

3.5.1. Изучение плазмы газового разряда в неоне.

Дорогинин Д.В.

Группа Б02-825

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.

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

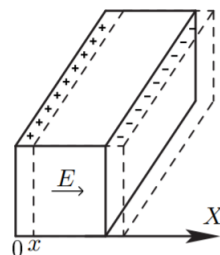
$$\varphi = \frac{Ze}{r} e^{-r/r_D}, \quad (3)$$

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:

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

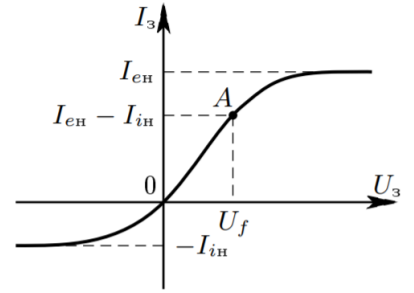
где $\langle v_e \rangle$ и $\langle v_i \rangle$ – средние скорости электронов и ионов, S – площадь зонда, n – плотность электронов и ионов. Скорости электронов много больше скорости ионов, поэтому $I_{i0} \ll I_{e0}$. Зонд будет заряжаться до некоторого равновесного напряжения $-U_f$ – *плавающего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

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



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 ($I_1 = -I_2 = I$):

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

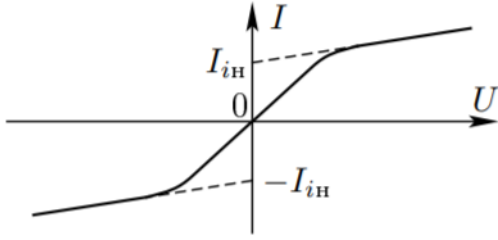
$$\Delta U_2 = \frac{kT_e}{e} \ln \left(1 + \frac{I}{I_{in}} \right)$$

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

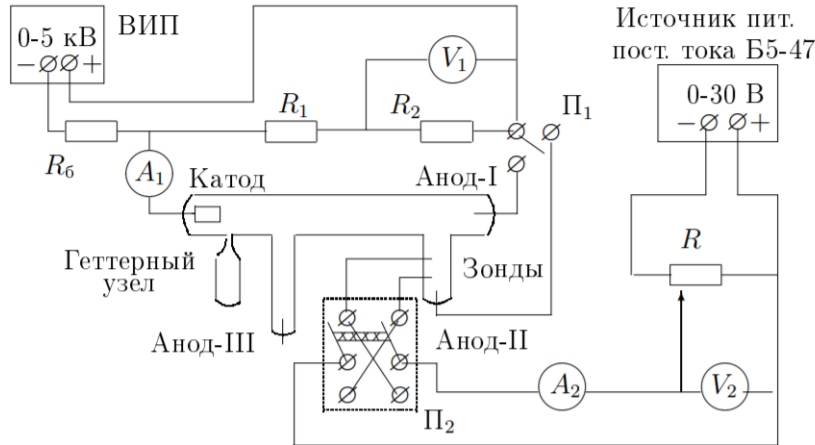
$$I = I_{in} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e} + AU. \quad (11)$$



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) 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 .

Ход работы

Измеряем напряжение зажигания в лампе: $U_{\text{зж}} = 25.7 \pm 0.2$ В.

С помощью вольтметра V_1 и амперметра A_1 снимаем ВАХ разряда $U_1 = f(I_p)$ для тока в диапазоне $0.5 \div 5$ мА (см. Таблица 1). Построим график:

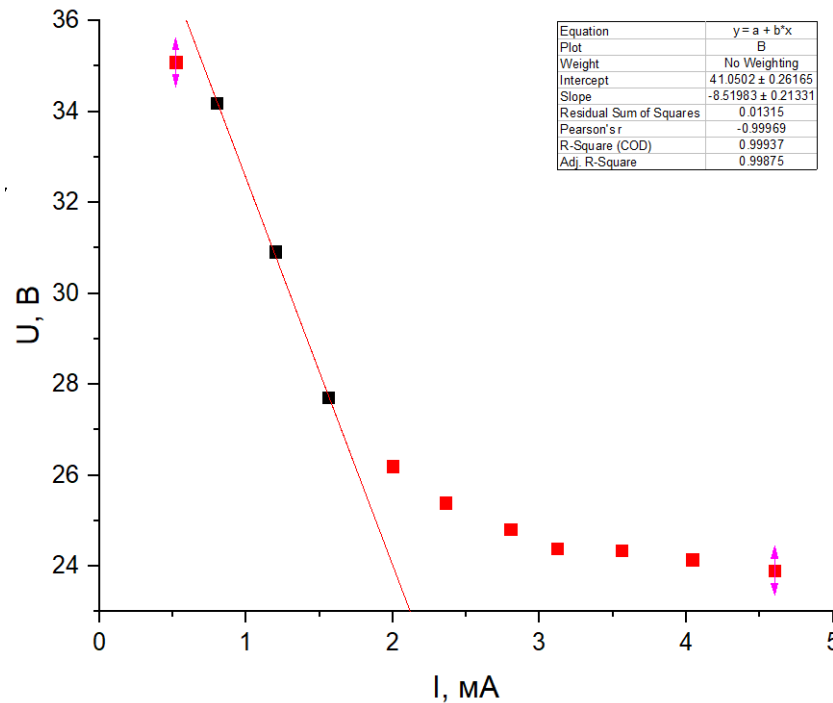
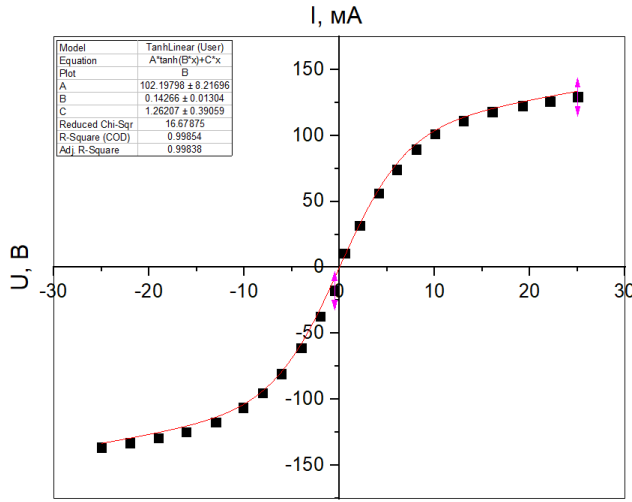


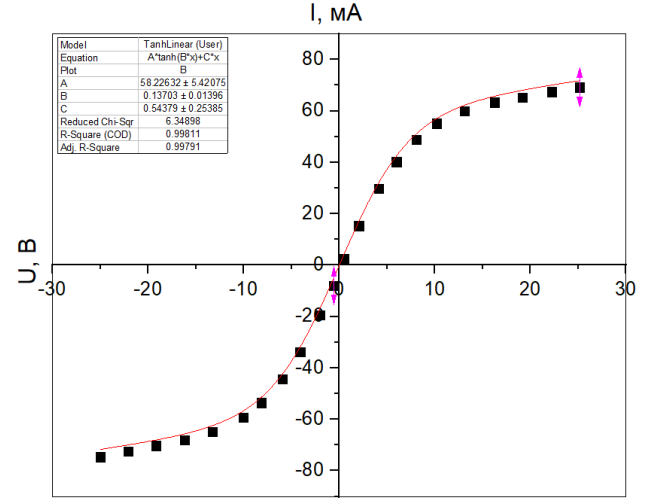
Рис. 1: Вольт-амперная характеристика разряда.

По наклону определим максимальное сопротивление заряда (с учётом того, что вольтметр подключен через делитель напряжения с коэффициентом 10): $R_{\text{max}} = (8.5 \pm 0.2) \cdot 10^4$ Ом. 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 $I_p = 5$ мА, $I_p = 3$ мА и $I_p = 1.5$ мА (Таблица 2).

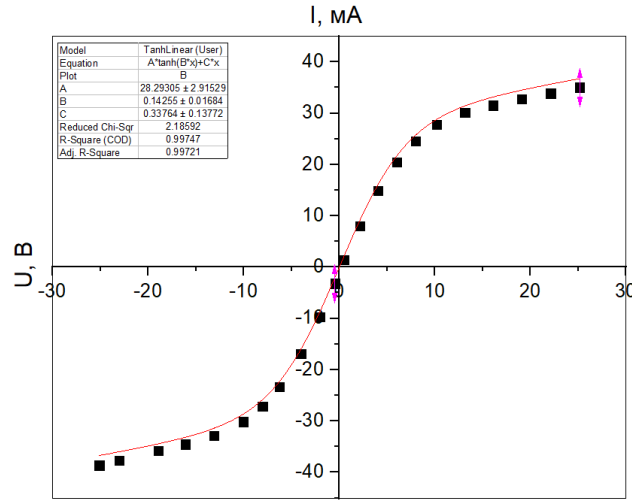
Результаты измерений представим на графиках с отцентрированными $\left(I_0 = \frac{1}{2} \sum I\right)$:



(a) ВАХ двойного зонда, $I = 5.0$ мА.



(b) ВАХ двойного зонда, $I = 3.0$ мА.



(c) ВАХ двойного зонда, $I = 1.5$ мА.

Приближая кривые формулой $I = Ath(BU) + CU$, найдём токи насыщения I_{in} и температуры электронов T_e .

Считая концентрации ионов и электронов равными, найдём 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 занесём все результаты в таблицу.

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}
5.0	41 ± 4	58 ± 6	144 ± 10	49 ± 3	30	24
3.0	42 ± 4	33 ± 4	107 ± 9	66 ± 5	40	13
1.5	41 ± 6	16 ± 2	75 ± 8	94 ± 10	57	7

Результаты измерений

U_1 , В	23.9	24.15	24.35	24.4	24.81	25.40	26.20	27.71	30.92	34.19	35.09
I_p , мА	4.60	4.04	3.56	3.12	2.80	2.36	2.00	1.56	1.20	0.80	0.52

Таблица 1: Зависимость $U_1 = f(I_p)$.

$I_p = 5.0$ мА		$I_p = 3.0$ мА		$I_p = 1.5$ мА	
U_2 , В	I_2 , мкА	U_2 , В	I_2 , мкА	U_2 , В	I_2 , мкА
25.01	126.20	25.13	66.86	25.15	33.67
22.11	122.84	22.23	65.03	22.09	32.50
19.23	119.52	19.14	62.97	19.06	31.36
16.04	114.79	16.23	60.95	16.09	30.18
13.02	108.13	13.12	57.65	13.13	28.78
10.00	97.96	10.21	52.78	10.18	26.37
8.04	86.26	8.04	46.57	7.98	23.24
6.01	71.00	5.98	37.85	5.99	19.09
4.12	53.02	4.14	27.46	4.03	13.50
2.10	28.54	2.04	12.96	2.13	6.61
0.54	7.63	0.48	0.085	0.52	0.04
-24.99	-139.73	-24.98	-77.00	-25.11	-40.02
-22.03	-136.27	-22.09	-74.82	-23.02	-39.05
-19.02	-132.46	-19.17	-72.64	-18.96	-37.15
-16.12	-128.01	-16.17	-70.34	-16.12	-35.90
-13.00	-120.47	-13.25	-67.17	-13.09	-34.20
-10.13	-109.59	-10.05	-61.57	-10.04	-31.49
-8.06	-98.48	-8.16	-55.87	-8.03	-28.49
-6.12	-83.83	-5.98	-46.69	-6.26	-24.73
-4.02	-64.11	-4.11	-36.10	-4.04	-18.30
-2.02	-40.20	-2.05	-21.73	-2.05	-11.05
-0.54	-20.79	-0.57	-10.27	-0.47	-4.56

Таблица 2: Зависимость $I_2 = f(U_2)$.