U_{in}, \text{В}$ | 1535.2 | 1495.4 | 1525.1 | 1525.3 |
| $\Delta U_{in}, \text{В}$ | 0.1 | | | |
| $\Delta U_{out}, \text{В}$ | 0.01 | | | |

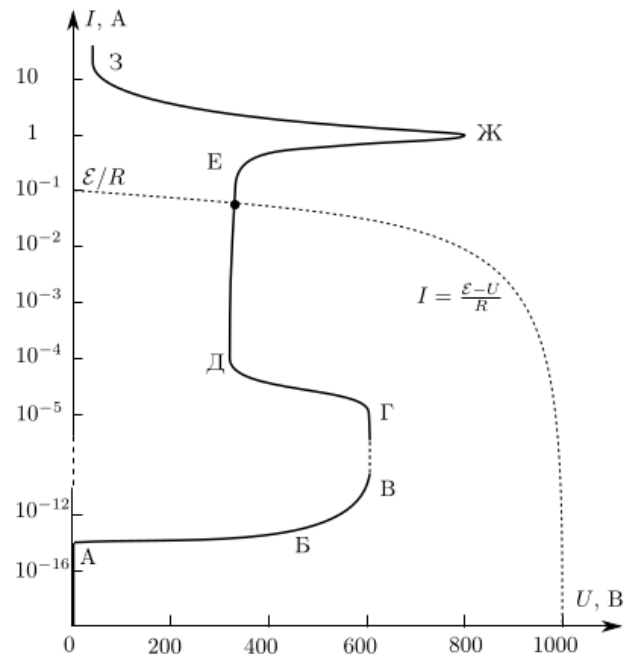
2. С помощью вольтметра V_1 и амперметра A_1 измерим ВАХ газового разряда $I(U)$. Ток изменяется в диапазоне 0.5 – 5.0 мА.

| | | | | | | | | | | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $I, \text{мА}$ | 0.55 | 0.93 | 1.55 | 2.14 | 2.55 | 3.07 | 3.53 | 4.07 | 4.51 | 5.09 |
| $U, \text{В}$ | 34.00 | 32.60 | 31.32 | 23.69 | 20.70 | 18.05 | 16.35 | 15.72 | 15.19 | 14.43 |
| $I, \text{мА}$ | 4.50 | 4.02 | 3.53 | 3.00 | 2.53 | 2.03 | 1.55 | 1.04 | 0.54 | - |
| $U, \text{В}$ | 15.10 | 15.60 | 16.26 | 18.33 | 20.70 | 24.70 | 31.26 | 32.30 | 34.24 | - |

3. Построим график участка вольт-амперной характеристики газового разряда (рис. а). Определим дифференциальное сопротивление:



(а) вах газового разряда



(b) пример вах разряда

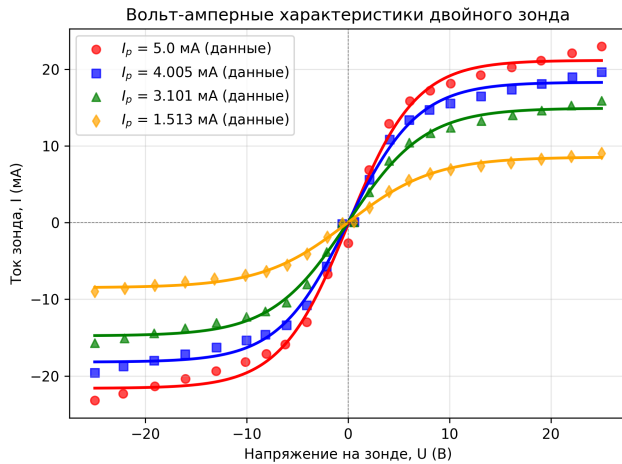
Рис. 2: графики

$$R_{dif} = \frac{dU}{dI} = -9605.89 \pm 175.32 \text{ Ом} \quad \Delta R = R \left(\frac{\delta(\Delta U)}{\Delta U} + \frac{\delta(\Delta I)}{\Delta I} \right) = 175.32 \text{ Ом} \quad (10)$$

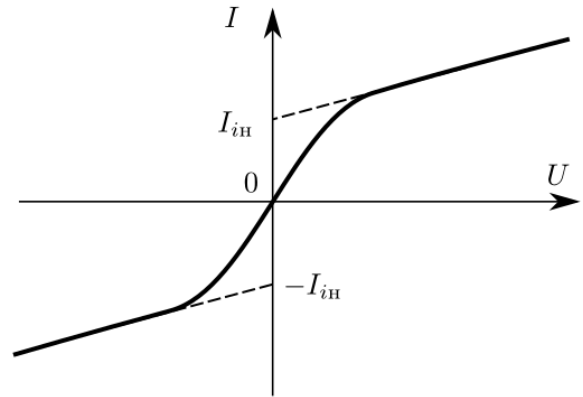
Построенный график соответствует участку Д-Г графика - поднормального тлеющего разряда.

4. Снимем ВАХ двойного зонда, плавно увеличивая напряжение от $-U_0$ до U_0 при фиксированном токе разряда I_p . Построим график зондовых характеристик для разных разрядных токов

| | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| 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 | |



(а) вах двойного зонда



(б) пример вах зонда

Рис. 3: графики2

5. По каждой зондовой характеристике определим ионный ток насыщения I_{in} , наклон характеристики $G = dI/dU, U = 0$ в начале координат.

| I_p , мА | I_{in} , мА | G , мА/В | $e/2kT_e$, 1/В |
|-------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 5.000 ± 0.001 | 21.40 ± 0.01 | 3.21 ± 0.01 | 0.150 ± 0.001 |
| 4.005 ± 0.001 | 18.26 ± 0.01 | 2.66 ± 0.01 | 0.146 ± 0.001 |
| 3.101 ± 0.001 | 14.86 ± 0.01 | 1.96 ± 0.01 | 0.132 ± 0.001 |
| 1.513 ± 0.001 | 8.52 ± 0.01 | 1.01 ± 0.01 | 0.118 ± 0.001 |

6. По результатам предыдущего пункта рассчитаем температуру электронов T_e , концентрацию электронов и ионов в плазме. Считаем площадь поверхности зонда равной $S \approx \pi dl$, параметры установки: $l = 5,2$ мм, $d = 0.2$, мм.

$$T_e = \frac{2kT_e G}{e} \quad n_i = \frac{5I_{in}}{2\pi dl} \sqrt{\frac{m}{2kT_e}}$$

| | | | | |
|------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| I_p , мА | 5.000 | 4.005 | 3.101 | 1.513 |
| T_e , К | 38726 | 39864 | 43882 | 49158 |
| n_i | 9.4×10^{15} | 7.93×10^{15} | 6.16×10^{15} | 3.33×10^{15} |

7. Рассчитаем плазменную частоту колебаний ω_p , электронную поляризационную длину r_{De} и дебаевский радиус экранирования r_D .
8. Оценим степень ионизации плазмы, считая давление в трубке $P \approx 2$ торр.
9. Построим графики зависимости $T_e(I_p)$, $n_e(I_p)$.

Вывод