

**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  $^{22}\text{Ne}$  при давлении 2 мм рт. ст. Катод и один из анодов (I или II) с помощью переключателя  $\Pi_1$  подключаются через балластный резистор  $R_6$  ( $\approx 450$  кОм) к регулируемому высоковольтному источнику питания (ВИП) с выходным напряжением до 5-ти кВ.

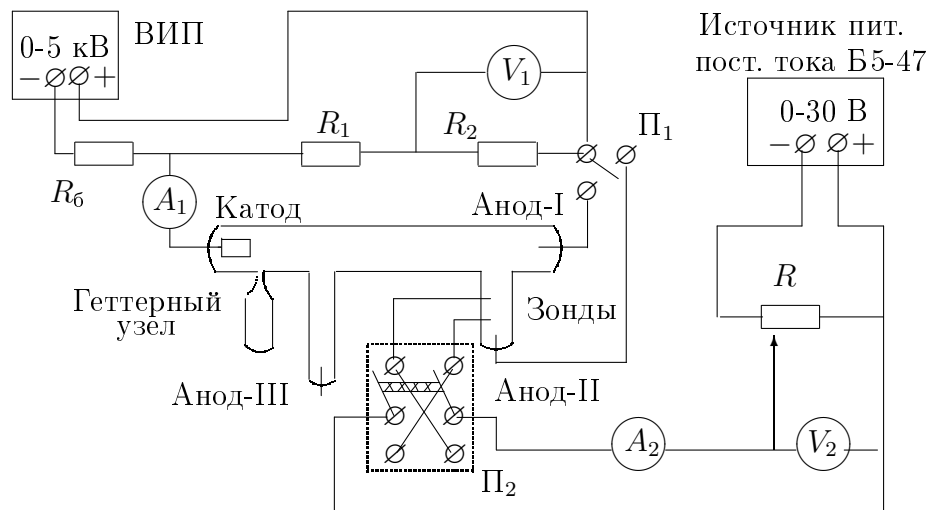


Рис. 1. Схема установки для исследования газового разряда

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  $\Pi_2$  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  $V_2$  (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  $\Pi_1$  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  $\Pi_1$  в положение «Анод-II», переключатель  $\Pi_2$  — 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  $U_2 (\simeq 0,5 \text{ В})$ ; 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 ( $\Pi_2$ ) (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:

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

Ток  $I_{in}$  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 ( $I_{in}$ ) до пересечения с касательной (точка 2);

определите  $\Delta U$  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):

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

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 ( $T_i \simeq 300$  K):

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

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  $\alpha$ ), 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	$n_e \text{ см}^{-3}$	$\omega_p$ рад/сек	$r_D$ см	$\langle N_D \rangle$	$\alpha$

Исправлено 23-VII-2018 г.