

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа прикладной математики и информатики

Отчёт о выполнении лабораторной работы

3.5.1

Изучение плазмы газового разряда в неоне

Выполнил:
Вронский Александр Сергеевич
Б05-226

Долгопрудный
26 октября 2024 г.

Цель работы: изучение вольт-амперной характеристики тлеющего разряда, изучение свойств плазмы методом зондовых характеристик.

В работе используются: стеклянная газоразрядная трубка, наполненная изотопом неона, высоковольтный источник питания (ВИП), источник питания постоянного тока, делитель напряжения, резистор, потенциометр, амперметры, вольтметры, переключатели.

Теория

Плазма

В ионизированном газе поле ионов «экранируется» электронами. Для поля \mathbf{E} и плотности ρ электрического заряда

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi\rho,$$

а с учётом сферической симметрии и $\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi$:

$$\frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\varphi}{dr} = -4\pi\rho.$$

Плотности заряда электронов и ионов (которые мы считаем бесконечно тяжёлыми и поэтому неподвижными)

$$\rho_e = -ne \cdot \exp\left(\frac{e\varphi}{kT_e}\right),$$

$$\rho_i = ne.$$

Тогда из (1) в предположении $\frac{e\varphi}{kT_e} \ll 1$ получим

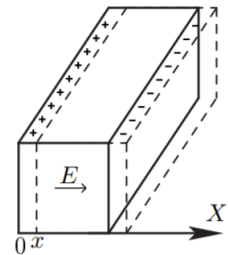
$$\varphi = \frac{Ze}{r} e^{-r/r_D},$$

где $r_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi ne^2}}$ – радиус Дебая. Среднее число ионов в сфере такого радиуса

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

Теперь выделим параллелепипед с плотностью n электронов, сместим их на x . Возникнут поверхностные заряды $\sigma = nex$, поле от которых будет придавать электронам ускорение:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{eE}{m} = -\frac{4\pi ne^2}{m} x.$$



Отсюда получаем *плазменную (ленгмюровскую) частоту* колебаний электронов:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi ne^2}{m}}.$$

Одиночный зонд

При внесении в плазму уединённого проводника – *зонда* – с потенциалом, изначально равным потенциалу точки плазмы, в которую его помещают, на него поступают токи электронов и ионов:

$$I_{e0} = \frac{n\langle v_e \rangle}{4} eS,$$

$$I_{i0} = \frac{n\langle v_i \rangle}{4} eS,$$

где $\langle v_e \rangle$ и $\langle v_i \rangle$ – средние скорости электронов и ионов, S – площадь зонда, n – плотность электронов и ионов. Скорости электронов много больше скорости ионов, поэтому $I_{i0} \ll I_{e0}$. Зонд будет заряжаться до некоторого равновесного напряжения $-U_f$ – *плавающего потенциала*.

В равновесии ионный ток мало меняется, а электронный имеет вид

$$I_e = I_0 \exp \left(-\frac{eU_f}{kT_e} \right).$$

Будем подавать потенциал U_3 на зонд и снимать значение зондового тока I_3 . Максимальное значение тока $I_{eн}$ – электронный ток насыщения, а минимальное $I_{иn}$ – ионный ток насыщения. Значение из эмпирической формулы Бомона:

$$I_{иn} = 0.4neS\sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}.$$

Двойной зонд

Двойной зонд – система из двух одинаковых зондов, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, между которыми создаётся разность потенциалов, меньшая U_f . Рассчитаем ток между ними вблизи $I = 0$. При небольших разностях потенциалов ионные токи на оба зонда близки к току насыщения и компенсируют друг друга, а значит величина результирующего тока полностью связана с разностью электронных токов. Пусть потенциалы на зондах

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

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

Между зондами $U = U_2 - U_1 = \Delta U_2 - \Delta U_1$. Через первый электрод

$$I_1 = I_{иn} + I_{e1} = I_{иn} - \frac{1}{4}neS\langle v_e \rangle \exp \left(-\frac{eU_f}{kT_e} \right) \exp \left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e} \right) = I_{иn} \left(1 - \exp \left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e} \right) \right).$$

Аналогично через второй получим

$$I_2 = I_{иn} \left(1 - \exp \left(\frac{e\Delta U_2}{kT_e} \right) \right)$$

Из (7) и (8) с учётом последовательного соединения зондов ($I_1 = -I_2 = I$):

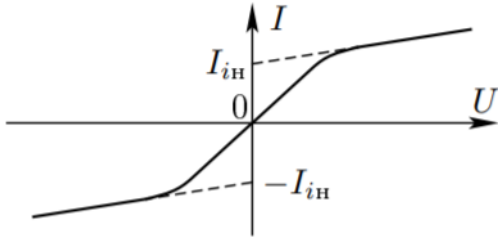
$$\Delta U_1 = \frac{kT_e}{e} \ln \left(1 - \frac{I}{I_{иn}} \right)$$

$$\Delta U_2 = \frac{kT_e}{e} \ln \left(1 + \frac{I}{I_{иn}} \right)$$

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока

$$U = \frac{kT_e}{e} \ln \frac{1 - I/I_{иn}}{1 + I/I_{иn}}, I = I_{иn} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e}.$$

Реальная зависимость выглядит несколько иначе и описывается формулой

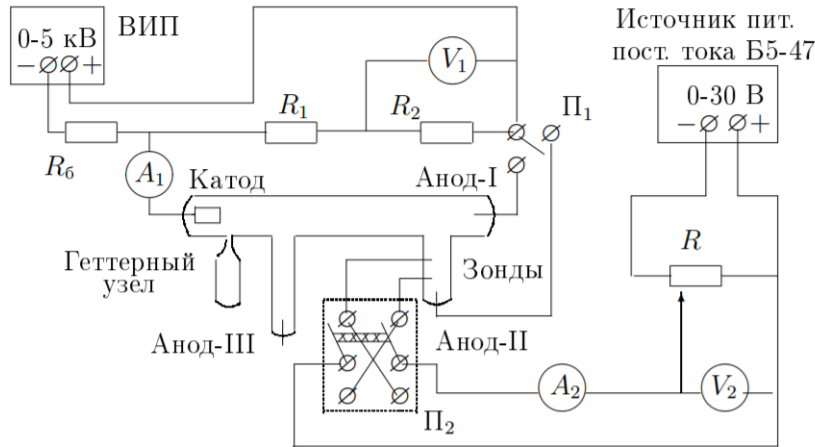


$$I = I_{\text{ин}} \text{th} \frac{eU}{2kT_e} + AU.$$

Из этой формулы можно найти формулу для T_e : для $U = 0$ мы найдём $I_{\text{ин}}$, продифференцируем в точке $U = 0$ и с учётом $\text{th} \alpha \approx \alpha$ при малых α и $A \rightarrow 0$ получим:

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

Описание установки



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 и II) с помощью переключателя Π_1 подключается через балластный резистор R_6 (≈ 450 кОм) к регулируемому 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 напряжения на разрядной трубке – цифровым вольтметром V_1 , 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 находятся 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 . Для измерения зондового тока используется мультиметр A_2 .

Ход работы

Измеряем напряжение зажигания в лампе: $U_{\text{зж}} = 25.7 \pm 0.2$ В.

С помощью вольтметра V_1 и амперметра A_1 снимаем ВАХ разряда $U_1 = f(I_p)$ для тока в диапазоне 0.5 – 5 мА (см. Таблица 1). Построим график: