

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
ФИЗТЕХ-ШКОЛА РАДИОТЕХНИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

---

Лабораторная работа 3.5.1  
**Изучение плазмы газового разряда в неоне.**

---

Устюжанина Мария  
Группа Б01-107

**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 Теоретическая часть и методика:

**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  $\omega_p$  и дебаевская длина  $r_D$  определяют временную и пространственную масштабы коллективного движения электронов относительно ионов.

## Плазменная частота

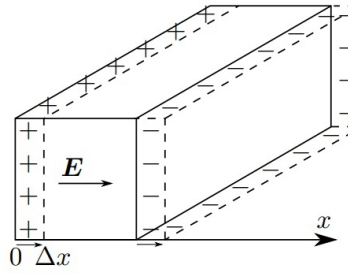


Рис. 1: Плазменные колебания

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:

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

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.

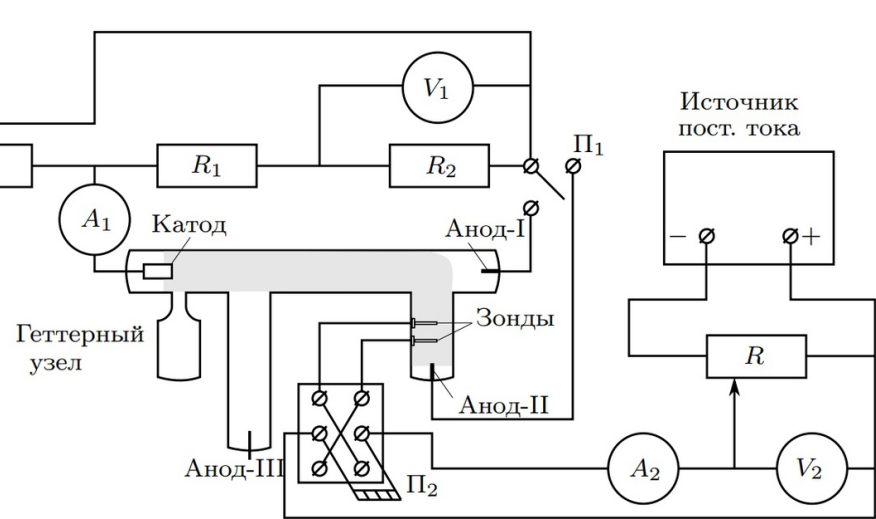


Рис. 2: Экспериментальная установка

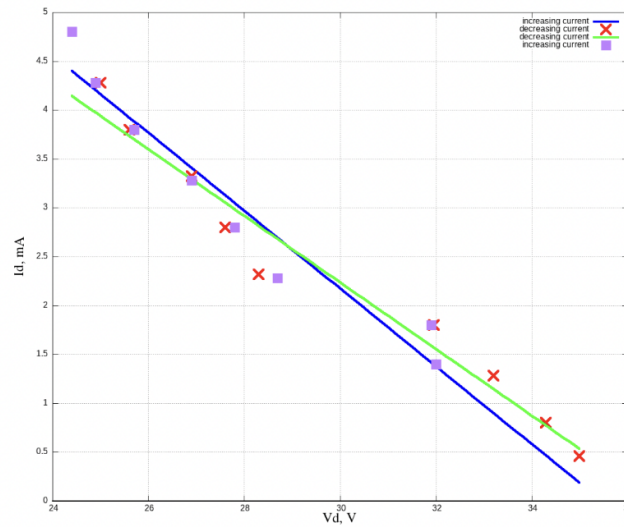
2   Ход работы:

2.1   Вольт-амперная характеристика разряда

Установим переключатель  $\Pi_1$  в положение "Анод-I". Установим напряжение, подаваемое с ВИП в 0. Плавно увеличивая выходное напряжение ВИП, определим напряжение зажигания разряда  $V_d$  (По показания вольметра  $V_1$  непосредственно перед зажиганием). Получим:  $V_d = 230\text{ V}$

Снимем с помощью вольтметра  $V_1$  и амперметра  $A_1$  ВАХ разряда  $I_d(V_d)$ . Изменять ток разряда  $I_{dsch}$  будем в диапазоне  $(0.5\text{ mA} - 5\text{ mA})$ .

U, V	I, mA
32	1.4
31.9	1.8
28.7	2.28
27.8	2.8
26.9	3.28
25.7	3.8
24.9	4.28
24.4	4.8
25	4.28
25.6	3.8
26.9	3.32
27.6	2.8
28.3	2.32
31.96	1.8
33.2	1.28
34.3	0.8
35	0.46



Опроксимировав уравнением ( $y = kx + b$ ) получим уравнения для уменьшения тока:

$$k = (-0.34 \pm 0.02) \text{ mA/V}$$

$$b = (12.5 \pm 0.08) \text{ mA}$$

И для повышения тока:

$$k = (-0.40 \pm 0.03) \text{ mA/V}$$

$$b = (14.1 \pm 0.09) \text{ mA}$$

Как видно из графиков, прямые очень похожи. По их наклону определим дифференциальное сопротивление разряда:

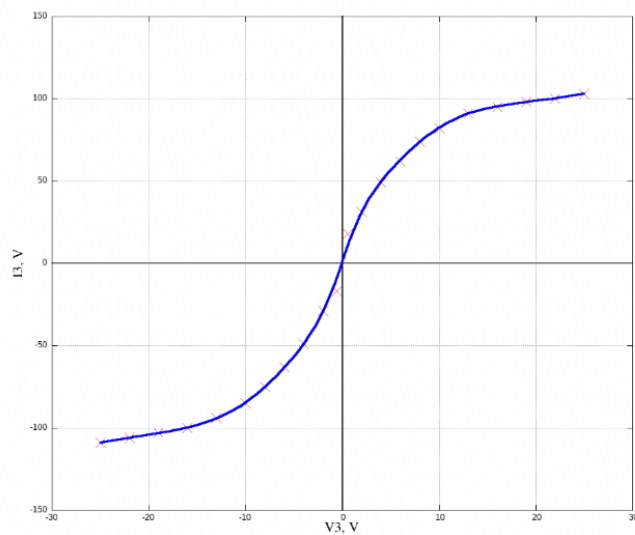
$$R_{diff} = \frac{dV}{dI} = (-2.5 \pm 0.18) \cdot 10^3 \Omega$$

## 2.2 Зондовые характеристики

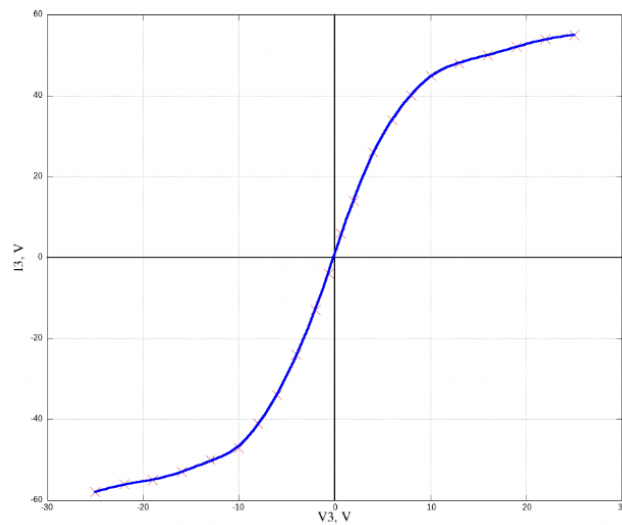
Уменьшим напряжение ВИП до 0. Переведём переключатель  $\Pi_1$  в положение "Анод-П переключатель  $\Pi_2$  в положение "+". Плавно увеличим напряжение ВИП и установим разрядный ток  $I_d = 5 \text{ mA}$ . Включим в сеть источник питания постоянного тока и установим на нем выходное напряжение  $V_2 = 25 \text{ V}$ . При помощи потенциометра  $R$  установим на зонде максимальное напряжение  $V_{@} = 25 \text{ V}$ . С помощью амперметра  $A_2$  и вольтметра  $V_2$  снимем ВАХ двойного зонда  $I_3 (V_3)$ . Измерим ВАХ также при  $I_d = 3 \text{ mA}$  и  $I_d = 1.5 \text{ mA}$

$I_d = 5 \text{ mA}$		$I_d = 3 \text{ mA}$		$I_d = 1.5 \text{ mA}$	
$V_3, \text{ V}$	$I_3, \text{ mA}$	$V_3, \text{ V}$	$I_3, \text{ mA}$	$V_3, \text{ V}$	$I_3, \text{ mA}$
25	103	25	55	25	27
22	100	22	54	22	26
19	98	19	52	19	25
16	95	16	50	16	24
13	91	13	48	13	23
10	82	10	45	10	21
8	74	8	40	8	19
6	62	6	34	6	16
4	49	4	26	4	12
2	31	2	14	2	6.5
0.6	18	0.6	6	0.6	2
-0.6	17	-0.6	4	-0.6	2
-2	29	-2	13	-2	6
-4	49	-4	24	-4	12
-6	63	-6	34	-6	16
-8	75	-8	41	-8	19
-10	85	-10	47	-10	22
-13	94	-13	50	-13	24
-16	100	-16	53	-16	25
-19	103	-19	55	-19	26
-22	106	-22	56	-22	27
-25	109	-25	58	-25	28

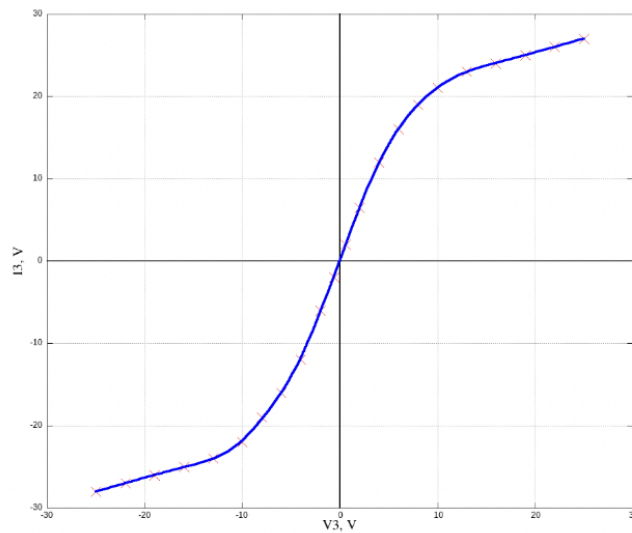
$I_d = 5 \text{ mA}$ :



$I_d = 3 \text{ mA}$ :



$I_d = 1.5 \text{ mA}$ :



По ВАХ для всех трёх значений  $I_d$  легко убедиться что участки кривой при больших напряжениях выходят на асимптоты.

Из графиков вычислим температуры электронов  $T_e$ . Вычислим концентрацию электронов  $n_e$  по формуле

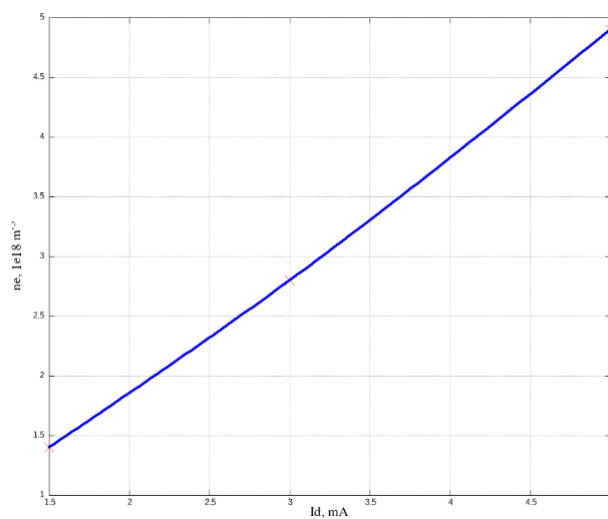
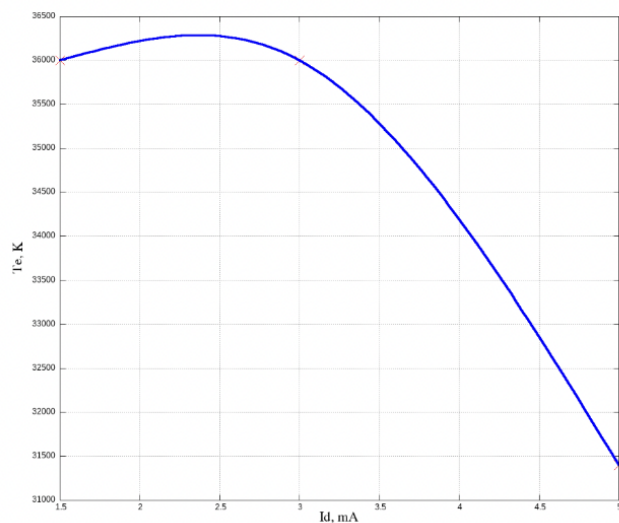
$$I_s = 0.4 n_e e S \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}$$

Расчитаем плазменную частоту колебаний электронов по формуле

$$\omega = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} = 6 \cdot 10^{-4} \sqrt{n_e}$$

$I_d, mA$	$T_e, 10^4 K$	$n_e, 10^{18} m^{-3}$	$\omega, 10^6 rad/sec$	$r_{De}, cm$	$r_D, cm$	$N_D$
5	3.14	4.9	1.3	0.5	0.05	256
3	3.6	2.8	1.0	0.7	0.07	704
1.5	3.6	1.4	0.7	1.0	0.095	1700

Построим зависимости  $T_e(I_d)$  и  $n_e(I_d)$ :



### 3 Выводы

В этой работе мы изучили ВАХ тлеющего разряда. 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.