

Отчёт о выполнении лабораторной работы
№3.5.1

Изучение плазмы газового разряда в неоне.

Устюжанина Мария, Б01-107, ФРКТ

18 ноября 2022 г.

1 Аннотация

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

В работе используются: стеклянная газоразрядная трубка, наполненная неоном; высоковольтный источник питания; источник питания постоянного тока; делитель напряжения; потенциометр; амперметры; вольтметры; переключатели.

2 Теоретические сведения и методика измерений

Тлеющий разряд – электрический разряд в газе низкого давления.

Свечение плазмы – следствие непрерывно идущей рекомбинации электронов и ионов в нейтральные атомы при относительно невысоких температурах. В этом процессе выделяется энергия и уменьшается концентрация электронов и ионов. В тлеющем газовом разряде обычно: «горячие» электроны и «холодные» ионы: $T_e \gg T_i$, так как масса электрона много меньше массы иона $m_e \ll m_i$, следовательно, электроны ускоряются внешним полем почти без потерь энергии, а иону быстро отдают энергию от поля и электронов нейтральным атомам газа и стенкам сосуда.

Дебаевский радиус

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

$$\bar{v}_e \sim \sqrt{\frac{k_B T_e}{m_e}}$$

где T_e – температура электронов. Амплитуду r колебаний электронов относительно ионов оценим как смещение с тепловой скоростью \bar{v}_e за характерное время плазменных колебаний $\frac{1}{\omega_p}$: $r = \frac{\bar{v}_e}{\omega_p}$. Зная, что $\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}}$, получим:

$$r_D = \sqrt{\frac{k_B T_e}{4\pi n_e e^2}} \sim \frac{v_e}{\omega_p}$$

Эту величину называют **дебаевским радиусом** (дебаевской длиной). Из рассмотренного примера видно, что дебаевская длина есть амплитуда ленгмюровских колебаний, возбуждаемых тепловыми флуктуациями. Она задаёт масштаб, на котором возможно спонтанное нарушение квазинейтральности плазмы.

Таким образом, плазменная частота ω_p и дебаевская длина r_D определяют временную и пространственную масштабы коллективного движения электронов относительно ионов.

Плазменная частота

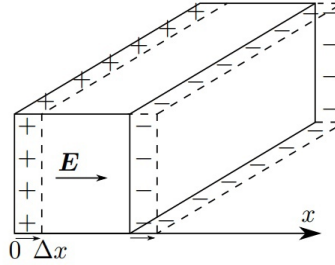


Рис. 1. Плазменные колебания

Теперь выделим параллелепипед с плотностью n электронов, сместим их на x . Возникнут поверхностные заряды плотностью $\sigma = nex$, поле от которых $E = 4\pi e\Delta x$ будет придавать электронам ускорение:

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

откуда получаем уравнение гармонических колебаний:

$$\ddot{x} + \frac{4\pi ne^2}{m}x = 0$$

Следовательно, **плазменная (ленгмюровская) частота** колебаний электронов:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi ne^2}{m}}. \quad (1)$$

Нами получен один из важнейших параметров плазмы. Плазменная частота определяет характерный временной масштаб плазмы - время отклика на флуктуацию плотности заряда в ней. Частота определяет многие физические процессы, включая распространение электромагнитных волн в плазме.

Равновесная и неравновесная плазма

Равновесная плазма - плазма, в которой в состоянии теплового равновесия все частицы (электроны, ионы, нейтральные) имеют максвелловское распределение по скоростям, а их температуры равны: $T_e = T_i = T_n$. При тепловом равновесии с окружающей средой равновесная плазма может существовать неограниченно долго.

Неавновесная плазма - плазма, в которой имеет место разделение температур компонентов, образующих её. При прекращении действия внешних источников неравновесная плазма исчезает в течение малых долей секунды ($\sim 10^{-5} - 10^{-4}$).

В нашем эксперименте плазма является неравновесной.

3 Экспериментальная установка

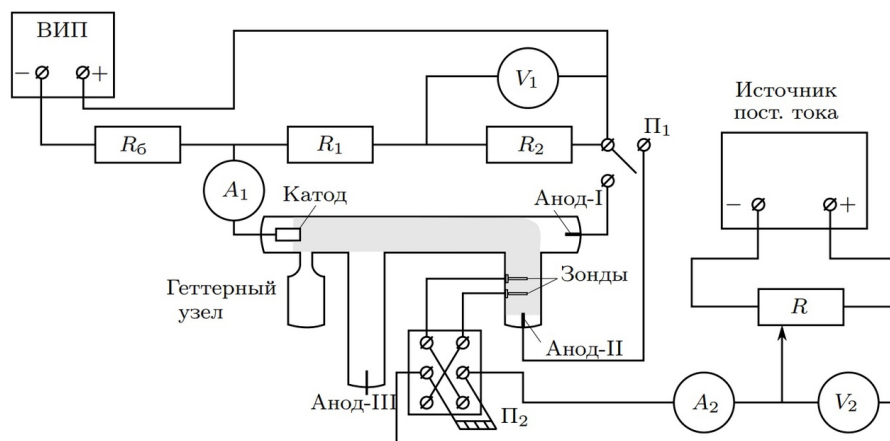


Рис. 2. Экспериментальная установка

Параметры нашей установки:

- Давление в трубке = 2 мм рт. ст.
- $d = 0,2$ мм
- $l = 5,2$ мм

4 Результаты измерений и обработка данных

4.1 Вольт-амперная характеристика

Построим вольт-амперную характеристику разряда в координатах $I_p(U_p)$. По наклону кривой определим максимальное дифференциальное сопротивление разряда $R_{\text{дифф}}$

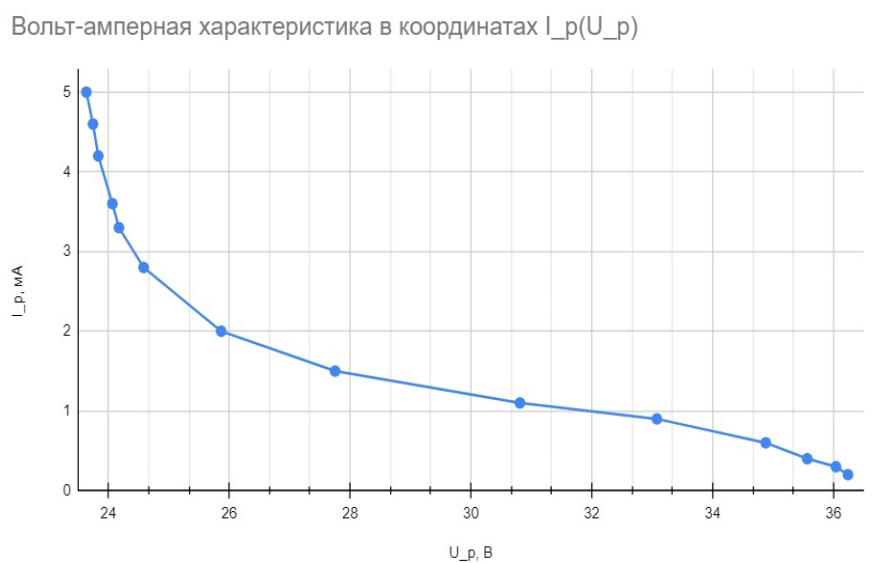


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика разряда

$$R_{\text{дифф}} = \frac{dU}{dI} = \frac{24,66}{2} = 12,33$$

Полученная нами часть вольт-амперной характеристики соответствует участку ДГ ВАХ разряда в неоне при давлении 1 тор (см. Рис.4).

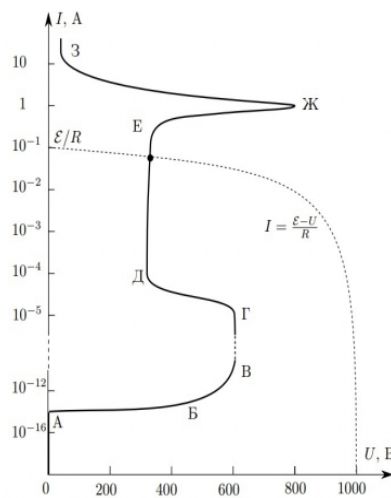


Рис. 4.

Вольт-амперная характеристика разряда в неоне при давлении 1 тор.

4.2 Зондовые характеристики

Построим зондовые характеристики $I(U)$ для трех токов: $I_1 = 5A$, $I_2 = 3A$, $I_3 = 0,5A$. Рассчитаем для каждого тока ионный ток насыщения I_{in} , наклон характеристики в начале координат $\frac{dI}{dU}$, температуры электронов T_e , концентрации электронов и ионов в плазме n_e, n_i ($S = \pi dl$). Полученные формулы представлены в таблице 1.

График зависимости I, мкА от U, В

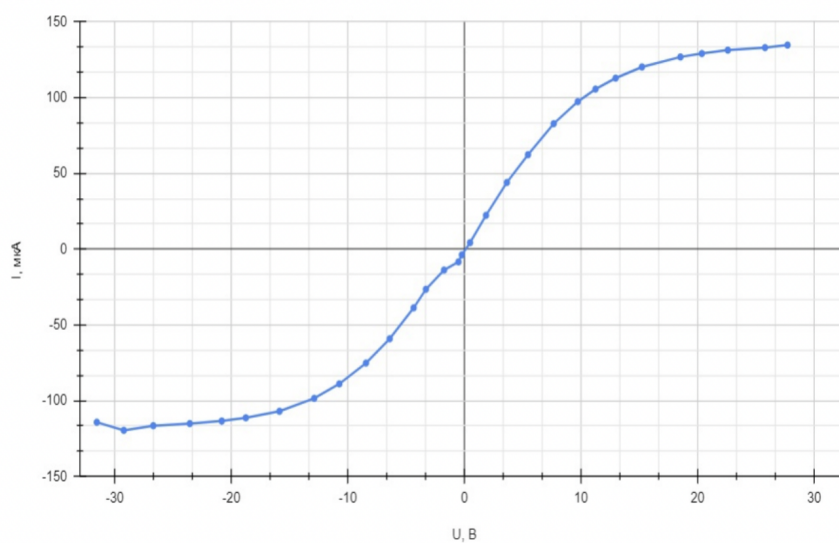


Рис. 4. Зондовая характеристика при $I = 5A$

График зависимости I , мкА от U , В

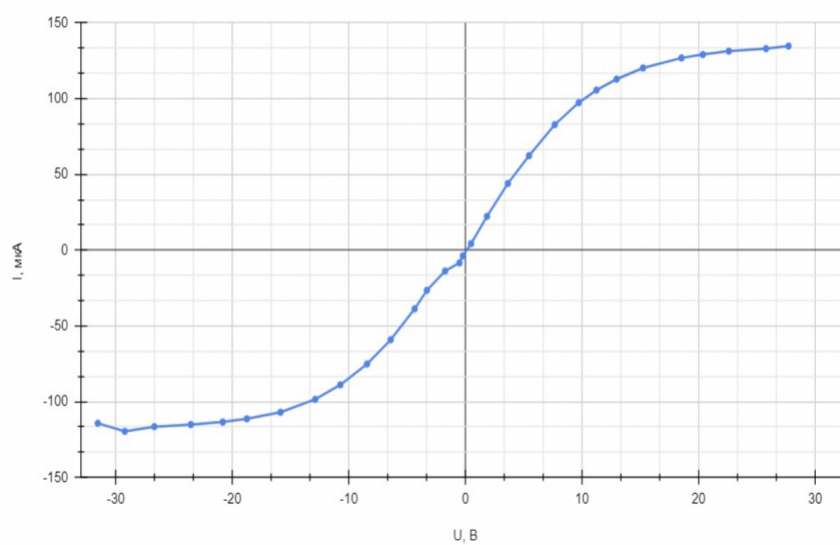


Рис. 5. Зондовая характеристика при $I = 3A$

График зависимости I , мкА от U , В

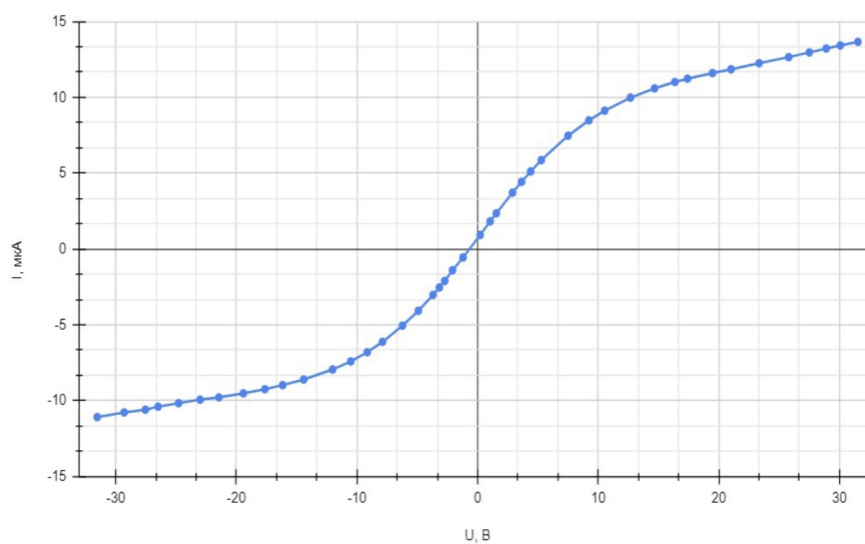


Рис. 6. Зондовая характеристика при $I = 0.5A$

Табл. 1. Результат.

I, mA	I_{in} , mA	dI/dU	T_e , K	$n_i M^{-3}$	$n_e M^{-3}$
5	110	$1,07 \cdot 10^{-5}$	37192,8	$7,5 \cdot 10^{16}$	$8,2 \cdot 10^{16}$
3	60	$7,08 \cdot 10^{-6}$	30689,8	$4,5 \cdot 10^{16}$	$5,3 \cdot 10^{16}$
0,5	8	$9,8 \cdot 10^{-7}$	29676,9	$6,12 \cdot 10^{15}$	$8,0 \cdot 10^{15}$

ω_p , 1/c	r_{De} , 10^{-3} cm	N_D
171212,8	5,5	53754,1
136542,9	6,3	47698,8
53098,12	16,0	104578,04

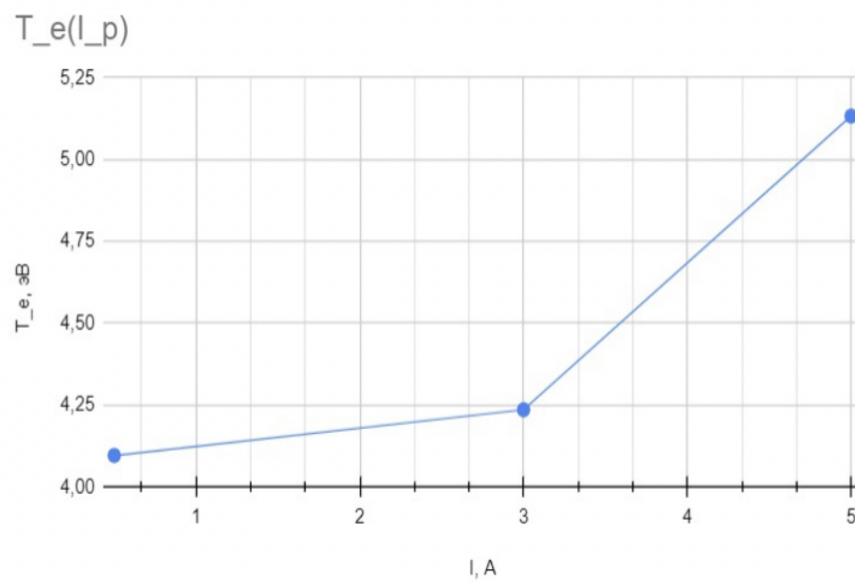


Рис. 7. График зависимости $T_e(I_p)$

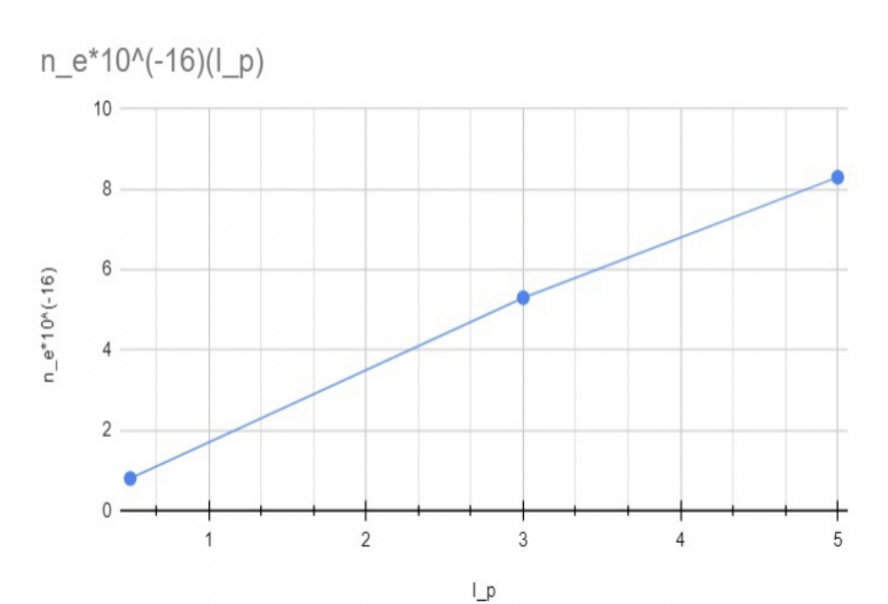


Рис. 8. График зависимости $n_e(I_p)$

5 Выводы

1. В этой работе мы изучили ВАХ тлеющего разряда.
2. Затем мы занялись изучением свойств плазмы методом зондовых характеристик. Мы получили что температура электронов у нас имеет порядок $10^4 K$, когда $kT_e \simeq 1 eV$. Концентрация электронов в плазме получилась порядка $10^{18} m^{-3}$. Плазменная частота колебаний $\omega \simeq 10^6 rad/sec$. Дебаевский радиус порядка $10^{-3} m$ и число ионов в нём много больше единицы.