

В работе используются: стеклянная газоразрядная трубка, наполненная изотопом неона, высоковольтный источник питания (ВИП), 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 (ненакаливаемый) 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-ти кВ.

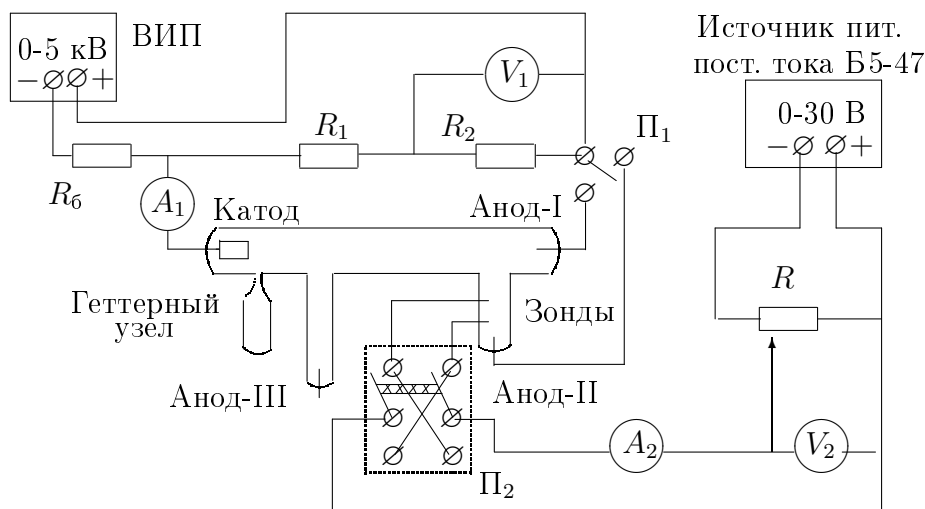


Рис. 1. Схема установки для исследования газового разряда

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, степень ионизации, плазменную частоту и дебаевский радиус экранирования.

I. Вольт-амперная характеристика (23-VII-18)

а) 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 конце папки). 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).

б) Плавно увеличивая выходное напряжение ВИП, определите напряжение зажигания разряда (показания вольтметра V_1 перед зажиганием).

в) С помощью вольтметра V_1 и амперметра A_1 снимите вольт-амперную характеристику разряда $U_1 = f(I_p)$. Ток разряда I_p изменяйте в диапазоне от 0,5 мА до $\simeq 5$ мА (при больших токах может сгореть сопротивление).

II. Зондовые характеристики

а) 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.

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 $U_2 \simeq 25$.

б) Снимите вольт-амперную характеристику двойного зонда $I_2 = f(U_2)$ (в диапазоне от +25 до -25 В) при фиксированном токе 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 $U_2 (\simeq 0,5$ В); если при малых токах не удаётся плавно регулировать напряжение с помощью реостата R , можно уменьшить напряжение источника GPS до 10 В.

В процессе измерения зондовой характеристики необходимо менять полярность подключения зондов (Π_2) (при нулевом токе), а также поддерживать постоянной величину тока разряда I_p в трубке (5 мА).

Записывая результаты в таблицу, ОДНОВРЕМЕННО стройте приближённый график $I = f(U)$ 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.

в) Снимите зондовые характеристики при токах разряда, равных 3 и 1,5 мА.

III. Обработка результатов

1. Постройте вольт-амперную характеристику разряда $U_1 = f(I_p)$. По наклону кривой определите максимальное дифференциальное сопротивление разряда R_{max} Ом.
2. Постройте зондовые характеристики для разных токов разряда на отдельных листах, отцентрируйте кривые и используйте их для определения температуры электронов по формуле (5.43) Введения к теме:

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

Ток $I_{ин}$ найдите из пересечения асимптоты к току насыщения с осью $U = 0$ (точка 1); $(dI/dU)_{u=0}$ — наклон характеристики $I = f(U)$ в точке $U = 0, I = 0$ (проведите касательную);

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

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

Рассчитайте температуру T , соответствующую энергии 1 эВ (полезно помнить). Какова температура электронов?

3. Постройте семейство отцентрированных зондовых характеристик $I = f(U)$ на одном листе.
4. Полагая концентрацию электронов n_e равной концентрации ионов n_i , определите её, используя формулу Бома (5.31):

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

Здесь $S = \pi \cdot d \cdot l$ — площадь поверхности зонда; значения d и l приведены в описании экспериментальной установки; $m_i = 22 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг — масса иона неона.

5. Постройте графики $T_e = f(I_p)$, $n_e = f(I_p)$.
6. Рассчитайте плазменную частоту колебаний электронов по формуле (5.16):

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} = 5,6 \cdot 10^4 \sqrt{n_e \text{ см}^{-3}} \text{ рад/сек.}$$

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

7. Рассчитайте дебаевский радиус r_D , используя формулу (5.18), где $T_e \gg T_i$, а температура ионов равна комнатной ($T_i \simeq 300$ К):

$$r_D = \sqrt{\frac{kT_i}{4\pi n_i e^2}} \text{ см.} \quad [\text{СГС}]$$

8. Убедитесь, что среднее число ионов в дебаевской сфере $N_D \gg 1$:

$$N_D = n_i \frac{4}{3} \pi r_D^3.$$

9. Оцените степень ионизации плазмы (долю ионизованных атомов α), если давление в трубке $P \simeq 1$ мбар, а температура равна комнатной:

$$\alpha = \frac{n_i}{n},$$

где n — общее число частиц в единице объёма ($P = nkT$).

При нормальных условиях $n = N_L$ — число Лошмидта.

10. Сведите результаты расчётов в таблицу и оцените погрешности.

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

Исправлено 23-VII-2018 г.