

Изучение плазмы газового разряда в неоне (3.5.1)

Стеценко Георгий, Б02-312

1 Цель работы

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

2 Теоретические сведения

2.1 Плазма

В ионизированном газе поле ионов «экранируется» электронами. Для поля \mathbf{E} и плотности ρ электрического заряда

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\rho/\varepsilon_0,$$

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 $r_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 kT_e}{ne^2}}$ – *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:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{eE}{m} = -\frac{ne^2}{m\varepsilon_0}x.$$

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

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi ne^2}{m\varepsilon_0}}. \quad (5)$$

2.2 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:

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

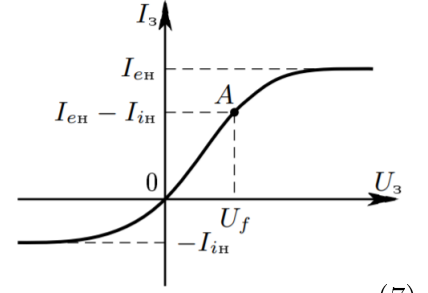
где $\langle v_e \rangle$ и $\langle v_i \rangle$ – средние скорости электронов и ионов, S – площадь зонда, n – плотность электронов и ионов. Скорости электронов много больше скорости ионов, поэтому $I_{i0} \ll I_{e0}$. Зонд будет заряжаться до некоторого равновесного напряжения $-U_f$ – *плавающего 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

$$\begin{aligned} U_1 &= -U_f + \Delta U_1, \\ U_2 &= -U_f + \Delta U_2. \end{aligned}$$

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 ($I_1 = -I_2 = I$):

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= \frac{kT_e}{e} \ln \left(1 - \frac{I}{I_{in}}\right) \\ \Delta U_2 &= \frac{kT_e}{e} \ln \left(1 + \frac{I}{I_{in}}\right) \end{aligned}$$

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока

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

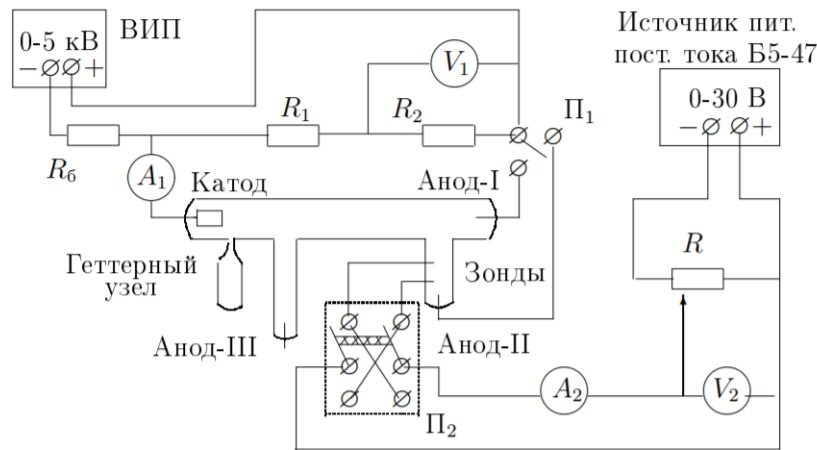
Реальная зависимость выглядит несколько иначе и описывается формулой

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

3 Методика измерений и результаты

В работе используются: стеклянная газоразрядная трубка, наполненная изотопом неона, высоковольтный источник питания (ВИП), источник питания постоянного тока, делитель напряжения, резистор, потенциометр, амперметры, вольтметры, переключатели.

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 анодом (I и II) с помощью переключателя Π_1 подключается через балластный резистор R_6 ($\approx 450\text{ k}\Omega$) 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 ($25\text{ M}\Omega$) делитель напряжения с коэффициентом $(R_1 + R_2)/R_2 = 10$.

С учётом конечного сопротивления вольтметра $R_V = 10\text{ M}\Omega$, он показывает заниженные по сравнению с ожидаемыми в $\alpha = 12.3$ раз. 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 .

В работе имеются следующие части: определение напряжения зажигания и гашения, снятие ВАХ, снятие зондовых характеристик.

4 Результаты измерений

Найдём для начала напряжение зажигания:

V_{ign}	203	201	199	196	202
$V_{\text{ign.avg}}$	200				

Теперь снимем ВАХ катод-анод на увеличение и падение тока и построим её график.

I , mA	0,508	0,808	1,107	1,400	1,723	2,007	2,357	2,604	2,928	3,207	3,500	3,934	4,110	4,451	4,723	5,019
U_V , V	35,15	34,17	32,51	28,56	26,19	24,86	23,56	22,73	21,63	20,84	20,39	20,03	19,81	19,4	19,22	18,96
U , V	430,6	418,6	398,2	349,9	320,8	304,5	288,6	278,4	265,0	255,3	249,8	245,4	242,7	237,7	235,4	232,3
I , mA	5,019	4,705	4,349	4,11	3,782	3,504	3,202	2,893	2,59	2,305	1,999	1,689	1,33	1,03	0,807	0,374
U_V , V	18,96	19,2	19,48	19,82	20,14	20,22	20,75	21,68	22,75	23,62	24,78	26,3	29,35	32,63	34,15	35,6
U , V	232,3	235,2	238,6	242,8	246,7	247,7	254,2	265,6	278,7	289,3	303,6	322,2	359,5	399,7	418,3	436,1

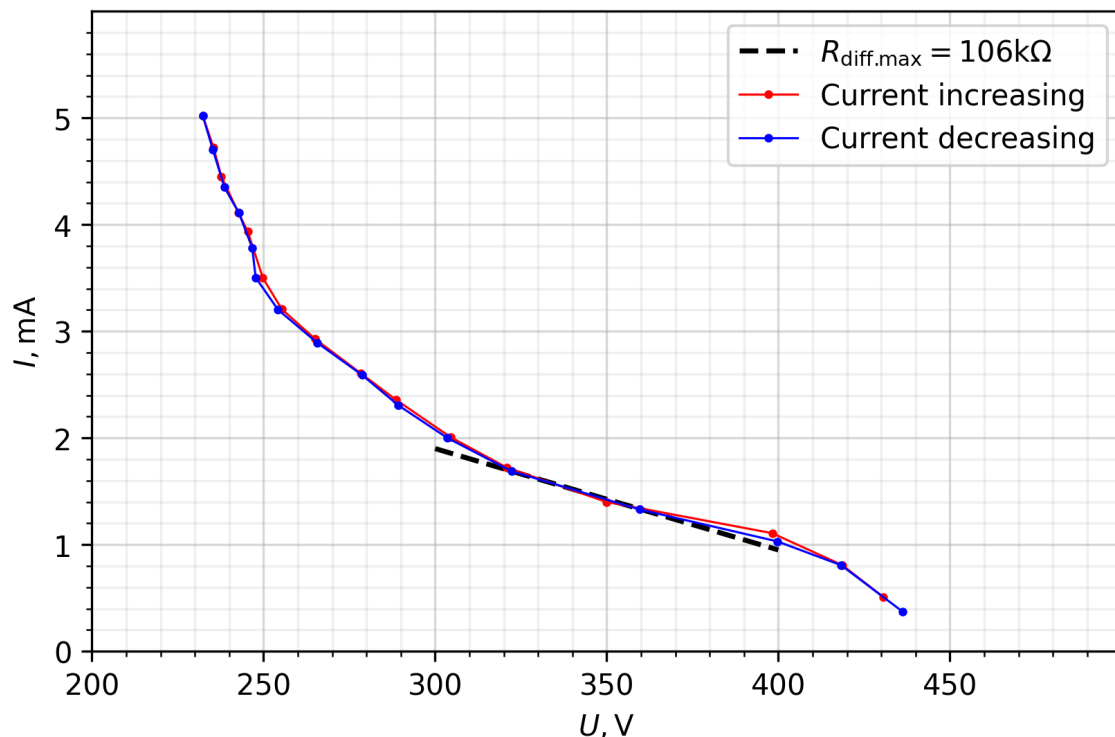


Рис. 1: ВАХ катод-анод

По минимальному углу наклона так же найдём максимальное дифференциальное сопротивление $R_{\text{dif}} = 106 \text{ k}\Omega$.

Теперь снимем зондовые характеристики для анодных токов 5 mA, 3.0 mA, 1.5 mA (см. приложение). По полученным данным построим график ???. На график, кроме того, нанесены аппроксимации функциями вида $A \cdot \tanh(BU) + C \cdot U + D$. Выпишем получившиеся параметры аппроксимации:

	A, uA	B, 1/V	C, uA/V	D, uA
5 mA	84.8	0.133	1.37	-6.45
	± 8.5	± 0.014	± 0.39	± 0.79
3 mA	55.6	0.122	0.51	-4.07
	± 2.5	± 0.005	± 0.11	± 0.19
1.5 mA	27.0	0.132	0.316	-2.37
	± 0.6	± 0.003	± 0.028	± 0.55

Поймём, что по сути своей $A = I_{\text{н.п.}}$, $B = \frac{e}{2kT_e}$.

$$kT_{e1} = \frac{1}{2 \cdot 0.133} \text{ eV} \approx (3.8 \pm 0.4) \text{ eV}$$

$$kT_{e2} = \frac{1}{2 \cdot 0.122} \text{ eV} \approx (4.1 \pm 0.2) \text{ eV}$$

$$kT_{e3} = \frac{1}{2 \cdot 0.132} \text{ eV} \approx (3.8 \pm 0.1) \text{ eV}$$

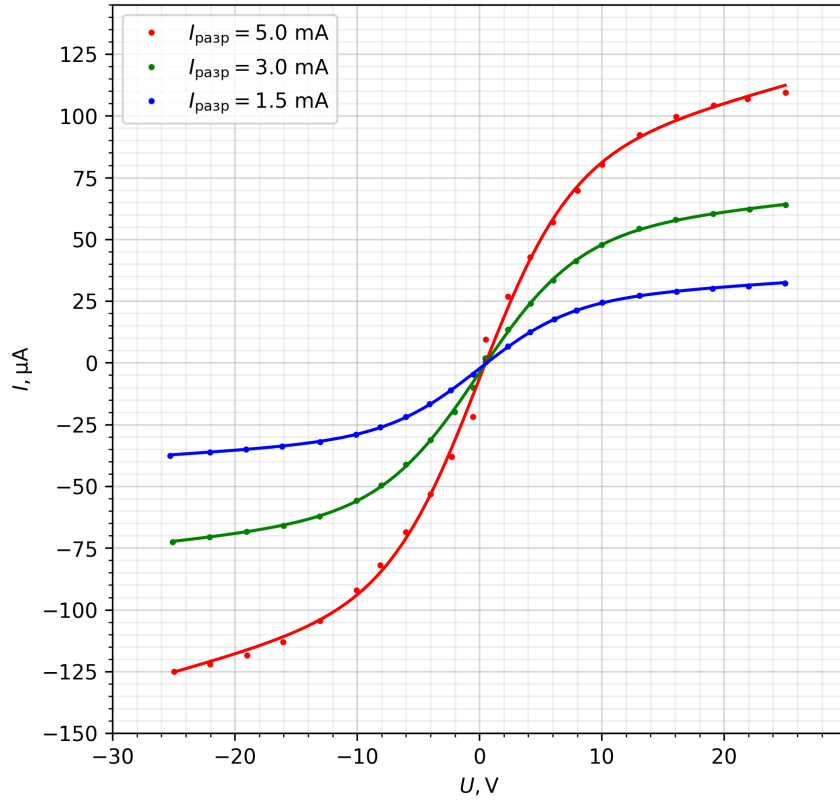


Рис. 2: Зондовая характеристика

Пользуясь (??), найдём концентрацию ионов в плазме.

$$n_{1i} = 6.7 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$$

$$n_{2i} = 6.5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$$

$$n_{3i} = 6.7 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$$

В общем и целом ионная концентрация остается почти одинаковой. Это согласуется со свойством самоорганизации нормального тлеющего разряда – ток в нем растёт за счёт увеличения размеров катодного пятна, при этом концентрация носителей остается неизменной. Примем $n_{\text{ср}} = 6.6 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$. Тогда так как концентрация неионизованных частиц $n = 6.4 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, степень ионизации $\alpha \sim 10^{-6}$.

Найдём теперь дебаевский радиус

$$r_D = 58.4 \mu\text{m}$$

и количество ионов в дебаевской ячейке

$$N_i = n_i \cdot 4/3\pi r_D^3 = 56000 \geq 1$$

что означает, что плазму можно считать идеальной.

5 Обсуждение результатов и выводы

В ходе работы были сняты вольтамперные и зондовые характеристики тлеющего разряда, обнаружена большая разница в температурах ионов и электронов в нем ($T_e \sim 40000\text{K}$), независимость концентрации носителей заряда от величины анодного тока, вычислен дебаевский радиус и показано, что плазму можно считать идеальной. Полученные результаты хорошо качественно согласуются с теорией.

6 Приложение

5 mA		3 mA		1.5 mA	
U_3, V	$I_3, \mu A$	U_3, V	$I_3, \mu A$	U_3, V	$I_3, \mu A$
25,05	109,50	25,05	63,94	25,01	32,22
21,94	106,90	22,08	62,12	22,02	31,10
19,16	104,34	19,11	60,28	19,07	30,04
16,07	99,70	16,05	57,94	16,14	28,91
13,08	92,26	13,05	54,32	13,09	27,25
10,03	80,30	9,99	47,80	10,05	24,38
8,00	69,63	7,91	41,15	7,92	21,22
6,01	56,87	6,02	33,39	6,11	17,55
4,16	42,78	4,17	24,03	4,16	12,49
2,33	26,83	2,33	13,43	2,33	6,74
0,51	9,38	0,49	1,81	0,51	0,20
-0,53	-21,83	-0,50	-10,08	-0,50	-4,61
-2,25	-38,00	-2,04	-19,89	-2,33	-11,14
-4,02	-53,26	-4,01	-31,31	-4,10	-16,76
-6,02	-68,51	-6,02	-41,31	-6,02	-21,80
-8,11	-81,92	-8,05	-49,52	-8,13	-26,07
-10,03	-92,10	-10,05	-55,77	-10,09	-29,01
-13,02	-104,39	-13,06	-62,19	-13,04	-31,96
-16,05	-113,00	-16,00	-65,92	-16,14	-33,80
-19,00	-118,50	-19,06	-68,45	-19,08	-35,10
-22,03	-122,12	-22,07	-70,48	-22,01	-36,30
-24,98	-125,00	-25,08	-72,48	-25,30	-37,70