

Лабораторная работа 3.5.1. Изучение плазмы газового разряда в неоне.

Балдин Виктор

28 сентября 2024 г.

Теория

Плазма

Из-за теплового движения в плазме электроны могут смещаться относительно ионов и образовывать неоднородности. В этих неоднородностях возникает электрическое поле, которое стремится восстановить баланс, из-за чего происходят колебания с частотой

$$w_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}}$$

За характерное время колебаний электроны за счет теплового движения смещаются на

$$r_D \sim \frac{v_e}{w_p} = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e e^2}}$$

r_D - дебаевский радиус, k - константа Больцмана.

Если поместить в плазму пробную (допустим, положительную) частицу, то электроны будут скапливаться около этой частицы, экранируя её поле. Потенциал точечного заряда будет иметь в плазме следующий вид:

$$\varphi(r) = \frac{q}{r} e^{-\frac{r}{r_D}}$$

где $r_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e e^2}}$ - радиус Дебая в случае равновесной плазмы. Если температуры электронов и ионов сильно отличаются, то следует определять отдельно величину радиуса экранирования для электронов и для ионов. Итоговый радиус будет

$$r_D = (r_{De}^{-2} + r_{Di}^{-2})^{-1/2}$$

То есть если $T_i \ll T_e$, то $r_D \approx r_{Di}$

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:

$$\begin{aligned} I_{e0} &= \frac{n\langle v_e \rangle}{4} eS, \\ I_{i0} &= \frac{n\langle v_i \rangle}{4} eS, \end{aligned} \quad (1)$$

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:

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

Электронный ток насыщения можно определить по тепловому движению:

$$I_{en} = \frac{n_e S}{4} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}}$$

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

$$I_1 = I_{in} + I_{e1} = I_{in} - \frac{1}{4} n_e S \langle v_e \rangle \exp\left(-\frac{eU_f}{kT_e}\right) \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e}\right) = I_{in} \left(1 - \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e}\right)\right). \quad (3)$$

Аналогично через второй получим

$$I_2 = I_{in} \left(1 - \exp\left(\frac{e\Delta U_2}{kT_e}\right)\right) \quad (4)$$

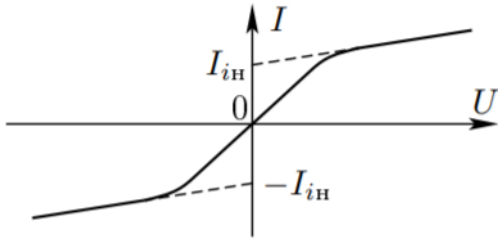
Из (7) и (8) с учётом последовательного соединения зондов ($I_1 = -I_2 = I$):

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

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

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока

$$U = \frac{kT_e}{e} \ln \frac{1 - I/I_{in}}{1 + I/I_{in}}, \quad I = I_{in} \tanh \frac{eU}{2kT_e} + AU. \quad (5)$$



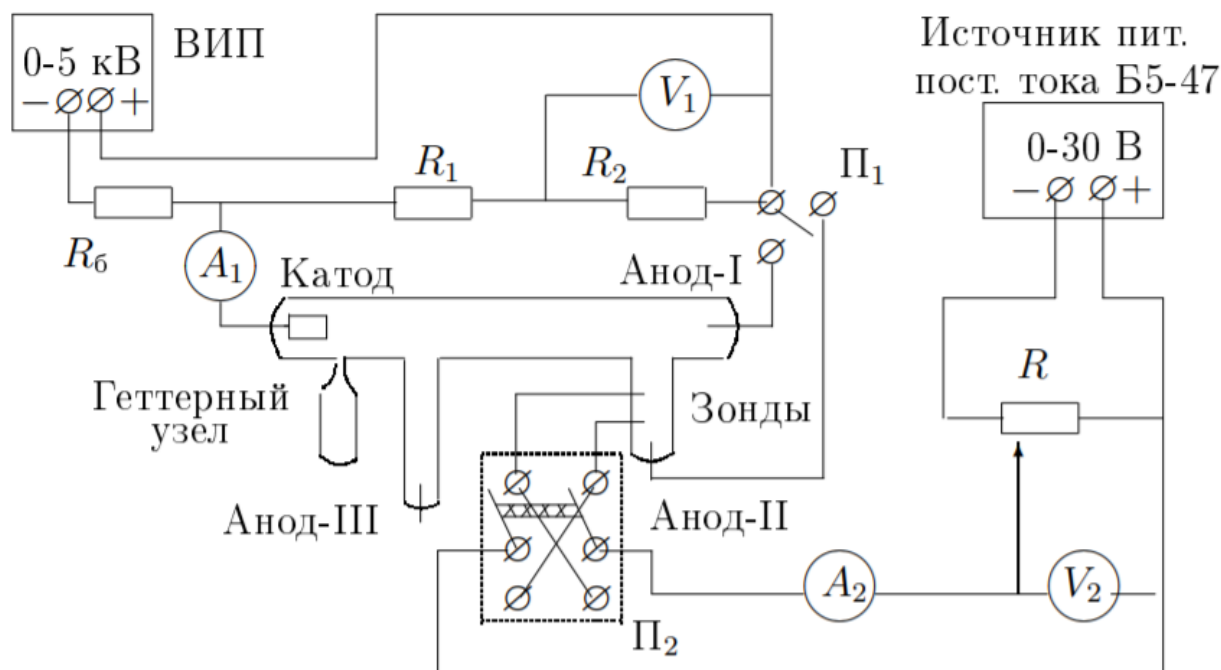
Зависимость выглядит примерно так. С учетом 5 можно выразить асимптоты графика:

$$I = I_{inac} + AU, \quad I = -I_{inac} + AU \quad (6)$$

Наклон в нуле принимает вид:

$$\frac{dI}{dU} = I_{inac} \frac{e}{2kT_e} + A \quad (7)$$

Описание установки



Стеклоянная газоразрядная трубка имеет холодный (ненакаливаемый) полый катод, три анода и *геттерный* узел – стеклоянный 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 регулируемоу ВИП с выкодным напряжением до 5 кВ.

При подключении к ВИП анода-I между ним и катодом возникает газовой разряд. Ток разряда измеряется миллиамперметром A_1 , а падение напряжения на разрядной трубке – цифровым вольтметром V_1 , подключённым к трубке череа 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 подклюены к источнику питания GPS череа потенциометр R . Переключатель Π_2 позволяет изменять полярность напряжения на зондах. Величина напряжения на зондах изменяеяся 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: $U_{\text{зж}} = 99 \pm 5$ В.

Снимаем ВАХ газового разряда. Результаты представлены в таблице.

Построим ВАХ и определим максимальное дифференциальное сопротивление разряда $R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI}$. Оно будет соответствовать участку с минимальным (по модулю) наклоном графика $I(U)$:

В схеме напряжение снимается с делителя напряжений с коэффициентом 10, поэтому $R_{\text{диф}} = -17 \pm 6$ кОм. Наш график соответствует участку поднормального тлеющего разряда (см. приложение к лабораторной работе).

С помощью вольтметра V_2 и амперметра A_2 снимем ВАХ двойного зонда $I_2 = f(U_2)$ при фиксированного тока разряда I_p в трубке в диапазоне $-25 \div 25$ В, процессе измерений меняя полярность зонда при нулевом токе. Измерения проведём для $I_p = 4.0$ мА, $I_p = 3.0$ мА и $I_p = 2.3$ мА.

Видно, что чем меньше ток, тем менее крутая кривая получается. Проанализируем графики по отдельности, чтобы найти их наклон в начале и пересечение асимптот с осью ординат. Данные будем заносить в таблицу. Ионный ток насыщения определим череа асимптоты, затем по наклону кривой в точке $U = 0$ найдем концентрацию электронов в плазме.

По данным таблицы видно что $N_D \gg 1 \Rightarrow$ плазму можно с хорошей точностью считать идеальной.

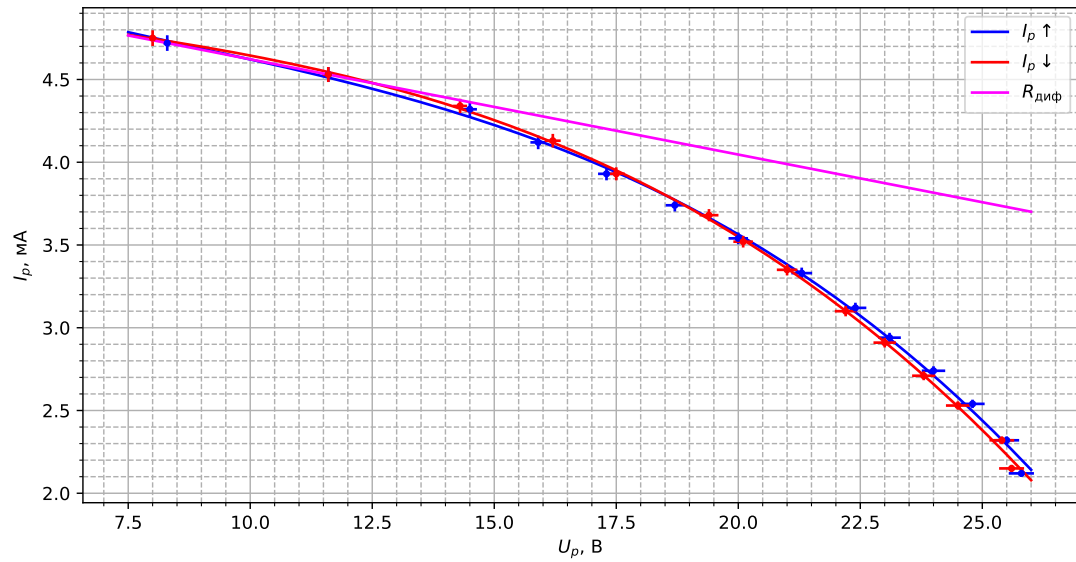


Рис. 1: ВАХ газового разряда в неоне

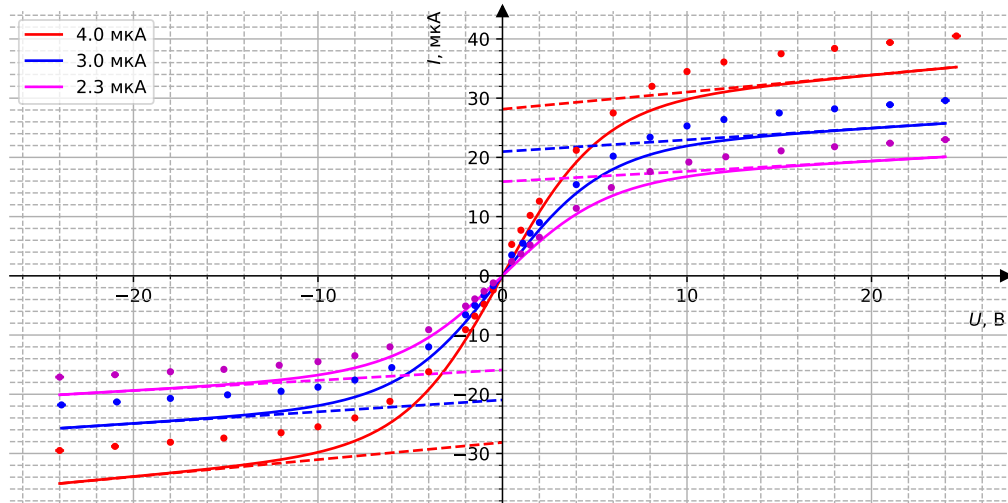


Рис. 2: Зондовые характеристики

| I_p , мА | T_e , 10^4 К | n_e , 10^{14} м $^{-3}$ | ω_p , 10^3 рад/с | r_{De} , 10^{-3} м | r_D , 10^{-4} м | N_D , 10^5 | α , 10^{-7} |
|------------|------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------|----------------|----------------------|
| 4.0 | 3.1 ± 0.8 | 1.4 ± 0.3 | 7.0 ± 0.8 | 10 ± 2 | 10 ± 1 | 5.2 ± 0.6 | 5.2 ± 1.2 |
| 3.0 | 3.1 ± 0.8 | 1.0 ± 0.2 | 6.0 ± 0.7 | 11 ± 2 | 11 ± 1 | 6.0 ± 0.7 | 3.8 ± 0.9 |
| 2.3 | 3.3 ± 0.8 | 0.8 ± 0.2 | 5.2 ± 0.6 | 14 ± 3 | 13 ± 1 | 7.0 ± 0.8 | 2.8 ± 0.7 |

Построим графики $T_e(I_p)$ и $n(I_p)$:

Очевидно, что из-за больших погрешностей эксперимента судить о характере $T_e(I_p)$ невозможно, но зависимость $n(I_p)$ возрастает при повышении тока, потому что больше молекул газа ионизируется, так как выше электрическое поле, выше скорость электронов и больше столкновений.

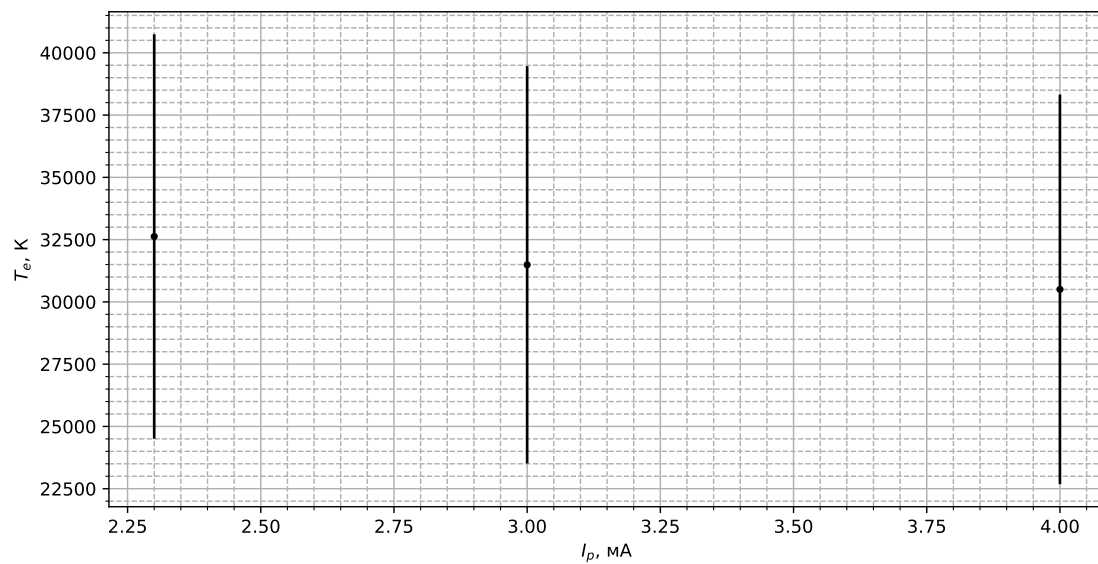


Рис. 3: Зависимость $T_e(I_p)$

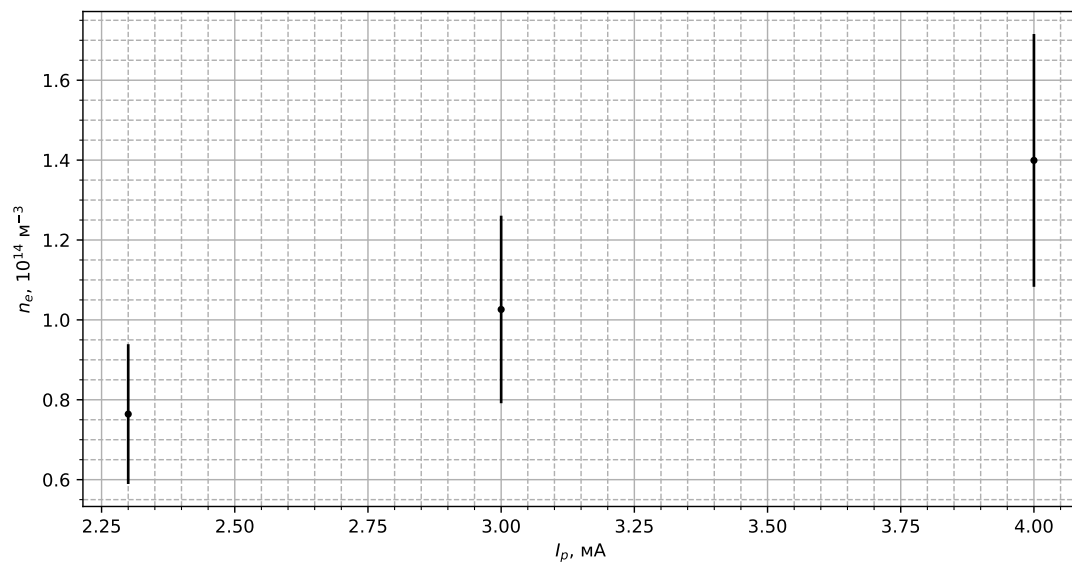


Рис. 4: Зависимость $n(I_p)$

Вывод

В данной лабораторной работе мы исследовали состояние плазмы в тлеющем газовом разряде с помощью двойного зонда. Полученные результаты сходятся с указанными в лабораторной работе по порядку. Плазму в тлеющем разряде можно с хорошей точностью назвать идеальной, так как $N_D \gg 1$.