

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 проведено исследование плазмы газового разряда в ^{22}Ne при давлении 2 мм рт. ст.: определён тип газового разряда по его вольт-амперной характеристике, а также основные параметры плазмы, такие как температура и концентрация электронов, плазменная частота и дебаевский радиус. Для вычисления искомым характеристик была использована схема измерения вольт-амперной характеристики плазмы с помощью двойного зонда. Полученные результаты позволили заявить о поднормальном типе газового разряда, а также квазинейтральности и идеальности исследуемой 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. Тем не менее, плазма широко используется, например, в медицине, биотехнологии, производстве электроники. В таком случае возникает проблема определения параметров плазмы, важных для осуществления прикладных задач, 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.

Методика

Для исследования типа газового разряда логично измерить его вольт-амперную характеристику (далее ВАХ) и сравнить полученный участок с известной зависимостью, указанной в источнике 1.

Так как плазма обладает качественно новым свойством относительно обычного газа — проводимостью, использованные в работе методы основаны именно на исследовании её электрических свойств, которые описаны ниже (подробнее с теоретическим выводом этих свойств можно ознакомиться в источнике 2):

- электроны плазмы колеблются с (плазменной) частотой равной $\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}}$, где n_e — концентрация электронов, e — элементарный заряд, m_e — масса электрона
- амплитуда колебаний (электронная поляризационная длина) $r_{De} = \sqrt{\frac{k_B T_e}{4\pi n_e e^2}}$, где k_B — постоянная Больцмана, T_e — температура электронов.
- при температуре ионов $T_i \ll T_e$ они экранируются электронами, поэтому $r_D = \sqrt{\frac{k_B T_i}{4\pi n_e e^2}}$ (Дебаевский радиус экранирования)
- количество электронов в сфере с Дебаевским радиусом $N_D = \frac{4}{3}\pi n_i r_D^3$, где n_i — концентрация ионов, причем если $N_D \gg 1$, то это говорит об идеальности

Таким образом, используемая методика будет основана на измерении электрических характеристик плазмы. В работе использована схема измерения ВАХ плазмы с помощью двойного зонда. При таком методе измерения теоретическая зависимость будет иметь вид:

$$I = I_{in} \tanh \frac{eU}{2k_B T_e} + AU,$$

где U и I — измеряемые напряжение и ток, I_{in} — ионный ток насыщения (максимальное значение ионной составляющей тока через одиночный зонд), A — константа определенная неидеальностью системы.

Ввиду сложности аппроксимации реальной зависимости, используется приближенная форма (аргумент гиперболического тангенса считается малым, значение A также считается малым), которая даёт возможность получить приближенные искомые значения, исходя из наклона графика ВАХ в начале координат (k_0):

$$k_B T_e = \frac{e I_{in}}{2k_0}$$

Схема установки

Для проведения измерений для плазмы газового разряда в ^{22}Ne при давлении 2 мм рт. ст. по методике описанной выше используется схема установки представленная на рис. 1. Стеклообразная 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]

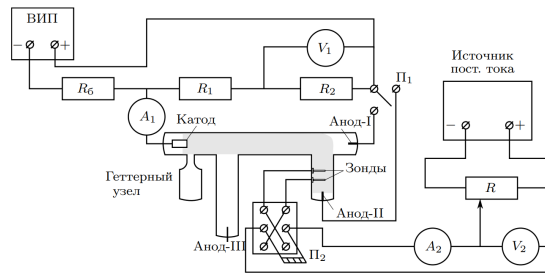


Рис. 1: Схема установки для исследования газового разряда

Результаты и их обсуждение

Измерение вольт-амперной характеристики разряда

Для начала были проведены измерения ВАХ газового разряда с целью определения его типа.

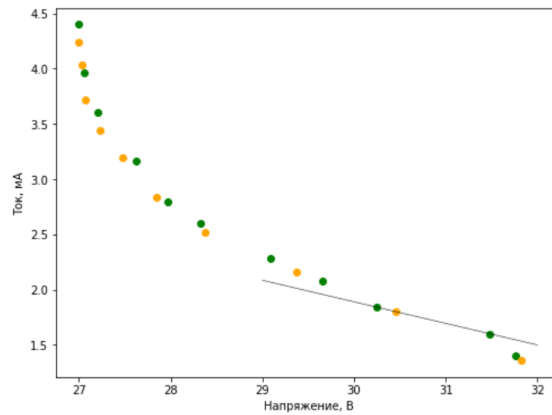


Рис. 2: Вольт-амперная характеристика разряда
Зеленые точки — увеличение напряжения
Оранжевые точки — снижение напряжения

На графике (рис. 2) виден участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением, что (согласно зависимости из источника 1) говорит о состоянии разряда между нормальным и поднормальным участками.

Измерение зондовых характеристик

После определения типа газового разряда были проведены измерения зондовых характеристик плазмы при различных токах разряда, что позволило вычислить искомые параметры.

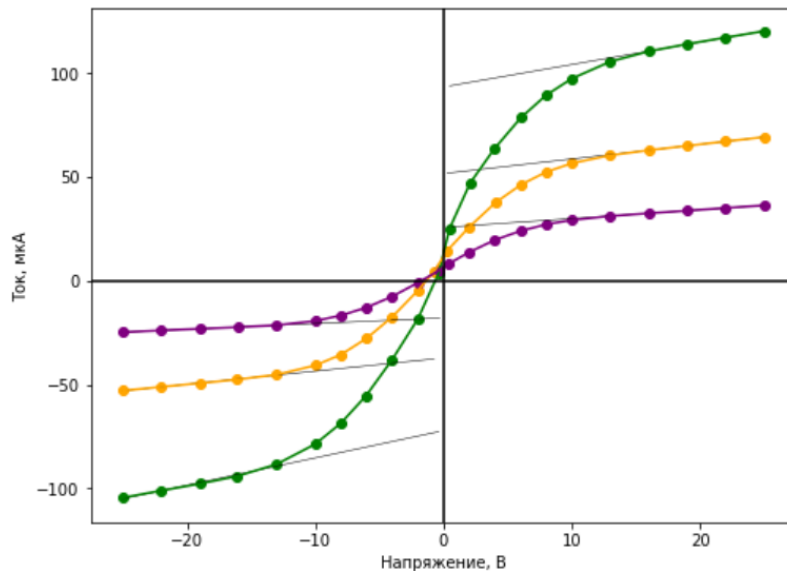


Рис. 3: Зондовые характеристики
Зеленая кривая — $I_p = 5 \text{ мА}$
Оранжевая кривая — $I_p = 3 \text{ мА}$
Фиолетовая кривая — $I_p = 1,5 \text{ мА}$

По зондовым характеристикам (см. рис. 3) определим токи насыщения и наклоны характеристик в начале координат. Используя формулы из методики получаем значения характеристик плазмы:

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

Малый по сравнению с характерными размерами установки Дебаевский радиус позволил заявить о квазинейтральности плазмы, а большое число ионов в Дебаевской сфере о её идеальности. Также после анализа полученных значений погрешностей, сделан вывод о неточности методики из-за большого вклада в погрешность определения коэффициента наклона графика зондовой характеристики в нуле.

Выводы

На ВАХ разряда получен характерный изгиб, отвечающий переходу газового разряда между нормальным и поднормальным участками тлеющего разряда. Также плазму в эксперименте можем считать квазинейтральной, так как характерные размеры областей рассмотрения плазмы значительно больше её дебаевского радиуса, а среднее число ионов в дебаевской сфере $N_D \gg 1$, поэтому плазму можно считать ещё и идеальной. Однако определение коэффициента наклона в начале координат вносит большой вклад в погрешность эксперимента, чего можно избежать путём построения зависимости по большему количеству точек снятых при помощи автоматизированной установки и использования точной формулы для зависимости тока от напряжения.

Список литературы

1. Лабораторный практикум по общей физике. В 3 томах. Том 2. Электричество и магнетизм: учебное пособие под ред. А. В. Максимычева, 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.