

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа радиотехники и компьютерных технологий

## Отчёт о выполнении лабораторной работы 3.5.1

### Изучение плазмы газового разряда в неоне

Автор:  
Тихонов Дмитрий Романович,  
студент группы Б01-206

Долгопрудный, 2023

# 1 Введение

**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.

# 2 Теоретические сведения

*Двойным зондом* называется система, состоящая из двух одинаковых зондов, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга. Между зондами создаётся разность потенциалов  $U$ , которая по величине много меньше плавающего потенциала:  $|U| \ll |U_f|$ . При этом оба зонда имеют относительно плазмы близкий к плавающему отрицательный потенциал, т.е. находятся на *ионной* ветви вольт-амперной характеристики.

При отсутствии разности потенциалов ток между зондами равен нулю. Рассчитаем величину тока, проходящего через двойной зонд вблизи точки  $I = 0$ . При небольших разностях потенциалов ионные токи на оба зонда равны ионному току насыщения и компенсируют друг друга. Величина результирующего тока целиком связана с различием в электронных токах. Пусть потенциал на первом зонде равен

$$U_1 = U_f + \Delta U_1,$$

а на втором

$$U_2 = U_f + \Delta U_2.$$

Предполагается, что  $\Delta U_1, \Delta U_2 \ll U_f$ . Напряжение  $U$  между зондами равно

$$U = U_2 - U_1 = \Delta U_2 - \Delta U_1.$$

Найдём ток, приходящий на первый электрод:

$$I_1 = I_{\text{ин}} - I_{e0} \exp\left(\frac{eU_1}{k_B T_e}\right) = I_{\text{ин}} - \left[ I_{e0} \exp\left(\frac{eU_f}{k_B T_e}\right) \right] \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{k_B T_e}\right).$$

Заметим, что при  $\Delta U_1 = 0$  (при  $U_1 = U_f$ ) электронный и ионный ток компенсируют друг друга. Это означает, что заключённый в квадратные скобки множитель равен  $I_{\text{ин}}$ . Имеем поэтому

$$I_1 = I_{\text{ин}} \left[ 1 - \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{k_B T_e}\right) \right].$$

Аналогично для второго электрода

$$I_2 = I_{\text{ин}} \left[ 1 - \exp\left(\frac{e\Delta U_2}{k_B T_e}\right) \right].$$

Заметим, что зонды 1 и 2 соединены *последовательно* – через плазму – поэтому  $I_1 = -I_2 = I$ . Выразим  $\Delta U_1$  и  $\Delta U_2$  из уравнений выше:

$$\Delta U_1 = \frac{k_B T_e}{e} \ln \left( 1 - \frac{I}{I_{\text{ин}}} \right), \quad \Delta U_2 = \frac{k_B T_e}{e} \ln \left( 1 + \frac{I}{I_{\text{ин}}} \right).$$

Наконец, вычитая второе равенство из первого, найдём

$$U = \Delta U_1 - \Delta U_2 = \frac{k_B T_e}{e} \ln \left( \frac{I_{\text{ин}} - I}{I_{\text{ин}} + I} \right),$$

и, разрешая это равенство относительно  $I$ , получим

$$I = I_{\text{ин}} \operatorname{th} \frac{eU}{2k_{\text{Б}}T_e}.$$

Эту формулу можно использовать для определения температуры электронов по форме вольт-амперной характеристики двойного зонда.

Наблюдаемая на опыте зависимость тока от напряжения изображена на рисунке 1. Заметим, что эта кривая отличается от теоретической существованием наклона у асимптот в области больших  $|U|$ , что связано с ускорением частиц плазмы приложенным полем, которое не учтено при выводе теоретической зависимости.

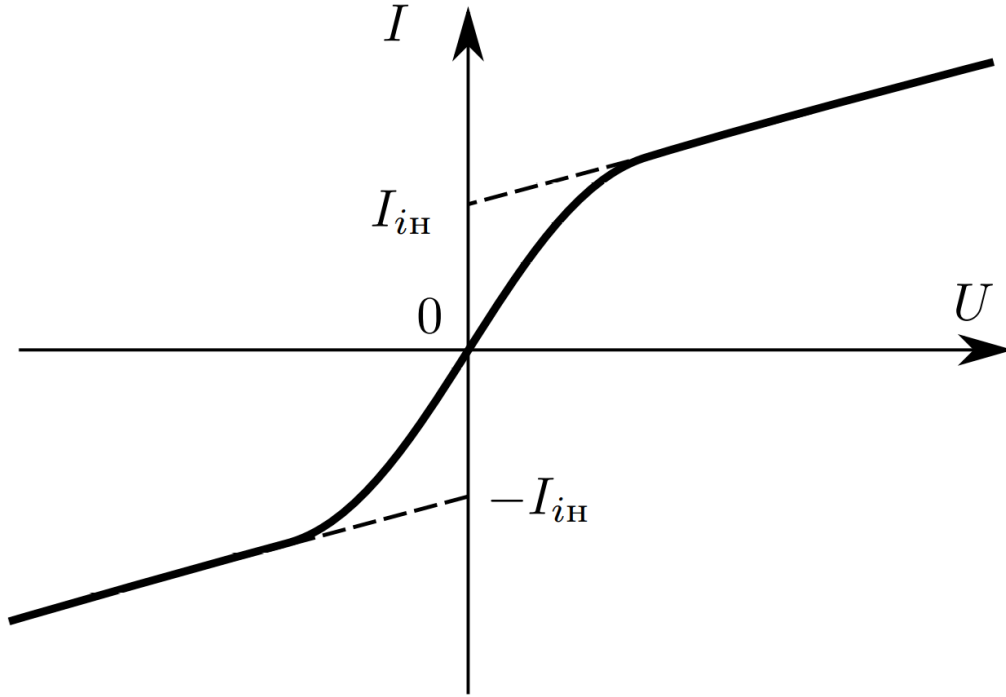


Рис. 1: Вольт-амперная характеристика двойного зонда

Графики типа 1 проще всего обрабатывать следующим образом. Сначала находится ток насыщения  $I_{\text{ин}}$  из пересечения асимптот с осью  $U = 0$ . Затем находится наклон графика в начале координат, из которого можно определить температуру электронов  $T_e$ . Дифференцируя формулу для  $I$  по  $U$  в точке  $U = 0$  и принимая во внимание, что при малых аргументах  $\operatorname{th} x \approx x$ , найдём

$$k_{\text{Б}}T_e = \frac{1}{2} \frac{eI_{\text{ин}}}{\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0}},$$

где  $\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0}$  — наклон характеристики зонда вблизи начала координат. По известным  $T_e$  и  $I_{\text{ин}}$  можно найти концентрацию заряженных частиц  $n_i = n_e$ .

Таким образом, двойные зонды удобно применять для измерения электронной температуры и концентрации частиц в плазме.

Вид ВАХ для конкретного газового проводника зависит от ряда условий, прежде всего от давления газа. На рис. 2 представлен пример полученной экспериментально ВАХ разряда в неоне.

В отсутствие внешнего ионизатора начальный участок характеристики самостоятельного разряда (участок ОА) соответствует столь малым токам, что на графике его не удаётся изобразить. Участок АВ соответствует току насыщения и режиму *газового усиления*. В точке В происходит пробой и начинается самостоятельный разряд. На участке ВГ уже выполнен критерий Таунсенда, но токи и степень ионизации ещё слишком малы, чтобы вызвать свечение и такой разряд называют *тёмным таунсендовским*.

Тлеющему разряду соответствует участок ГДЕЖ. Участок ГД называется *поднормальным* тлеющим разрядом, почти вертикальная часть ДЕ – *нормальным* тлеющим разрядом и остальная часть ЕЖ – *аномальным* тлеющим разрядом.

Нормальный тлеющий разряд обладает примечательным свойством самоорганизации: при увеличении полного тока в разряде, его плотность остаётся практически неизменной, меняется лишь площадь «катодного пятна», из которого вытекает ток. Меняя  $\mathcal{E}$  или  $R$ , можно видеть, как светящееся пятно на поверхности катода расширяется или сокращается. При этом напряжение в разряде практически не меняется. При полном заполнении катода дальнейшее увеличение тока будет возможно только за счёт повышения интенсивности ионизации газа, что возможно только при повышении напряжения. Разряд при этом переходит в режим аномального тлеющего разряда.

Далее идёт спадающий участок ЖЗ, соответствующий разогреву катода и переходу к *дуговому разряду*. Заметим, что при больших давлениях газа (атмосферном и больше) после пробоя сразу устанавливается дуговой разряд.

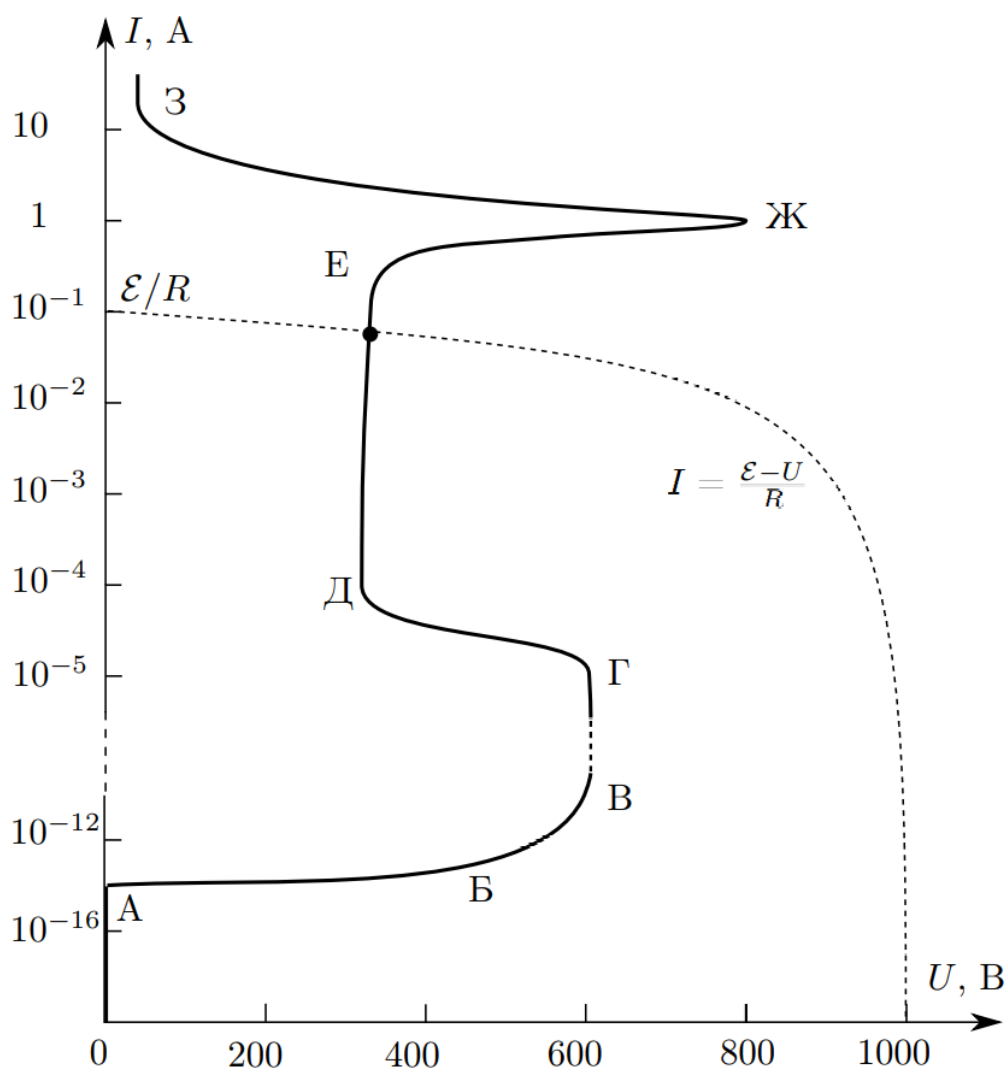


Рис. 2: Вольт-амперная характеристика разряда в неоне

### 3 Методика измерений и экспериментальная установка

Схема установки для исследования плазмы газового разряда в неоне представлена на рис. 3. Стекло-анная газоразрядная трубка имеет холодный (ненагреваемый) полый катод, три анода и *геттерный узел* – стеклянный баллон, на внутреннюю поверхность которого напылена газопоглощающая плёнка (*геттер*). Трубка наполнена изотопом неона  $^{22}\text{Ne}$  при давлении 2 мм рт. ст. Катод и один из анодов с помощью переключателя  $\Pi_1$  подключаются через балластный резистор  $R_6$  ( $\sim 450$  кОм) к регулируемому высоковольтному источнику питания (ВИП) с выходным напряжением до 5 кВ.

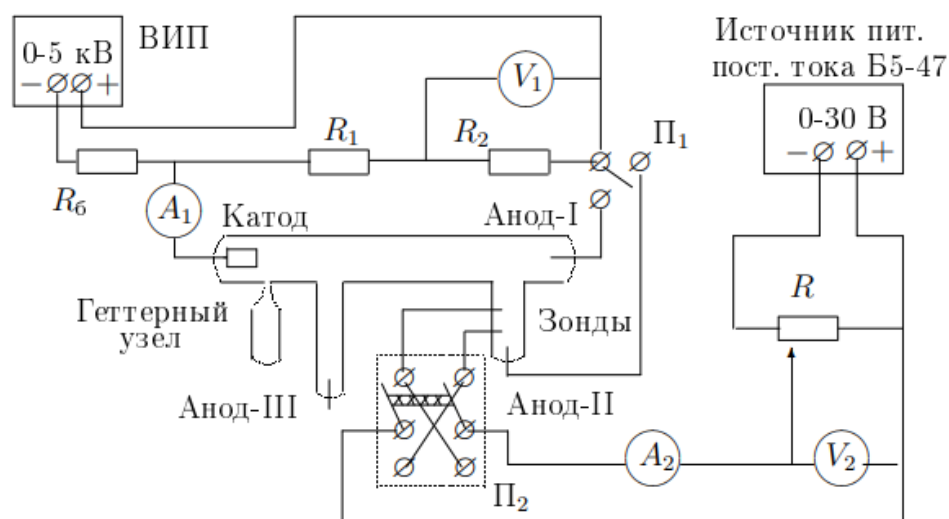


Рис. 3: Схема установки для исследования газового разряда

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  $V_1$  (мультиметром GDM), 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 находится 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  $\Pi_2$  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  $V_2$  (GDM). Для измерения зондового тока используется мультиметр  $A_2$  (GDM). Анод-III в нашей работе не используется.

## 4 Результаты измерений и обработка данных

### 4.1 Вольт-амперная характеристика разряда

Определим напряжение зажигания разряда. Для этого будем плавно поднимать напряжение ВИП. В момент зажигания разряда  $U_{\text{зж}} = 1960$  В. Проведем измерения ВАХ газоразрядной трубки с помощью амперметра  $A_1$  и вольтметра  $V_1$ . Результаты измерений приведены в таблице 1.

$I_p$ , мА	$U_p$ , В
0,505	34,26
0,946	32,43
1,582	31,26
1,998	30,29
2,526	27,39
2,524	27,40
3,052	25,17
3,589	23,47
4,093	23,18
4,495	22,90
5,051	22,35
4,029	22,87
3,036	25,25
2,049	29,81
1,077	32,14
0,548	34,05

Таблица 1: Зависимость напряжения разряда  $U_p$  от его тока  $I_p$

По данным таблицы 1 построим график зависимости  $U_p(I_p)$  (рис. 4).

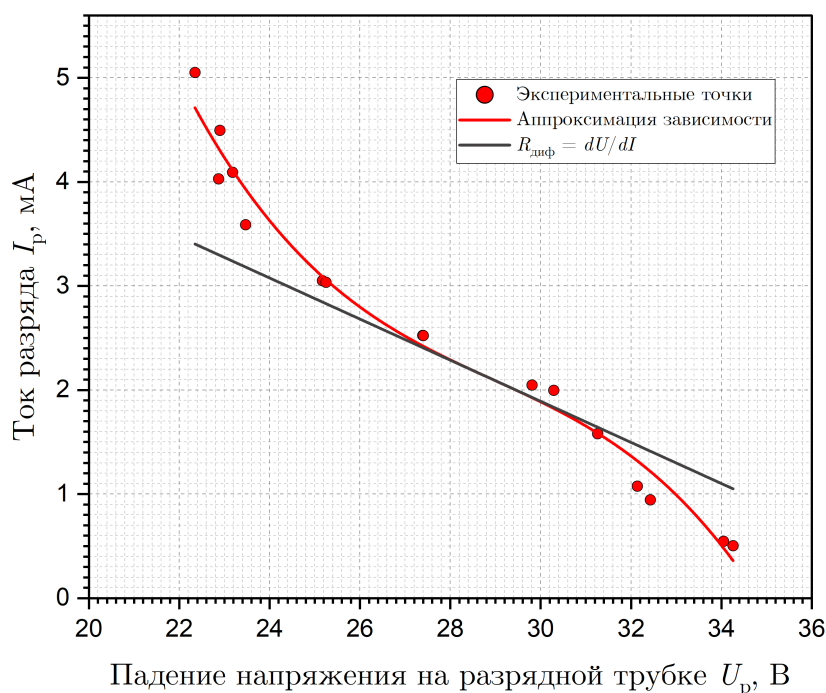


Рис. 4: Вольт-амперная характеристика разряда в координатах  $I_p(U_p)$

Сравнив график с рисунком 2, сделаем вывод, что полученный в работе график соответствует участку  $\Gamma$ -Д (*поднормальный тлеющий разряд*). С помощью программы *Origin Pro 2023b* также определим максимальное дифференциальное сопротивление разряда  $R_{\text{дифф}}$ :

$$R_{\text{дифф}} = \frac{dU}{dI} = -5,06 \text{ кОм.} \quad (1)$$

## 4.2 Зондовые характеристики

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

Измерим вольт-амперную характеристику двойного зонда  $I_z(U_z)$  в диапазоне от  $-U_z^{\text{max}}$  до  $U_z^{\text{max}}$  при фиксированном токе разряда  $I_p$ . Проведём данные измерения при трёх различных значениях тока разряда. Занесём полученные данные в таблицу 2.

$I_p = 5,05 \text{ мА}$		$I_p = 3,02 \text{ мА}$		$I_p = 1,51 \text{ мА}$	
$I_z, \text{ мкА}$	$U_z, \text{ В}$	$I_z$	$U_z, \text{ В}$	$I_z$	$U_z, \text{ В}$
117,12	25,01	69,30	25,00	36,01	25,05
114,30	22,04	67,24	22,02	34,75	22,04
111,32	19,03	65,20	19,03	33,50	19,01
107,70	16,20	63,10	16,04	32,30	16,12
101,60	13,15	60,33	13,10	30,87	13,03
92,02	10,10	55,80	10,13	28,80	10,13
83,20	8,09	50,95	8,12	26,60	8,05
72,30	6,10	44,10	6,08	23,55	6,14
58,80	4,01	35,20	4,04	18,99	3,05
45,50	2,10	24,50	2,05	13,08	2,02
33,33	0,55	15,00	0,50	8,20	0,56
-11,60	-0,56	-3,20	-0,55	3,92	-0,48
-23,40	-2,02	-6,02	-2,03	-1,84	-2,10
-38,67	-4,04	-17,50	-4,04	-7,75	-4,04
-52,37	-6,03	-27,20	-6,07	-12,90	-6,08
-64,47	-8,02	-34,70	-8,13	-16,62	-8,11
-74,70	-10,14	-39,90	-10,04	-19,10	-10,01
-84,87	-13,10	-44,50	-13,00	-21,32	-13,07
-90,93	-16,03	-47,80	-16,04	-22,35	-16,05
-94,70	-19,05	-49,65	-19,06	-23,13	-19,01
-97,70	-22,06	-51,40	-22,10	-23,93	-22,02
-100,66	-25,05	-53,20	-25,05	-24,74	-25,05

Таблица 2: Результаты измерения зависимости напряжения на зонде  $U_z$  от тока  $I_z$  через него

Параметры используемого в работе зонда:  $d = 0,2 \text{ мм}$  и  $l = 5,2 \text{ мм}$ .

Построим теперь в отдельных системах координат отцентрированные зондовые характеристики для разных токов. Полученные зависимости приведены на рисунках 5, 6 и 7.

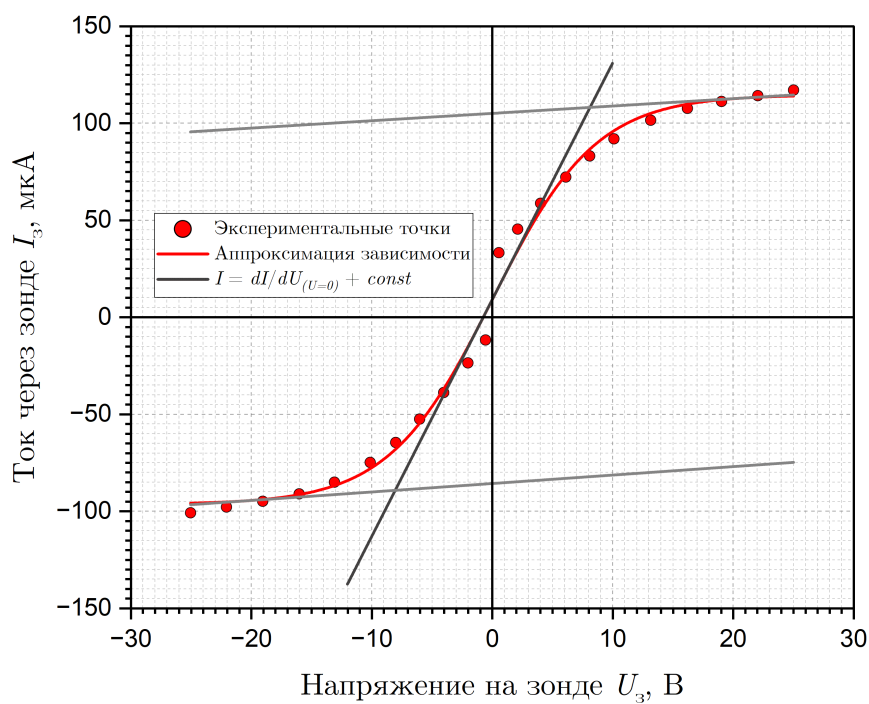


Рис. 5: Зондовая характеристика  $I_z(U_z)$  при токе через разряд  $I_p = 5$  мА

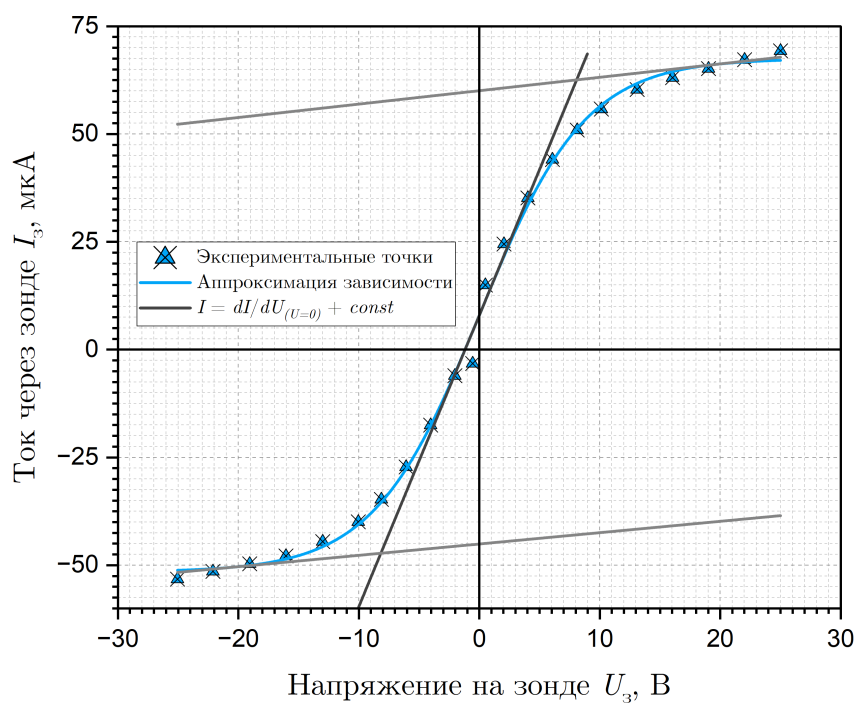


Рис. 6: Зондовая характеристика  $I_z(U_z)$  при токе через разряд  $I_p = 3,0$  мА



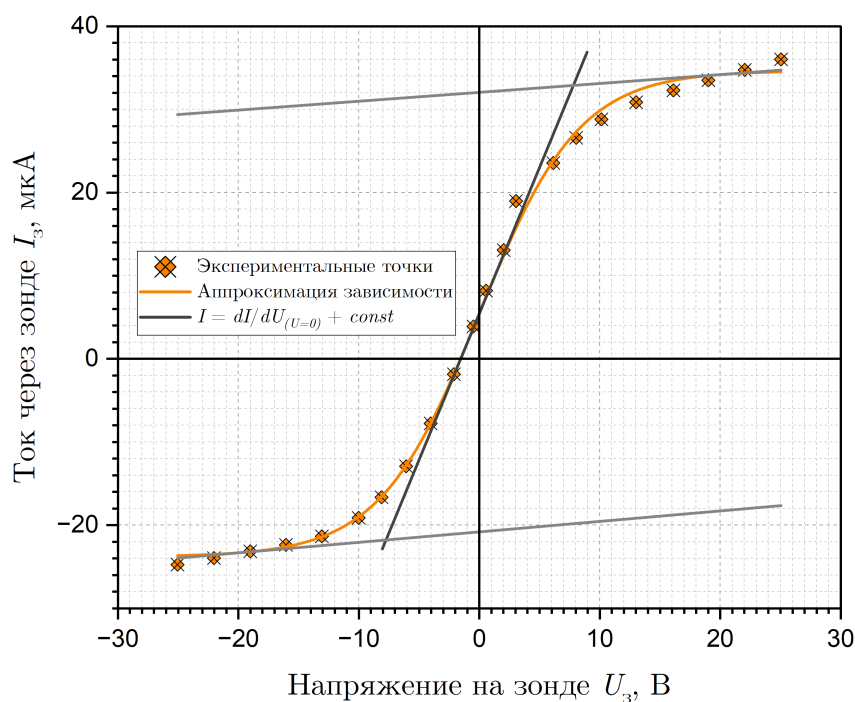


Рис. 7: Зондовая характеристика  $I_z(U_z)$  при токе через разряд  $I_p = 1,5$  мА

По графикам определим температуру электронов. Проведём асимптоты к току насыщения до пересечения с осью  $U = 0$ , определив ток насыщения  $I_{in}$ . После этого проведём касательную к зондовой характеристике в начале координат, определив  $\frac{dI}{dU}|_{U=0}$ . Проведём горизонталь  $I = I_{in}$  до пересечения с касательной и определим значение  $\Delta U$ , затем  $kT_e = \frac{e\Delta U}{2}$ . Полученные из графиков значения  $\Delta U^\pm$  и  $T_e$  занесём в таблицу 3. Основным источников погрешности  $T_e$  является неидеальность совпадения  $\Delta U^\pm$  при разных полярностях напряжения на зонде, а также погрешности вольтметра и амперметра.

$I_p$ , мА	5,05	3,02	1,51
$I_{in}^+$ , мкА	105,1	60,1	32,1
$I_{in}^-$ , мкА	85,6	45,1	20,8
$I_{in}$ , мкА	95,4	52,6	26,5
$\Delta U^+$ , В	7,9	7,8	7,6
$\Delta U^-$ , В	7,7	7,8	7,5
$\Delta U$ , В	7,8	7,8	7,6
$T_e$ , $10^4$ К	4,6	4,6	4,5

Таблица 3: Зависимость температуры электронов  $T_e$  от тока  $I_p$  через разряд

Построим на одном листе семейство зондовых характеристик (рис. 8).

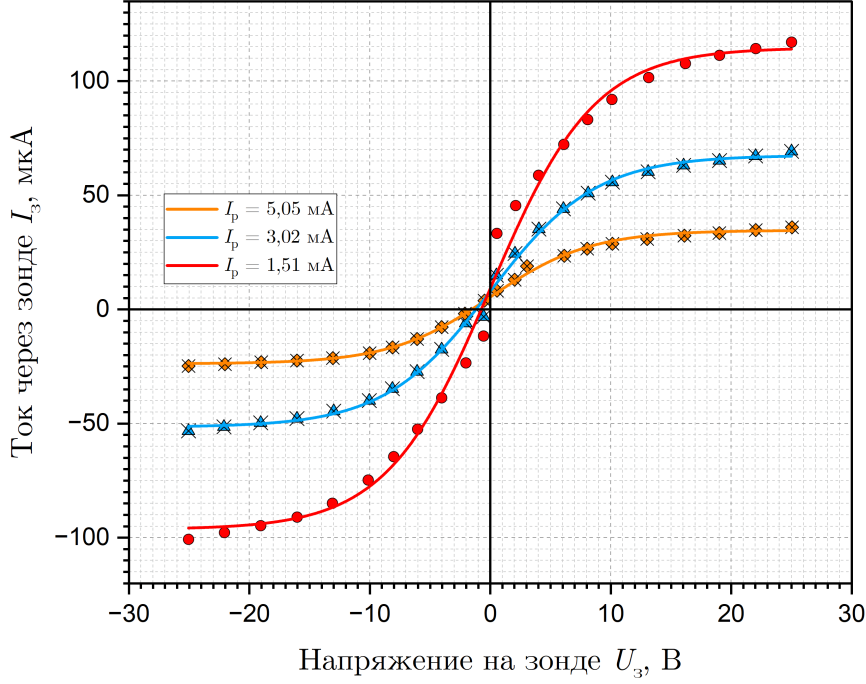


Рис. 8: Семейство зондовых характеристик  $I_z(U_z)$

Определим концентрацию электронов  $n_e$ , считая её равной концентрации ионов  $n_i$  и используя формулу Бома:

$$I_{iH} = 0,4n_e e S \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}} \Rightarrow n_e = \frac{2,5I_{iH}}{eS} \sqrt{\frac{m_i}{2kT_e}} = \frac{2,5I_{iH}}{\pi d l e} \sqrt{\frac{m_i}{\Delta U}}, \quad (2)$$

где  $S = \pi d l$  – площадь поверхности зонда, а  $m_i = 22 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}$  кг – масса иона неона. Посчитанные по формуле значения  $n_e$  тоже занесём в таблицу 4.

Зная концентрацию электронов в плазме, можно найти их плазменную частоту колебаний по формуле

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} \text{ [СГС]} = 5,6 \cdot 10^4 \sqrt{n_e} \text{ [СГС]} = 5,6 \sqrt{n_e} \text{ [СИ]}. \quad (3)$$

Результаты также занесём в таблицу 4. Заметим, что при падении на эту плазму электромагнитного излучения через неё пройдут волны с частотами, *превышающими*  $\omega_p$ .

Рассчитаем теперь электронную поляризационную длину  $r_{De}$ . Используем формулу

$$r_{De} = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e e^2}} = \frac{1}{\omega_p} \sqrt{\frac{e \Delta U}{2m_e}}. \quad (4)$$

Занесём результаты в таблицу 4.

Найдём *дебаевский радиус*, учитывая  $T_i \approx 300$  К, по формуле

$$r_D = \sqrt{\frac{kT_i}{4\pi n_e e^2}} = \frac{1}{\omega_p} \sqrt{\frac{kT_i}{m_e}}. \quad (5)$$

Занесём результаты в таблицу 4. Из полученных значений ( $10^{-4} \dots 10^{-3}$  см) очевидно, что плазму можно считать *квазинейтральной* при всех используемых в работе токах разряда.

Оценим теперь среднее число ионов  $N_D$  в дебаевской сфере:

$$N_D = \frac{4\pi}{3} r_D^3 n_i. \quad (6)$$

Занесём результаты в таблицу 4. Из полученных значений ( $N_D \gg 1$ ) делаем вывод, что *плазма является идеальной*.

Давление в плазме приближённо равно  $P \approx 2$  торр = 266,6 Па, тогда можно найти полную концентрацию как  $n = \frac{P}{kT_i} = 6,44 \cdot 10^{22}$ . Степень ионизации плазмы равна

$$\alpha = \frac{n_i}{n}.$$

Посчитанные по этой формуле значения занесём в таблицу 4.

$I_p$ , мА	5,05	3,02	1,51
$T_e$ , $10^4 \cdot \text{K}$	4,6	4,6	4,5
$n_e$ , $10^{16} \cdot \text{м}^{-3}$	5,8	3,3	1,6
$\omega_p$ , $10^9 \cdot \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	13,4	10,2	7,1
$r_{De}$ , мкм	62,1	81,6	115,8
$r_D$ , мкм	5,1	6,6	9,6
$N_D$	32,2	39,7	59,3
$\alpha \cdot 10^{-7}$	9,0	5,1	2,5

Таблица 4: Параметры плазмы

Построим теперь график зависимости электронной концентрации  $n_e(I_p)$  от тока разряда. График приведён на рисунке 9.

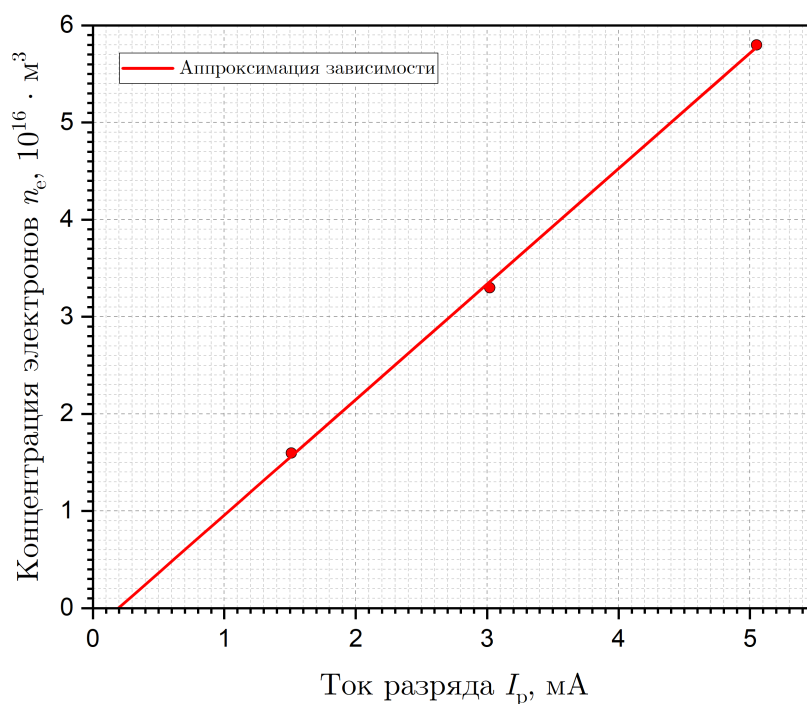


Рис. 9: Зависимость концентрации электронов  $n_e$  от тока разряда  $I_p$

## 5 Заключение

1. В данной работе были изучены вольт-амперная характеристика тлеющего разряда и свойства плазмы методом зондовых характеристик.

2. В первой части работы были проведены измерения ВАХ разряда, результат успешно сопоставлен участку, соответствующему тлеющему разряду на характерной ВАХ (см. рис. 2).
3. Во второй части работы были измерены зондовых характеристики плазмы при различных токах разряда. Полученные данные были обработаны, с их помощью было проведено исследование основных параметров плазмы – температуры и концентрации ионов (см. таблицу 4).
4. В процессе выполнения работы сделан вывод об *идеальности* и *квазинейтральности* плазмы во всём рабочем диапазоне.
5. Построены графики зависимости температуры плазмы и концентрации ионов в ней от тока разряда. Заметим, что концентрация с хорошей точностью линейно растёт с увеличением тока, температура, наоборот, растёт нелинейно.