

**Отчет о выполнении лабораторной
работы 3.5.1 "Изучение плазмы
газового разряда в неоне"**

Алпатова Александра, Калашников Михаил, Б03-205

Цель работы: Изучение ВАХ тлеющего разряда; свойств плазмы методом зондовых характеристик.

В работе используются:

- стеклянная газоразрядная трубка, наполненная неоном;
- высоковольтный источник питания;
- источник питания постоянного тока;
- делитель напряжения;
- резистор;
- потенциометр;
- амперметры;
- вольтметры;
- переключатели.

Теоретическая справка

Двойным зондом называется система, состоящая из двух одинаковых зондов, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга. Между зондами создаётся разность потенциалов U , которая по величине много меньше плавающего потенциала: $|U| \ll |U_f|$. При этом оба зонда имеют относительно плазмы близкий к плавающему отрицательный потенциал, т.е. находятся на *ионной* ветви вольт-амперной характеристики.

При отсутствии разности потенциалов ток между зондами равен нулю. Рассчитаем величину тока, проходящего через двойной зонд вблизи точки $I = 0$. При небольших разностях потенциалов ионные токи на оба зонда равны ионному току насыщения и компенсируют друг друга. Величина результирующего тока целиком связана с различием в электронных токах. Пусть потенциал на первом зонде равен

$$U_1 = U_f + \Delta U_1,$$

а на втором

$$U_2 = U_f + \Delta U_2.$$

Предполагается, что $\Delta U_1, \Delta U_2 \ll U_f$. Напряжение U между зондами равно

$$U = U_2 - U_1 = \Delta U_2 - \Delta U_1.$$

Найдём ток, приходящий на первый электрод:

$$I_1 = I_{\text{и}} - I_{e0} \exp\left\{\left(\frac{eU_1}{k_{\text{Б}}T_e}\right)\right\} = I_{\text{и}} - \left[I_{e0} \exp\left\{\left(\frac{eU_f}{k_{\text{Б}}T_e}\right)\right\}\right] \exp\left\{\left(\frac{e\Delta U_1}{k_{\text{Б}}T_e}\right)\right\}.$$

Заметим, что при $\Delta U_1 = 0$ (при $U_1 = U_f$) электронный и ионный ток компенсируют друг друга. Это означает, что заключённый в квадратные скобки множитель равен I_{in} . Имеем поэтому

$$I_1 = I_{in} \left[1 - \exp \left\{ \left(\frac{e\Delta U_1}{k_B T_e} \right) \right\} \right].$$

Аналогично для второго электрода

$$I_2 = I_{in} \left[1 - \exp \left\{ \left(\frac{e\Delta U_2}{k_B T_e} \right) \right\} \right].$$

Заметим, что зонды 1 и 2 соединены *последовательно* – через плазму – поэтому $I_1 = -I_2 = I$. Выразим ΔU_1 и ΔU_2 из уравнений выше:

$$\Delta U_1 = \frac{k_B T_e}{e} \ln \left(1 - \frac{I}{I_{in}} \right), \quad \Delta U_2 = \frac{k_B T_e}{e} \ln \left(1 + \frac{I}{I_{in}} \right).$$

Наконец, вычитая второе равенство из первого, найдём

$$U = \Delta U_1 - \Delta U_2 = \frac{k_B T_e}{e} \ln \left(\frac{I_{in} - I}{I_{in} + I} \right),$$

и, разрешая это равенство относительно I , получим

$$I = I_{in} \operatorname{th} \frac{eU}{2k_B T_e}.$$

Эту формулу можно использовать для определения температуры электронов по форме вольт-амперной характеристики двойного зонда.

Наблюдаемая на опыте зависимость тока от напряжения изображена на рисунке 1. Заметим, что эта кривая отличается от теоретической существованием наклона у асимптот в области больших $|U|$, что связано с ускорением частиц плазмы приложенным полем, которое не учтено при выводе теоретической зависимости.

Графики типа 1 проще всего обрабатывать следующим образом. Сначала находится ток насыщения I_{in} из пересечения асимптот с осью $U = 0$. Затем находится наклон графика в начале координат, из которого можно определить температуру электронов T_e . Дифференцируя формулу для I по U в точке $U = 0$ и принимая во внимание, что при малых аргументах $\operatorname{th} x \approx x$, найдём

$$k_B T_e = \frac{1}{2} \frac{e I_{in}}{\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0}},$$

где $\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0}$ – наклон характеристики зонда вблизи начала координат. По известным T_e и I_{in} можно найти концентрацию заряженных частиц $n_i = n_e$.

Таким образом, двойные зонды удобно применять для измерения электронной температуры и концентрации частиц в плазме.

Экспериментальная установка

Схема установки для исследования плазмы газового разряда в неоне представлена на рисунке 2. Стеклообразная газоразрядная трубка имеет холодный

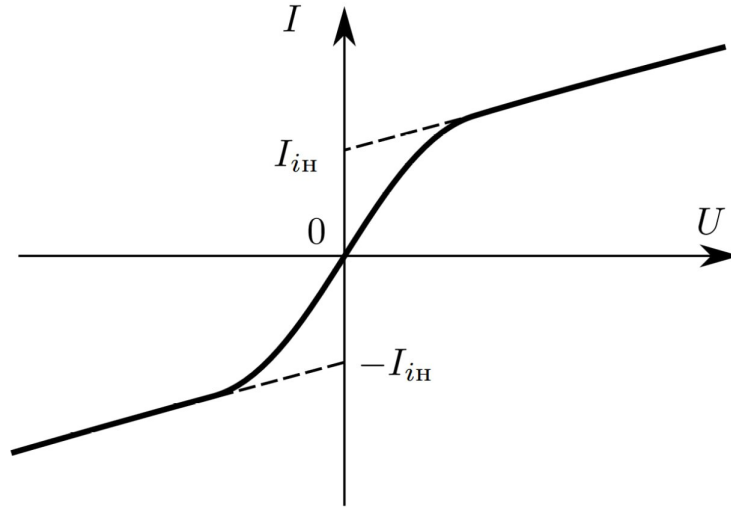


Рис. 1: Вольт-амперная характеристика двойного зонда

(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 ($\sim 450 \text{ к}\Omega$) к регулируемому высоковольтному источнику питания (ВИП) с выходным напряжением до 5 кВ.

При подключении к ВИП анода-I между ним и катодом возникает газовый разряд. Ток разряда измеряется миллиамперметром A_1 , а падение напряжение на разрядной трубке – цифровым вольтметром V_1 (мультиметром GDM), подключённым к трубке через высокоомный ($25 \text{ М}\Omega$) делитель напряжения с коэффициентом $\frac{R_1+R_2}{R_2} = 10$.

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 $d = 0,2 \text{ мм}$ и имеют длину $l = 5,2 \text{ мм}$. 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 (GMD). Для измерения зондового тока используется мультиметр A_2 (GDM). Анод-III в нашей работе не используется.

1. Проведение эксперимента

1. Определим напряжение зажигания разряда по нескольким измерениям: $U_{\text{зж}} = 206 \pm 8 \text{ В}$.

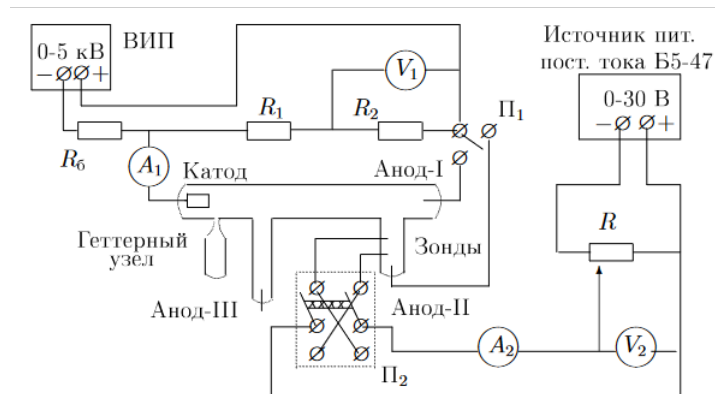


Рис. 2: Схема установки для исследования газового разряда

2. Проведем измерение ВАХ разряда. Полученные точки приведены на рис. 1.
- 3-4. Подготовим оборудование к измерению зондовых характеристик.
5. Проведем измерения ВАХ двойного зонда в диапазоне от -25 В до 25 В при токе разряда $I_p = 5$ мА.
6. Повторим предыдущие пункты для токов разряда 3 мА и 1.5 мА.
7. Выключим все использованное оборудование и зафиксируем параметры зондов: $d = 0.2$ мм, $l = 5.2$ мм.

2. Обработка данных

8. Построим ВАХ разряда (рис. 2). Проведем прямую через точки, лежащие в правой нижней области и найдем максимальное дифференциальное сопротивление разряда $R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} = -3.1 \pm 0.2$ Ом. Полученная зависимость вероятнее всего является частью участка Г-Д ВАХ разряда, представленной в лабнике.
9. Теперь построим зондовые характеристики для разных токов (рис. 3). Проведем касательную в нуле и асимптоты в бесконечностях чтобы определить производную $\frac{dI}{dU}|_{U=0}$ и ток насыщения $I_{\text{ин}}$. После этого найдем температуру электронов в Кельвинах по формуле:

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

10. Результаты вычислений с погрешностями, полученные в предыдущем пункте и во всех последующих будут представлены в сводной таблице в конце работы.

11. Вычислим концентрацию электронов с помощью формулы Бома, полагая, что $n_e = n_i$:

$$n_e = \frac{5}{2} \frac{I_{\text{и}}}{e\pi l d} \sqrt{\frac{m_i}{2kT_e}}$$

12. Рассчитаем плазменную частоту колебаний электронов по формуле:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} = 5.6 \cdot 10^4 \sqrt{n_e} \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Рассчитаем электронную поляризационную длину r_{D_e} по формуле:

$$r_{D_e} = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e e^2}}$$

Также найдем дебаевский радиус экранирования r_D , принимая температуру ионов равной комнатной ($T_i \approx 300 \text{ K}$):

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

13. Оценим среднее число ионов в дебаевской сфере:

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

14. Оценим степень ионизации плазмы ($P \approx 2 \text{ торр}$):

$$\alpha = \frac{n_i}{n} = \frac{n_e kT_i}{P}$$

15. Построим графики зависимостей электронной температуры и концентрации электронов от тока разряда: $T_e(I_p)$, $n_e(I_p)$ (рис. 4 и рис. 5).

16. Ниже приведена сводная таблица полученных значений.

3. Вывод

Дебаевский радиус электронов r_{D_e} много меньше поперечного размера трубки, в котором содержится плазма. Поэтому последнюю можно считать квазинейтральной. Идеальной плазму можно считать с малой точностью, так как число Дебая N_D не много больше 1.

4. Приложения

I_p , мА	kT_e , эВ	n_e , см ⁻³	ω_p , рад · с ⁻¹
5	1.056 ± 0.013	$(1.288 \pm 0.018) \cdot 10^{12}$	$(6.36 \pm 0.04) \cdot 10^{10}$
3	1.969 ± 0.004	$(5.126 \pm 0.014) \cdot 10^{11}$	$(4.010 \pm 0.005) \cdot 10^{10}$
1.5	2.576 ± 0.004	$(2.161 \pm 0.004) \cdot 10^{11}$	$(2.603 \pm 0.003) \cdot 10^{10}$
r_{De} , см	r_D , см	N_D	α
$(6.74 \pm 0.06) \cdot 10^{-4}$	$(1.054 \pm 0.007) \cdot 10^{-4}$	6.31 ± 0.16	$(2.03 \pm 0.03) \cdot 10^{-5}$
$(1.457 \pm 0.003) \cdot 10^{-3}$	$(1.670 \pm 0.002) \cdot 10^{-4}$	10.00 ± 0.05	$(8.06 \pm 0.02) \cdot 10^{-6}$
$(2.567 \pm 0.003) \cdot 10^{-3}$	$(2.572 \pm 0.003) \cdot 10^{-4}$	15.41 ± 0.05	$(3.400 \pm 0.007) \cdot 10^{-6}$

Таблица 1: Сводная таблица расчетов

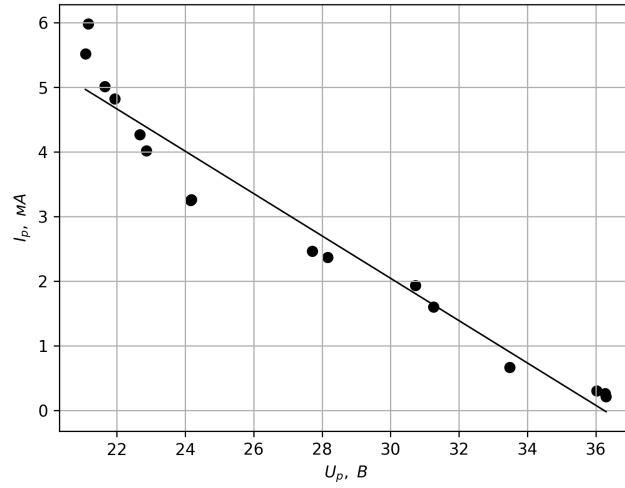


Рис. 3: Вольт-амперная характеристика разряда $I_p(U_p)$

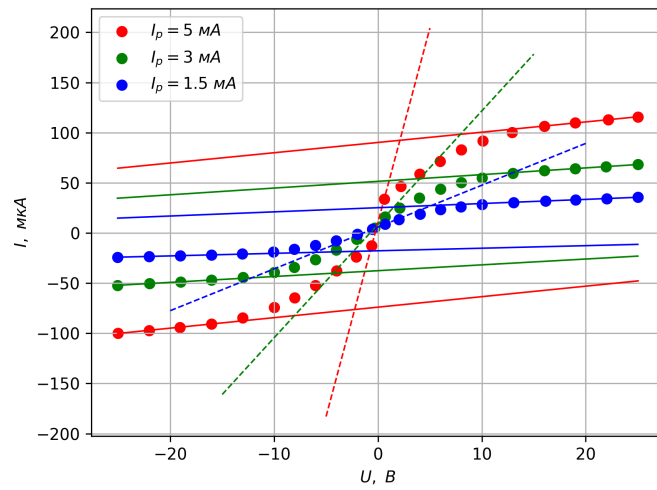


Рис. 4: Вольт-амперная характеристика зонда для разных токов разряда $I(U)$

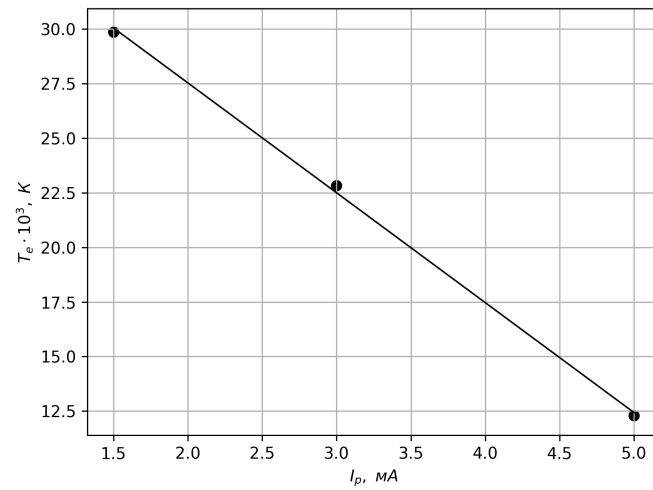


Рис. 5: Зависимость $T_e(I_p)$

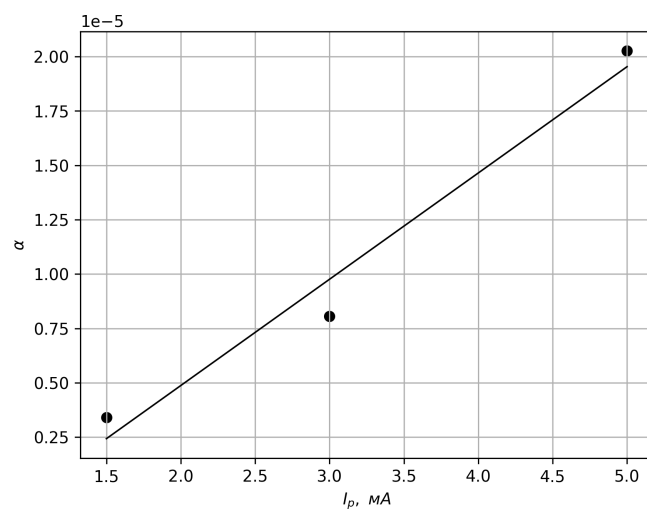


Рис. 6: Зависимость $\alpha(I_p)$