

Изучение плазмы газового разряда в неоне

Каспаров Николай, Б01-304

November 29, 2024

Цель работы:

- Изучение вольт-амперной характеристики тлеющего разряда;
- Изучение свойств плазмы методом зондовых характеристик.

В работе используются:

- Стеклоянная газоразрядная трубка, наполненная неоном;
- Высоковольтный источник питания (ВИП);
- Источник питания постоянного тока;
- Делитель напряжения;
- Потенциометр, амперметры, вольтметры, переключатели.

1 Теоретическое введение

1.1 Плазменная частота

Выделим в нейтральной плазме некоторый объём в виде параллелепипеда (см. рис. 1).

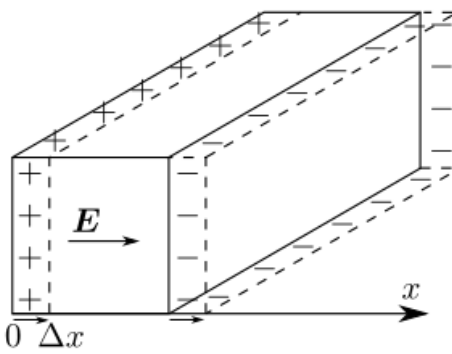


Рисунок 1: Плазменные колебания

Обозначим концентрацию электронов как n_e , однозарядных ионов: n_i , тогда $n_i = n_e$. Пусть все электроны сместились на расстояние x относительно ионов. Будем считать, что ионы неподвижны, тогда на боковых гранях параллелепипеда возникнут нескомпенсированные поверхностные заряды с плотностью

$$\sigma = \pm n_e e \Delta x. \quad (1)$$

Аналогично конденсатору, они создадут электрическое поле

$$E = 4\pi n_e e \Delta x. \quad (2)$$

В свою очередь это поле будет действовать на электроны:

$$\frac{d^2 \Delta x}{dt^2} = -\frac{eE}{m} = -\frac{4\pi n_e e^2}{m} \Delta x. \quad (3)$$

Видно, что полученное уравнение описывает гармонические колебания с частотой

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} \quad (4)$$

Таким образом, мы получили частоту коллективных колебаний электронов относительно квазинейтрального состояния. Такие колебания называют ленгмюровскими, а частоту ω_p — плазменной или ленгмюровской.

1.2 Плазменная частота

Плазменные колебания могут быть возбуждены как за счёт внешнего воздействия (например, при прохождении электромагнитной волны), так и за счёт тепловой энергии, содержащейся непосредственно в плазме. Оценим амплитуду колебаний в последнем случае.

Средняя скорость теплового движения электронов по порядку величины равна

$$v_e \sim \sqrt{\frac{kT_e}{m_e}}. \quad (5)$$

Амплитуду r колебаний электронов относительно ионов можно оценить как смещение с тепловой скоростью \bar{v}_e за характерное время плазменных колебаний $1/\omega_p$. Полученную величину обозначают как

$$r_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e e^2}} \sim \frac{\bar{v}_e}{\omega_p} \quad (6)$$

и называют дебаевским радиусом (или дебаевской длиной). Это — ещё один важный плазменный параметр, задающий характерный пространственный масштаб многих плазменных явлений.

1.3 Измерения методом одиночного зонда

При внесении проводника в плазму, он подвергается «бомбардировке» со стороны её заряженных частиц. Как известно из молекулярной физики, число частиц, ударяющихся в идеальном газе в секунду о единичную поверхность, равно:

$$j = \frac{1}{4} n \bar{v}, \quad (7)$$

и так как скорость электронов, очевидно, больше скоростей ионов, проводник зарядится отрицательно.

Найдем отрицательный потенциал U_f (относительно плазмы), который также называется плавающим. В равновесии, если бы $U_f = 0$, то электронный и ионные токи были бы равны:

$$I_{e0} = \frac{n\bar{v}_e}{4} eS, \quad I_{i0} = \frac{n\bar{v}_i}{4} eS, \quad (8)$$

Теперь учтем, что $U_f \neq 0$. На ионный ток это почти не повлияет: $I_i \approx I_{i0}$. Электронный же ток уменьшится, поскольку лишь часть электронов, летящих к зонду, способна преодолеть потенциальный барьер. Из распределения Больцмана:

$$I_e = I_{e0} \exp\left(\frac{eU_f}{kT_e}\right), \quad (9)$$

где $U_f < 0$, поэтому $I_e < I_{e0}$.

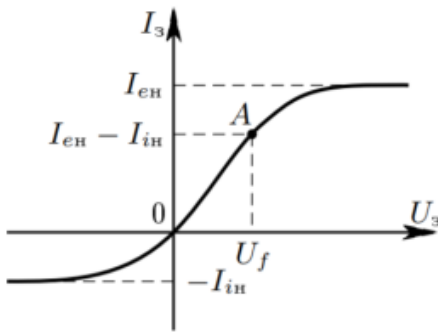


Рисунок 2: Ток насы

Будем подавать потенциал U_z на зонд и снимать значение зондового тока I_z . Максимальное значение тока I_{en} — электронный ток насыщения, а минимальное I_{in} — ионный ток насыщения. Значение из эмпирической формулы Бомона:

$$I_{in} = 0.4neS\sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}} \quad (10)$$

1.4 Измерения методом двойного зонда

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 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 равны:

$$U_1 = U_f + \Delta U_1, \quad U_2 = U_f + \Delta U_2, \quad (11)$$

где $\Delta U_1, \Delta U_2 \ll U_f$. Напряжение между зондами равно

$$U = U_2 - U_1 = \Delta U_2 - \Delta U_1. \quad (12)$$

Найдем ток, приходящий на первый электрод:

$$I_1 = I_{\text{ин}} - I_{\text{е0}} \exp\left(\frac{eU_1}{kT_e}\right) = I_{\text{ин}} - \left[I_{\text{е0}} \exp\left(\frac{eU_f}{kT_e}\right) \right] \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e}\right), \quad (13)$$

но заметим, что при $\Delta U_1 = 0$ ($U_1 = U_f$) электронный и ионный токи компенсируют друг друга. Значит,

$$I_1 = I_{\text{ин}} - I_{\text{е0}} \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e}\right), \quad (14)$$

$$I_2 = I_{\text{ин}} - I_{\text{е0}} \exp\left(\frac{e\Delta U_2}{kT_e}\right), \quad (15)$$

Из последовательности соединения видно, что $I_1 = -I_2 = I$, значит

$$U = \Delta U_1 - \Delta U_2 = \frac{kT_e}{e} \ln \frac{I_{\text{ин}} - I}{I_{\text{ин}} + I}, \quad (16)$$

и, разрешая это равенство относительно I , получаем:

$$I = I_{\text{ин}} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e}. \quad (17)$$

Отсюда, используя приближение $\operatorname{th} x \approx x$, получим

$$kT_e = \frac{1}{2} \frac{eI_{\text{ин}}}{\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0}}, \quad (18)$$

где $\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0}$ - наклон характеристики зонда вблизи начала координат.

В действительности же, наш результат отличается от реального существованием наклона у асимптот в области больших $|U|$, что связано с ускорением частиц плазмы приложенным полем, которое не учтено при выводе

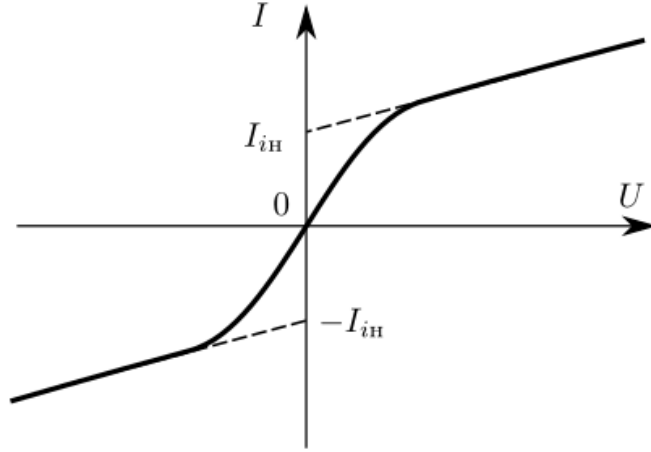


Рисунок 3: ВАХ двойного зонда

2 Описание установки

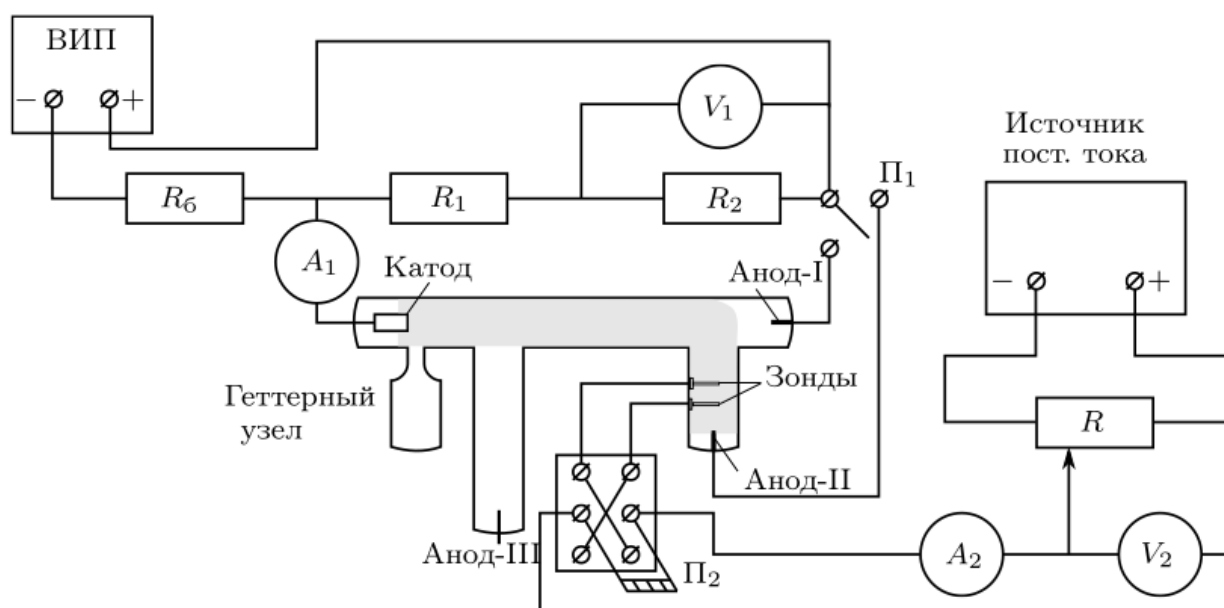


Рисунок 4: Схема установки

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 4 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 .

3 Ход работы

3.1 Вольт-амперная характеристика разряда

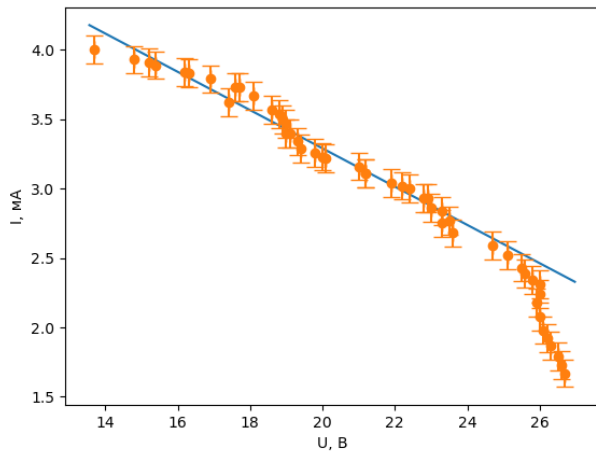


Рисунок 5: ВАХ разряда

Как мы может увидеть из Рис. 6, участок разряда в нашем случае соответствует фрагменту ДГ - поднормальному тлеющему разряду.

Будем увеличивать напряжение ВИП, пока не произойдет зажигание разряда. Затем обратно, до исчезновения разряда. Данные нанесем на график (Рис. 5):

Разницы в результатах при повышении и понижении напряжения обнаружено не было. Аппроксимируем график прямой (используя МНК).

Найдем дифференциальное сопротивление разряда:

$$R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} = (-7.0 \pm 0.2) \text{ кОм} \quad (19)$$

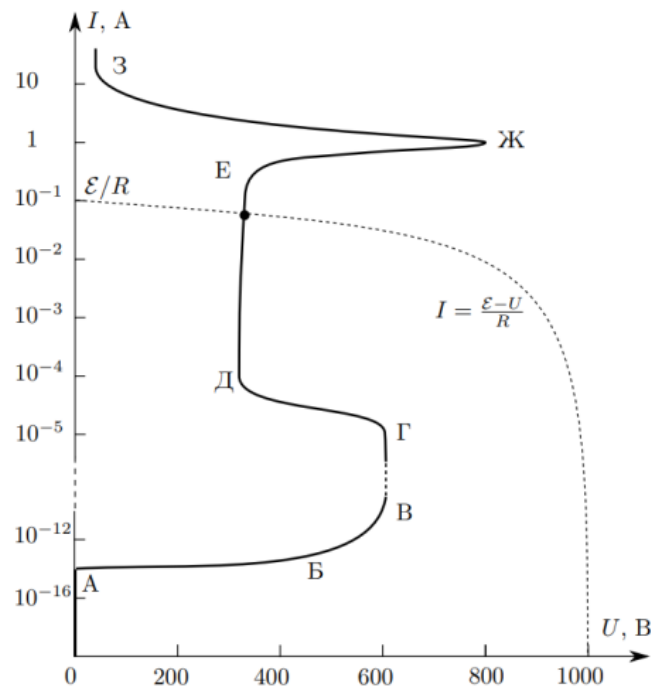


Рисунок 6: ВАХ разряда

3.2 Зондовые характеристики

Снимем ВАХ двойного зонда для токов разряда 2 мА, 3 мА и 4 мА. Каждый график отцентрируем и нанесем на общую систему координат:

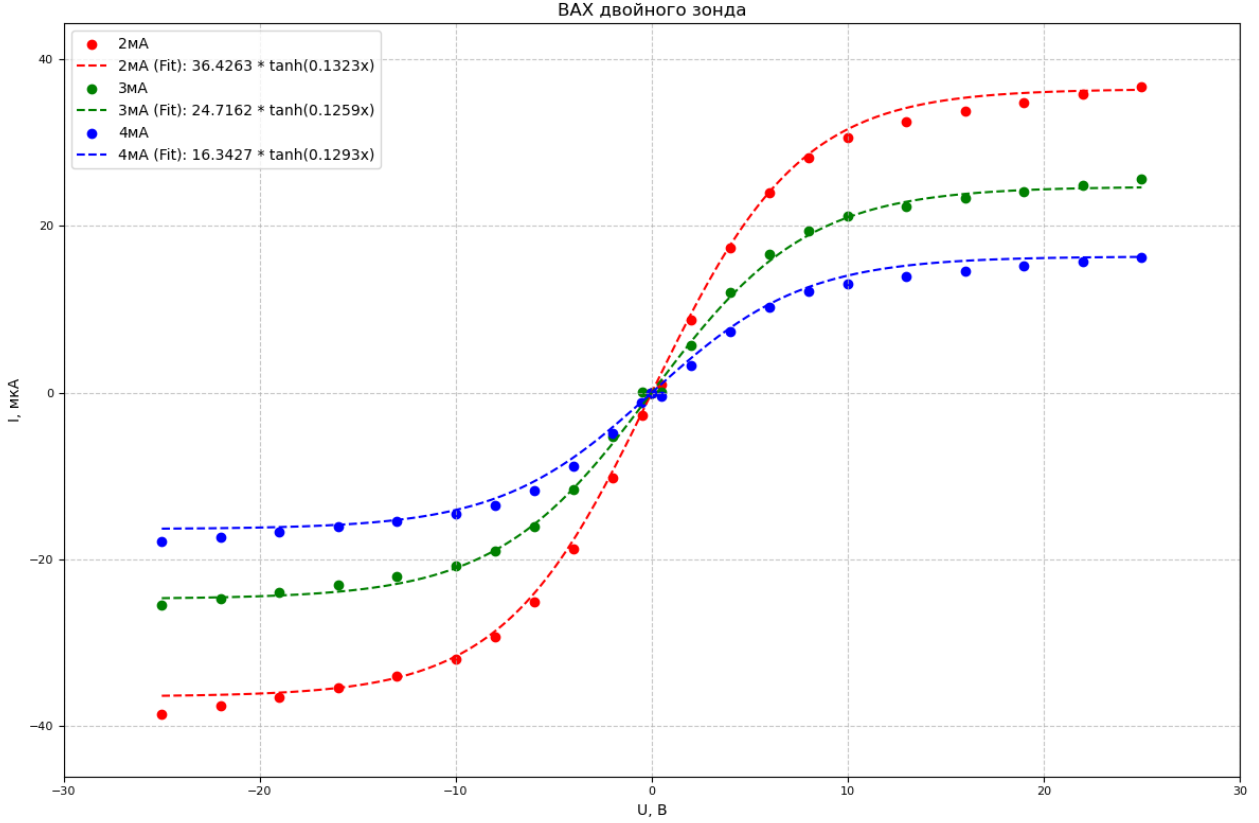


Рисунок 7: ВАХ двойного зонда

Вспомним формулу (17):

$$I = I_{\text{in}} \tanh \frac{eU}{2kT_e}.$$

Из графика получим ионный ток насыщения для разных сил тока, а также температуру электронов T_e . Используя эмпирическую формулу Бомона (10), найдем концентрацию ионов и электронов в плазме (считаем, что они одинаковы).

$$n = \frac{I_i}{0.4eS} \sqrt{\frac{m_i}{e}} B, \quad \text{где } B = \frac{e}{2kT_e} \quad (20)$$

Рассчитаем также плазменную частоту колебаний электронов w_q , используя формулу (4).

$$w_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} \quad (21)$$

Также вычислим дебаевский и электронный радиусы экранирования по формуле (6), а также оценочное среднее число ионов в дебаевской сфере по формуле:

$$N_e = \frac{4}{3} \pi r_D^3 n_e \quad (22)$$

Чтобы оценить долю ионизированных молекул, оценим давление внутри трубки в 2 торр. Все данные организуем в общую итоговую таблицу:

I_p , мА	2.00 ± 0.01	3.00 ± 0.01	4.00 ± 0.01
T_e , эВ	3.9 ± 0.5	4.0 ± 0.6	3.9 ± 0.6
n_e , 10^{16} м $^{-3}$	1.2 ± 0.1	1.8 ± 0.1	2.7 ± 0.1
ω_p , 10^9 рад/с	6.1 ± 0.3	7.5 ± 0.4	9.2 ± 0.5
r_{De} , 10^{-6} м	1.4 ± 0.2	1.1 ± 0.1	0.9 ± 0.1
r_D , 10^{-5} м	1.1 ± 0.1	0.9 ± 0.1	0.7 ± 0.1
N_D	70 ± 20	50 ± 20	40 ± 10
α , 10^{-7}	≈ 4	≈ 7	≈ 12

Таблица 1: Параметры тлеющего разряда

4 Вывод

В этой работе мы получили ВАХ разряда, по наклону которой определили максимальное дифференциальное сопротивление. Мы также определили, что работаем с поднормальным тлеющим разрядом.

Мы построили семейство зондовых характеристик, благодаря которым определили ионный ток насыщения, температуру электронов, концентрацию электронов и ионов в плазме, частоту колебаний электронов, электронную поляризационную длину r_{De} и дебаевский радиус экранирования r_D .

Определив среднее число ионов в дебаевской сфере N_D , мы увидели, что $N_D \gg 1$, что означает, что плазму разряда можно считать идеальной. Также была определена степень ионизации плазмы.

Наибольший вклад в погрешность внесла аппроксимация ВАХ двойного зонда. Чтобы улучшить точность, надо придумать способ более точно описывать графики $I(U)$.