

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ОТЧЁТ  
О ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Изучение плазмы газового  
разряда в неоне

Работу выполнил,  
студент ФЭФМ группы Б04-107 \_\_\_\_\_ Луговцов Г.С.

Долгопрудный 2022

## Реферат

В работе изучаются состояние и свойства плазмы газового разряда в неоне. Для этого экспериментально находится вольт-амперная характеристика разряда, одиночного и двойного зондов. В результате были получены такие характеристики плазмы как электронная температура, концентрация электронов, ленгмюровская частота колебаний электронов, дебаевский радиус, среднее число ионов в дебаевской сфере и долю ионизованных атомов для различных значений тока разряда.

## Содержание

Введение . . . . .	4
1 Методика . . . . .	5
1.1 Описание установки . . . . .	5
1.2 Одиночный и двойной зонды . . . . .	6
2 Обсуждение результатов . . . . .	8
2.1 Исследование ВАХ разряда . . . . .	8
2.2 Исследование зондовых характеристик . . . . .	9
Заключение . . . . .	12
Список использованных источников . . . . .	13

## Введение

Как известно, вещество может находиться в трёх агрегатных состояниях – твёрдом, жидком и газообразном, которые последовательно сменяют друг друга при росте температуры. Если мы и дальше будем нагревать газ, то молекулы сначала диссоциируют на атомы, а затем и атомы распадутся на ионы и электроны. Такой газ называют ионизованным. Если степень ионизации газа оказывается достаточно велика, то поведение частиц приобретает коллективный характер и газ начинают называть плазмой. Такой газ начинает обладать качественно новыми свойствами, для описания которых вводятся такие параметры как 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.

# 1 Методика

## 1.1 Описание установки

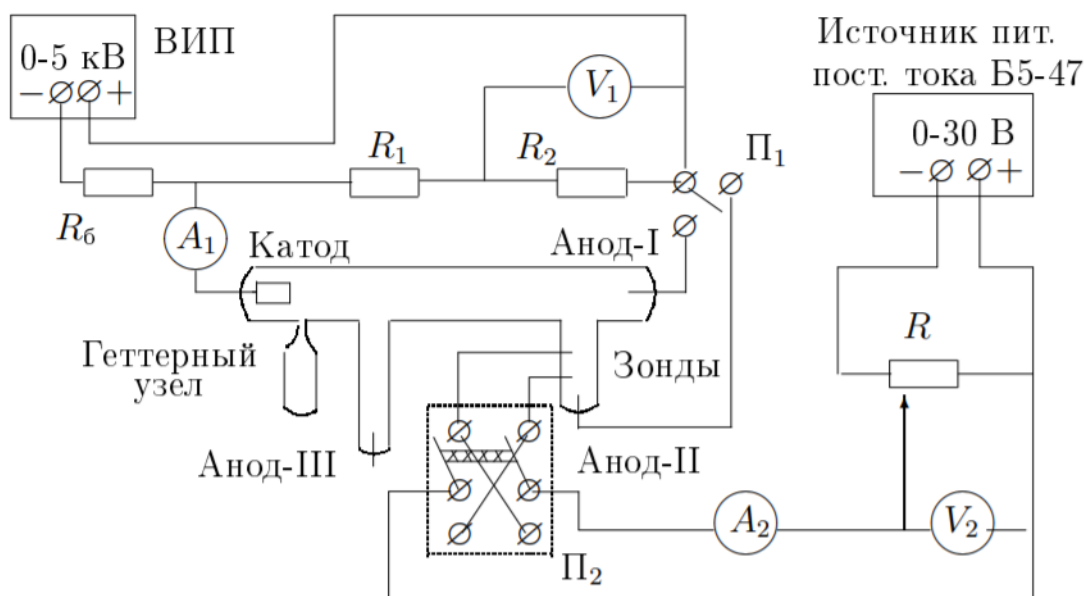


Рисунок 1.1 — Принципиальная схема установки. Установка состоит из высоковольтного источника питания (ВИП), стеклянной газоразрядной трубки, источника питания постоянного тока, вольтметров и амперметров.

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 торр. Катод и один из анодов (I и II) с помощью переключателя  $\Pi_1$  подключается через балластный резистор  $R_6$  к регулируемому высоковольтному источнику питания (ВИП).

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 делитель напряжения.

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 изго-

товлены из молибденовой проволоки. Они подключены к отдельному источнику питания 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  $A_2$ .

## 1.2 Одиночный и двойной зонды

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:

$$\begin{aligned} I_{e0} &= \frac{n\langle v_e \rangle}{4} eS, \\ I_{i0} &= \frac{n\langle v_i \rangle}{4} eS, \end{aligned} \quad (1.1)$$

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 (рис. ??).

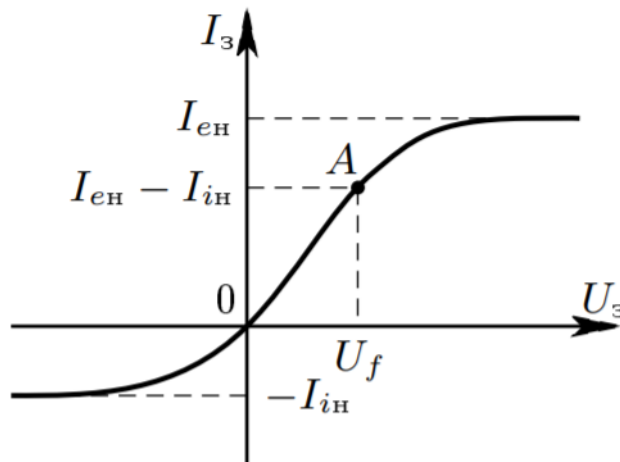


Рисунок 1.2 — Вольт-амперная характеристика одиночного зонда

Будем подавать потенциал  $U_з$  на зонд и снимать значение зондового тока  $I_з$ . Максимальное значение тока  $I_{eн}$  – электронный ток насыщения, а минимальное  $I_{иН}$  – ионный ток насыщения.

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.

Реальная зависимость описывается формулой

$$I = I_{iH} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e} + AU. \quad (1.2)$$

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:

$$kT_e = \frac{1}{2} \frac{eI_{iH}}{\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0}}. \quad (1.3)$$

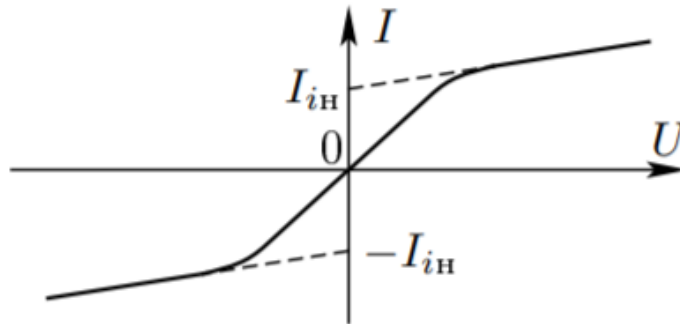


Рисунок 1.3 — Вольт-амперная характеристика двойного зонда

## 2 Обсуждение результатов

### 2.1 Исследование ВАХ разряда

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

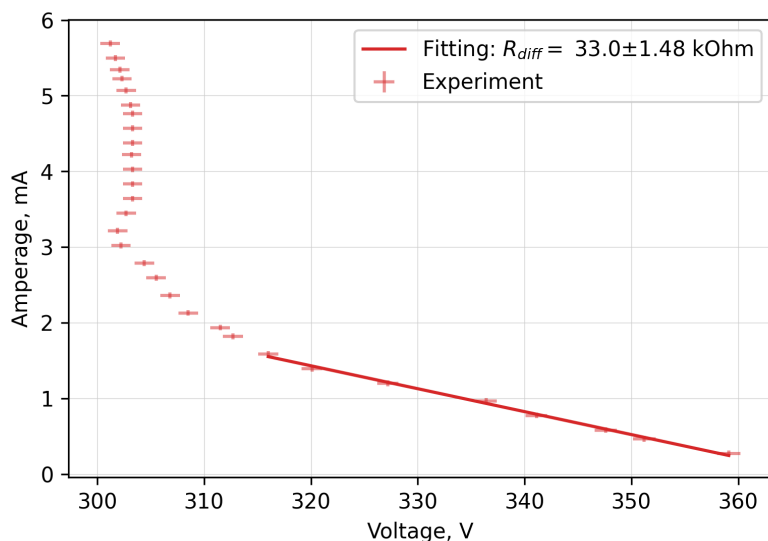


Рисунок 2.1 — ВАХ разряда

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

$$R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} = 33.0 \pm 1.5 \text{ кОм} \quad (2.1)$$

Сравнивая полученную кривую с рисунком 2.2 мы приходим к выводу, что состояние будет называться *поднормальным тлеющим зарядом* (участок ГД). Полное описание есть на стр. 283 практикума [1].



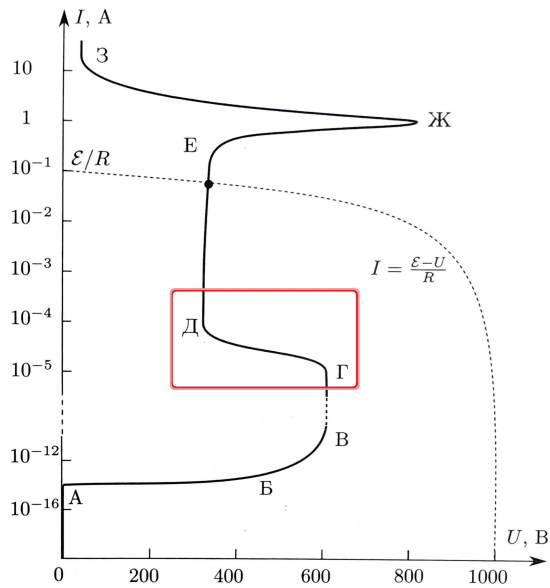


Рисунок 2.2 — Вольт-амперная характеристика разряда в неоне при давлении 1 торр. Пунктиром изображён пример нагрузочной прямой, соответствующей режиму нормального тлеющего разряда.

## 2.2 Исследование зондовых характеристик

Построим зондовые характеристики для разных токов и отцентрируем кривые:

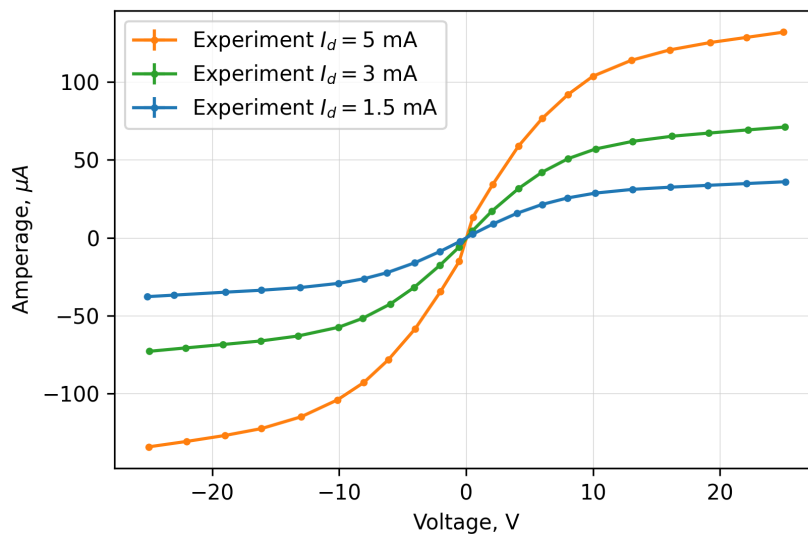


Рисунок 2.3 — ВАХ двойного зонда

Определим асимптоты:

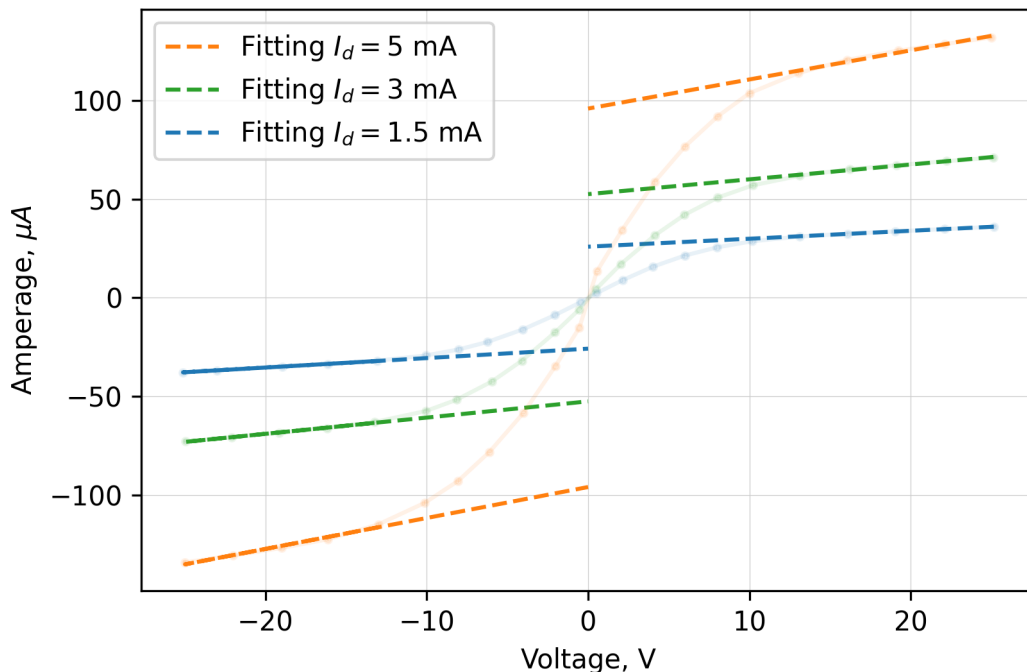


Рисунок 2.4 — Асимптоты ВАХ зондов

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

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

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

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

Используя полученные данные вычислим электронную температуру  $T_e$ , концентрацию электронов  $n_e$ , частоту собственных продольных колебаний пространственного заряда в однородной плазме в отсутствие магнитного поля – ленгмюровскую частоту колебаний электронов  $\omega_p$ , расстояние, на которое распространяется действие электрического поля отдельного заряда в квазинейтральной среде – дебаевский радиус  $r_D$ , среднее число ионов в дебаевской сфере  $N_D$  и долю ионизованных атомов  $\alpha$  для различных значений тока разряда:

$I_p$ , mA	$T_e$ , $10^5$ K	$n_e$ , $10^{16}$ m $^{-3}$	$\omega_p$ , $10^5$ рад/с	$r_D$ , $10^{-4}$ см	$N_D$	$\alpha$ , $10^{-7}$
5.0	$4.1 \pm 0.4$	$5.8 \pm 0.6$	$14.4 \pm 1.0$	$4.9 \pm 0.3$	30	24
3.0	$4.2 \pm 0.4$	$3.3 \pm 0.4$	$10.7 \pm 0.9$	$6.6 \pm 0.5$	40	13
1.5	$4.1 \pm 0.6$	$1.62 \pm 0.21$	$7.5 \pm 0.8$	$9.4 \pm 1.0$	57	7

Таблица 2.1 — Параметры плазмы для различных значений тока разряда  $I_p$ .

## Заключение

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

При исследовании зондовых характеристик удалось выяснить, что плазма идеальна (энергия кулоновского взаимодействия много меньше тепловой) и квазинейтральна (суммарный заряд в любом малом по сравнению с размерами системы объёме равен нулю).

Полученные в результате обработки экспериментальных данных характеристики плазмы позволяют достаточно точно описать её поведение не только в рамках эксперимента, но и в других исследовательских задачах, использующих плазму в подобных условиях.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. М.Г., Никулин. Лабораторный практикум по общей физике: учеб. пособие. В трёх томах. Т. 2. Электричество и магнетизм / Никулин М.Г., Попов П.В., Нозик А.А. — Москва: МФТИ, 2019. — 370 с.