

# Изучение плазмы газового разряда в неоне

Луговцов Глеб  
ФЭФМ МФТИ  
lugovtsov.gs@phystech.edu

## Аннотация

В работе изучается плазма газового разряда в неоне, ВАХ разряда и описание свойств полученной плазмы с помощью некоторых параметров.

# 1 Введение

Плазмой называют четвёртое агрегатное состояние, при котором вещество (в нашем случае это неон) диссоциирует на газ из свободных ионов, электронов и нейтральных частиц, которые не распались. Поведение этого газа можно описать множеством параметров, таких как температура, плазменная частота, радиус Дебая, среднее число ионов в дебаевской сфере. В этой работе мы постараемся подробно изучить поведение плазмы на примере двойного зонда и разряда.

## 2 Теоретическая справка

### 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:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi ne^2}{m}}. \quad (5)$$

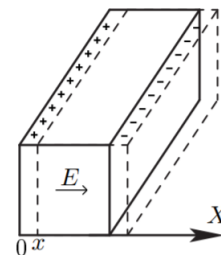


Рис. 1: Плазменные колебания

## 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  $I_{eH}$  – электронный ток насыщения, а минимальное  $I_{iH}$  – ионный ток насыщения. Значение из эмпирической формулы Бомона:

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

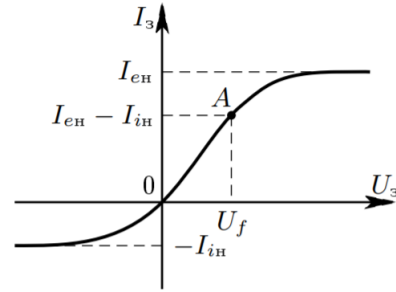


Рис. 2: Вольт-амперная характеристика одиночного зонда

## 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

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

Аналогично через второй получим

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

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

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

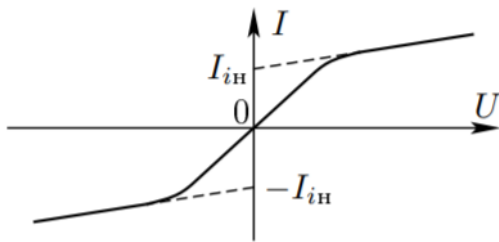
$$\Delta U_2 = \frac{kT_e}{e} \ln \left( 1 + \frac{I}{I_{iH}} \right)$$

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока

$$U = \frac{kT_e}{e} \ln \frac{1 - I/I_{iH}}{1 + I/I_{iH}}, I = I_{iH} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e}. \quad (10)$$

Реальная зависимость выглядит несколько иначе и описывается формулой

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



Из этой формулы можно найти формулу для  $T_e$ : для  $U = 0$  мы найдём  $I_{iH}$ , продифференцируем в точке  $U = 0$  и с учётом  $\operatorname{th} \alpha \approx \alpha$  при малых  $\alpha$  и  $A \rightarrow 0$  получим:

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

Рис. 3: Вольт-амперная характеристика двойного зонда

### 3 Ход работы

#### Описание установки

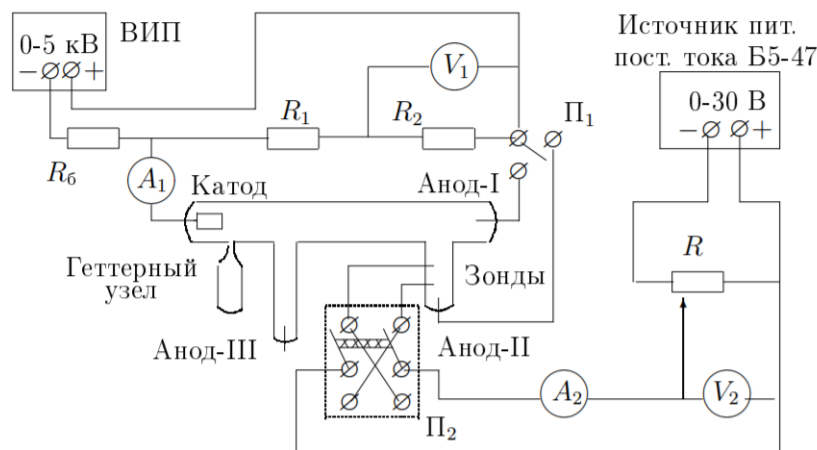


Рис. 4: Принципиальная схема установки

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  $A_2$ .

## Исследование ВАХ разряда

Зажигаем плазму и строим ВАХ разряда в координатах  $I_p(U_p)$ :

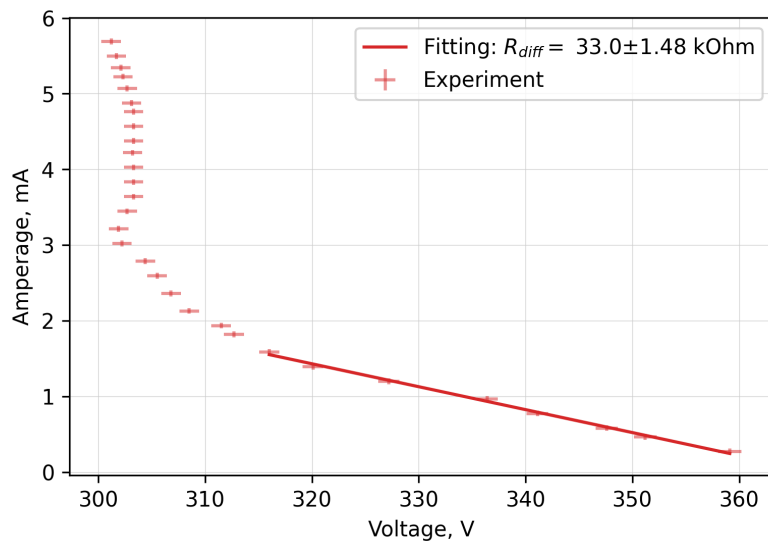


Рис. 5: ВАХ разряда

По наклону того участка кривой, который приближен к линии, находим максимальное дифференциальное сопротивление разряда  $R_{диф}$  (обратный коэффициент прямой):

$$R_{диф} = \frac{dU}{dI} = 33.0 \pm 1.5 \text{ кОм} \quad (13)$$

Сравнивая полученную кривую с рисунком 6 мы приходим к выводу, что состояние будет называться *поднормальным тлеющим зарядом* (участок ГД). Полное описание есть на стр. 283 практикума.

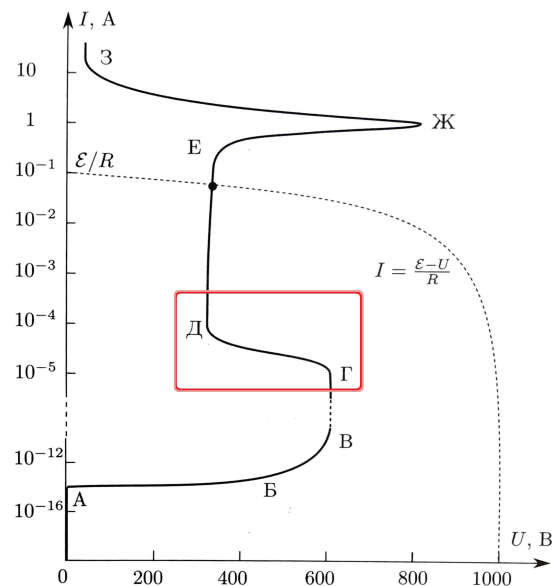


Рис. 6: Вольт-амперная характеристика разряда в неоне при давлении 1 торр. Пунктиром изображён пример нагрузочной прямой, соответствующей режиму нормального тлеющего разряда.

### Исследование зондовых характеристик

Построим зондовые характеристики для разных токов и отцентрируем кривые:

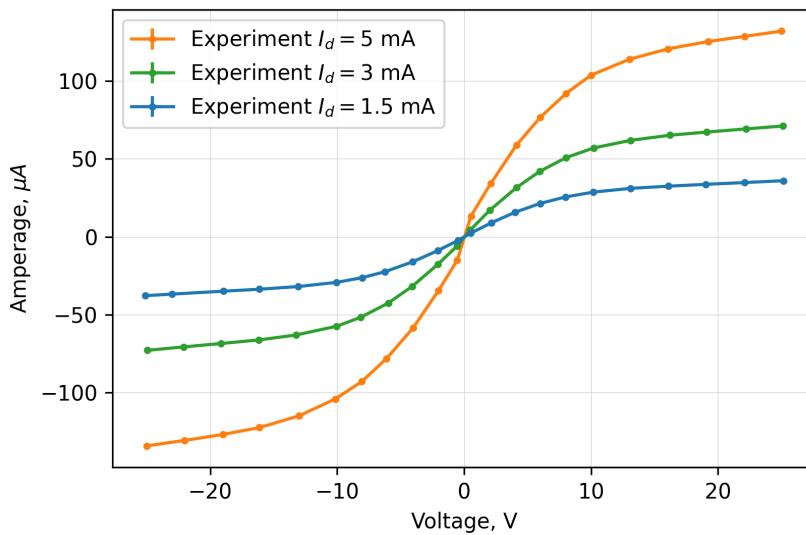


Рис. 7: ВАХ двойного зонда

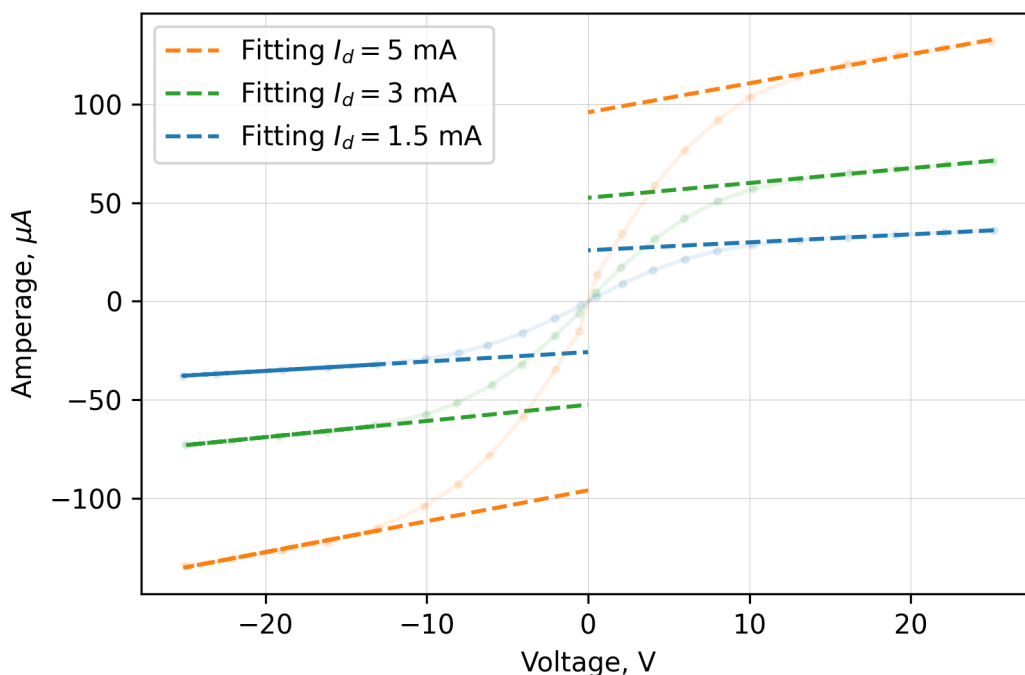


Рис. 8: Асимптоты ВАХ зондов

Определим асимптоты:

И по точкам пересечения асимптот с осью ординат найдём ионный ток насыщения:

$$I_{iH}^{5B} = 95.8 \pm 0.5 \text{ мкА},$$

$$I_{iH}^{3B} = 52.5 \pm 0.2 \text{ мкА},$$

$$I_{iH}^{1.5B} = 25.9 \pm 0.1 \text{ мкА}.$$

Полученные данные занесём в таблицу:

$I_p$ , мА	$T_e$ , $10^4$ К	$n_e$ , $10^{15} \text{ м}^{-3}$	$\omega_p$ , $10^4$ рад/с	$r_D$ , $10^{-5}$ см	$N_D$	$\alpha$ , $10^{-7}$
5.0	$41 \pm 4$	$58 \pm 6$	$144 \pm 10$	$49 \pm 3$	30	24
3.0	$42 \pm 4$	$33 \pm 4$	$107 \pm 9$	$66 \pm 5$	40	13
1.5	$41 \pm 6$	$16 \pm 2$	$75 \pm 8$	$94 \pm 10$	57	7

## 4 Выводы

Исследовав ВАХ разряда, мы пришли к выводу, что плазма находилась в состоянии *поднормального тлеющего заряда*.

При исследовании зондовых характеристик удалось выяснить, что плазма *идеальна и квазинейтральна*.