

## 3.5.1 Изучение плазмы газового разряда в неоне

Анна Назарчук Б02-109

### 1. Аннотация

В работе изучена плазма газового разряда в неоне с помощью двойного зонда. Была получена ВАХ разряда в режиме поднормального тлеющего разряда. Получены 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. Такое состояние газа нельзя описывать как обычный газ с некоторыми частицами, требуются дополнительные параметры, описывающие движение такого газа (плазмы). Определение таких параметров, как тип разряда и других основных характеристик, и является целью данной работы.

### 3. Методика измерений

Измерения произведены с помощью двойного зонда - системы, состоящей из двух одинаковых зондов на небольшом расстоянии друг от друга, между которыми создается небольшая (по сравнению с потенциалом, до которого заряжается зонд, помещенный в плазму) разность потенциалов  $U$ . Теоретически получена зависимость тока от напряжения между зондами: (она также представлена на графике 1).

$$I = I_{in} th \frac{eU}{2k_B T_e} \quad (1)$$

При рассмотрении этой формулы вблизи  $U = 0$ :

$$k_B T_e = \frac{1}{2} \frac{e I_{in}}{\frac{dI}{dU}|_{U=0}} \quad (2)$$

Из пересечения асимптот с осью  $U = 0$  можно найти  $I_{in}$ . Далее, вычислив наклон графика в начале координат, можно определить температуру электронов (формула 2). По этим известным параметрам можно найти концентрацию заряженных частиц, используя полуэмперическую формулу Д. Бома:

$$I_{in} \approx 0.4 n_i S \sqrt{\frac{2k_B T_e}{m_i}} \quad (3)$$

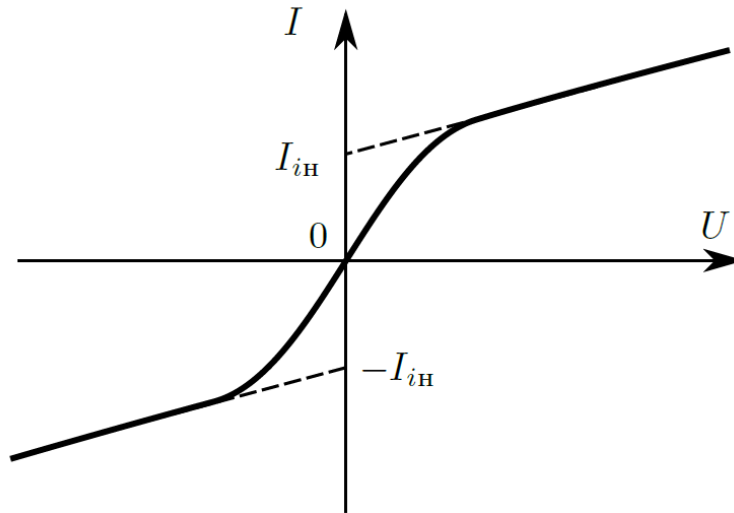


Рис. 1: Вольт-амперная характеристика двойного зонда

Основными характеристиками плазмы являются плазменная частота колебаний  $\omega_p$  (определяет временной масштаб движения плазмы), дебаевский радиус  $r_{De}$  (определяет пространственный масштаб явления в плазме), поляризационная длина  $r_D$  (определяет масштаб, на котором можно считать плазму квазинейтральной), среднее число ионов в дебаевской сфере  $N_D$  (при больших значениях плазма считается идеальной). Теоретические формулы для вычисления этих величин приведены в таблице 1.

Таблица 1: Теоретические выражения для основных характеристик плазмы

Величина	Теоретическое выражение
$\omega_p$	$\sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}}$
$r_{De}$	$\sqrt{\frac{k_B T_e}{4\pi n_e e^2}}$
$r_D$	$\sqrt{\frac{k_B}{4\pi n_e e^2} \frac{T_e T_i}{T_e + T_i}}$
$N_D$	$\frac{4}{3} \pi n_i r_D^3$

## 4. Установка

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 2. 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.

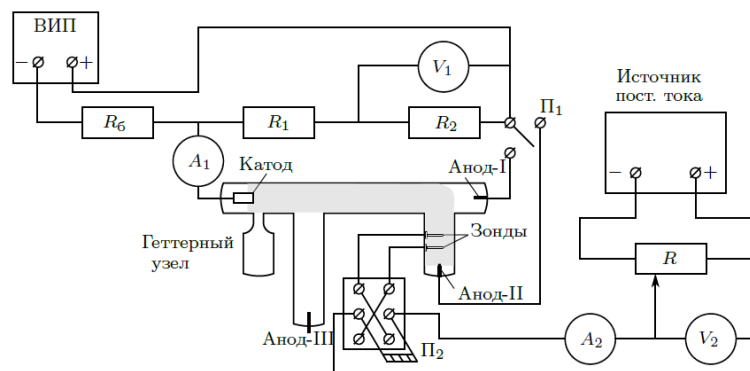


Рис. 2: Схема установки

## 5. Измерения и обработка данных

### 5.1. Вольт-амперная характеристика разряда

С помощью вольтметра  $V_1$  и амперметра  $A_1$  измерили вольт-амперную характеристику разряда  $I_p(U_p)$  (рис. 3)

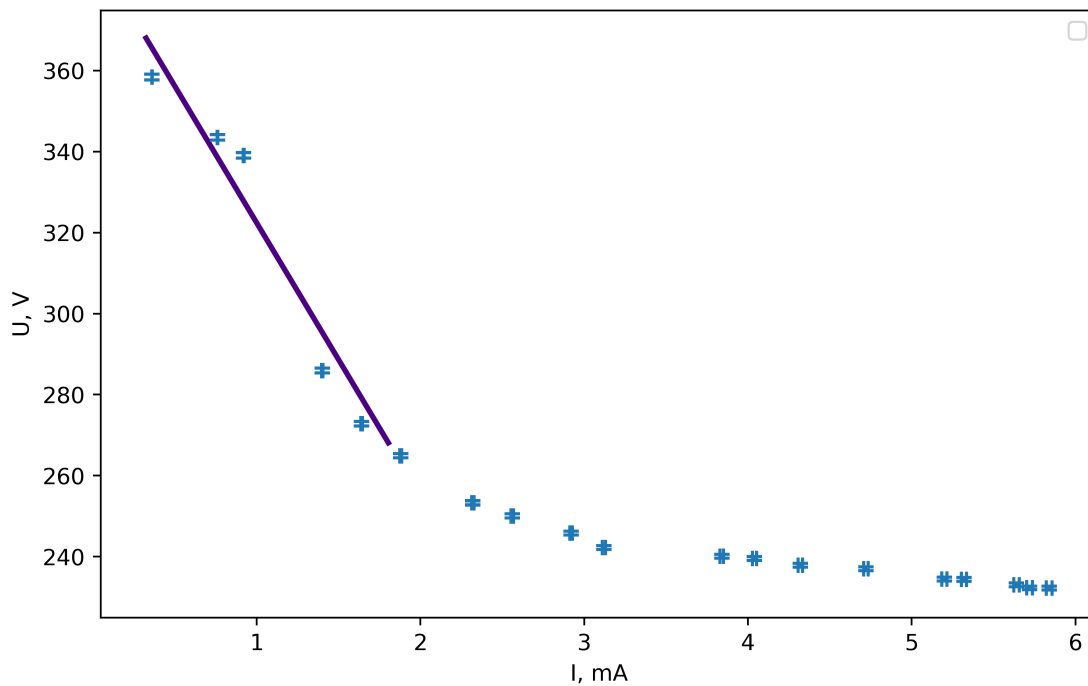


Рис. 3: Вольт-амперная характеристика разряда при давлении  $P \sim 2$  торр

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

## 5.2. Зондовые характеристики

При фиксированном токе разряда измерили вольт-амперную характеристику двойного зонда. (рис. 4). Для каждой зондовой характеристики определили ионный ток и наклон характеристики в начале координат по графику. Из полученных результатов рассчитаны  $T_e$ ,  $n_i$ ,  $\omega_p$ ,  $r_{De}$ ,  $r_D$ ,  $N_D$ ,  $\alpha$  - степень ионизации плазмы (по формулам из таблицы 1). Результаты приведены в таблице 2, также построены графики зависимости электронной температуры и концентрации электронов от тока разряда (рис. 5).

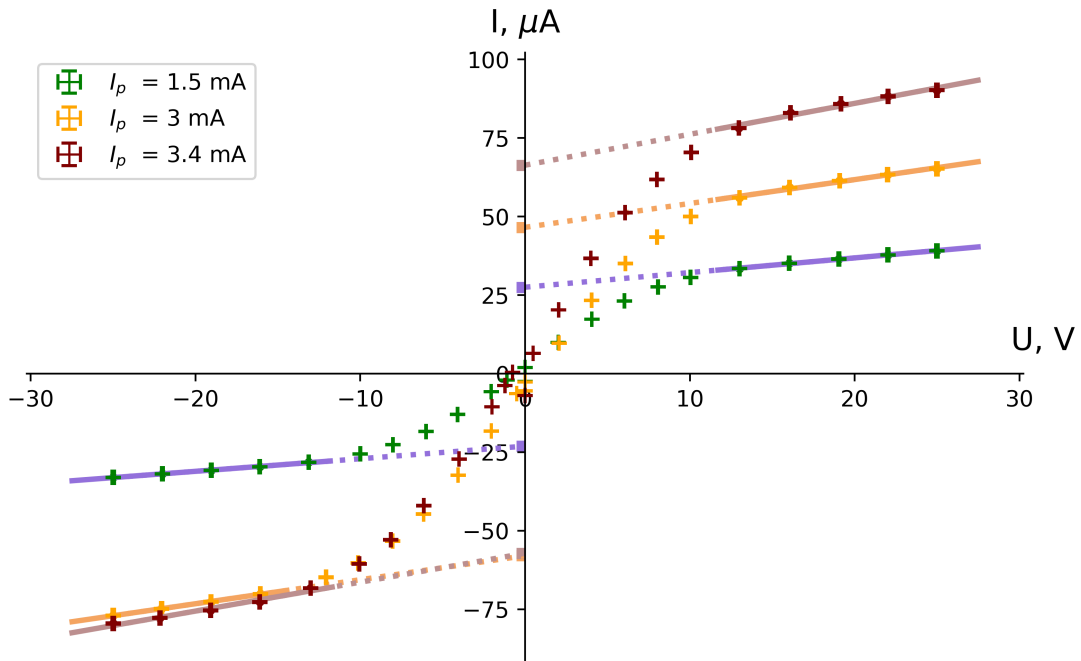


Рис. 4: Вольт-амперная характеристика двойного зонда при небольших токах, давлении  $P \sim 2$  торр

Таблица 2: Характеристики плазмы для разных токов разряда  $I_p$

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

## 6. Обсуждение результатов

1. При сравнении вольт-амперной характеристики разряда (рис. 3) и графика вольт-амперной характеристики газового разряда из приложения к лабораторной работе (рис.

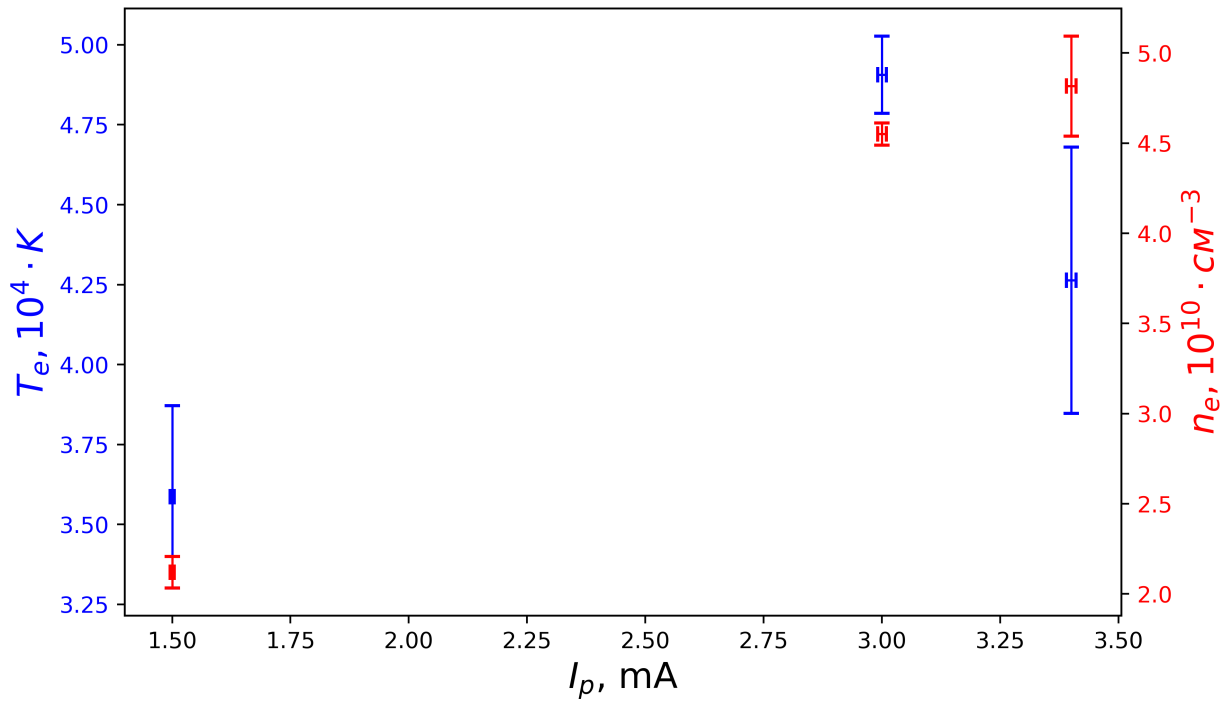


Рис. 5: Зависимость электронной температуры и концентрации электронов от тока разряда при давлении  $P \sim 2$  торр

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

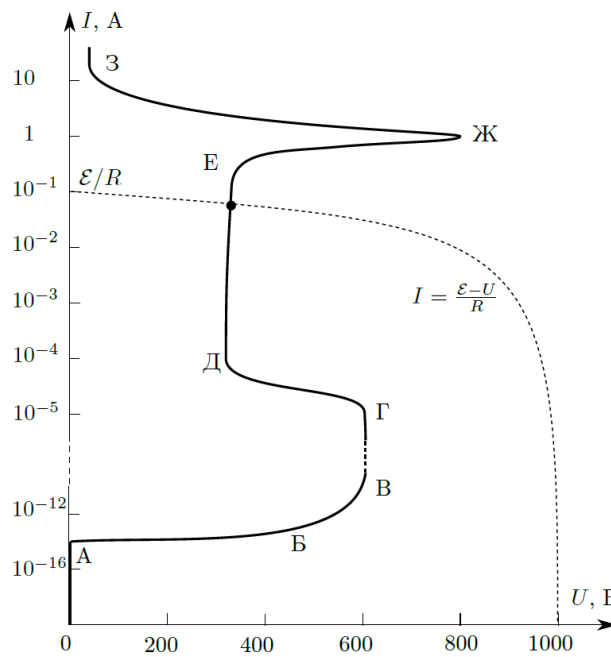


Рис. 6: Вольт-амперная характеристика разряда в неоне (из приложения)

2. По определению поляризационной длины  $r_{De}$  плазму можно считать квазинейтраль-

ной, 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. 5) 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.

## 7. Выводы

Из ВАХ разряда подтверждено, что исследуется тлеющий газовый разряд. Экспериментальная зондовая характеристика схожа с теоретической зависимостью:  $I = I_{ин} th \frac{eU}{2k_B T_e}$ , 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.