

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Лабораторная работа 3.5.1  
по теме:  
«Изучение плазмы газового разряда в неоне»

Студент группы Б02-109

Назарчук Анна

Долгопрудный, 2022

# 1. Аннотация

В работе исследована плазма газового разряда в неоне с помощью двойного зонда. Экспериментально получена вольт-амперная характеристика разряда в режиме поднормального тлеющего разряда. Расчитаны зондовые характеристики, измерены основные параметры плазмы.

# 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

Для определения основных характеристик плазмы произведены измерения 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).[1]

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

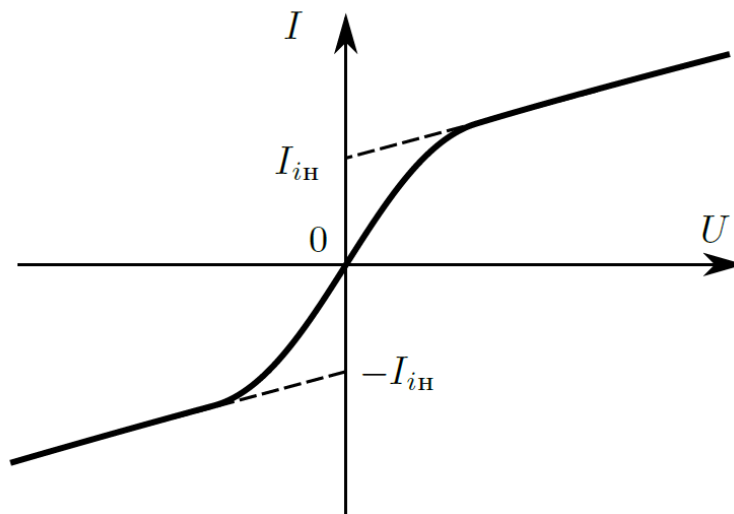


Рис. 1: Качественный вид экспериментальной вольт-амперной характеристики двойного зонда [1]

При рассмотрении этой формулы вблизи  $U = 0$ :

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

Для определения температуры электронов в плазме из пересечения асимптот с осью  $U = 0$  найдена  $I_{in}$  и вычислен наклон графика в начале координат. По этим известным параметрам определена концентрацию заряженных частиц, используя полуэмпирическую формулу Д. Бома: [1]

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

Основными характеристиками плазмы являются плазменная частота колебаний  $\omega_p$  (определяет временной масштаб движения плазмы), дебаевский радиус  $r_{De}$  (определяет пространственный масштаб явления в плазме), поляризация 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.[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 высоковольтному источнику питания 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 высоковольтному источнику питания анода-II разряд возникает в пространстве между катодом и анодом-II, где находится двойной зонд, используемый для диагностики плазмы положительного столба.

## 5. Измерения и обработка данных

### 5.1. Вольт-амперная характеристика разряда

Для определения типа разряда с помощью вольтметра  $V_1$  и амперметра  $A_1$  измерена вольт-амперная характеристика разряда  $I_p(U_p)$  (рис. 3)

По наклону кривой определено максимальное  $R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} = -68 \pm 11$  кОм. Полученный участок вольт-амперной характеристики соответствует поднормальному тлеющему разряду.

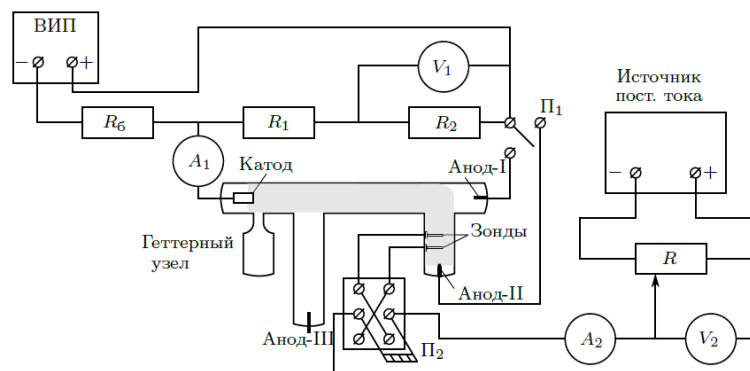


Рис. 2: Схема экспериментальной установки для исследования газового разряда при давлениях  $\sim 2$  Торр.  $R_6$  - балластный резистор ( $\sim 500$  кОм),  $\Pi_1$  - переключатель,  $R_1, R_2$  - высокоомный делитель напряжения,  $R$  - потенциометр,  $V_1, V_2$  - вольтметры,  $A_1, A_2$  - амперметры, ВИП - высоковольтный источник питания

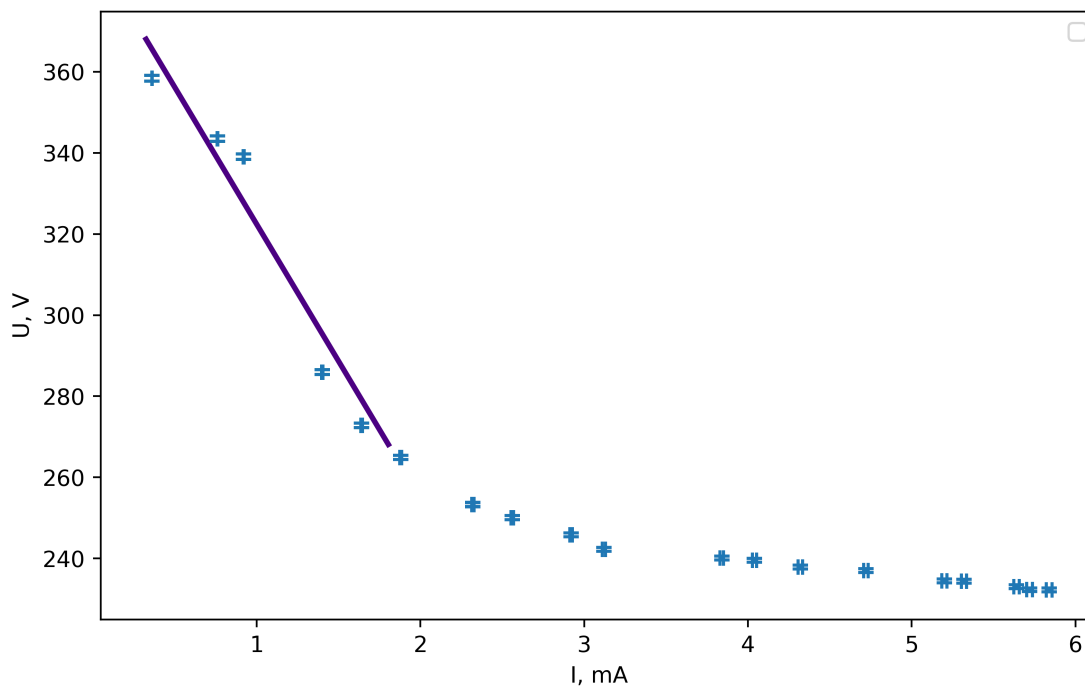


Рис. 3: Вольт-амперная характеристика разряда в неоне при давлении  $P \sim 2$  торр, температуре ионов  $T_i \approx 300$  К

## 5.2. Зондовые характеристики

Для определения характеристик плазмы в неоне при фиксированном токе разряда измерена вольт-амперная характеристика двойного зонда. (рис. 4). Для каждой зондовой характеристики определен 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).

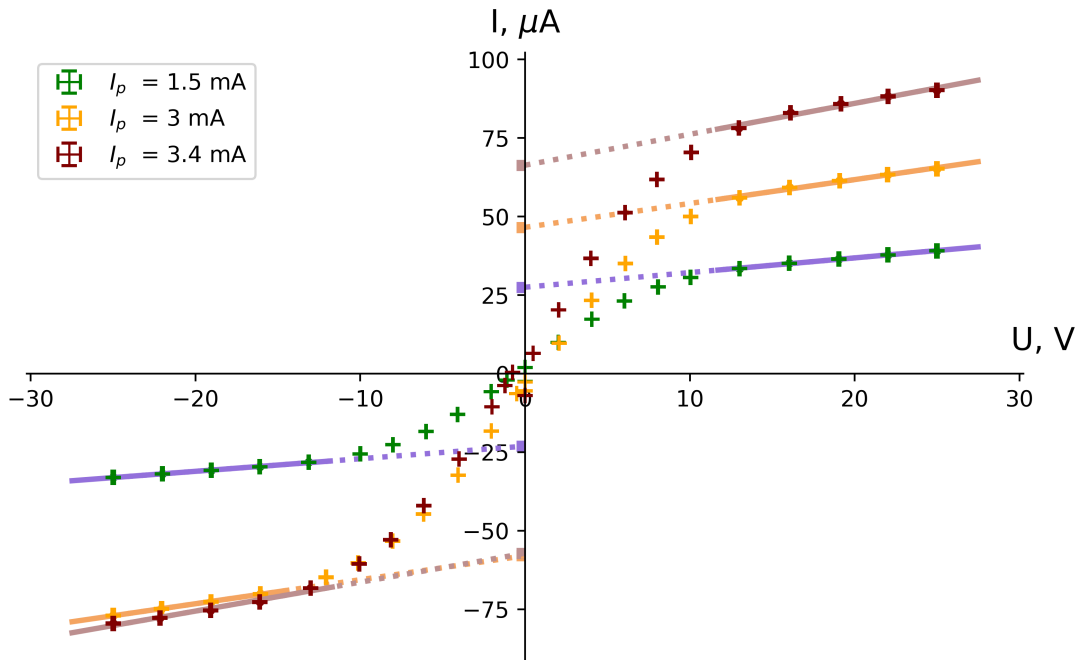


Рис. 4: Вольт-амперная характеристика двойного зонда при токах  $\sim 50 \mu A$ , давлении  $P \sim 2$  торр, температуре ионов  $T_i \approx 300$  К

Таблица 2: Характеристики плазмы в неоне при давлении  $P \sim 2$  торр, температуре ионов  $T_i \approx 300$  К для разных токов разряда  $I_p$

$I_p$ , мА	1.5	3	3.4
$T_e$ , эВ	$3.08 \pm 0.25$	$4.23 \pm 0.10$	$3.7 \pm 0.4$
$n_i, 10^{10} \text{ 1/см}^3$	$2.12 \pm 0.09$	$4.55 \pm 0.06$	$4.8 \pm 0.3$
$\omega_p, 10^9 \text{ рад/с}$	$8.21 \pm 0.17$	$12.03 \pm 0.08$	$12.4 \pm 0.4$
$r_{De}, 10^{-3} \text{ см}$	$9.0 \pm 0.8$	$7.17 \pm 0.20$	$6.5 \pm 0.7$
$r_D, 10^{-3} \text{ см}$	$0.82 \pm 0.03$	$0.561 \pm 0.075$	$0.54 \pm 0.03$
$N_D$	$49 \pm 6$	$34 \pm 1$	$33 \pm 6$
$\alpha, 10^{-5}$	$3.9 \pm 0.4$	$11.6 \pm 0.3$	$10.7 \pm 1.2$

## 6. Обсуждение результатов

1. При сравнении вольт-амперной характеристики разряда (рис. 3) и графика вольт-амперной характеристики газового разряда из [1] (рис. 6) видно, что рассматривался участок ГД, соответствующий поднормальному тлеющему разряду.

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.

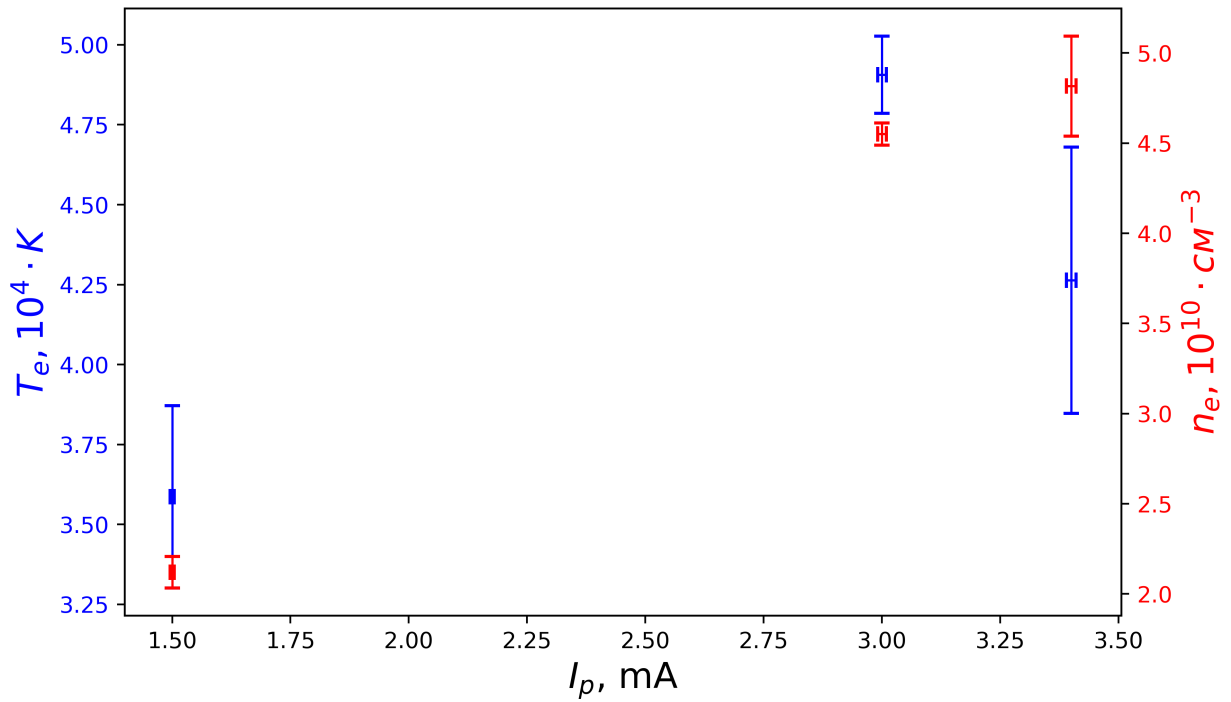


Рис. 5: Зависимость электронной температуры и концентрации электронов от тока разряда в плазме неона при давлении  $P \sim 2$  торр, температуре ионов  $T_i \approx 300$  К

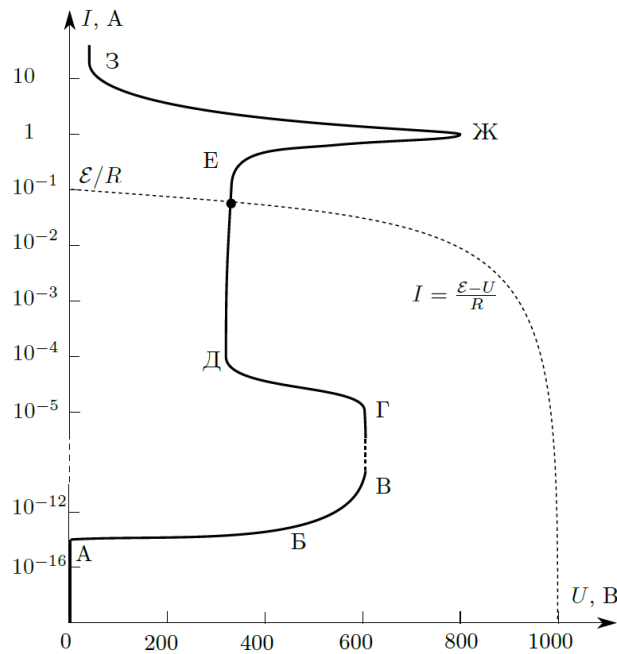


Рис. 6: Качественный вид вольт-амперной характеристики разряда в неоне при давлении  $P \sim 1$  торр (из [1])

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 вольт-амперной характеристики разряда получено, что исследовался тлеющий газовый разряд. Экспериментальная зондовая характеристика схожа с теоретической зависимостью:  $I = I_{\text{ин}} th \frac{eU}{2k_B T_e}$ , количество ионов в дебаевской сфере  $N_D \sim 40$  показывает идеальность плазмы. Остальные характеристики плазмы получились схожими с табличными значениями [1], что показало справедливость метода измерений. Однако не удалось оценить зависимость температуры электронов от тока разряда из-за неточных измерений и малого их числа.

## Список используемой литературы

- [1] Никулин М.Г., Попов П.В., Нозик А.А. и др. Лабораторный практикум по общей физике : учеб. пособие. В трех томах. Т. 2. Электричество и магнетизм