

Лабораторная работа 3.1.3

"Изучение плазмы газового разряда в неоне"

17 декабря 2020 г.

Цель:

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

Оборудование:

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 $\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi$:

$$\frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\varphi}{dr} = -4\pi\rho. \quad (1)$$

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

$$\begin{aligned} \rho_e &= -ne \cdot \exp\left(\frac{e\varphi}{kT_e}\right), \\ \rho_i &= ne. \end{aligned} \quad (2)$$

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

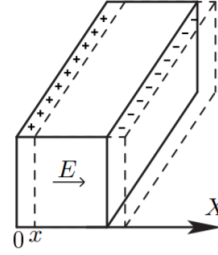
$$\varphi = \frac{Ze}{r} e^{-r/r_D}, \quad (3)$$

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

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

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

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



Отсюда получаем плазменную (ленгмюровскую) частоту колебаний электронов:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n e^2}{m}}. \quad (5)$$

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:

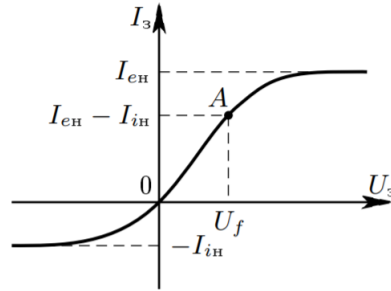
$$\begin{aligned} I_{e0} &= \frac{n \langle v_e \rangle}{4} eS, \\ I_{i0} &= \frac{n \langle v_i \rangle}{4} eS, \end{aligned} \quad (6)$$

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_{en} – электронный ток насыщения, а минимальное I_{in} – ионный ток насыщения. Значение из эмпирической формулы Бомона:



$$I_{in} = 0.4 n e S \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}. \quad (7)$$

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

$$I_1 = I_{in} + I_{e1} = I_{in} - \frac{1}{4} neS \langle v_e \rangle \exp\left(-\frac{eU_f}{kT_e}\right) \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e}\right) = I_{in} \left(1 - \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e}\right)\right). \quad (8)$$

Аналогично через второй получим

$$I_2 = I_{in} \left(1 - \exp\left(\frac{e\Delta U_2}{kT_e}\right)\right) \quad (9)$$

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

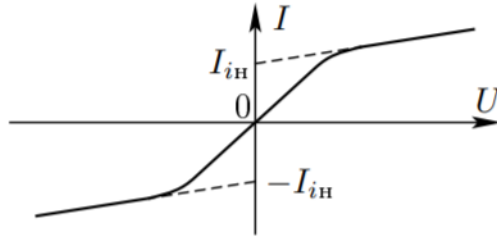
$$\Delta U_1 = \frac{kT_e}{e} \ln\left(1 - \frac{I}{I_{in}}\right)$$

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

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока

$$U = \frac{kT_e}{e} \ln \frac{1 - I/I_{in}}{1 + I/I_{in}}, I = I_{in} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e}. \quad (10)$$

Реальная зависимость выглядит несколько иначе и описывается формулой

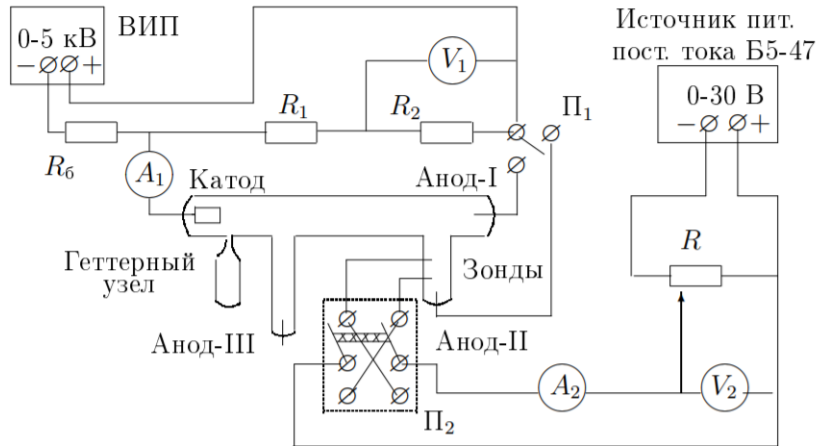


$$I = I_{in} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e} + AU. \quad (11)$$

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

$$kT_e = \frac{1}{2} \frac{eI_{in}}{\frac{dI}{dU}|_{U=0}}. \quad (12)$$

Описание установки



Стеклянная газоразрядная трубка имеет холодный (ненакаливаемый) по- лый катод, три анода и *геттерный* узел – стеклянный баллон, на внут- реннюю поверхность которого напылена газопоглощающая плёнка (*геттер*). Трубка наполнена изотопом неона ^{22}Ne при давлении 2 мм рт. ст. Катод и один из анодом (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 напря- жения на разрядной трубке – цифровым вольтметром V_1 , подклюённм к трубке через высокоомный (25 МОм) делитель напряжения с коэффици- ентом $(R_1 + R_2)/R_2 = 10$.

При подключении к ВИП анода-II разряд возникает в пространстве между катодом и анодом-II, где находятся двойной зонд, используемый для диагно- стики плазмы положительного столба. Зонды изготовлены из молибденовой проволоки диаметром $d = 0.2$ мм и имеют длину $l = 5.2$ мм. Они подклю- чены к источнику питания GPS через потенциометр R . Переключатель Π_2 позволяет изменять полярность напряжения на зондах. Величина напря- жения на зондах изменяеься с помощью дискретного переключателя «V» выходного напряжения источника питания и потенциометра R , а измеряет- ся цифровым вольтметром V_2 . Для измерения зондового тока используется мультиметр A_2 .

Результаты измерений и обработка результатов

Измерим напряжение зажигания $U_z = (20.1 \pm 0.2)\text{В}$ Далее снимим вольт- амперную характеристику и построим график

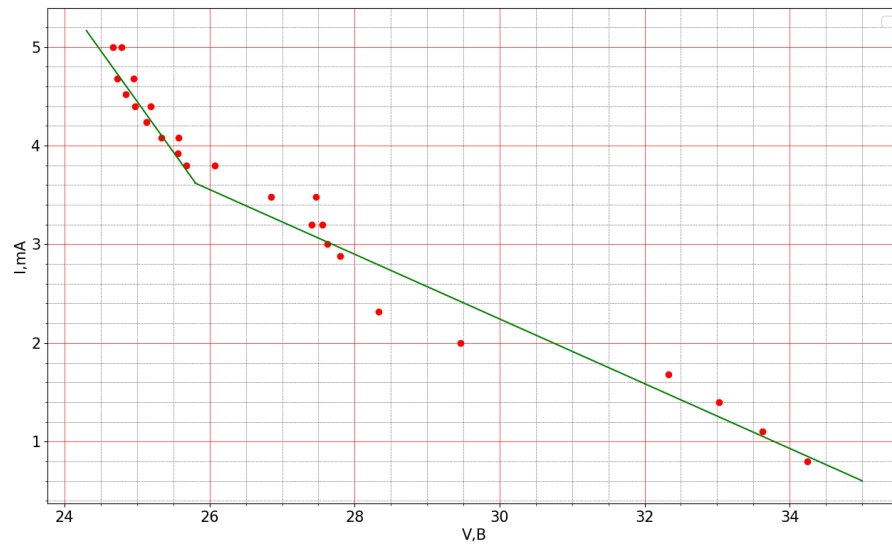


Рис. 1: зависимость $I(U)$

по наклону определим максимальное дифференциальное сопротивление
 заряда $R_{max} =$
 построим зондовые характеристики для различных токов

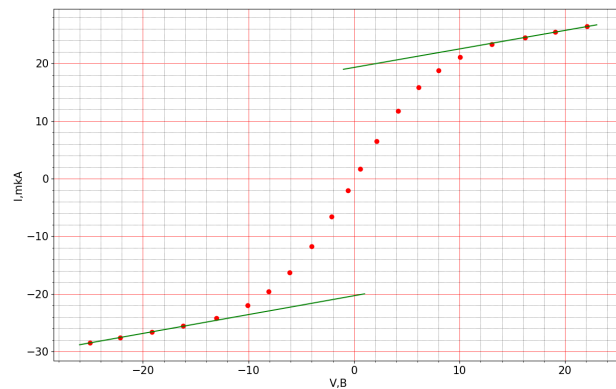


Рис. 2: $I=1.5\text{mV}$

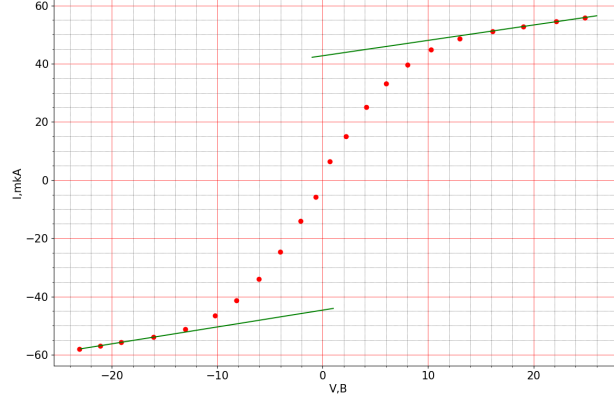


Рис. 3: $I=3\text{mV}$

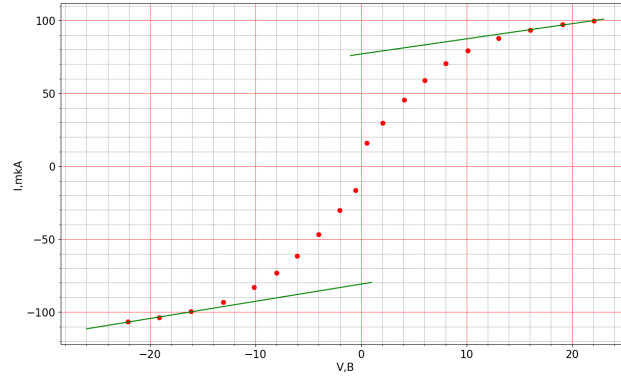


Рис. 4: $I=5\text{mV}$

найдем токи насыщения $I_{\text{иН}}$ и температуры электронов T_e . Считая концентрации ионов и электронов равными, найдем их, пользуясь формулой (7). Рассчитаем плазменную частоты ω_p по формуле (5) и радиус Дебая r_D , оценим среднее число ионов в дебаевской сфера N_D по формуле (4) и степень ионизации α , приняв $P \approx 1$ мбар, и занесем все результаты в таблицу. построим зависимость температуры и концентрации электронов от разрядного тока, в предположении что концентрация электронов равна концентрации ионов

I_p , мА	T_e , 10^4 К	n_e , 10^{15} м $^{-3}$	ω_p , 10^4 рад/с	r_D , 10^{-5} см	N_D	α , 10^{-7}
1.5	3.7 ± 0.4	144 ± 12	144 ± 12	49 ± 3	30	24
3.0	2.8 ± 0.3	107 ± 10	107 ± 10	66 ± 5	40	13
5	1.5 ± 0.2	75 ± 6	75 ± 6	94 ± 10	57	7

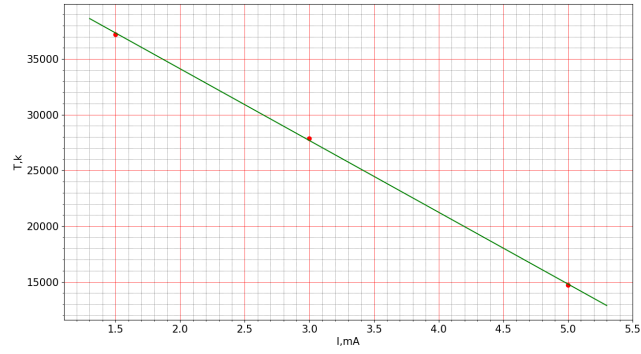


Рис. 5: $T_e(I_p)$

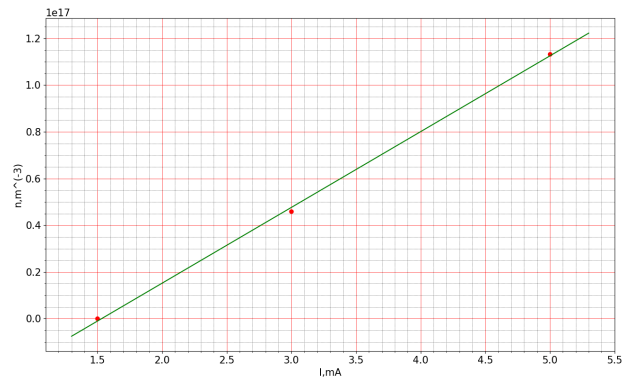


Рис. 6: $n_e(I_p)$