

3.5.1 (4.16) ИЗУЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА В НЕОНЕ

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ

11 августа 2021 г.

В работе используются: стеклянная газоразрядная трубка, наполненная неоном, высоковольтный источник питания, источник питания постоянного тока, делитель напряжения, резистор, потенциометр, амперметры, вольтметры, переключатели.

Экспериментальная установка. Схема установки для исследования плазмы газового разряда в неоне представлена на рис. 1. Стеклянная газоразрядная трубка имеет холодный (ненагреваемый) 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 (~ 450 кОм) к регулируемому высоковольтному источнику питания (ВИП) с выходным напряжением до 5 кВ.

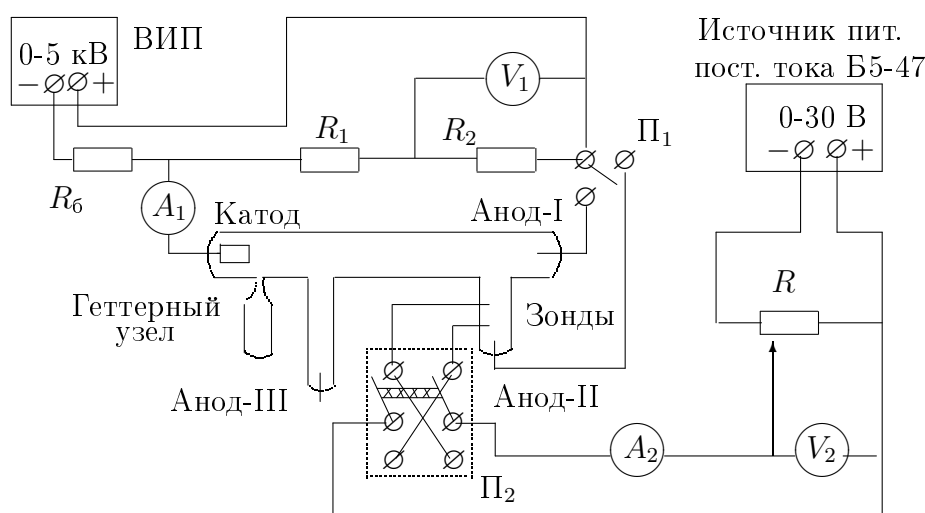


Рис. 1. Схема установки для исследования газового разряда

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 (мультиметром GDM), подключённым к трубке через высокоомный (25 МОм) делитель напряжения с коэффициентом $(R_1 + R_2)/R_2 = 10$.

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 $d = 0,2$ мм и имеют длину $l = 5,2$ мм. Они подключены к источнику питания GPS 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 цифровым вольтметром V_2 (GDM). Для измерения зондового тока используется мультиметр A_2 (GDM). Анод-III в нашей работе не используется.

ЗАДАНИЕ

В работе предлагается снять вольт-амперную характеристику тлеющего разряда и зондовые характеристики при разных токах разряда и по результатам измерений рассчитать концентрацию и температуру электронов в плазме, плазменную частоту, поляризационную длину, дебаевский радиус экранирования и степень ионизации.

I. Вольт-амперная характеристика разряда

1. Подготовьте приборы к работе:

установите переключатель Π_1 в положение «Анод-I»;
ручку регулировки выходного напряжения ВИП поставьте в крайнее левое положение, соответствующее нулевому выходному напряжению, и включите ВИП в сеть. Познакомьтесь с правилами работы с мультиметром (см. ТО в папке).

Подготовьте к работе мультиметр V_1 :

включите прибор в сеть; выберите режим работы — измерение постоянного напряжения (кнопка «DCV» нажата),
автоматический режим (кнопка «AUTO/MEN» нажата), при этом внизу на табло надпись — «AUTO, DC», справа — единицы измерения (V);
кнопкой \blacktriangle установите предел 1000 В (на табло — 000.xx).

Плавнo увеличивая выходное напряжение ВИП, определите напряжение зажигания разряда $U_{\text{зж}}$ (показания вольтметра V_1 непосредственно перед зажиганием).

2. С помощью вольтметра V_1 и амперметра A_1 снимите вольт-амперную характеристику разряда $I_p(U_p)$. Ток разряда I_p изменяйте в диапазоне от 0,5 мА до $\simeq 5$ мА (при бoльших токах может сгореть сопротивление).

Проведите измерения как при нарастании, так и при убывании тока. Обратите внимание, что потенциал гашения разряда меньше потенциала зажигания.

II. Зондовые характеристики

3. Уменьшите напряжение ВИП до нуля и переведите переключатель Π_1 в положение «Анод-II», переключатель Π_2 — в положение «+».

Подготовьте к работе мультиметры A_2 и V_2 : включите приборы в сеть;

на A_2 установите автоматический режим измерения постоянного тока (кнопки «DCA» и «AUTO/MEN»), единицы измерения — мкА;

на V_2 установите автоматический режим измерения напряжения (кнопки «DCV» и «AUTO/MEN»), единицы измерения — вольты.

4. Плавнo увеличивайте напряжение ВИП до возникновения разряда и установите разрядный ток $I_p \simeq 5$ мА.

Включите в сеть источник питания GPS, нажмите кнопку «OUTPUT»,
установите произвольный ток (ручкой «CURRENT»),
затем — напряжение $U_2 \simeq 25$ В (ручкой «VOLTAGE»).

При помощи потенциометра R установите на зонде максимальное напряжение $U_2 \simeq 25$ В.

5. С помощью мультиметров A_2 и V_2 снимите вольт-амперную характеристику двойного зонда $I_3(U_3)$ (в диапазоне от +25 до -25 В) при фиксированном токе разряда

I_p : уменьшая напряжение с помощью потенциометра R шагами по 3 В в интервале от 25 до 10 В, шагами по 2 В в интервале от 10 В до минимального $U_2 (\simeq 0,5 \text{ В})$; если при малых токах не удаётся плавно регулировать напряжение с помощью реостата R , можно уменьшить напряжение источника GPS до 10 В.

Чтобы снять участок кривой при отрицательных напряжениях (см. рис. 5.2 Введения), следует при нулевом токе через зонд поменять полярность подключения зондов (переключатель Π_2).

В процессе измерений необходимо поддерживать постоянной величину тока разряда I_p в трубке (5 мА).

Записывая результаты в таблицу, ОДНОВРЕМЕННО стройте приближённый график $I_3(U_3)$ в тетради в интервале от +25 до -25 В. Отцентрируйте кривую: проведите ось абсцисс на уровне $I = \Sigma \Delta I / 2$, восстановите ось ординат из точки пересечения кривой с новой осью абсцисс. Убедитесь, что можно провести асимптоты к участкам кривой при больших напряжениях. Если точек мало — проведите дополнительные измерения.

6. Снимите зондовые характеристики при токах разряда, равных 3 и 1,5 мА.
7. Переведите ручки регулировки источников питания к минимальным значениям и отключите приборы. Запишите параметры зондов d и l (см. описание экспериментальной установки в папке).

III. Обработка результатов

8. Постройте вольт-амперную характеристику разряда в координатах $I_p(U_p)$.

По наклону кривой определите максимальное дифференциальное сопротивление разряда $R_{\text{диф}} \text{ Ом} = dU/dI$.

Сравните график с рисунком 6 Приложения к разделу V. Какому участку ВАХ газового разряда соответствует полученный в работе график?

9. Постройте зондовые характеристики для разных токов разряда на отдельных листах, отцентрируйте кривые и используйте их для определения температуры электронов T_e по формуле (5.26):

$$kT_e = \frac{1}{2} \frac{eI_{\text{ин}}}{\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0}}.$$

Ток $I_{\text{ин}}$ (см. рис. 5.8) найдите из пересечения асимптоты к току насыщения с осью $U = 0$ (точка 1);

$(dI/dU)_{U=0}$ — наклон характеристики $I = f(U)$ в начале координат (проведите касательную);

проведите горизонталь из точки 1 ($I_{\text{ин}}$) до пересечения с касательной (точка 2);

определите ΔU в вольтах между точками 1 и 2 и энергию («температуру») электронов kT_e в электрон-вольтах: $kT_e = (\Delta U/2) \text{ эВ}$.

Рассчитайте температуру электронов в кельвинах (энергии 1 эВ соответствует температура $T \simeq 11800^\circ\text{K}$).

10. Постройте семейство отцентрированных зондовых характеристик $I_3(U_3)$ на одном листе.

11. Полагая концентрацию электронов n_e равной концентрации ионов n_i , определите её, используя формулу Бома (5.22):

$$I_{\text{и}} = 0,4n_e e S \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}. \quad [\text{СИ}]$$

Здесь $S = \pi \cdot d \cdot l$ — площадь поверхности зонда;

$m_i = 22 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг — масса иона неона.

12. Рассчитайте плазменную частоту колебаний электронов по формуле (5.1):

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} = 5,6 \cdot 10^4 \sqrt{n_e} \frac{\text{рад}}{\text{сек}}. \quad [\text{СГС}]$$

Какие частоты пройдут через такую плазму при падении на неё э-м излучения?

Рассчитайте электронную поляризационную длину r_{De} по формуле (5.9):

$$r_{De} = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e e^2}} \text{ см.}$$

Рассчитайте дебаевский радиус экранирования r_D , используя формулу (5.10), где $T_e \gg T_i$, а температура ионов равна комнатной ($T_i \simeq 300^\circ\text{K}$):

$$r_D = \sqrt{\frac{kT_i}{4\pi n_e e^2}} \text{ см.}$$

Можно ли считать плазму квазинейтральной¹?

13. Оцените среднее число ионов в дебаевской сфере:

$$N_D = \frac{4}{3}\pi r_D^3 n_i. \quad (5.13)$$

Является ли плазма идеальной²?

14. Оцените степень ионизации плазмы (долю ионизованных атомов α), если давление в трубке $P \simeq 2$ торр (2 мм рт. ст.): $\alpha = n_i/n$, где n — общее число частиц в единице объёма ($P = nkT_i$).

При нормальных условиях ($P = 1$ атм = 760 мм рт.ст., $T = 0^\circ\text{C}$)

$n = N_D$ — число Лошмидта.

15. Постройте графики зависимостей электронной температуры и концентрации электронов от тока разряда: $T_e(I_p)$, $n_e(I_p)$. Проанализируйте и попытайтесь объяснить полученные зависимости.

16. Оцените погрешности и сведите результаты расчётов в таблицу.

$R_{\text{диф}}$ Ом	I_p мА	kT_e эВ	n_e см ⁻³	ω_p рад/сек	r_{De} см	r_D см	$\langle N_D \rangle$	α

Исправлено 11-VIII-2021 г.

¹ Плазма квазинейтральна, если её линейные размеры \gg поляризационной длины r_{De} .

² Плазму можно рассматривать как идеальный газ, если число Дебая $N_D \gg 1$ (см. 5.12).