

# Лабораторная работа 3.5.1. Изучение плазмы газового разряда в неоне.

Балдин Виктор

28 сентября 2024 г.

## Теория

### Плазма

Из-за теплового движения в плазме электроны могут смещаться относительно ионов и образовывать неоднородности. В этих неоднородностях возникает электрическое поле, которое стремится восстановить баланс, из-за чего происходят колебания с частотой

$$w_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}}$$

За характерное время колебаний электроны за счет теплового движения смещаются на

$$r_D \sim \frac{v_e}{w_p} = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e e^2}}$$

$r_D$  - дебаевский радиус,  $k$  - константа Больцмана.

Если поместить в плазму пробную (допустим, положительную) частицу, то электроны будут скапливаться около этой частицы, экранируя её поле. Потенциал точечного заряда будет иметь в плазме следующий вид:

$$\varphi(r) = \frac{q}{r} e^{-\frac{r}{r_D}}$$

где  $r_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e e^2}}$  - радиус Дебая в случае равновесной плазмы. Если температуры электронов и ионов сильно отличаются, то следует определять отдельно величину радиуса экранирования для электронов и для ионов. Итоговый радиус будет

$$r_D = (r_{De}^{-2} + r_{Di}^{-2})^{-1/2}$$

То есть если  $T_i \ll T_e$ , то  $r_D \approx r_{Di}$

### 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:

$$\begin{aligned} I_{e0} &= \frac{n\langle v_e \rangle}{4} eS, \\ I_{i0} &= \frac{n\langle v_i \rangle}{4} eS, \end{aligned} \quad (1)$$

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  $I_{en}$  – электронный ток насыщения, а минимальное  $I_{in}$  – ионный ток насыщения. Значение из эмпирической формулы Бомона:

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

Электронный ток насыщения можно определить по тепловому движению:

$$I_{en} = \frac{n_e S}{4} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}}$$

## 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

$$I_1 = I_{in} + I_{e1} = I_{in} - \frac{1}{4} n_e S \langle v_e \rangle \exp\left(-\frac{eU_f}{kT_e}\right) \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e}\right) = I_{in} \left(1 - \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e}\right)\right). \quad (3)$$

Аналогично через второй получим

$$I_2 = I_{in} \left(1 - \exp\left(\frac{e\Delta U_2}{kT_e}\right)\right) \quad (4)$$

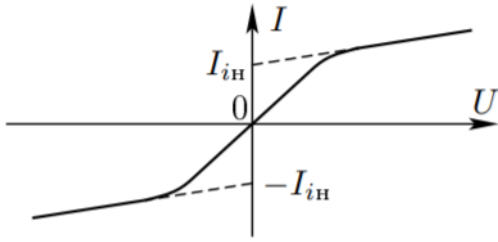
Из (7) и (8) с учётом последовательного соединения зондов ( $I_1 = -I_2 = I$ ):

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

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

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока

$$U = \frac{kT_e}{e} \ln \frac{1 - I/I_{in}}{1 + I/I_{in}}, \quad I = I_{in} \tanh \frac{eU}{2kT_e} + AU. \quad (5)$$



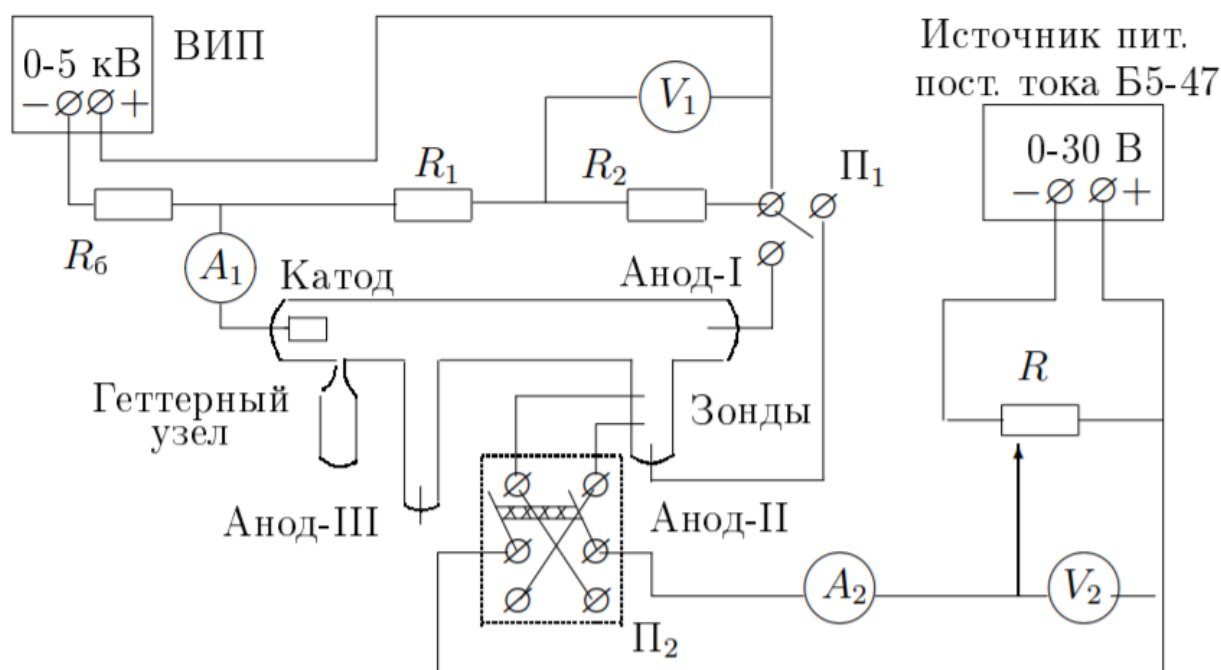
Зависимость выглядит примерно так. С учетом 5 можно выразить асимптоты графика:

$$I = I_{inac} + AU, \quad I = -I_{inac} + AU \quad (6)$$

Наклон в нуле принимает вид:

$$\frac{dI}{dU} = I_{inac} \frac{e}{2kT_e} + A \quad (7)$$

## Описание установки



Стеклопаяная газоразрядная трубка имеет холодный (ненакаливаемый) полый катод, три анода и *геттерный* узел – стеклопаяный 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 анодов (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:  $U_{\text{зж}} = 99 \pm 5$  В.

Снимаем ВАХ газового разряда. Результаты представлены в таблице.

Построим ВАХ и определим максимальное дифференциальное сопротивление разряда  $R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI}$ . Оно будет соответствовать участку с минимальным (по модулю) наклоном графика  $I(U)$ :

В схеме напряжение снимается с делителя напряжений с коэффициентом 10, поэтому  $R_{\text{диф}} = -1.7 \pm 0.6$  кОм. Наш график соответствует участку поднормального тлеющего разряда (см. приложение к лабораторной работе).

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  $I_p = 4.0$  мА,  $I_p = 3.0$  мА и  $I_p = 2.3$  мА.

Видно, что чем меньше ток, тем менее крутая кривая получается. Проанализируем графики по отдельности, чтобы найти их наклон в начале и пересечение асимптот с осью ординат. Данные будем заносить в таблицу. Ионный ток насыщения определим через асимптоты, затем по наклону кривой в точке  $U = 0$  найдём концентрацию электронов в плазме.

По данным таблицы видно что  $N_D \gg 1 \Rightarrow$  плазму можно с хорошей точностью считать идеальной.

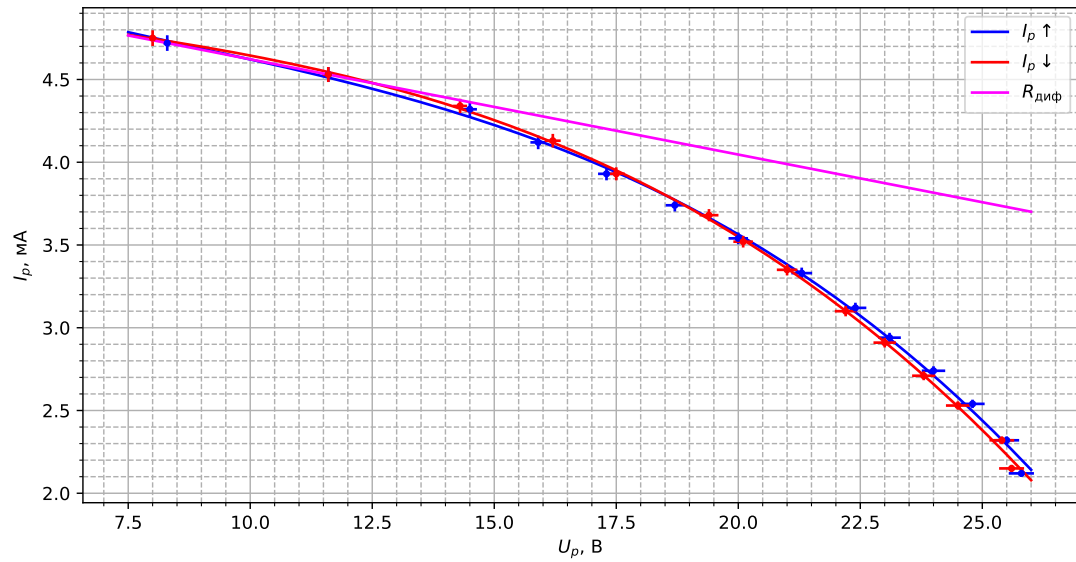


Рис. 1: ВАХ газового разряда в неоне

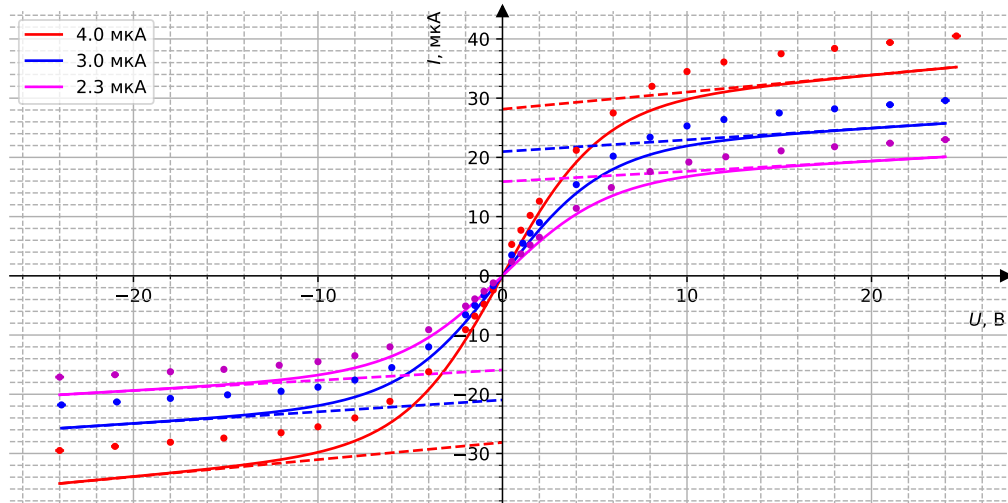


Рис. 2: Зондовые характеристики

$I_p$ , мА	$T_e$ , $10^3$ К	$n_e$ , $10^{-14}$ м $^{-3}$	$\omega_p$ , $10^8$ рад/с	$r_{De}$ , $10^{-4}$ м	$r_D$ , $10^{-4}$ м	$N_D$	$\alpha$ , $10^{-7}$
4.0	$3.1 \pm 0.8$	$1.4 \pm 0.3$	$6.7 \pm 0.8$	$10 \pm 2$	$1.0 \pm 0.1$	$605 \pm 68$	$5.2 \pm 1.2$
3.0	$3.1 \pm 0.8$	$1.0 \pm 0.2$	$5.7 \pm 0.7$	$12 \pm 3$	$1.2 \pm 0.1$	$707 \pm 81$	$3.8 \pm 0.9$
2.3	$3.3 \pm 0.8$	$0.8 \pm 0.2$	$4.9 \pm 0.6$	$14 \pm 3$	$1.4 \pm 0.2$	$819 \pm 94$	$2.8 \pm 0.7$

Построим графики  $T_e(I_p)$  и  $n(I_p)$ :

Очевидно, что из-за больших погрешностей эксперимента судить о характере  $T_e(I_p)$  невозможно, но зависимость  $n(I_p)$  возрастает при повышении тока, потому что больше молекул газа ионизируется, так как выше электрическое поле, выше скорость электронов и больше столкновений.

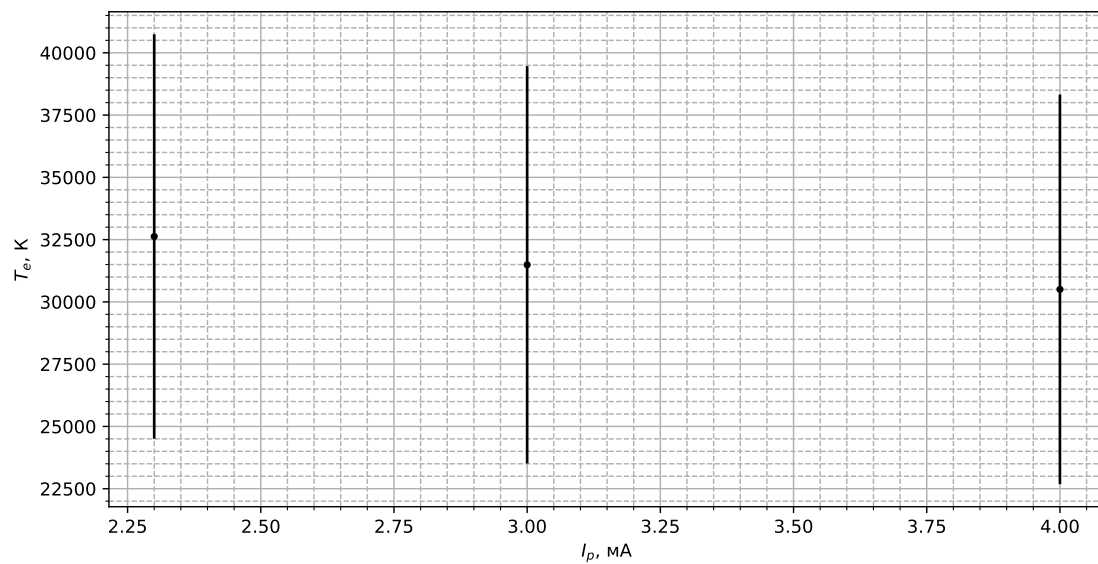


Рис. 3: Зависимость  $T_e(I_p)$

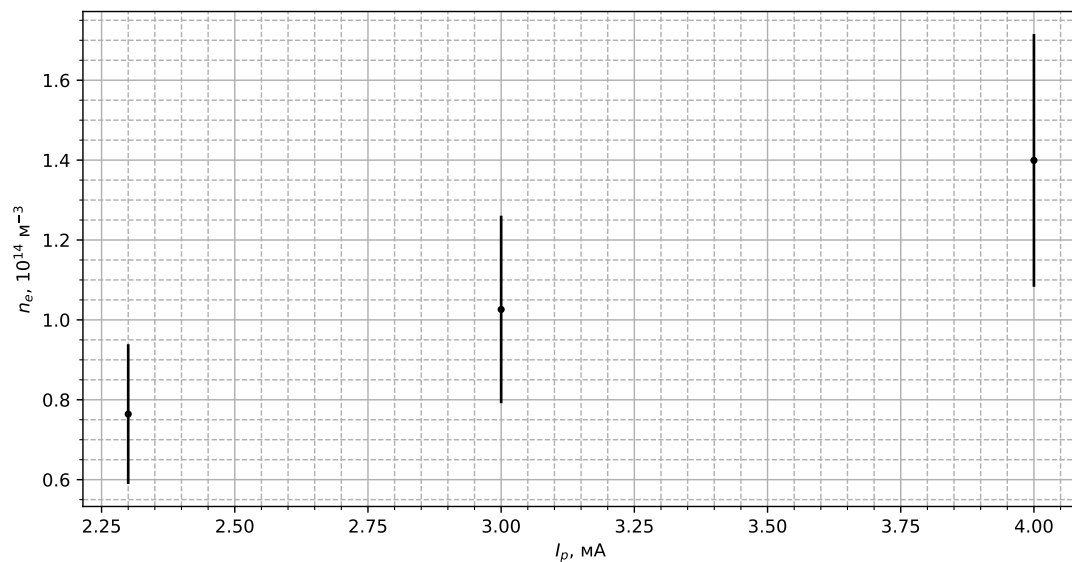


Рис. 4: Зависимость  $n(I_p)$

## Вывод

В данной лабораторной работе мы исследовали состояние плазмы в тлеющем газовом разряде с помощью двойного зонда. Полученные результаты сходятся с указанными в лабораторной работе по порядку. Плазму в тлеющем разряде можно с хорошей точностью назвать идеальной, так как  $N_D \gg 1$ .