

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3.5.1

Изучение плазмы газового разряда в неоне

выполнил студент группы Б02-103

Силаев Вадим

Долгопрудный, 2022 г.

Аннотация

В работе проводится исследование плазмы газового разряда: определение состояния разряда по его вольт-амперной характеристике, определение основных параметров плазмы, таких как температура и концентрация электронов, плазменная частота и дебаевский радиус. Параметры плазмы вычисляются из данных, полученных при измерении вольт-амперных характеристик с помощью двойного зонда. В работе присутствуют графики соответствующих характеристик, а также расчеты всех искомых значений, также сделаны выводы о состоянии газового разряда, квазинейтральности и идеальности плазмы.

Введение

Плазма — состояние ионизированного газа, при котором поведение содержащихся в нем заряженных частиц приобретает коллективный характер, но система при этом остается квазинейтральной. В этом состоянии газ приобретает ряд новых свойств и параметров, которые невозможно описать моделью газа с небольшой примесью заряженных частиц, что вынуждает использовать иную модель. В таком случае возникает проблема определения параметров плазмы, для решения которой разработана методика, позволяющая рассчитать их путем обработки данных вольт-амперных характеристик тлеющего разряда и двойного зонда, расположенного в сосуде с плазмой. Искомыми параметрами плазмы являются: температура и концентрация электронов, плазменная частота колебаний, электронная поляризационная длина и дебаевский радиус.

Схема установки

Схема установки для исследования плазмы газового разряда в неоне представлена на рис. 1. Стеклоянная газоразрядная трубка имеет холодный (не нагреваемый) полый катод, три анода и геттерный узел — стеклянный баллон, на внутреннюю поверхность которого напылена газопоглощающая плёнка (геттер). Трубка наполнена изотопом неона ^{22}Ne при давлении 2 мм рт. ст. Катод и один из анодов (I или II) с помощью переключателя Π_1 подключаются через балластный резистор R_6 (~ 500 кОм) к регулируемому высоковольтному источнику питания (ВИП) с выходным напряжением до нескольких киловольт.

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 , подключённым к трубке через высокоомный (несколько десятков МОм) делитель напряжения с коэффициентом $(R_1 + R_2) / R_2$.

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. Зонды изготовлены из молибденовой проволоки диаметром d и имеют длину l . Они подключены к источнику питания через потенциометр R . Переключатель Π_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 вольтметром V_2 . Для измерения зондового тока используется микроамперметр A_2 . Анод-III в работе не используется.^[1]

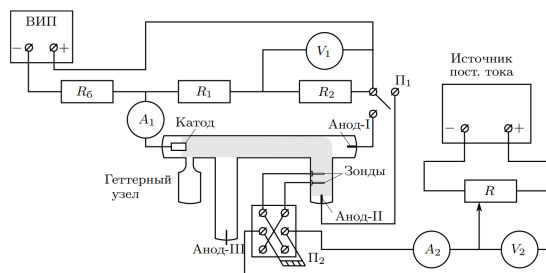


Рис. 1: Схема установки для исследования газового разряда

Практическая часть

Измерение вольт-амперной характеристики разряда

Для измерения ВАХ тлеющего разряда переводим переключатель Π_1 в положение "Анод-Г". Плавно увеличивая входное напряжение замечаем, что примерно при $U_{\text{заж}} = 217 \text{ В}$ плазма зажигается, при этом напряжение измеряемое вольтметром падает до 32 В.

После зажигания разряда проводим измерения ВАХ с помощью вольтметра V_1 и амперметра A_1 в обоих направлениях. При измерении в обратном направлении можно заметить, что разряд гаснет при напряжении меньшем чем $U_{\text{заж}}$.

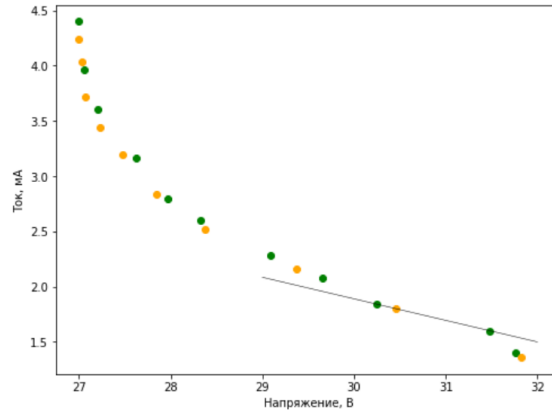


Рис. 2: ВАХ разряда

Зеленые точки — увеличение напряжения
Оранжевые точки — снижение напряжения

Измерение зондовых характеристик

Для измерения зондовых характеристик мы переводим переключатель Π_1 в положение "Анод-II". Плавно увеличиваем напряжение до возникновения разряда и устанавливаем нужный нам ток разряда $I_p = 5 \text{ мА}$, далее с помощью потенциометра устанавливаем максимально возможное напряжение на зонде и начинаем измерять ВАХ двойного зонда.

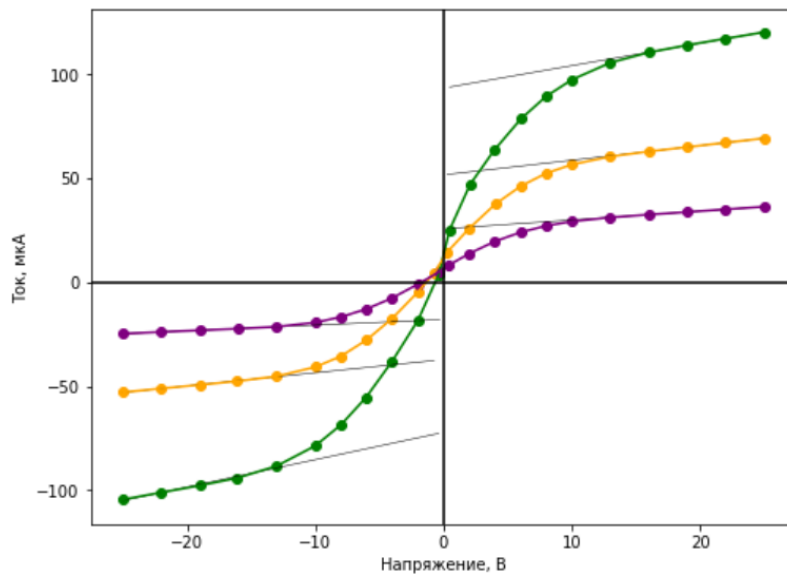


Рис. 3: Зондовые характеристики

Зеленая кривая — $I_p = 5 \text{ мА}$
Оранжевая кривая — $I_p = 3 \text{ мА}$
Фиолетовая кривая — $I_p = 1,5 \text{ мА}$

Обработка данных

Анализируя форму ВАХ разряда (см. рис. 2), можем сделать вывод, что наблюдаются нормальный и поднормальный тлеющий разряд. Максимальное дифференциальное сопротивление с учетом делителя напряжений (в 10 раз) составляет $R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} = 51 \text{ кОм}$.

По зондовым характеристикам (см. рис. 3) определим токи насыщения и наклоны характеристик в начале координат. Используя полученные данные можем рассчитать температуру электронов:

$$k_B T_e = \frac{e I_{\text{ин}}}{2k_0}, \quad (1)$$

где e — заряд электрона, k_B — постоянная Больцмана.

Также можем вычислить концентрацию электронов:

$$n_e = n_i = \frac{I_{\text{ин}}}{0,4eS} \sqrt{\frac{m_i}{2k_B T_e}} = \frac{I_{\text{ин}}}{0,4e\pi dl} \sqrt{\frac{m_i}{2k_B T_e}}, \quad (2)$$

где n_i — концентрация ионов, m_i — масса ионов ^{22}Ne , S — площадь зонда, d — диаметр зонда, l — длина зонда.^[1]

Остальные параметры плазмы также вычисляем по формулам.

Плазменная частота:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}}, \quad (3)$$

где m_e — масса электрона.

Электронная поляризационная длина:

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

Дебаевский радиус экранирования (при $T_i \ll T_e$):

$$r_D = \sqrt{\frac{k_B T_i}{4\pi n_e e^2}}, \quad (5)$$

где $T_i \approx 300 \text{ К}$ — температура ионов.^[2]

Количество ионов в дебаевской сфере:

$$N_D = \frac{4}{3} \pi n_i r_D^3 \quad (6)$$

Расчитанные значения:

I_p , мА	$I_{\text{ин}}$, мкА	k_0 , мкА/В	T_e , 10^3 К	n_e , 10^{15} м^{-3}
5	83 ± 2	$15,5 \pm 2,0$	31 ± 5	14 ± 2
3	44 ± 1	$8,7 \pm 1,3$	29 ± 4	8 ± 1
1,5	22 ± 1	$4,4 \pm 0,8$	29 ± 3	$4,0 \pm 0,7$

I_p , мА	ω_p , 10^3 рад/с	r_{De} , 10^{-6} м	r_D , 10^{-7} м	N_D
5	70 ± 6	97 ± 9	97 ± 9	53
3	53 ± 5	124 ± 11	124 ± 11	64
1,5	38 ± 4	176 ± 16	176 ± 16	91

Выводы

В ходе работы получены следующие результаты:

- На ВАХ разряда получен характерный изгиб, отвечающий переходу газового разряда между нормальным и поднормальным участками тлеющего разряда
- Плазму в эксперименте можем считать квазинейтральной, так как характерные размеры областей рассмотрения плазмы значительно больше её дебаевского радиуса
- Среднее число ионов в дебаевской сфере $N_D \gg 1$, поэтому плазму можно считать идеальной
- Полученные в эксперименте данные описывают плазму согласно теории, из чего делаем вывод о нахождении удачной методики измерений и теоретической модели

Список литературы

1. Лабораторный практикум по общей физике. В 3 томах. Том 2. Электричество и магнетизм: учебное пособие под ред. А. В. Максимищева, М. Г. Никулина, 2019. — 370 с.
2. Д.В. Сивухин. Общий курс физики. В 5-ти томах. Том 3. Электричество М.: Наука, 1977. — 704 с.