

## 3.5.1 Изучение плазмы газового разряда в неоне

Анна Назарчук Б02-109

### 1. Аннотация

В работе изучается плазма газового разряда в неоне с помощью двойного зонда. Снимается ВАХ разряда в режиме поднормального тлеющего разряда. Получаются зондовые характеристики, рассчитываются параметры плазмы (например,  $\omega_p$ ,  $r_D$ ).

### 2. Введение

Как известно, вещество может находиться в трёх агрегатных состояниях — твёрдом, жидком и газообразном, причём эти состояния последовательно сменяются по мере возрастания температуры. Если и дальше нагревать газ, то сначала молекулы диссоциируют на атомы, а затем и атомы распадаются на электроны и ионы, так что газ становится ионизованным, представляя собой смесь из свободных электронов и ионов, а также нейтральных частиц. Если степень ионизации газа (отношение числа ионизованных атомов к их полному числу) оказывается достаточно велика, то поведение заряженных частиц приобретает коллективный характер, так что описание свойств среды не может быть сведено к описанию обычного газа, содержащего некоторое количество отдельных заряженных частиц. Такое состояние ионизованного газа и называется плазмой. Первое описание плазмы было дано в 1923 г. И. Ленгмюром. Современная физика термин "газовый разряд" трактует как не только процесс протекания тока через газ, но и любой процесс возникновения ионизации газа под действием внешнего поля. Это и планируется пронаблюдать в данной работе.

### 3. Постановка задачи

Получить вольт-амперную характеристику газового разряда, определить тип разряда. Рассчитать основные характеристики плазмы методом зондовых характеристик.

### 4. Теоретические сведения

Определяющими свойствами плазмы являются коллективный характер её движения и квазинейтральность (равенство нулю средней плотности заряда). Рассмотрим простейший вид коллективных плазменных колебаний.

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

$\omega_p$  - плазменная частота (частота коллективных колебаний электронов относительно квазинейтрального состояния, так называемых ленгмюровских колебаний, определяет временной масштаб для плазмы)

Плазменный масштаб плазменных явлений задается дебаевским радиусом - амплитудой ленгмюровских колебаний, возбуждаемых тепловыми колебаниями

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

Рассмотрим плазменное экранирование. В равновесную плазму ( $T = T_e = T_i$ ) помещена массивная пробная частица заряда  $+q$ , с радиусом, большим  $r_D$ . Для электронов из закона Больцмана:

$$n_e = n_{e0} \cdot \exp\left(\frac{e\varphi}{k_B T}\right) \quad (3)$$

Аналогичное соотношение можно написать и для ионов (однозарядных). Температура электронов достаточно высока, поэтому:

$$\rho = -en_e + en_i \approx -en \cdot \frac{e\varphi}{k_B T} \quad (4)$$

Уравнение Пуассона для одномерного случая:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -4\pi\rho \quad (5)$$

Объединив два уравнения, получим аналогичное выражение:

$$r_D = \sqrt{\frac{k_B T_e}{4\pi n_e e^2}} \quad (6)$$

Теперь рассмотрим неравновесную плазму ( $T_e \neq T_i$ ):

$$r_{De} = \sqrt{\frac{k_B T_e}{4\pi n_e e^2}}, \quad r_{Di} = \sqrt{\frac{k_B T_i}{4\pi n_i e^2}} \quad (7)$$

Поэтому в общем случае:

$$r_D = (r_{De}^2 + r_{Di}^2)^{-1/2} = \sqrt{\frac{k_B}{4\pi n_e e^2} \frac{T_e T_i}{T_e + T_i}} = \quad (8)$$

Плазма - ионизированный газ,  $r_D \ll a$ , размера области, занимаемой газом. Плазма идеальна, если кулоновская энергия мала по сравнению с тепловой:

$$\omega_{кул} = -\frac{1}{2}n_i \frac{q^2}{r_D}, \quad \omega_{тепл} = n_i k_B T \quad (9)$$

Отношение энергий есть число заряженных частиц в сфере с дебаевским радиусом:

$$N_D = \frac{4}{3}\pi n_i r_D^3 \quad (10)$$

Плазма идеальна при  $N_D \gg 1$ .

## 5. Методика измерений

### 5.1. Плавающий потенциал

Измерение электрических потенциалов с помощью "зондов небольших проводников, вводимых в плазму. При внесении проводника в плазму, он подвергается "бомбардировке" со стороны её заряженных частиц. Из-за различий в скорости частиц проводник зарядится отрицательно с потенциалом (отн. плазмы)  $-U_f$  - плавающий потенциал. Если бы  $U_f = 0$ :

$$I_{e0} = \frac{n\bar{v}_e}{4}eS, \quad I_{i0} = \frac{n\bar{v}_i}{4}eS, \quad (11)$$

Теперь  $U_f \neq 0$ :  $I_i \approx I_{i0}$ , согласно распределению Больцмана:

$$I_e = I_{e0} \exp\left(\frac{eU_f}{k_B T_e}\right) \quad (12)$$

### 5.2. Одиночный зонд

Схема измерений приведена на рис. 1.

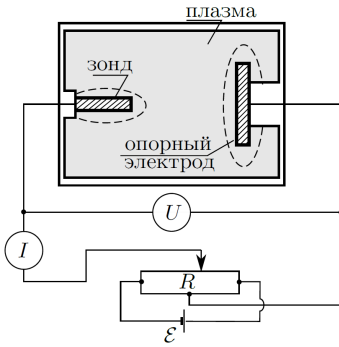


Рис. 1: Исследование плазмы методом одиночного зонда

Зависимость тока через зонд от потенциала зонда - зондовая характеристика (рис. 2). Токи можно оценить из формулы 11:

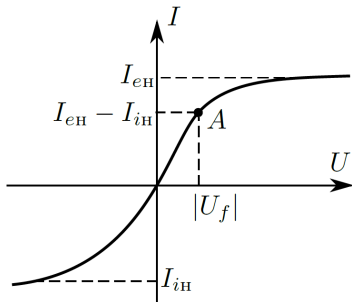


Рис. 2: Зондовая характеристика

$$I_{en} \approx I_{e0} = \frac{1}{4}n_e S \sqrt{\frac{8k_B T_e}{\pi m_e}} \quad (13)$$

Полуэмпирическая формула Д. Бома:

$$I_{in} \approx 0.4n_i S \sqrt{\frac{2k_B T_e}{m_i}} \quad (14)$$

### 5.3. Двойной зонд

Двойной зонд - система, состоящая из двух одинаковых зондов на небольшом расстоянии друг от друга, между которыми создается небольшая (по сравнению с  $U_f$ ) разность потенциалов  $U$ . При малых токах через зонд:

$$U_1 = U_f + \Delta U_1, \quad U_2 = U_f + \Delta U_2 \quad (15)$$

$$U = U_2 - U_1 = \Delta U_2 - \Delta U_1 \quad (16)$$

Токи, приходящие на электроды:

$$I_1 = I_{\text{ин}}(1 - \exp(\frac{e\Delta U_1}{k_B T_e})), \quad I_2 = I_{\text{ин}}(1 - \exp(\frac{e\Delta U_2}{k_B T_e})) \quad (17)$$

Из последовательного соединения зондов:

$$I = I_{\text{ин}} th \frac{eU}{2k_B T_e} \quad (18)$$

Вблизи  $U = 0$ :

$$k_B T_e = \frac{1}{2} \frac{eI_{\text{ин}}}{\frac{dI}{dU}|_{U=0}} \quad (19)$$

### 5.4. Установка

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 3. Трубка наполнена изотопом неона  $^{22}\text{Ne}$  при давлении 2 мм рт. ст. 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 — вольтметром  $V_1$ . При подключении к ВИП анода-II разряд возникает в пространстве между катодом и анодом-II, где находится двойной зонд, используемый для диагностики плазмы положительного столба.

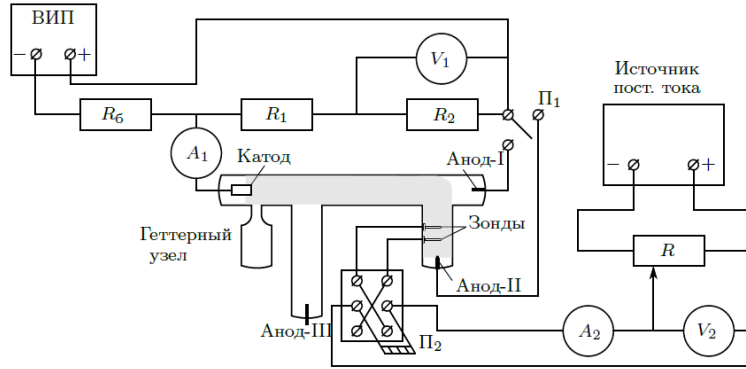


Рис. 3: Схема установки

## 6. Измерения и обработка данных

### 6.1. Вольт-амперная характеристика разряда

С помощью вольтметра  $V_1$  и амперметра  $A_1$  измерили вольт-амперную характеристику разряда  $I_p(U_p)$  (рис. 4)

По наклону кривой определили максимальное  $R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} = -68000 \pm 11000$  Ом. Полученный участок ВАХ соответствует поднормальному тлеющему разряду.

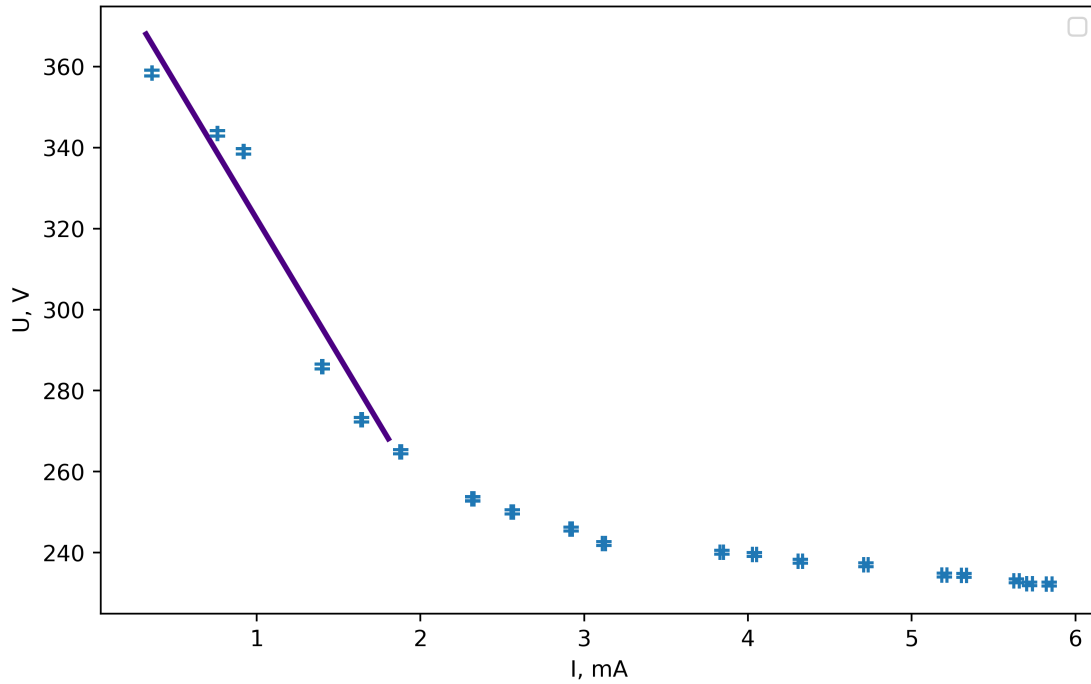


Рис. 4: ВАХ разряда

## 6.2. Зондовые характеристики

При фиксированном токе разряда измерили вольт-амперную характеристику двойного зонда. (рис. 5). Для каждой зондовой характеристики определили ионный ток и наклон характеристики в начале координат по графику. Из полученных результатов рассчитаны  $T_e$  (ф-ла 19),  $n_i$  (ф-ла 14),  $\omega_p$  (ф-ла 1),  $r_{De}$  (ф-ла 7),  $r_D$  (ф-ла 8),  $N_D$  (ф-ла 10),  $\alpha$  - степень ионизации плазмы. Результаты приведены в таблице 1, также построены графики зависимости электронной температуры и концентрации электронов от тока разряда (рис. 6).

Таблица 1: Характеристики плазмы для разных токов разряда  $I_p$

$I_p$ , mA	1.5	3	3.4
$T_e$ , эВ	$3.1 \pm 0.2$	$4.2 \pm 0.1$	$3.7 \pm 0.4$
$n_i, 10^{10} \text{ 1/см}^3$	$2.1 \pm 0.1$	$4.6 \pm 0.1$	$4.8 \pm 0.3$
$\omega_p, 10^9 \text{ рад/с}$	$8.2 \pm 0.2$	$12.0 \pm 0.1$	$12.4 \pm 0.4$
$r_{De}, 10^{-3} \text{ см}$	$9.0 \pm 0.8$	$7.2 \pm 0.2$	$6.5 \pm 0.7$
$r_D, 10^{-3} \text{ см}$	$0.82 \pm 0.03$	$0.56 \pm 0.01$	$0.54 \pm 0.03$
$N_D$	$49 \pm 6$	$34 \pm 1$	$33 \pm 6$
$\alpha, 10^{-5}$	$3.9 \pm 0.4$	$11.6 \pm 0.3$	$10.7 \pm 1.2$

## 7. Обсуждение результатов

1. При сравнении вольт-амперной характеристики разряда (рис. 4) и графика вольт-амперной характеристики газового разряда из приложения к лабораторной работе (рис.

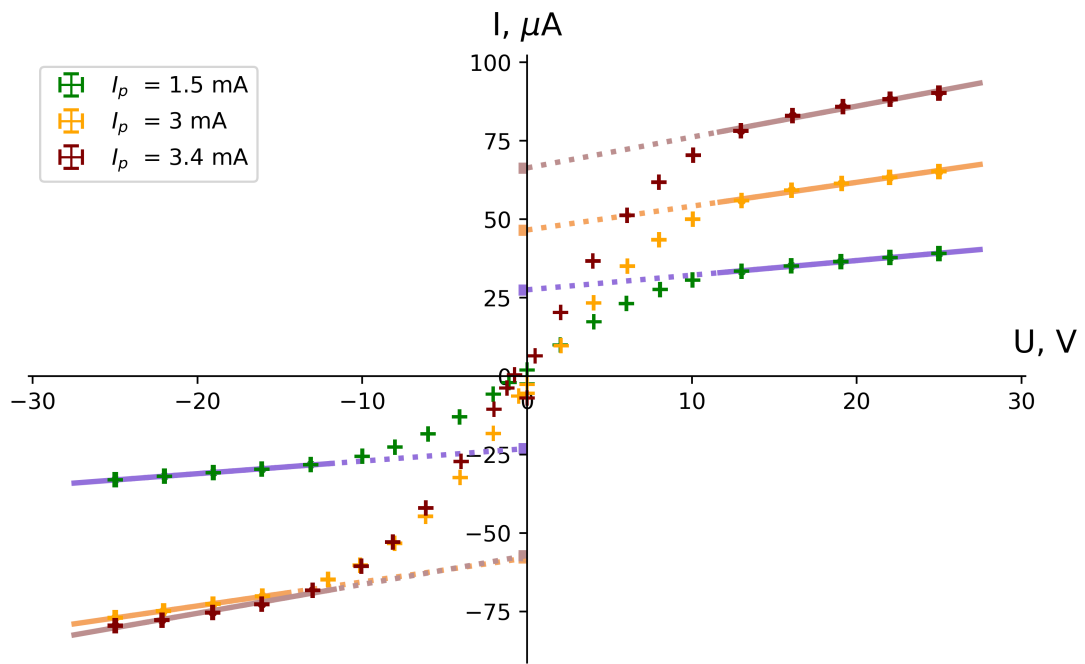


Рис. 5: ВАХ двойного зонда

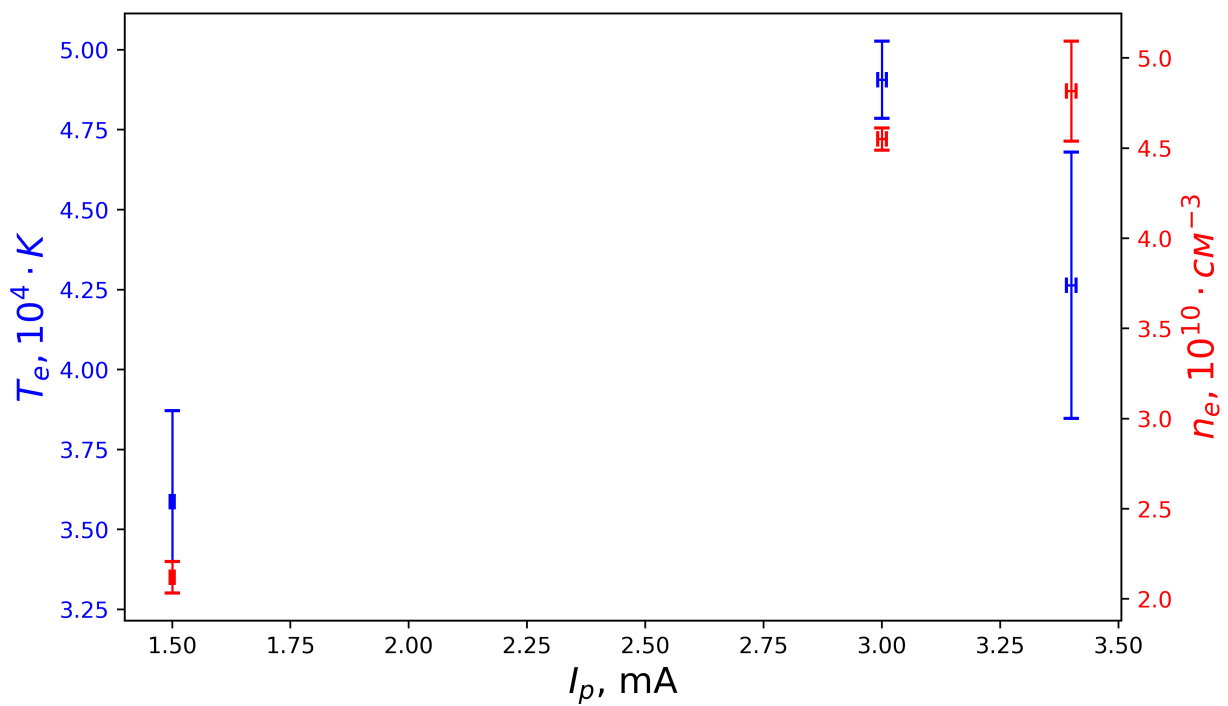


Рис. 6: Зависимость электронной температуры и концентрации электронов от тока разряда

7) видно, что рассматривался участок ГД, соответствующий поднормальному тлеющему разряду.

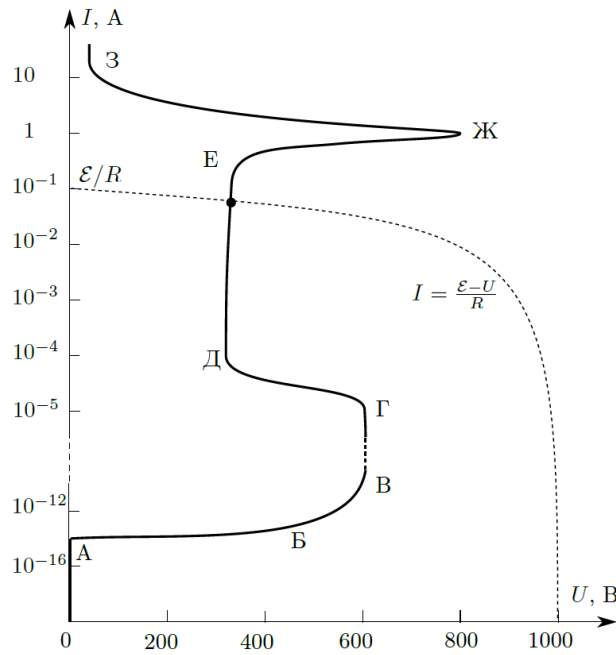


Рис. 7: Вольт-амперная характеристика разряда в неоне (из приложения)

2. По определению поляризационной длины  $r_{De}$  плазму можно считать квазинейтральной, так как именно электронная дебаевская длина определяет масштаб, на котором нарушается квазинейтральность из-за тепловых флуктуаций электронов относительно ионов, а  $r_{De} \sim 10^{-2}$  см, что много меньше размеров области.

3. Оценив число ионов в дебаевской сфере  $N_D \sim 40$ , видно, что число частиц много больше 1, что позволяет называть плазму идеальной.

4. Определить зависимость электронной температуры от тока разряда с помощью полученных данных (рис. 6) невозможно из-за малого числа точек и достаточной погрешности результатов. Однако можно качественно оценить зависимость концентрации электронов от тока разряда: график напоминает линейную или степенную зависимость, что достаточно ожидаемо, при увеличении тока разряда увеличивается и число электронов в газе.

## 8. Выводы

Из ВАХ разряда подтверждено, что исследуется тлеющий газовый разряд. Экспериментальная зондовая характеристика подтверждает теоретическую зависимость:  $I = I_{in} th \frac{eU}{2k_B T_e}$ , количество ионов в дебаевской сфере  $N_D \sim 40$  показывает идеальность плазмы. Остальные характеристики плазмы получились схожими по порядку с примерами в инструкции к работе, что подтверждает справедливость метода измерений. Однако не удалось оценить зависимость температуры электронов от тока разряда из-за неточных измерений и малого их числа.