

Лабораторная работа 3.5.1

Изучение плазмы газового разряда в неоне.

6 сентября 2021 г.

Старченко Иван Александрович

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

1. Теоретические сведения

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

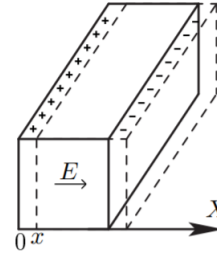
$$\varphi = \frac{Ze}{r} e^{-r/r_D}, \quad (3)$$

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

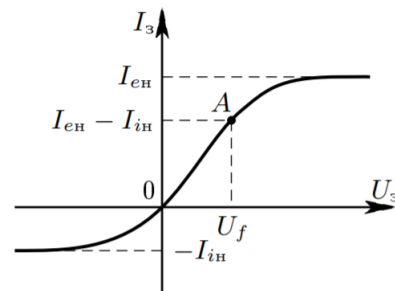
При внесении в плазму уединённого проводника – *зонда* – с потенциалом, изначально равным потенциалу точки плазмы, в которую его помещают, на него поступают токи электронов и ионов:

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

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_z на зонд и снимать значение зондового тока I_z . 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 ($I_1 = -I_2 = I$):

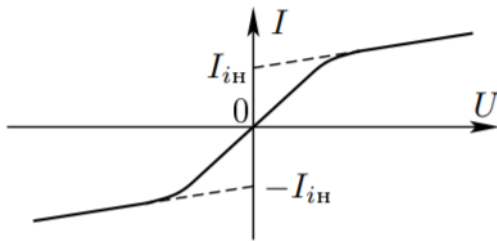
$$\Delta U_1 = \frac{kT_e}{e} \ln \left(1 - \frac{I}{I_{in}}\right)$$

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

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

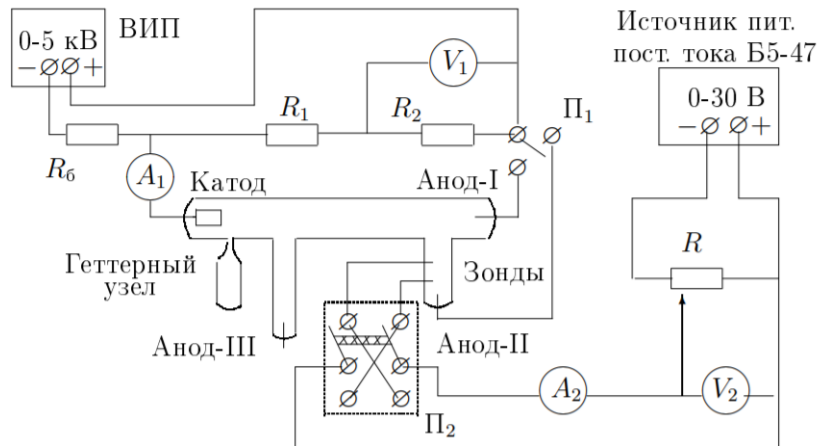


$$I = I_{in} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e} + AU. \quad (11)$$

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:

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

2. Экспериментальная установка



Стеклянная газоразрядная трубка имеет холодный (ненакаливаемый) полый катод, три анода и *геттерный* узел – стеклянный баллон, на внут-

ренную повехность которого напылена газопоглощающая плёнка (*getter*). Трубка наполнена изотопом неона ^2Ne 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 (≈ 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 $(R_1 + R_2)/R_2 = 10$.

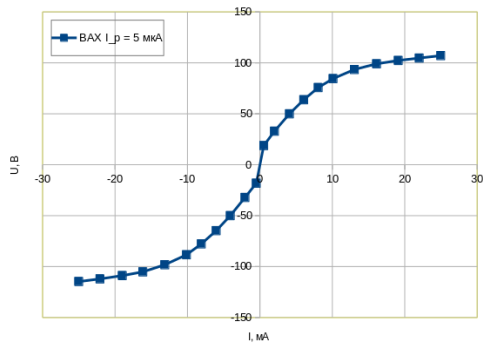
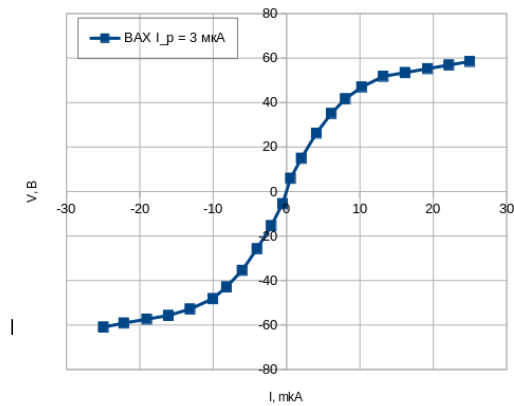
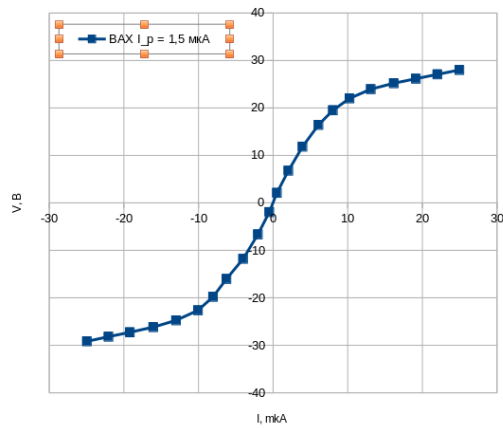
При подключении к ВИП анода-II разряд возникает в пространстве между катодом и анодом-II, где находятся двойной зонд, используемый для диагностики плазмы положительного столба. Зонды изготовлены из молибденовой проволоки диаметром $d = 0.2$ мм и имеют длину $l = 5.2$ мм. Они подключены к источнику питания 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

1) Подготовим приборы к работе. плавно увеличив выходное напряжение ВИП, определим напряжение зажигания ($U_{\text{зак}} = 22,8$ В)

2) С помощью вольтметра V_1 и амперметра A_1 снимем ВАХ $U_P(I_P)$. Данные представлены в таблице, приведенной в конце.

3) Снимем ВАХ двойного зонда с помощью мультиметров A_2 и V_2 при $I_p = 5, 3, 1.5$ mA. Занесем в таблицу полученные данные (таблица приведена в конце).

(a) ВАХ двойного зонда, $I = 5.0$ мА.(b) ВАХ двойного зонда, $I = 3.0$ мА.(c) ВАХ двойного зонда, $I = 1.5$ мА.

4. Аппроксимация полученных данных

5. Вывод

6. Список используемой литературы

- Никулин М.Г. Лабораторный практикум по общей физике. Электричество и магнетизм

- Описание лабораторных работ на кафедре общей физики МФТИ
- П.В. Попов, А.А. Нозик. Обработка результатов учебного эксперимента

U_p , В	48	61	71	81	90	100	110	120	130	140	150
I_p , мА	29.56	27.49	27.33	26.64	25.90	25.00	24.52	24.27	24.32	24.36	24.46

Таблица 1: Зависимость $U_P(I_P)$ в сторону увеличения

		U_p , В	10	19	25	35	45				
		I_p , мА	35.12	24.48	33.90	32.98	30.72				
U_p , В	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	
I_p , мА	28.96	27.63	27.26	26.66	26.40	25.12	24.68	24.38	24.34	24.34	

Таблица 2: Зависимость $U_P(I_P)$ в сторону уменьшения

$I_p = 5.0 \text{ мА}$		$I_p = 3.0 \text{ мА}$		$I_p = 1.5 \text{ мА}$	
$U_2, \text{ В}$	$I_2, \text{ мкА}$	$U_2, \text{ В}$	$I_2, \text{ мкА}$	$U_2, \text{ В}$	$I_2, \text{ мкА}$
24.97	107.06	24.96	58.46	24.96	28.01
22.00	104.70	22.13	56.90	22.01	27.08
19.10	102.31	19.22	55.24	19.13	26.16
16.11	99.04	16.15	53.48	16.17	25.21
13.04	93.46	13.18	51.18	13.09	23.96
10.10	84.50	10.24	47.01	10.24	22.02
8.05	75.71	8.01	41.69	8.01	19.51
6.05	63.77	6.09	35.10	6.08	16.44
4.08	49.95	4.06	26.26	3.94	11.85
2.01	32.88	2.02	44.94	2.04	6.78
0.53	18.74	0.55	5.95	0.51	2.12
-0.50	-18.19	-0.55	-5.47	-0.51	-1.94
-2.06	-32.18	-2.09	-15.34	-2.04	-6.63
-4.09	-50.01	-4.03	-25.73	-4.02	-11.78
-6.03	-64.73	-6.05	-35.44	-6.25	-16.02
-8.09	-77.76	-8.19	-42.88	-8.05	-19.79
-10.14	-88.44	-10.05	-48.17	-10.07	-22.63
-13.13	-98.22	-13.15	-52.81	-13.01	-24.75
-16.16	-105.20	-16.11	-55.71	-16.06	-26.17
-19.00	-108.87	-19.04	-57.36	-19.20	-27.26
-22.08	-112.12	-22.18	-59.12	-22.06	-28.19
-25.01	-114.71	-24.96	-60.94	-24.95	-29.16

Таблица 3: Зависимость $U_3(I_3)$.