

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа физики и исследований им. Ландау

Лабораторная работа

Изучение плазмы газового разряда в неоне

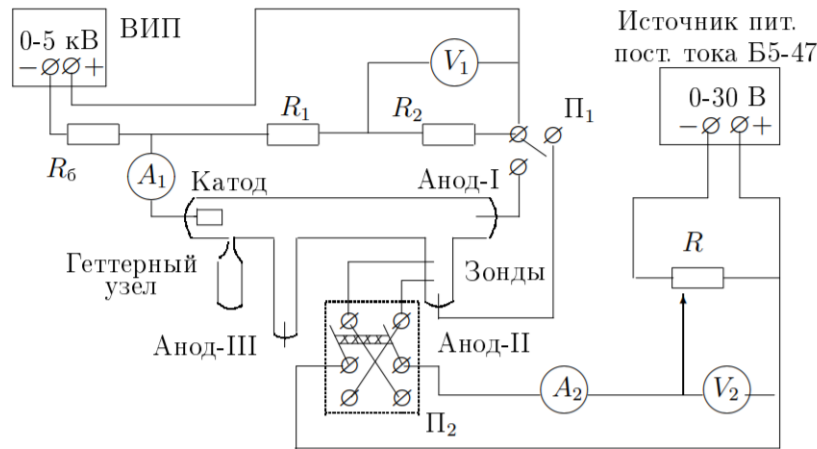
Выполнила:
Карасёва Таисия
Б02-001

Долгопрудный 2021

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.

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 (≈ 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 .

Теория

Плазма

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

$$\text{div } \mathbf{E} = 4\pi\rho,$$

а с учётом сферической симметрии и $\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi$:

$$\frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\varphi}{dr} = -4\pi\rho. \quad (1)$$

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

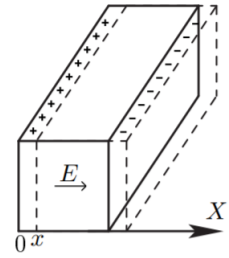
$$\varphi = \frac{Ze}{r} e^{-r/r_D}, \quad (3)$$

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:

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

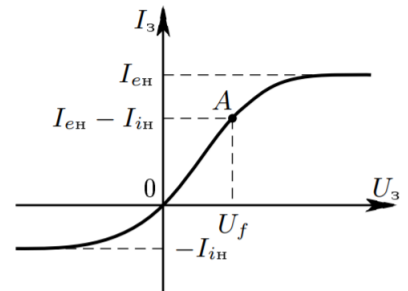
где $\langle v_e \rangle$ и $\langle v_i \rangle$ – средние скорости электронов и ионов, S – площадь зонда, n – плотность электронов и ионов. Скорости электронов много больше скорости ионов, поэтому $I_{i0} \ll I_{e0}$. Зонд будет заряжаться до некоторого равновесного напряжения $-U_f$ – *плавающего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

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



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 ($I_1 = -I_2 = I$):

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

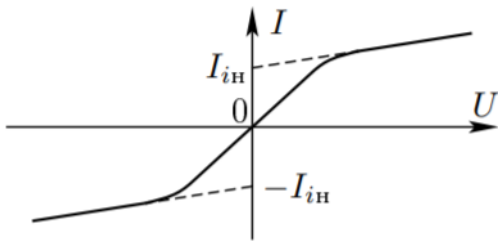
$$\Delta U_2 = \frac{kT_e}{e} \ln \left(1 + \frac{I}{I_{in}}\right)$$

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:

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

Ход работы

1. Измеряем напряжение зажигания в лампе: $U_{зж} = 220 \pm 10$ 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).

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

U_1 , В	31.32	29.87	29.23	28.72	28.22	27.87	27.67	27.49
I_p , мА	1.6	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2
U_1 , В	27.33	27.15	27.12	27.12	27.13	27.15	27.13	27.10
I_p , мА	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8

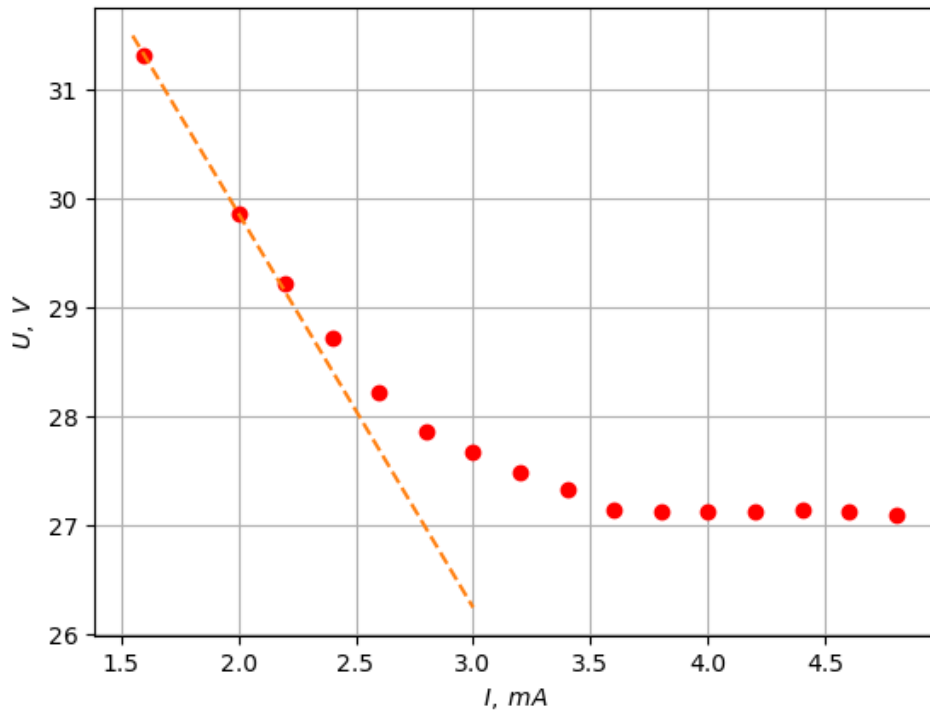


Рис. 1: ВАХ разряда.

По наклону определим максимальное сопротивление заряда (с учётом того, что вольтметр подключен через делитель напряжения с коэффициентом 10): $R_{max} = (3.7 \pm 0.2) \cdot 10^4 \Omega$.

- 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 (Таблицы 2-4).

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

Таблица 2: Зависимость $I_z(U_z)$ для тока разряда $I_p = 5$ мА

U_z , В	25	22	19	16	13	10	8	6	4	2	0.5
I_z , мА	91.5	92.2	90.6	87.9	82.0	71.0	58.9	43.9	24.5	4.10	-13.7
U_z , В	-0.5	-2	-4	-6	-8	-10	-13	-16	-19	-22	-25
I_z , мА	-14.9	-30.8	-49.6	-65.8	-78.3	-85.4	-98.6	-104.2	-107.2	-108.7	-107.6

Таблица 3: Зависимость $I_z(U_z)$ для тока разряда $I_p = 3 \text{ mA}$

$U_z, \text{ В}$	25	22	19	16	13	10	8	6	4	2	0.5
$I_z, \text{ мА}$	52.0	50.3	48.5	46.7	44.1	39.2	33.6	25.3	14.7	1.9	-8.3
$U_z, \text{ В}$	-0.5	-2	-4	-6	-8	-10	-13	-16	-19	-22	-25
$I_z, \text{ мА}$	-12.9	-23.2	-34.1	-43.6	-50.4	-55.1	-59.3	-61.9	-64.2	-66.2	-68.4

Таблица 4: Зависимость $I_z(U_z)$ для тока разряда $I_p = 1.5 \text{ mA}$

$U_z, \text{ В}$	25	22	19	16	13	10	8	6	4	2	0.5
$I_z, \text{ мА}$	24.7	23.9	23.1	22.3	21.3	19.2	16.5	12.5	7.2	0.7	-4.6
$U_z, \text{ В}$	-0.5	-2	-4	-6	-8	-10	-13	-16	-19	-22	-25
$I_z, \text{ мА}$	-8.0	-13.3	-19.1	-23.6	-26.8	-29.1	-31.0	-32.4	-33.7	-35.0	-36.3

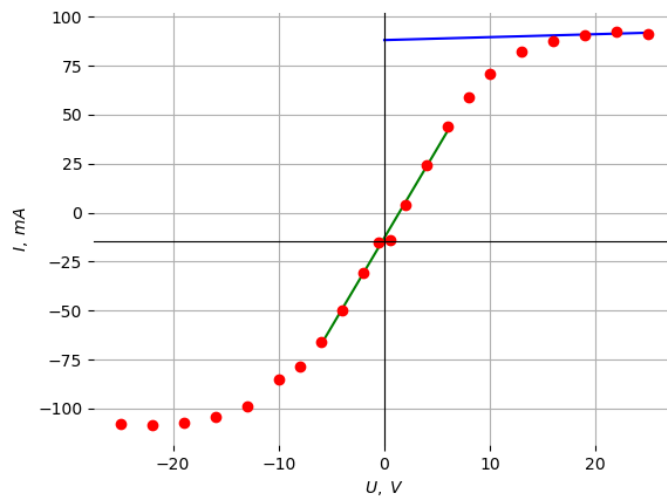


Рис. 2: Зависимость $I_z(U_z)$ для тока разряда $I_p = 5 \text{ mA}$.

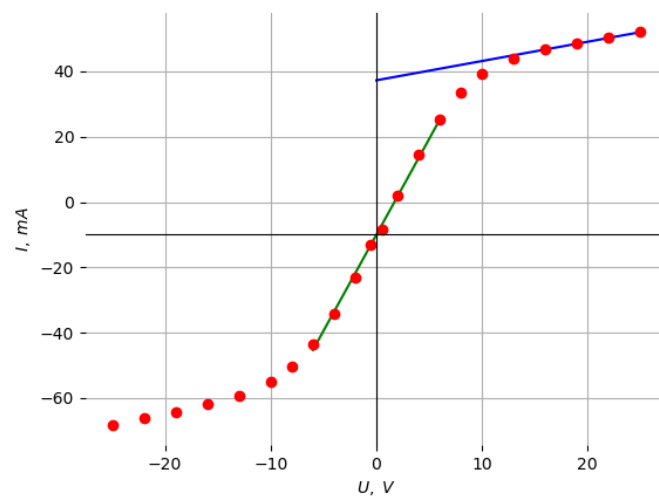


Рис. 3: Зависимость $I_z(U_z)$ для тока разряда $I_p = 3 \text{ mA}$.

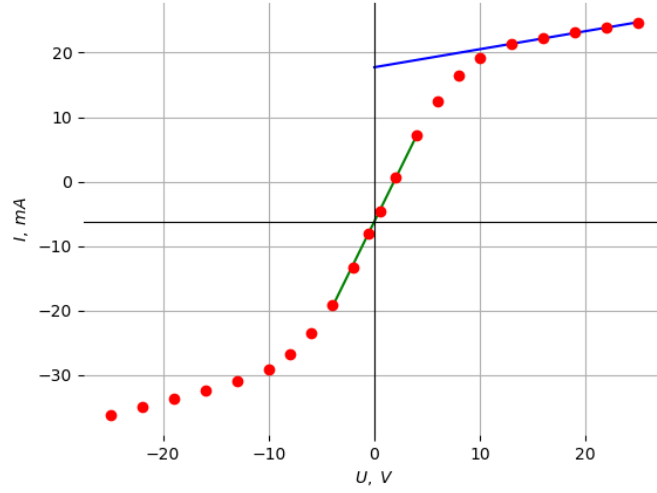


Рис. 4: Зависимость $I_z(U_z)$ для тока разряда $I_p = 1.5 \text{ mA}$.

3. Найдём токи насыщения $I_{\text{ин}}$ и температуры электронов T_e .

$$kT_e = \frac{1}{2} \frac{eI_{\text{ин}}}{\frac{dI}{dU}(U=0)}$$

$\frac{dI}{dU}(U=0)$ рассчитаем как угловые коэффициенты "зелёных" прямых на рисунках выше с помощью МНК

Погрешности $\frac{dI}{dU}$ и $I_{\text{ин}}$ определяем как погрешности соответствующих коэффициентов МНК,

$$\sigma_{kT_e} = \frac{e}{2} \frac{1}{\left(\frac{dI}{dU}\right)^2} \sqrt{\sigma_{I_{\text{ин}}}^2 + \frac{I_{\text{ин}}^2}{\left(\frac{dI}{dU}\right)^2} \sigma_{\frac{dI}{dU}}^2}$$

4. Считая концентрации ионов и электронов равными, найдём их, пользуясь формулой (7) (Площадь поверхности зонда $S \approx \pi dl$, где $d = 0.2 \text{ мм}$, $l = 5.2 \text{ мм}$). Рассчитаем плазменную частоты ω_p по формуле (5) и электронную длину поляризации r_{De} , дебаевский радиус r_D , оценим среднее число ионов в дебаевской сфера N_D по формуле (4) и степень ионизации $\alpha = \frac{kT_e n_e}{P}$, приняв $P \approx 2 \text{ торр}$, и занесём все результаты в таблицу.

$$\sigma_{n_e} = \sqrt{\frac{m_i}{2kT_e}} \frac{1}{0.4Se} \sqrt{\sigma_{I_{\text{ин}}}^2 + \frac{\sigma_{kT_e}^2 I_{\text{ин}}^2}{4(kT_e)^2}}$$

$$\sigma_{\omega_p} = e\sigma_{n_e} \sqrt{\frac{\pi}{mn_e}}$$

$$\sigma_{r_{De}} = \frac{1}{\omega_p} \sqrt{\frac{kT_e}{m}} \sqrt{\frac{\sigma_{\omega_p}^2}{\omega_p^2} + \frac{\sigma_{kT_e}^2}{4(kT_e)^2}}$$

$$\sigma_{r_D} = \frac{\sigma_{\omega_p}}{\omega_p^2} \sqrt{\frac{kT_e}{m}}$$

$$\sigma_{N_D} = 4\pi r_D^2 \sqrt{\frac{\sigma_{n_e}^2 r_D^2}{3} + n_e^2 \sigma_{r_D}^2}$$

Для определения r_D примем $T_i \approx 300K$

I_p , мА	I_{in} , мА	kT_e , эВ	n_e , 10^{13} см $^{-3}$	ω_p , 10^{11} рад/с
5.0	88.1 ± 0.1	4.84 ± 0.01	6.2 ± 0.1	4.44 ± 0.04
3.0	37.3 ± 0.1	3.16 ± 0.01	3.2 ± 0.1	3.19 ± 0.06
1.5	17.7 ± 0.1	2.68 ± 0.01	1.7 ± 0.1	2.33 ± 0.08

I_p , мА	r_{De} , 10^{-4} см	r_D , 10^{-4} см	N_D	α
5.0	9.4 ± 0.1	0.57 ± 0.01	48 ± 2	0.2
3.0	13.2 ± 0.3	0.84 ± 0.02	79 ± 5	0.1
1.5	18.1 ± 0.5	1.11 ± 0.04	95 ± 7	0.04

5. Построим графики зависимости концентрации и температуры электронов от тока разряда

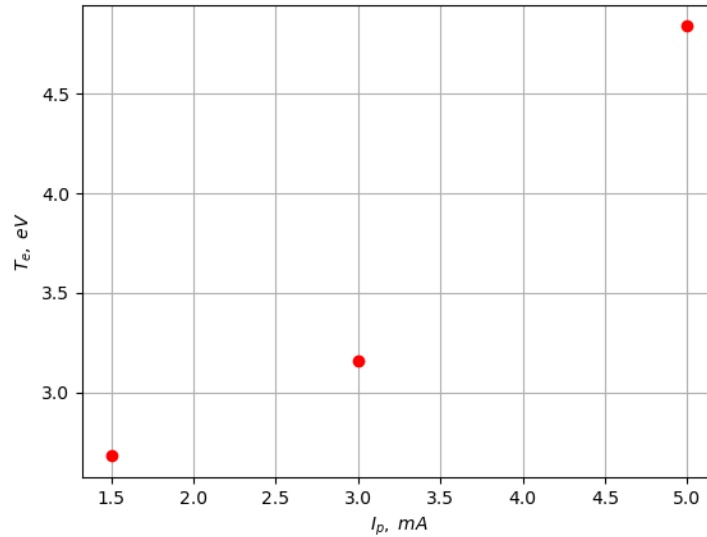


Рис. 5: Зависимость $T_e(I_p)$

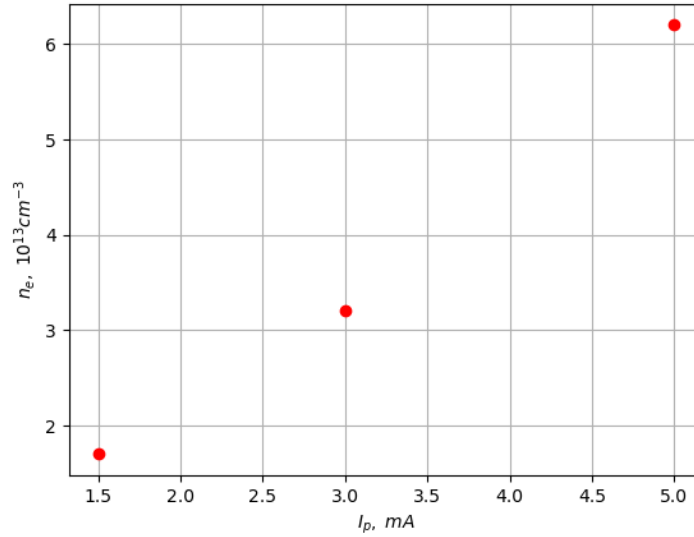


Рис. 6: Зависимость $n_e(I_p)$

Вывод

В данной работе

1. была получена ВАХ тлеющего разряда. Её вид сходится с теоретическим
2. при различных токах разряда были получены зондовые характеристики $I(U)$, по уравнениям асимптот которых были определены ионные токи насыщения. С помощью значений ионных токов насыщения были определены
 - (a) энергия электронов. Значения близки к теоретическим (~ 1 эВ)
 - (b) концентрация электронов (равная концентрации ионов). Относительная погрешность составила менее 6%. Полученное значение на 3 порядка превышает теоретическое ($\sim 10^{10}$), что, вероятно, является последствием некорректно определёнными значениями тока ионизации
 - (c) плазменные частоты колебаний электронов. Относительная погрешность составила менее 4%.
 - (d) электронные длины поляризации r_{De} с относительной погрешностью не более 3%. Полученные значения на 1 порядок меньше теоретически предсказанного $\sim 10^{-2}$ см, что, вероятно, является последствием некорректно определёнными значениями тока ионизации
 - (e) дебаевский радиус r_D с относительной погрешностью не более 3%. Полученные значения на 1 порядок меньше теоретически предсказанного $\sim 10^{-3}$
 - (f) число заряженных частиц в сфере дебаевского радиуса $N_D \gg 1 \Rightarrow$ плазму можно считать идеальной.
 - (g) (оценочно) степень ионизации α
3. были получены графики зависимости концентрации и температуры электронов от тока разряда