

Лабораторная работа №3.5.1

Изучение плазмы газового разряда в неоне

Джокер Бэтмен, Б02-000, 25.09.2021

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, резистор, потенциометр, амперметры, вольтметры, переключатели.

Теоретическая справка

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, проходящий на первый электрод:

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

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

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

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 ΔU_1 и ΔU_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

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

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.

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

$$k_B T_e = \frac{1}{2} \frac{e I_{\text{ин}}}{\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0}},$$

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.

Экспериментальная установка

Схема установки для исследования плазмы газового разряда в неоне представлена на рисунке 2. Стеклопаяная 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}Ne при давлении 2 мм рт. ст. Катод и один из анодов (I или II) с помощью переключателя Π_1 подключаются через балластный резистор R_6 (~ 450 к Ω) к регулируемому

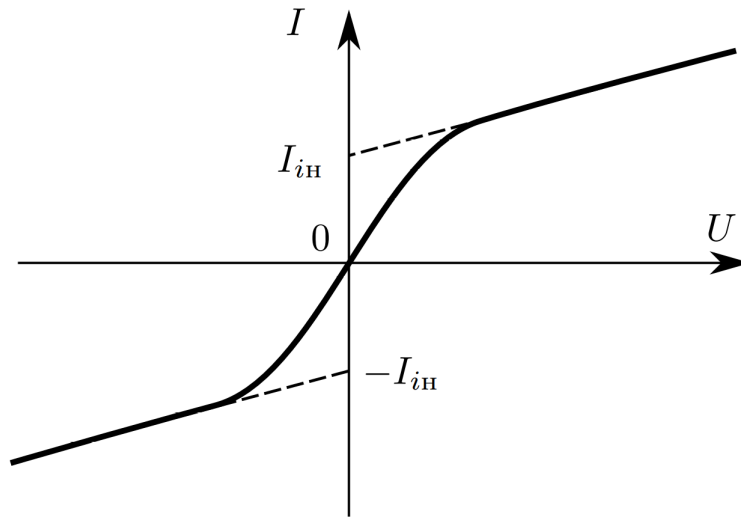


Рис. 1 — Вольт-амперная характеристика двойного зонда

высоковольтному источнику питания (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 напряжение на разрядной трубке – цифровым вольтметром V_1 (мультиметром GDM), подключённым к трубке через высокоомный ($25\text{ M}\Omega$) делитель напряжения с коэффициентом $\frac{R_1+R_2}{R_2} = 10$.

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 $d = 0,2\text{ мм}$ и имеют длину $l = 5,2\text{ мм}$. 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 (GMD). Для измерения зондового тока используется мультиметр A_2 (GDM). Анод-III в нашей работе не используется.

Ход работы

I. Вольт-амперная характеристика разряда

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 зажётся разряд. Показания вольтметра V_1 непосредственно перед зажиганием – т.н. напряжение зажигания разряда – равны $U_{\text{зж}} = (231 \pm 3)\text{ В}$.

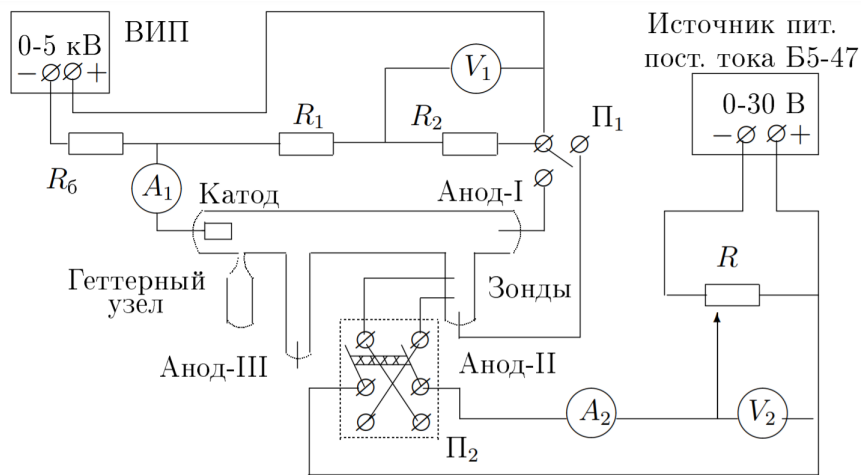


Рис. 2 — Схема установки для исследования газового разряда

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. Тоже 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 напряжения разряда U_p от его тока I_p при нарастании и убывании последнего

I_p , мА	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
U_p^{\nearrow} , В	35,0	34,2	32,9	30,0	28,1	27,0	26,4	25,8
U_p^{\searrow} , В	35,0	34,3	32,8	30,2	28,1	27,1	26,3	25,8
$U_p^{\langle \dots \rangle}$, В	35,0	34,3	32,9	30,1	28,1	27,1	26,4	25,8
I_p , мА	2,20	2,40	2,60	2,80	3,00	3,20	3,40	3,60
U_p^{\nearrow} , В	25,3	25,2	24,8	24,6	24,3	24,1	24,1	24,0
U_p^{\searrow} , В	25,4	25,0	24,8	24,6	24,2	24,0	24,0	24,0
$U_p^{\langle \dots \rangle}$, В	25,4	25,1	24,8	24,6	24,3	24,1	24,1	24,0
I_p , мА	3,80	4,00	4,20	4,40	4,60	4,80	5,00	—
U_p^{\nearrow} , В	24,0	23,9	23,8	23,8	23,7	23,7	23,6	—
U_p^{\searrow} , В	24,0	23,9	23,8	23,8	23,7	23,7	23,6	—
$U_p^{\langle \dots \rangle}$, В	24,0	23,9	23,8	23,8	23,7	23,7	23,6	—

Построим вольт-амперную характеристику разряда в координатах $I_p(U_p)$. Она представлена на рисунке 3. По наклону кривой на левом конце гра-

фика определим минимальное дифференциальное сопротивление разряда $R_{\text{диф}} \equiv \frac{dU}{dI} = (-255 \pm 10) \Omega$. Сравнив график с рисунком 10 (в Приложении к отчёту), сделаем вывод, что полученный в работе график *соответствует участку Г–Д*.

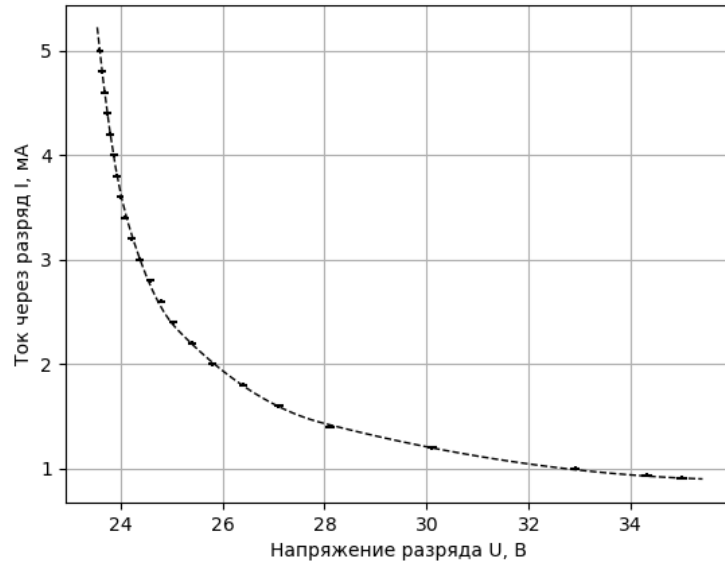


Рис. 3 — Вольт-амперная характеристика разряда $I_p(U_p)$. Сглаживающая кривая проведена с помощью кубического сплайна

II. Зондовые характеристики

Подготовим приборы к работе. Плавно увеличим напряжение ВИП до возникновения разряда. Установим максимально допустимое значение разрядного тока $I_p^{\text{max}} = 5,0 \text{ мА}$. Подготовим к работе источник питания, после чего с помощью потенциометра R установим на зонда 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^{max} при фиксированном токе разряда I_p . Проведём данные измерения при трёх различных значениях тока разряда (1,5 мА, 3,0 мА и 5,0 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 c также занесём в таблицу.

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. Результаты построений приведены на рисунках 4, 5 и 6.

Таблица 2 – Зависимость напряжения на зонде U_z от тока I_z через него значениях $I_p = 1,5$ мА, $3,0$ мА и $5,0$ мА соответственно

U_z , В	I_z , мкА	I_{zc} , мкА	I_z , мкА	I_{zc} , мкА	I_z , мкА	I_{zc} , 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

По графикам определим температуру электронов. Действовать будем следующим образом: сначала проведём асимптоту к току насыщения до пересечения с осью $U = 0$, определив тем самым ток насыщения $I_{ин}$. После этого проведём касательную к зондовой характеристике в начале координат, определив тем самым $\frac{dI}{dU}|_{U=0}$. Проведём горизонтали $I = I_{ин}$ до пересечения с касательной. Это, в свою очередь, определит значение ΔU , а тогда $kT_e = \frac{e\Delta U}{2}$. Полученные из графиков значения ΔU^\pm и T_e занесём в таблицу 3. Основным источников погрешности T_e будем считать неидеальность совпадения ΔU^\pm при разных полярностях напряжения на зонде, а также погрешности вольтметра и амперметра.

Таблица 3 – Зависимость температуры электронов T_e от тока I_p через разряд

I_p , мА	$1,50 \pm 0,02$	$3,00 \pm 0,02$	$5,00 \pm 0,02$
$I_{ин}^+$, мкА	26,0	55,0	108,6
$I_{ин}^-$, мкА	26,7	55,3	108,3
$I_{ин}$, мкА	$26,4 \pm 0,4$	$55,1 \pm 0,3$	$108,5 \pm 0,4$
ΔU^+ , В	6,88	7,83	10,16
ΔU^- , В	6,89	7,81	10,13
ΔU , В	6,89	7,82	10,15
T_e , 10^4 К	$4,00 \pm 0,03$	$4,54 \pm 0,04$	$5,89 \pm 0,05$

Построим на одном листе семейство отцентрированных зондовых характеристик (рисунок 7).

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

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

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, несложно найти их плазменную частоту колебаний по формуле

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} \text{ [СГС]} = 5,6 \cdot 10^4 \sqrt{n_e} \text{ [СГС]} = 5,6 \cdot 10^1 \sqrt{n_e} \text{ [СИ]}.$$

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

Рассчитаем теперь электронную поларизационную длину r_{De} . Используем формулу

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

Занесём результаты в таблицу 4.

По формуле

$$r_D = \sqrt{\frac{kT_i}{4\pi n_e e^2}} = \frac{1}{\omega_p} \sqrt{\frac{kT_i}{m_e}},$$

где $T_i \approx 300$ К, найдём дебаевский радиус. 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:

$$N_D = \frac{4\pi}{3} r_D^3 n_i.$$

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

Давление в плазме приблизительно 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.

Также занесём в таблицу дифференциальное сопротивление ВАХ разряда при соответствующих значениях I_p .

Построим теперь графики зависимостей электронной температуры $T_e(I_p)$ и концентрации $n_e(I_p)$ от тока разряда. Графики приведены на рисунках 8 и 9.

Таблица 4 – Параметры плазмы

I_p , мА	$1,50 \pm 0,02$	$3,00 \pm 0,02$	$5,00 \pm 0,02$
$R_{\text{диф}}$, к Ω	$5,00 \pm 0,15$	$1,25 \pm 0,07$	$0,26 \pm 0,01$
T_e , 10^4 К	$4,00 \pm 0,03$	$4,54 \pm 0,04$	$5,89 \pm 0,05$
n_e , 10^{16} м $^{-3}$	$2,29 \pm 0,02$	$4,50 \pm 0,05$	$7,77 \pm 0,08$
ω_p , 10^9 рад/с	$8,47 \pm 0,02$	$11,88 \pm 0,03$	$15,60 \pm 0,04$
r_{De} , мкм	$91,9 \pm 0,5$	$69,8 \pm 0,4$	$60,6 \pm 0,3$
r_D , мкм	$7,96 \pm 0,02$	$5,68 \pm 0,02$	$4,32 \pm 0,01$
N_D	$48,4 \pm 0,2$	$34,5 \pm 0,1$	$26,3 \pm 0,1$
α , 10^{-7}	$3,56 \pm 0,02$	$6,99 \pm 0,04$	$12,06 \pm 0,06$

Вывод

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

В первой части работы были проведены измерения ВАХ разряда, результат успешно сопоставлен участку, соответствующему тлеющему разряду на характерной ВАХ (см. рисунок 10).

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).

В этой же части работы сделан вывод об *идеальности* и *квазинейтральности* плазмы во всём рабочем диапазоне.

Построены графики зависимости температуры плазмы и концентрации ионов в ней от тока разряда. Видим, что концентрация с хорошей точностью линейно растёт с увеличением тока, в то время как температура растёт нелинейно (к слову, полученные для температуры точки с хорошей точностью ложатся на параболу $y = 3,86 + 0,09x^2$ с вершиной в непосредственной близости от начала координат, что говорит о возможной квадратичной зависимости температуры электронов от тока разряда).

Относительно невысокие погрешности полученных значений говорят о точности методов, корректности работы оборудования и правильности проведения эксперимента.

1 Приложение. Вольт-амперная характеристика разряда в неоне

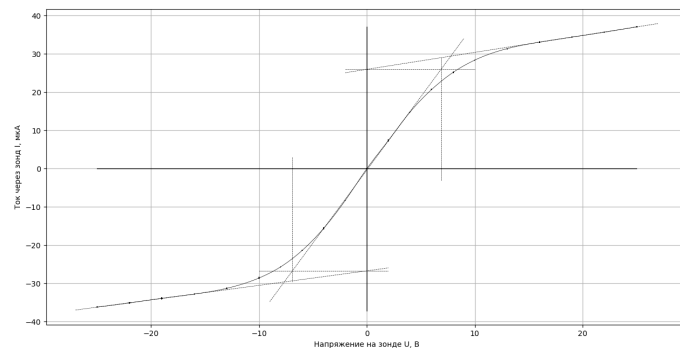


Рис. 4 — Зондовая характеристика $I_z(U_z)$ при токе через разряд $I_p = 1,5$ мА. Сглаживающая кривая проведена с помощью кубического сплайна

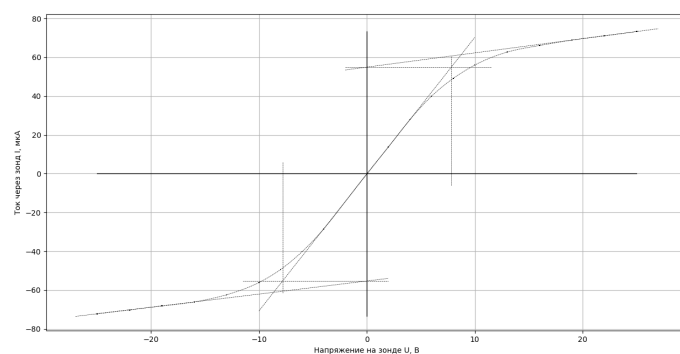


Рис. 5 — Зондовая характеристика $I_z(U_z)$ при токе через разряд $I_p = 3,0$ мА. Сглаживающая кривая проведена с помощью кубического сплайна

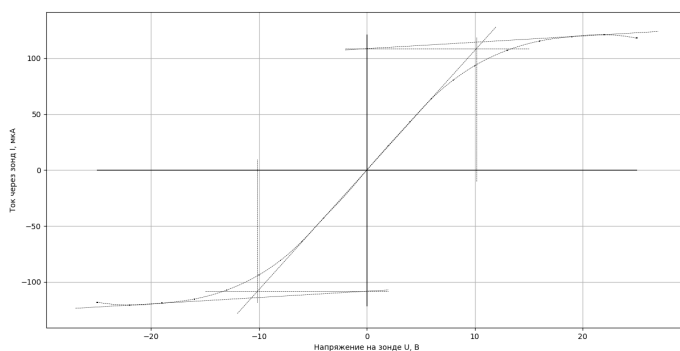


Рис. 6 — Зондовая характеристика $I_z(U_z)$ при токе через разряд $I_p = 5,0$ мА. Сглаживающая кривая проведена с помощью кубического сплайна

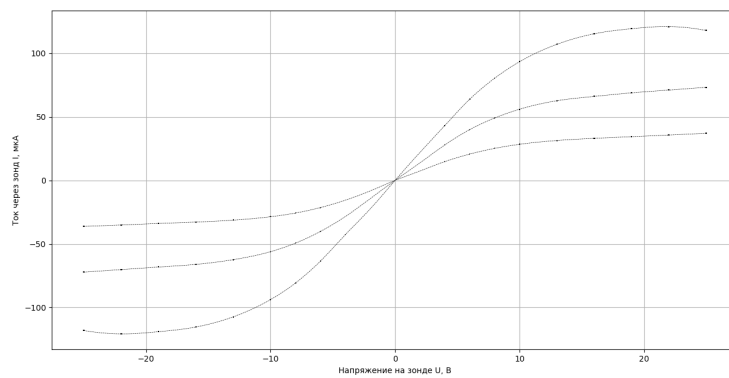


Рис. 7 — Семейство зондовых характеристик $I_z(U_z)$ при токах через разряд $I_p = 1,5$ мА, $3,0$ мА и $5,0$ мА. Сглаживающие кривые проведены с помощью кубических сплайнов

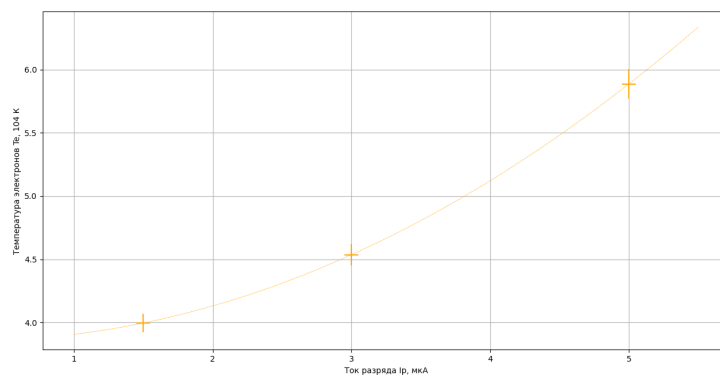


Рис. 8 — Зависимость температуры электронов T_e от тока разряда I_p .
Сглаживающая кривая проведена с помощью аппроксимации
экспериментальных точек зависимостью $y = a + cx^2$

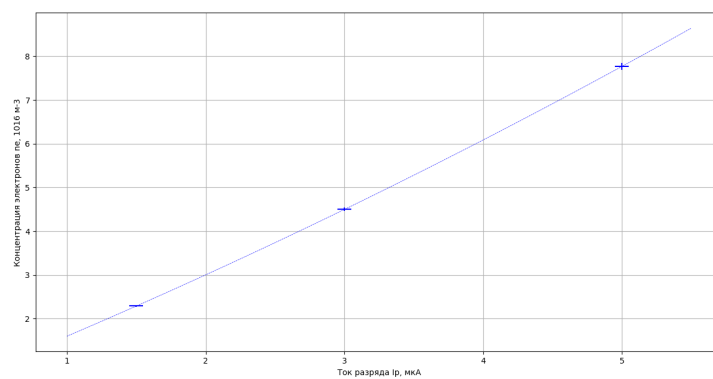


Рис. 9 — Зависимость концентрации электронов n_e от тока разряда I_p .
Прямая проведена по МНК

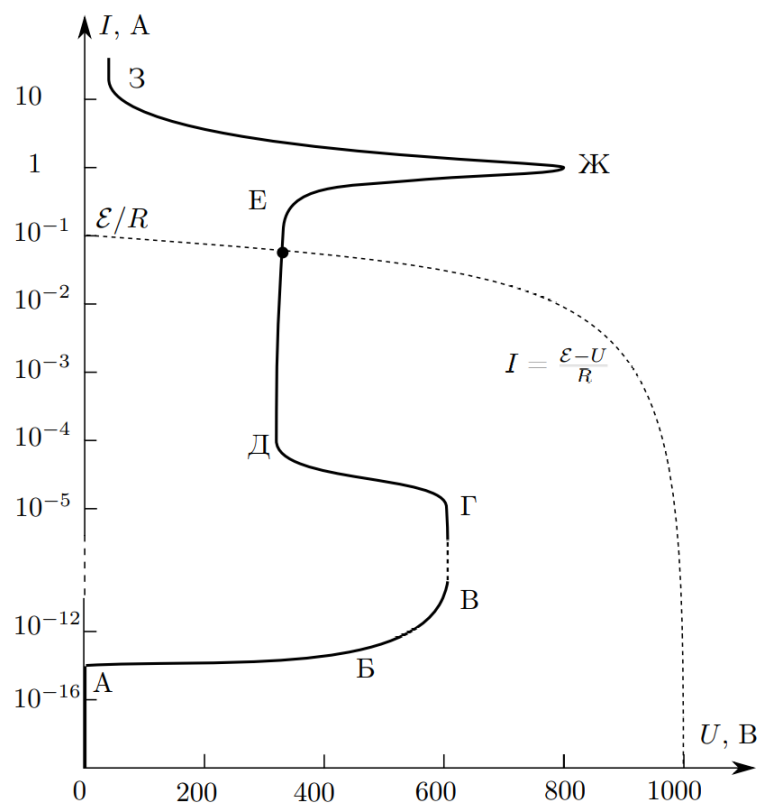


Рис. 10 — Вольт-амперная характеристика разряда в неоне