

Лабораторная работа №3.5.1
Изучение плазмы газового разряда в неоне

Рожков А. В.

24 сентября 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.

1 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 $r_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi ne^2}}$ – 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:

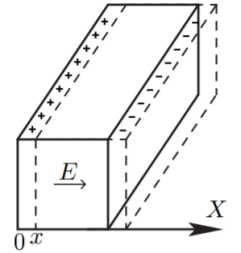
$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{eE}{m} = -\frac{4\pi ne^2}{m} x.$$

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

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

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:



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

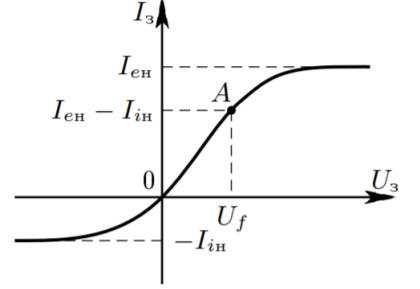
где $\langle v_e \rangle$ и $\langle v_i \rangle$ – средние скорости электронов и ионов, S – площадь зонда, n – плотность электронов и ионов. Скорости электронов много больше скорости ионов, поэтому $I_{i0} \ll I_{e0}$. Зонд будет заряжаться до некоторого равновесного напряжения $-U_f$ – *плавающего 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 $I_{eн}$ – электронный ток насыщения, а минимальное $I_{iн}$ – ионный ток насыщения. Значение из эмпирической формулы Бомона:

$$I_{iн} = 0.4neS\sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}. \quad (7)$$



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

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

Аналогично через второй получим

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

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

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

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

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока

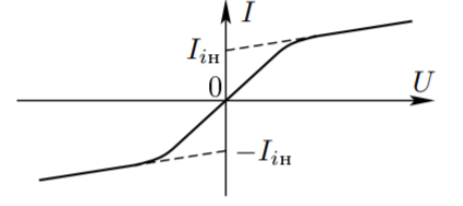
$$U = \frac{kT_e}{e} \ln \frac{1 - I/I_{iн}}{1 + I/I_{iн}}, I = I_{iн} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e}. \quad (10)$$

Реальная зависимость выглядит несколько иначе и описывается формулой

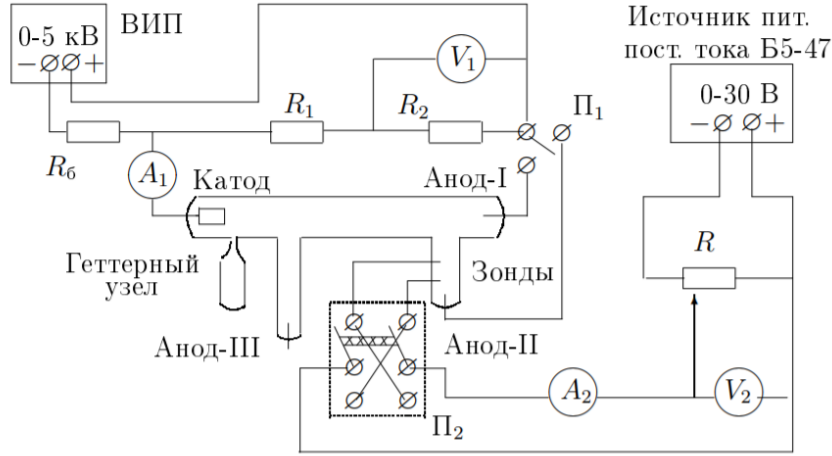
$$I = I_{\text{ин}} \text{th} \frac{eU}{2kT_e} + AU. \quad (11)$$

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:

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



2 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 .

3 Ход работы

3.1 ВАХ разряда

Построим ВАХ разряда

$$R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} = (-3.06 \pm 0.12) \text{ кОм}$$

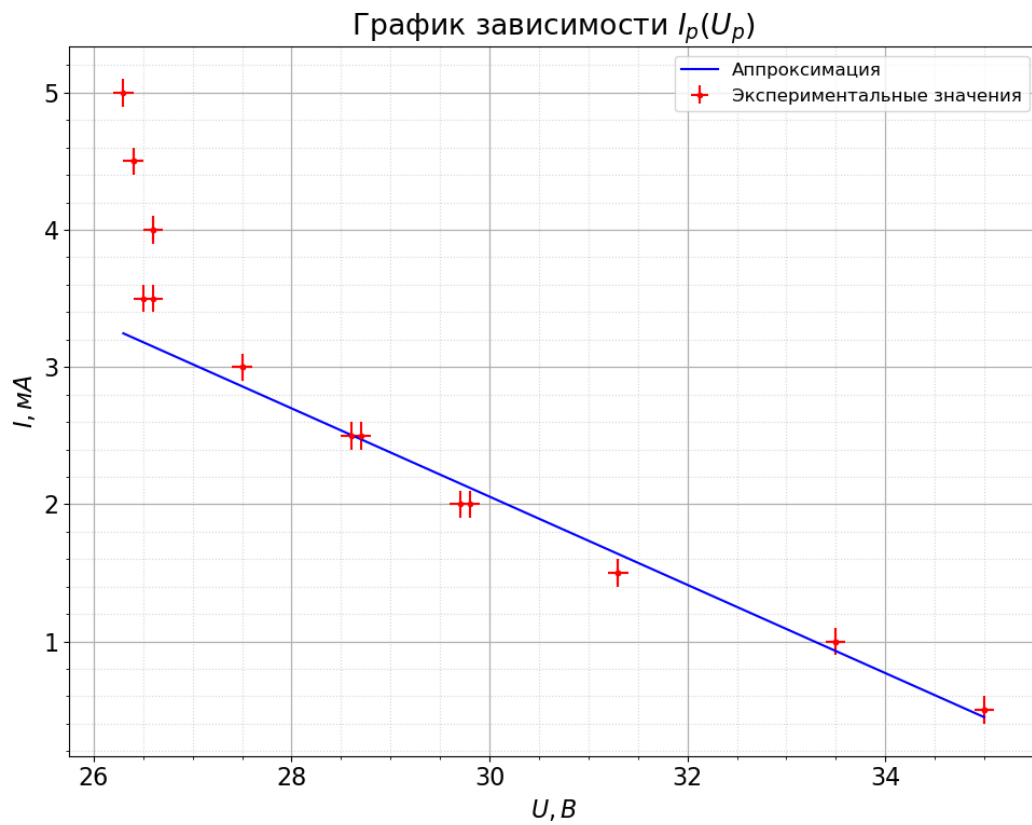


Рис. 1: ВАХ разряда $I_p(U_p)$

Как видим по рисунку 2, наш график соответствует участку ДГ - поднормальному тлеющему разряду.

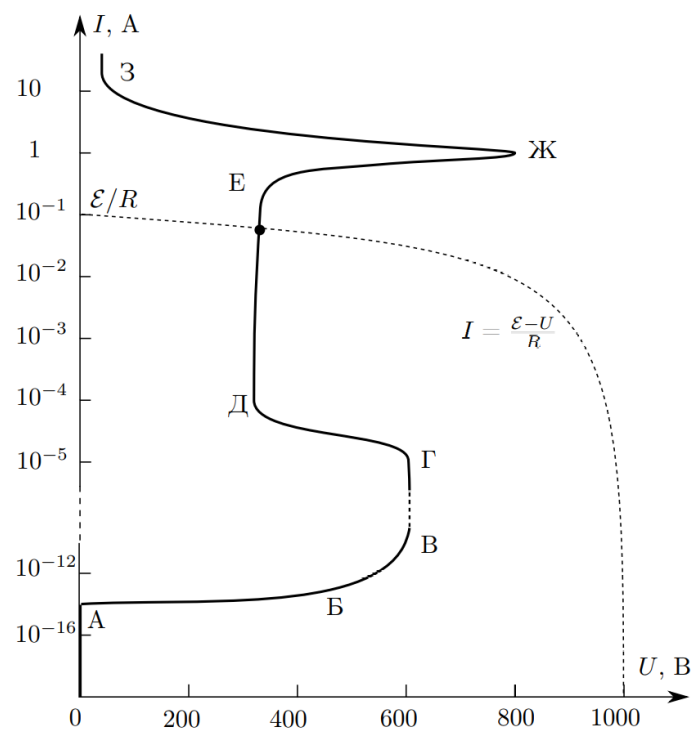


Рис. 2: ВАХ разряда

3.2 Зондовые характеристики

Построим ВАХ зондов для различных значений тока разряда. На графиках представлены отцен-трированные по вертикали значения. Также проведены асимптоты

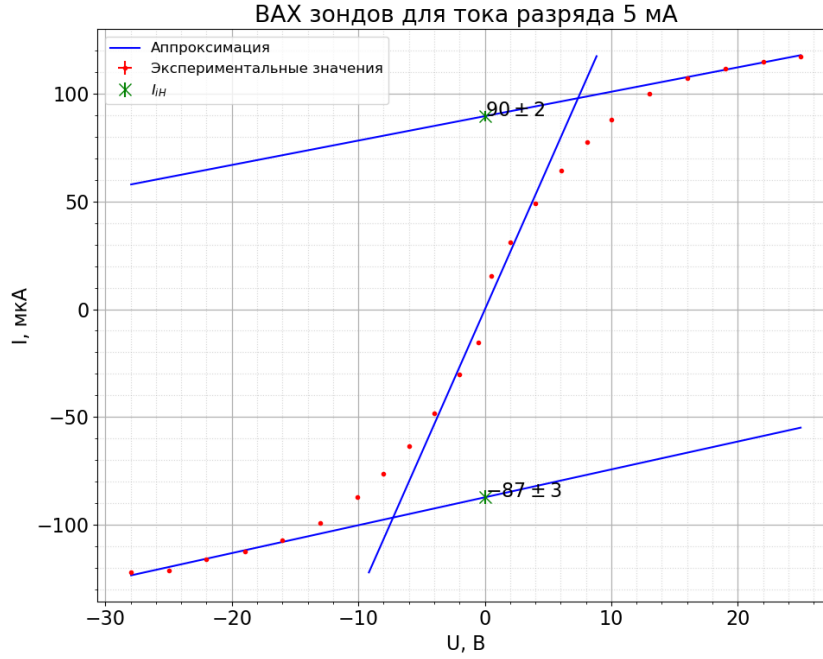


Рис. 3: ВАХ зонда $I(U)$ притока разряда 5 мА

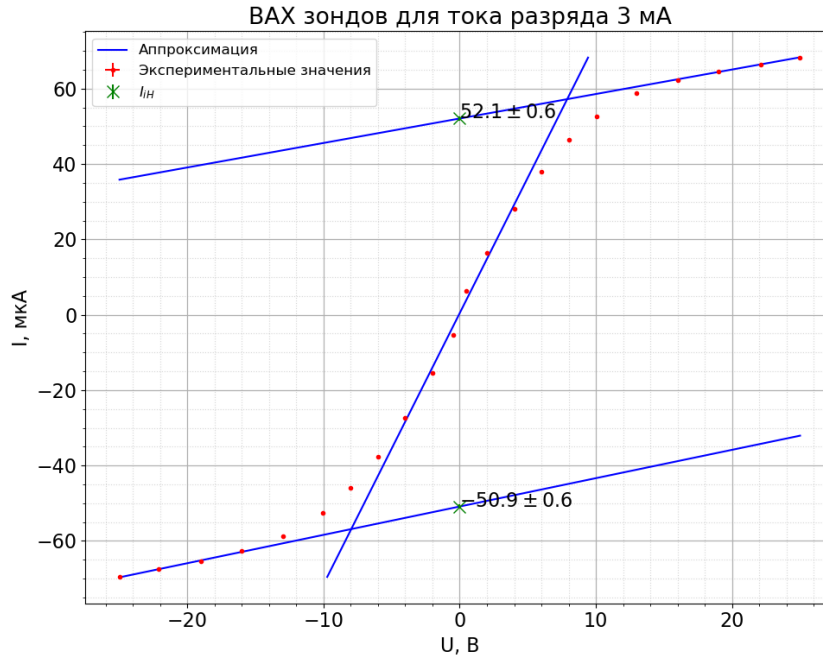


Рис. 4: ВАХ зонда $I(U)$ притока разряда 3 мА

Из точек пересечения асимптот с осью $U = 0$ найдём I_{iH} . Также определим $\frac{dI}{dU}$ в окрестности точки $U = 0$. При помощи этого рассчитаем температуру электронов.

$$kT_{e1} = \frac{1}{2} \frac{eI_{iH}}{\frac{dI}{dU}|_{U_0=0}}$$

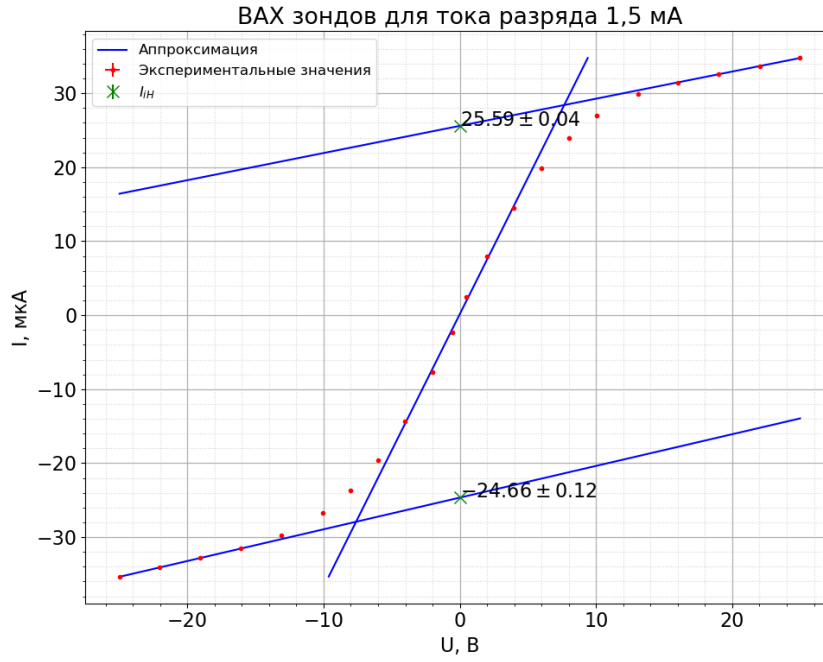


Рис. 5: ВАХ зонда $I(U)$ при токе разряда 1.5 мА

Также температуру электронов можно найти из разности напряжений в точках 1 и 2, где 1 - точка пересечения асимптоты с осью $U = 0$; 2 - точка пересечения горизонтали из точки 1 с касательной к графику в $(0, 0)$.

$$kT_{e2} = \frac{\Delta U e}{2}$$

В таблице 1 видим, что kT_{e1} совпали. Для дальнейших расчётов будем использовать kT_{e1} , так как она имеет меньшую погрешность.

Найдём также температуру электронов в кельвинах. Энергии 1 эВ соответствует температура $T \simeq 11800^\circ K$.

$I_{\text{разр}}$	5 мА	3 мА	1,5 мА
$I_i H, \text{мкА}$	88 ± 3	51.5 ± 0.8	25.1 ± 0.5
$\Delta U, \text{В}$	7 ± 2	7.2 ± 0.8	6.8 ± 0.4
$kT_{e1}, \text{эВ}$	3.3 ± 0.7	3.6 ± 0.4	3.4 ± 0.2
$kT_{e2}, \text{эВ}$	3.3 ± 0.8	3.6 ± 0.4	3.4 ± 0.2
$T_e, \text{К}$	39000 ± 8000	42000 ± 4000	40000 ± 2000

Таблица 1: Промежуточные результаты

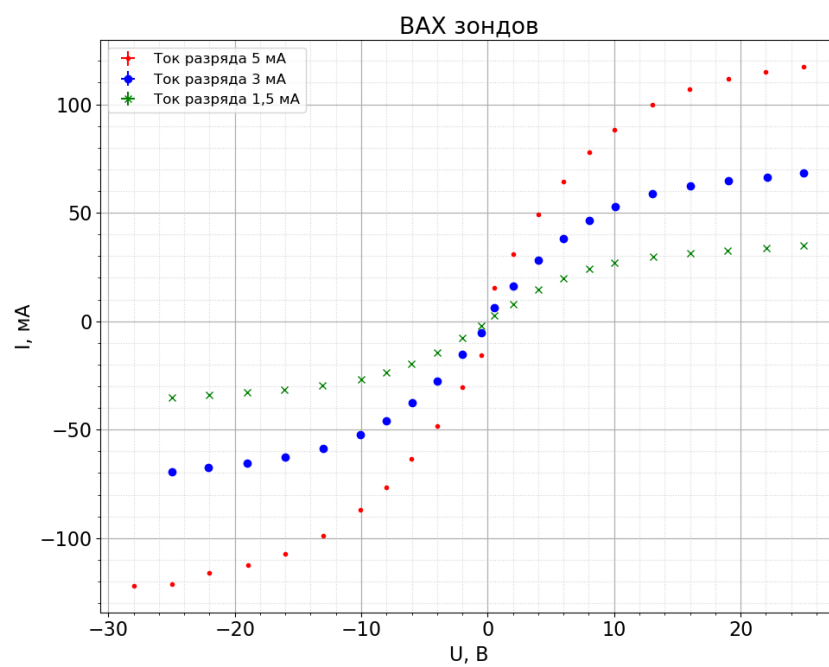


Рис. 6: ВАХ зонда $I(U)$