

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа фотоники, электроники и молекулярной физики

Отчёт о выполнении лабораторной работы

3.5.1

Изучение плазмы газового разряда в неоне

Автор:
Макаров Лев Евгеньевич
Б04-306

Долгопрудный 2024

1 Введение

Цель работы:

1. Исследование характеристик газового разряда

В работе используются:

- стеклянная газоразрядная трубка, наполненная неоном
- высоковольтный источник питания
- источник питания постоянного тока
- делитель напряжения
- резистор
- потенциометр
- амперметры
- вольтметры
- переключатели

2 Теоретические сведения

Плазма

Из-за теплового движения в плазме электроны могут смещаться относительно ионов и образовывать неоднородности. В этих неоднородностях возникает электрическое поле, которое стремится восстановить баланс, из-за чего происходят колебания с частотой

$$w_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}}$$

За характерное время колебаний электроны за счет теплового движения смещаются на

$$r_D \sim \frac{v_e}{w_p} = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e e^2}}$$

r_D - дебаевский радиус, k - константа Больцмана.

Если поместить в плазму пробную (допустим, положительную) частицу, то электроны будут скапливаться около этой частицы, экранируя её поле. Потенциал точечного заряда будет иметь в плазме следующий вид:

$$\varphi(r) = \frac{q}{r} e^{-\frac{r}{r_D}}$$

где $r_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e e^2}}$ - радиус Дебая в случае равновесной плазмы. Если температуры электронов и ионов сильно отличаются, то следует определять отдельно величину радиуса экранирования для электронов и для ионов. Итоговый радиус будет

$$r_D = (r_{De}^{-2} + r_{Di}^{-2})^{-1/2}$$

То есть если $T_i \ll T_e$, то $r_D \approx r_{Di}$

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:

$$\begin{aligned} I_{e0} &= \frac{n\langle v_e \rangle}{4} eS, \\ I_{i0} &= \frac{n\langle v_i \rangle}{4} eS, \end{aligned} \quad (1)$$

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:

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

Электронный ток насыщения можно определить по тепловому движению:

$$I_{en} = \frac{n_e S}{4} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}}$$

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

$$I_1 = I_{in} + I_{e1} = I_{in} - \frac{1}{4}neS\langle v_e \rangle \exp\left(-\frac{eU_f}{kT_e}\right) \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e}\right) = I_{in} \left(1 - \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e}\right)\right). \quad (3)$$

Аналогично через второй получим

$$I_2 = I_{in} \left(1 - \exp\left(\frac{e\Delta U_2}{kT_e}\right)\right) \quad (4)$$

Из (7) и (8) с учётом последовательного соединения зондов ($I_1 = -I_2 = I$):

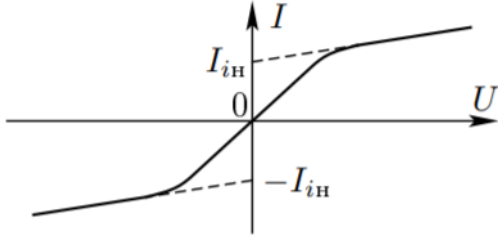
$$\Delta U_1 = \frac{kT_e}{e} \ln\left(1 - \frac{I}{I_{in}}\right)$$

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

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока

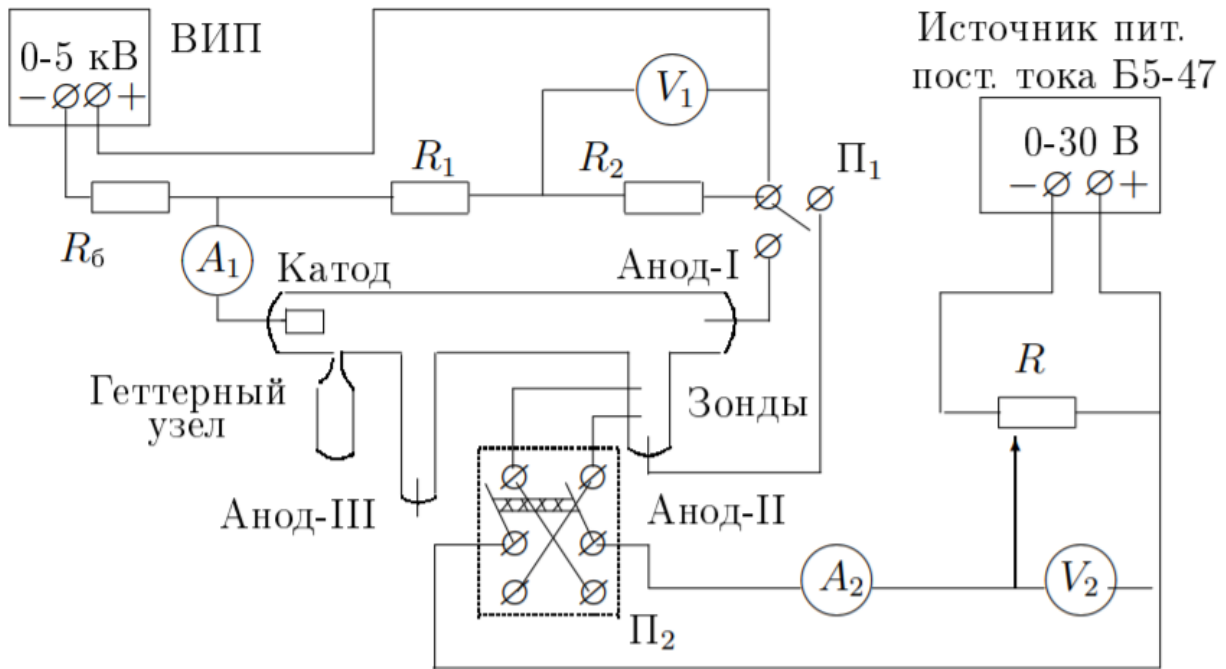
$$U = \frac{kT_e}{e} \ln \frac{1 - I/I_{in}}{1 + I/I_{in}}, \quad I = I_{in} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e}. \quad (5)$$

Зависимость выглядит примерно так. Из 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:



$$kT_e = \frac{1}{2} \frac{eI_{in}}{\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0}}. \quad (6)$$

3 Экспериментальная установка



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 ^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 выкодным 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 .

4 Результаты измерений и обработка данных

ВАХ разряда

1. Подготовим все приборы к работе.

Включим в сеть ВИП и мультиметр V_1 . Будем плавно увеличивать выходное напряжение ВИП с нулевого значения до того момента, как в трубке зажжётся разряд. Показания вольтметра V_1 непосредственно перед зажиганием – т.н. напряжение зажигания разряда – равны $U_{\text{зж}} = (231 \pm 3)$ В.

2. С помощью вольтметра V_1 и амперметра A_1 снимем вольт-амперную характеристику разряда $U_p(I_p)$ в диапазоне от 0,5 мА до ≈ 5 мА по току.

Измерения проведём как при нарастании (\nearrow), так и при убывании (\searrow) тока. Занесём полученные данные в таблицу 1. Заметим заранее, что гистерезиса ВАХ в работе не наблюдается, поэтому при построении графика имеет смысл использовать значения, полученные при усреднении ($\langle \dots \rangle$) снятых значений. Также занесём эти точки в таблицу.

Оценим также погрешности. Погрешность амперметра A_1 равна половине цены его деления, $\Delta I = 0,02$ мА. Погрешность вольтметра равна $0,003U + 4$ ед. мл. разряда.

Таблица 1: Зависимость тока разряда I_p от его напряжения U_p при нарастании и убывании

$U_p^{\text{возр}}, \text{ В}$	26,02	22,96	22,86	22,11	22,45	23,14	24,49	35,37
$I_p, \text{ мА}$	0,5	0,8	1,1	1,4	1,7	2,0	2,3	2,6
$U_p^{\text{убыв}}, \text{ В}$	24,9	23,12	22,0	22,11	22,74	22,9	26,29	
$I_p, \text{ мА}$	2,3	2,0	1,7	1,4	1,1	0,8	0,5	

Построим вольт-амперную характеристику разряда в координатах $I_p(U_p)$. Она представлена на рисунке 1. По наклону кривой на левом конце графика определим минимальное дифференциальное сопротивление разряда $R_{\text{диф}} \equiv \frac{dU}{dI} = 36000 \Omega$. Сравнив график с рисунком ?? (в Приложении к отчёту), сделаем вывод, что полученный в работе график *соответствует участку Г–Д*.

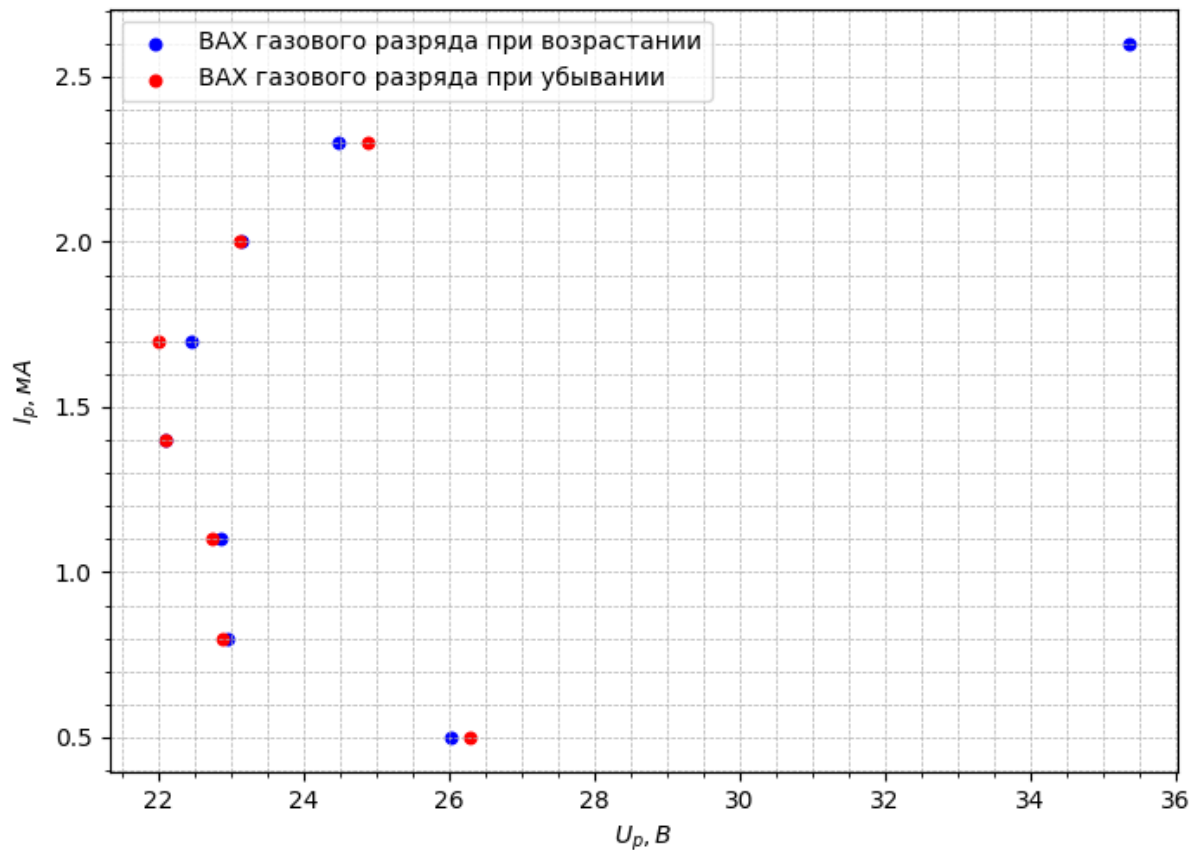


Рис. 1: Вольт-амперная характеристика разряда $I_p(U_p)$. Сглаживающая кривая проведена с помощью кубического сплайна

II. Зондовые характеристики

Подготовим приборы к работе. Плавно увеличим напряжение ВИП до возникновения разряда. Установим максимально допустимое значение разрядного тока $I_p^{max} = 5,0$ мА. Подготовим к работе источник питания, после чего с помощью потенциометра R установим на зонда максимально допустимое напряжение $U_3^{max} = 25,0$ В.

Измерим вольт-амперную характеристику двойного зонда $I_3(U_3)$ в диапазоне от $-U_3^{max}$ до U_3^{max} при фиксированном токе разряда I_p . Проведём данные измерения при трёх различных значениях тока разряда (2,0 мА, 1,5 мА и 0,84 мА в таблице соответственно). Занесём полученные данные в таблицу 2. Отцентрируем кривую: проведём ось абсцисс на уровне $I = \frac{1}{2} \sum \Delta I$ и восстановим ось ординат из точки пересечения кривой с осью абсцисс. Пересчитанные для этого точки с индексом s также занесём в таблицу.

Таблица 2: Зависимость напряжения на зонде U_z от тока I_z через него значениях $I_p = 2,0$ мА, 1,5 мА и 0,84 мА соответственно

$U_z, \text{В}$	$I_z, \text{мкА}$	$I_{zc}, \text{мкА}$	$I_z, \text{мкА}$	$I_{zc}, \text{мкА}$	$I_z, \text{мкА}$	$I_{zc}, \text{мкА}$
25,0	39,8	37,1	77,8	73,3	124,0	118,0
22,0	38,4	35,7	75,6	71,1	127,1	121,1
19,0	37,1	34,4	73,4	68,9	125,4	119,4
16,0	35,8	33,1	70,1	65,6	121,4	115,4
13,0	34,1	31,4	67,2	62,7	113,1	107,1
10,0	31,1	28,4	60,5	56,0	99,4	93,4
8,0	27,9	25,2	53,6	49,1	86,4	80,4
6,0	23,4	20,7	44,5	40,0	69,9	63,9
4,0	17,5	14,8	32,4	27,9	49,2	43,2
2,0	10,1	7,4	18,3	13,8	24,9	18,9
0,0	2,7	0,0	4,5	0,0	6,0	0,0
-2,0	-5,6	-8,3	-9,9	-14,4	-12,5	-18,5
-4,0	-12,9	-15,6	-24,0	-28,5	-36,8	-42,8
-6,0	-18,7	-21,4	-35,7	-40,2	-57,6	-63,6
-8,0	-23,0	-25,7	-44,9	-49,4	-74,8	-80,8
-10,0	-25,9	-28,6	-51,6	-56,1	-87,8	-93,8
-13,0	-28,6	-31,3	-57,9	-62,4	-101,4	-107,4
-16,0	-30,1	-32,8	-61,4	-66,1	-109,4	-115,4
-19,0	-31,2	-33,9	-63,7	-68,2	-113,1	-119,1
-22,0	-32,4	-35,1	-65,7	-70,2	-114,8	-120,8
-25,0	-33,5	-36,2	-67,7	-72,2	-112,2	-118,2

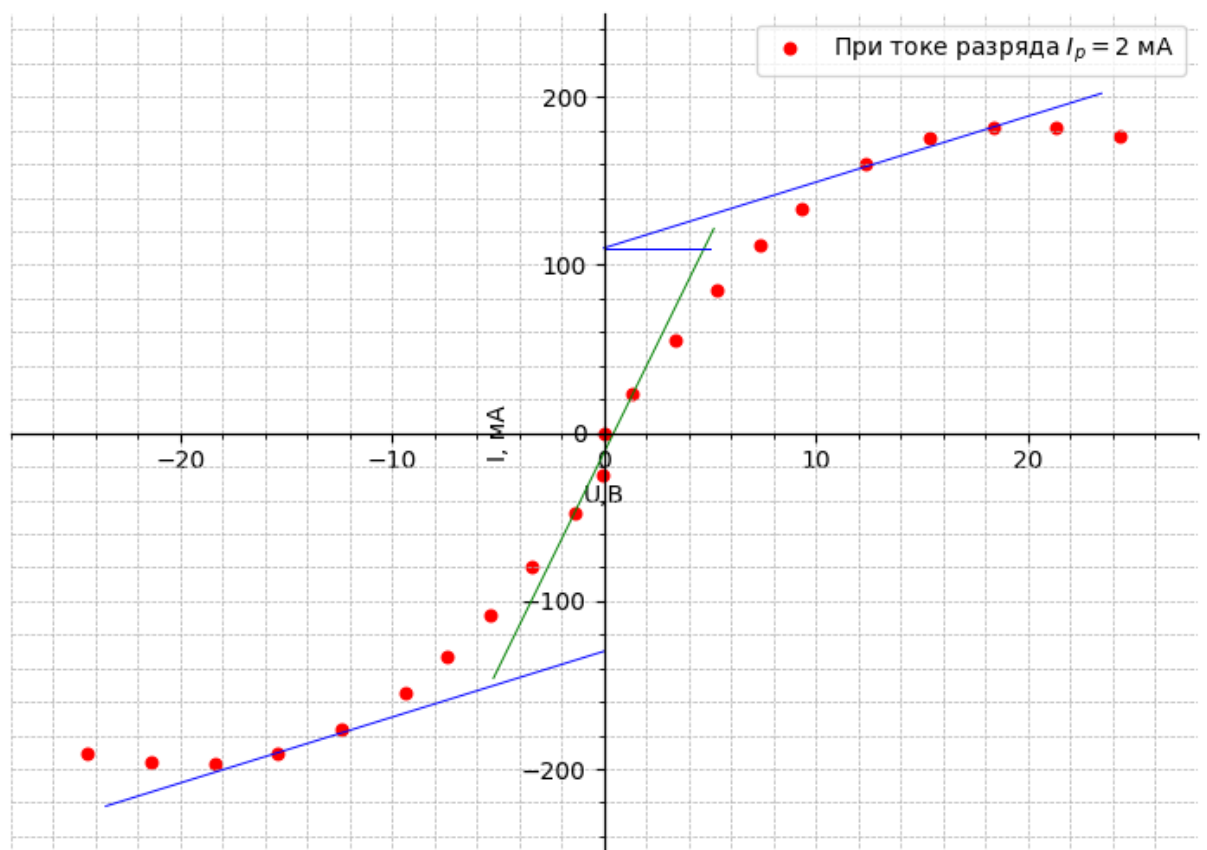


Рис. 2: Зондовая характеристика через разряд $I_p = 2,00$ мА

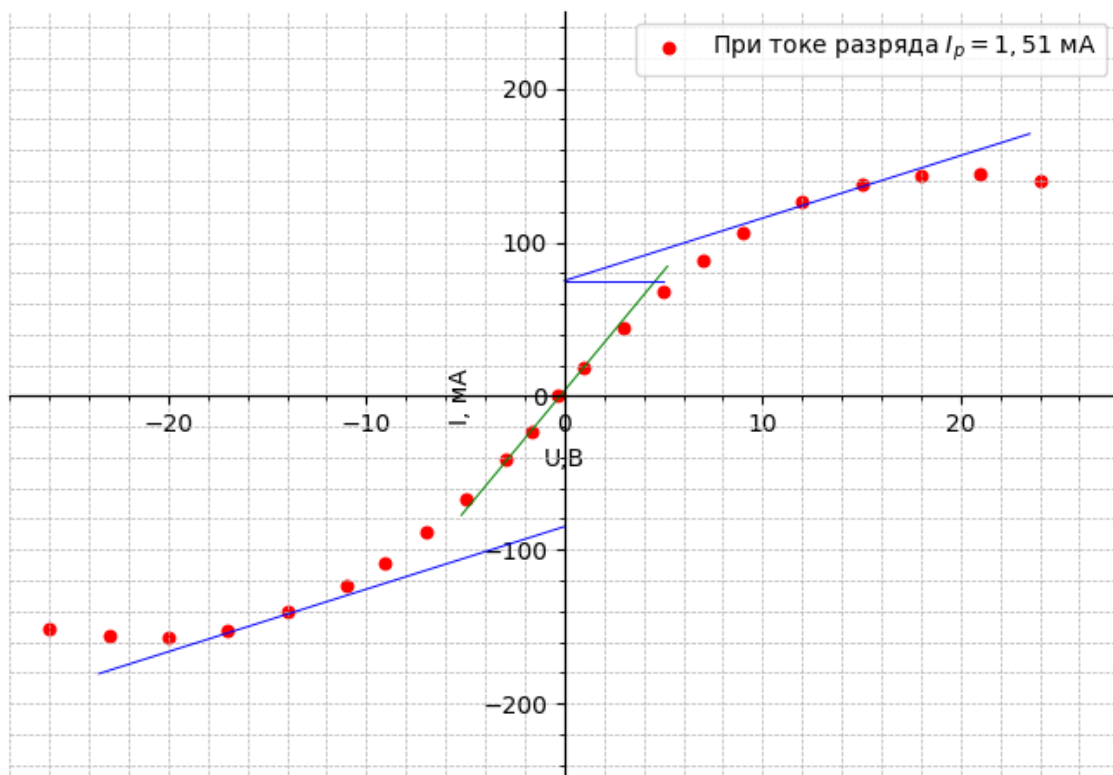


Рис. 3: Зондовая характеристика через разряд $I_p = 1,51$ мА

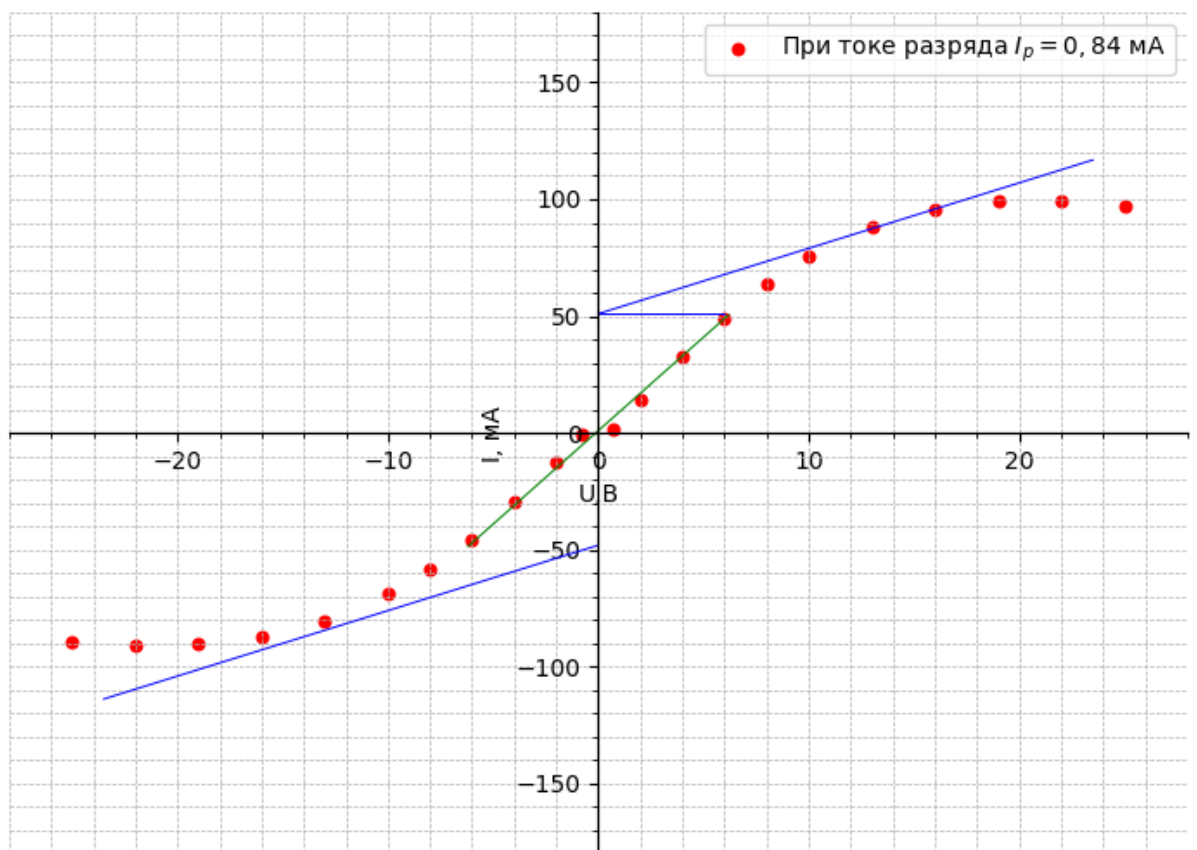


Рис. 4: Зондовая характеристика через разряд $I_p = 0,84$ мА

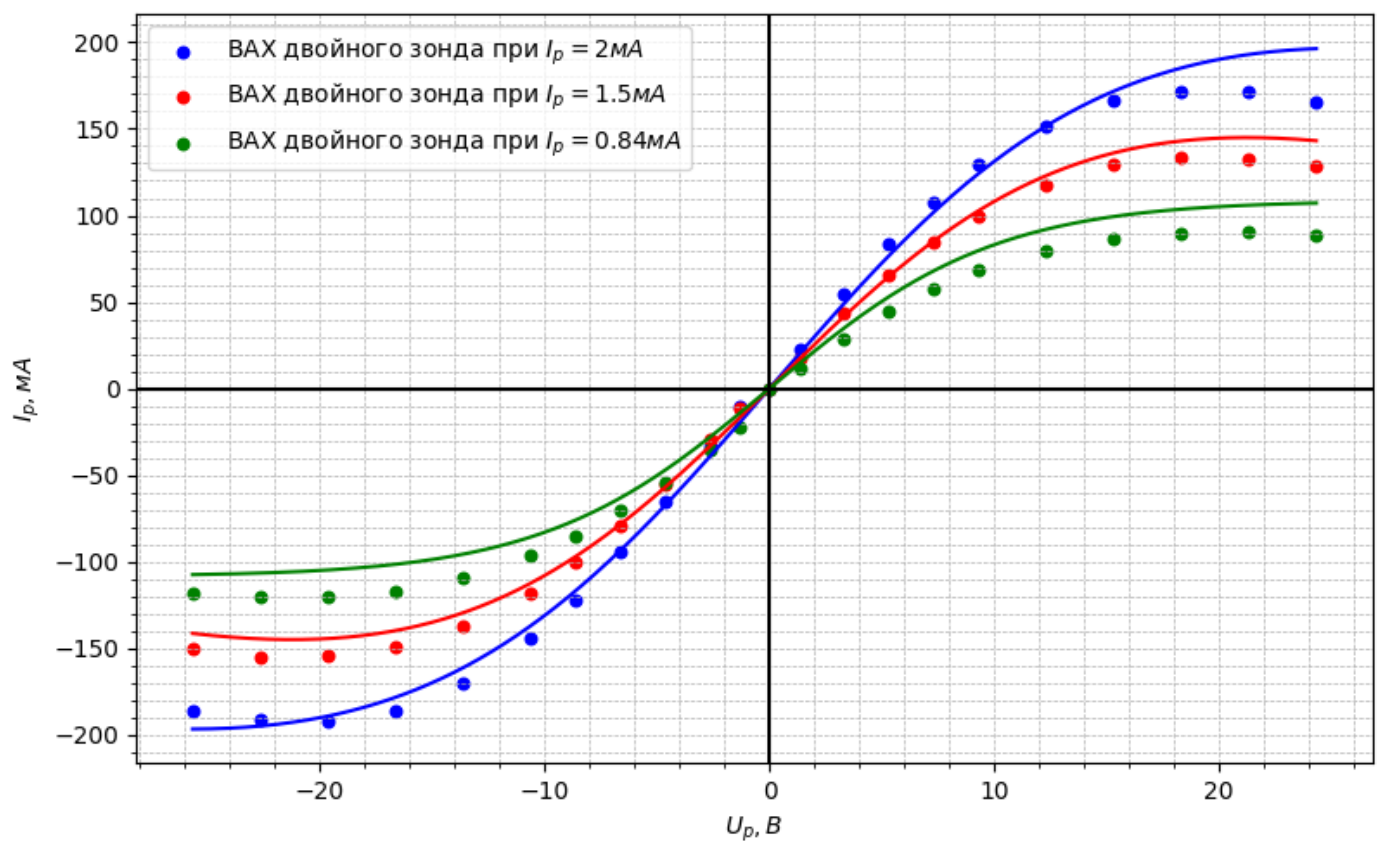


Рис. 5: Зондовые характеристики через разряд

По графикам определим температуру электронов.

$$kT_e = \frac{e\Delta U}{2}$$

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

$kT_e = \frac{\Delta U}{2}$, где ΔU - расстояние между точками 1 и 2.

$I_{in} = 0.4neS\sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}$, где $S=\pi dl$ - площадь поверхности зонда. Зная, что $d=0,2$ мм, $l=5,2$ мм, получим $S=3,27 * 10^{-6}2$, а $m_i= 22 * 1,66 * 10^{-27}$ - масса иона неона.

$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi ne^2}{m}} = 5,6 * 10^4 * \sqrt{n_e}$ - плазменная частота колебаний электронов.

$r_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi ne^2}}$ -радиус Дебая. Среднее число ионов в сфере такого радиуса $N_D = n\frac{4}{3}\pi r_D^3$.

I_p ,	I_{in} ,	dI/dU , мА/В	кТ, Эв	Т,К*10 ³	$n_e, 10^{16}, v^{-3}$	$\omega 10^{12}/$	$r_d 10^{-4}$	$N_d, 10^5$	α
2	110	25,73	3	35,4	3,76	10,85880288	6	3,25	
1,5	75	3,4	2,5	41,3	3,45	10,4	6,60	3,97	

Таблица 3: Данные расчетов

Графики зависимости $Te(Ip),ne(Ip)$ занесены на Рисунок 6.

5 Вывод

В данной лабораторной работе мы исследовали состояние плазмы в тлеющем газовом разряде с помощью двойного зонда. Полученные результаты сходятся с указанными в лабораторной работе по порядку. Плазму в тлеющем разряде можно с хорошей точностью назвать идеальной, так как $N_D > 30 \gg 1$.

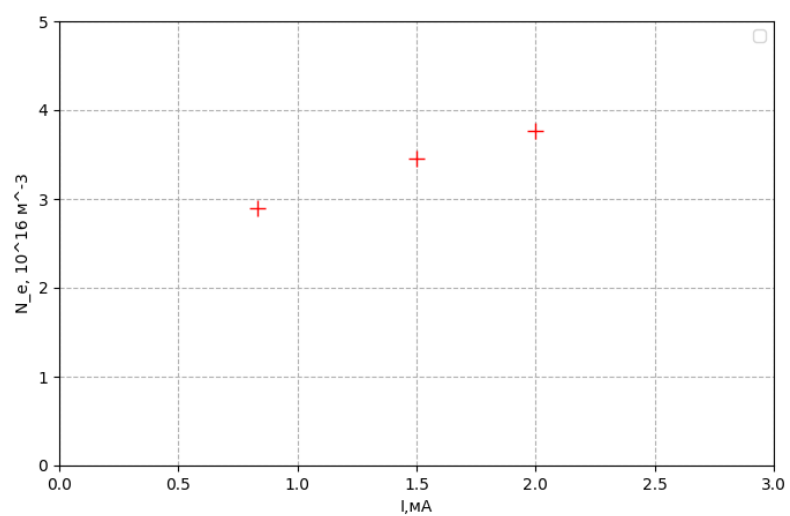
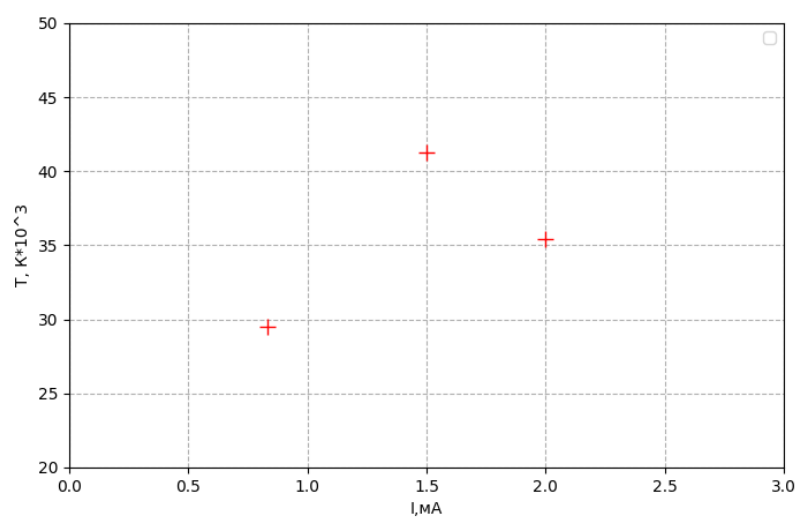


Рис. 6: Графики зависимости $T_e(I_p), n_e(I_p)$