

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

ИЗУЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА В НЕОНЕ

Выполнил:
Деревянченко Михаил
Группа:
Б03-106

Долгопрудный, 2022

Оглавление

1. Аннотация.....	3
2. Теоретические сведения.....	4
3. Экспериментальная установка и методика измерений.....	10
4. Проведение измерений и обработка результатов.....	13
5. Обсуждение результатов.....	22
6. Вывод.....	24

1. Аннотация

Целью данной работы являются:

1. Снятие вольт-амперной характеристики тлеющего разряда и зондовые характеристики при разных токах разряда.
2. Рассчитать концентрацию и температуру электронов в плазме, плазменную частоту, поляризационную длину, дебаевский радиус экранирования и степень ионизации.

2. Теоретические сведения

2.1 Плазма

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

$$\operatorname{div} E = 4 \pi \rho$$

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

$$\frac{d^2 \varphi}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\varphi}{dr} = -4 \pi \rho$$

Плотности заряда электронов и ионов (которые мы считаем бесконечно тяжёлыми и поэтому неподвижными)

$$\rho_e = -ne \exp\left(\frac{e\varphi}{kT_e}\right)$$

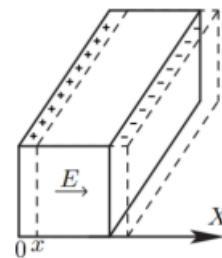
Расстояние, на которое распространяется действие электрического поля отдельного заряда в плазме:

$$r_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4 \pi n e^2}} \quad \text{- радиус Дебая.}$$

Среднее число ионов в сфере такого радиуса

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

Теперь выделим параллелепипед с плотностью n электронов, сместим их на x . Возникнут поверхностные заряды $\sigma = nex$, поле от которых будет придавать электронам ускорение:



$$\frac{d^2 x}{dx^2} = \frac{-eE}{m} = \frac{-4\pi n e^2}{m} x$$

Отсюда получаем плазменную (ленгмюровскую) частоту колебаний электронов:

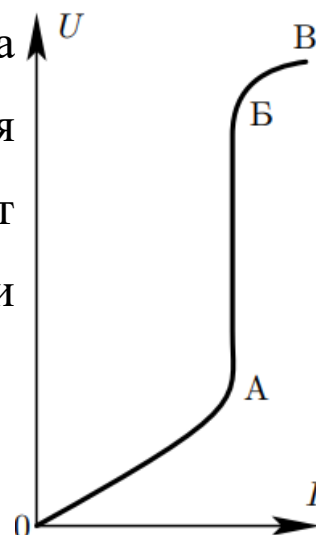
$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n e^2}{m}}$$

2.2 Газовый разряд

Газовый разряд — процесс возникновения ионизации газа под действием приложенного электрического поля.

Предположим, что ионы в газовом проводнике создаются исключительно внешним ионизатором. Тогда при прекращении действия этого ионизатора ток и, следовательно, разряд прекращаются. Такой разряд называется несамостоятельным.

ВАХ несамостоятельного разряда представлена справа. С повышением напряжения на газовом промежутке ток сначала возрастает (кривая ОА), а потом достигает насыщения и

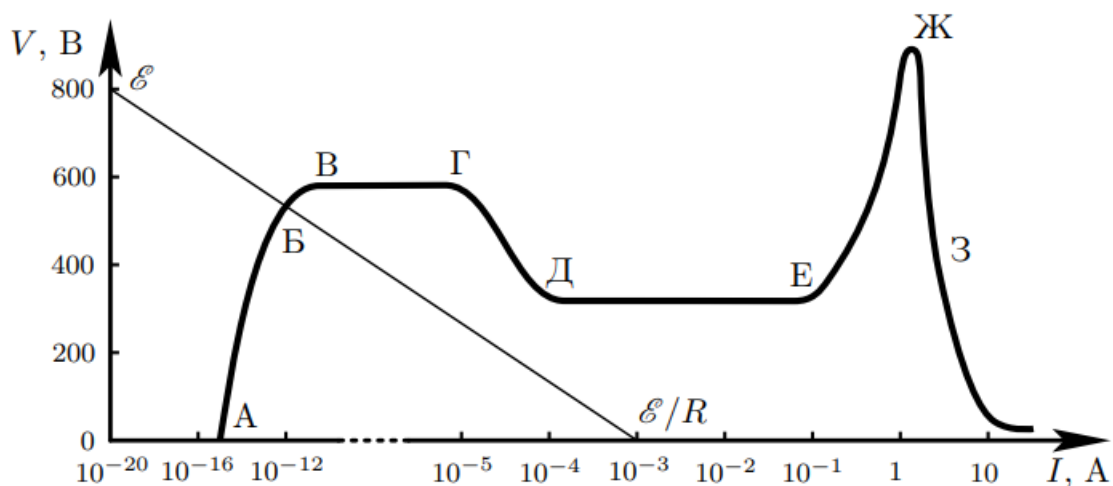


остаётся практически постоянным (участок АБ), что соответствует полному вытягиванию на электроды зарядов, создаваемых внешним ионизатором. При дальнейшем повышении напряжения ток снова начинает возрастать (участок БВ). Это значит, что имеющиеся ионы, и прежде всего электроны, за период между двумя последовательными столкновениями набирают такую энергию, что возникнет столкновительная ионизация, то есть рождение новых, вторичных ионов. При этом возникают и развиваются электронные лавины.

В достаточно сильном электрическом поле проводимость газа может возрасти скачком — возникает пробой. Соответствующее напряжение на газовом промежутке называется напряжением пробоя, или **напряжением зажигания**. Если после возникновения пробоя убрать внешний ионизатор, то разряд не прекращается. Разряд перешёл в режим самостоятельного разряда: теперь ионизация поддерживается процессами в самом разряде.

В широком смысле термин электрический пробой означает превращение изолятора в проводник в результате приложения к нему достаточно сильного поля. Для газа это означает переход в ионизованное состояние. При этом возрастание тока приводит к ещё большему возрастанию концентрации ионов, что приводит к

возрастанию проводимости и, следовательно, к понижению напряжения, необходимого для поддержания такого тока. Если ввести понятие дифференциальное сопротивление как производную по току от напряжения, то в этом случае возникает новое явление — отрицательное дифференциальное сопротивление.



ВАХ разряда в неоне и нагрузочная прямая

2.3 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:

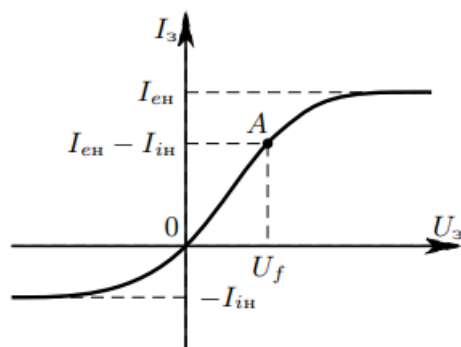
$$I_{e0} = \frac{n \langle v_e \rangle}{4} eS$$

$$I_{i0} = \frac{n \langle v_i \rangle}{4} eS$$

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:

$$I_{in} = 0.4 ne \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}$$

2.4 Двойной зонд

Двойным зондом называется система, состоящая из двух одинаковых зондов, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга. Между зондами создаётся разность потенциалов, которая по величине много меньше плавающего потенциала 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. Пусть потенциалы на первом и втором зондах равны:

$$U_1 = -U_f + \Delta U_1$$

$$U_2 = -U_f + \Delta U_2$$

Между зондами $U = \Delta U_2 - \Delta U_1$. Ток на первом электроде:

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

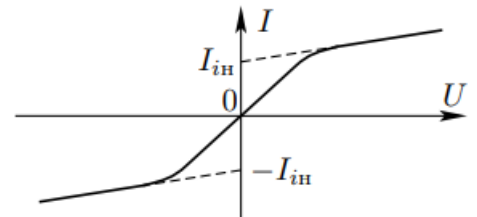
При $\Delta U_1 = 0$ электронный и ионный ток компенсируют друг друга. Тогда:

$$I_1 = I_{in} \left(1 - \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e}\right) \right)$$

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

С учетом последовательного соединения зондов ($I_1 = -I_2 = I$):

$$U = \frac{kT_e}{e} \ln \frac{1 - I/I_{in}}{1 + I/I_{in}}$$



$$I = I_{in} \exp\left(-\frac{eU}{2kT_e}\right) + AU$$

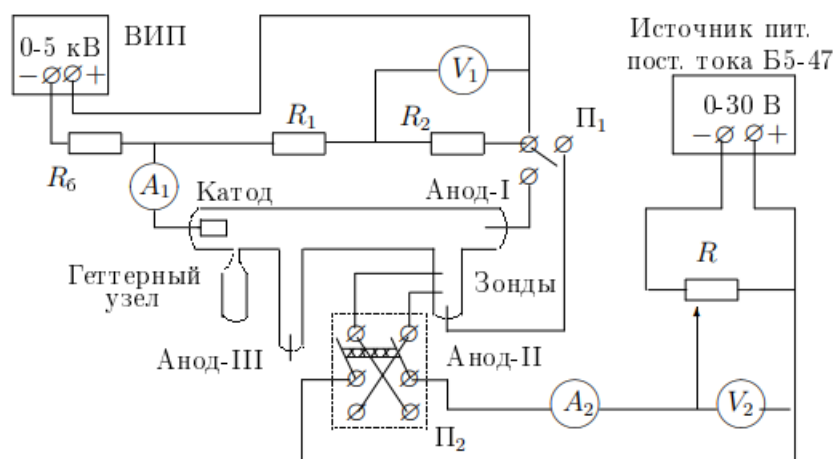
где A — некоторая константа, величина которой может быть найдена из опыта.

Дифференцируя формулу в точке $U = 0$, учитывая малый угол и A стремящееся к нулю, найдем:

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

3. Экспериментальная установка и методика измерений

- Экспериментальная установка:



Стеклянная газоразрядная трубка имеет холодный (не нагреваемый) 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 (~ 500

кОм) к регулируемому высоковольтному источнику питания (ВИП) с выходным напряжением до нескольких киловольт.

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 — вольтметром V_1 , подключенным к трубке через высокоомный (несколько десятков МОм) делитель напряжения с коэффициентом $(R_1+R_2)/R_2$. 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 и имеют длину l . Они подключены к источнику питания через потенциометр R . Переключатель П2 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 вольтметром V_2 . Для измерения зондового тока используется микроамперметр A_2 .

- Методика измерений:

1. Снять ВАХ разряда $I_p(U_p)$

2. Снять ВАХ двойного зонда $I_3(U_3)$ при фиксированном токе разряда.
3. Снять зондовые характеристики при токах разряда, равных 3 и 1.5 мА.

4. Проведение измерений и обработка результатов

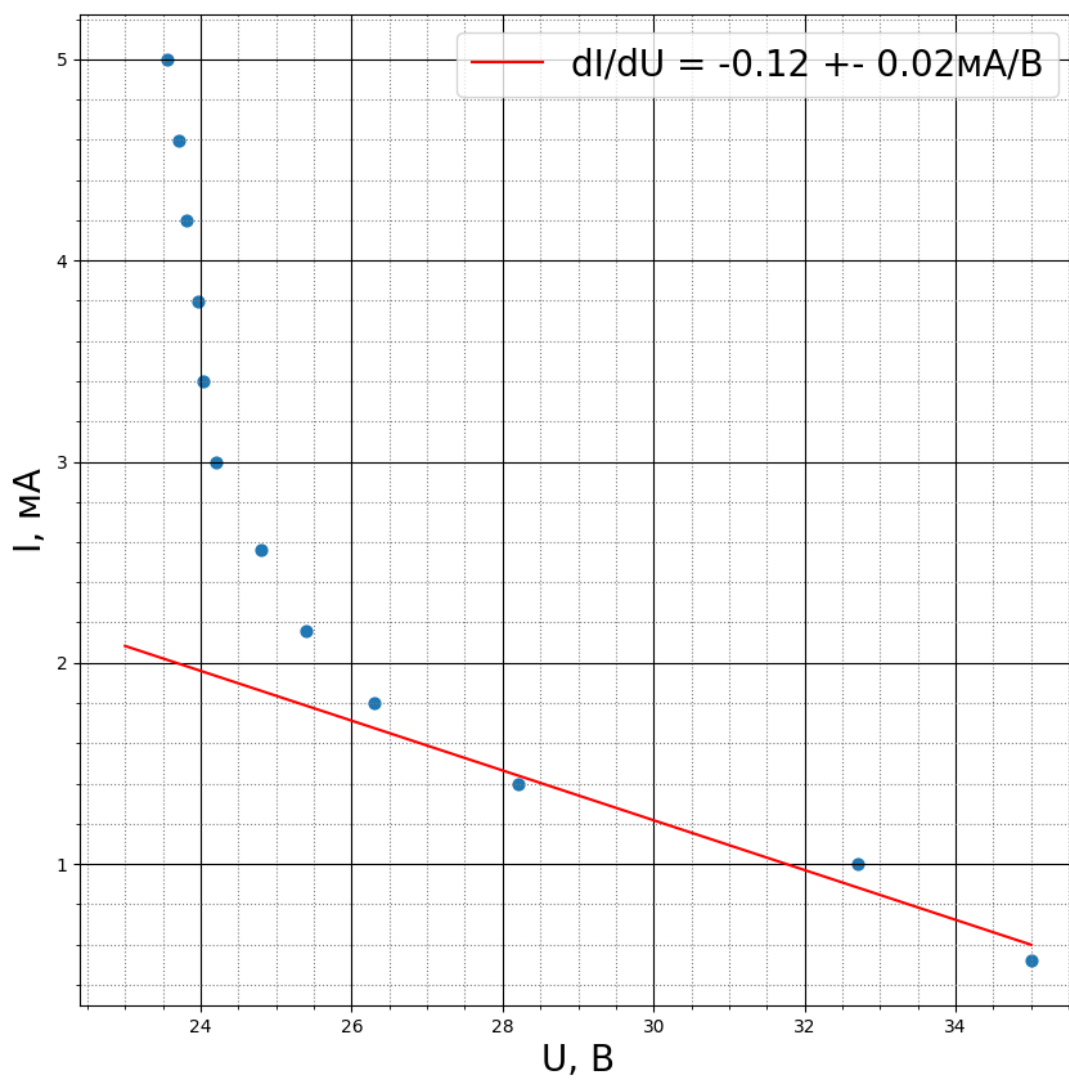
$$1.U_{\text{ЗАЖ}} = 216\text{В}$$

ВАХ разряда

I, мА	U, В
0.52	35
1	32.8
1.4	28.2
1.8	26.3
2.16	25.4
2.56	24.8
3	24.2
3.4	24.04
3.8	23.97
4.2	23.81
4.6	23.71
5	23.56
4.6	23.72
4.2	23.81
3.8	23.97

3.4	24.01
3	24.15
2.56	24.79
2.16	25.38
1.8	26.20
1.4	27.93
1	32.70
0.52	35.12

ВАХ разряда



Наибольшее вклад в погрешность имеет погрешность МНК, а систематические погрешности приборов малы, по сравнению с ней. Также учитываем наличие делителя напряжения с коэффициентом 10.

$R_{\max} = (8.1 \pm 0.4) \cdot 10^4 \text{ Ом}$ — максимально дифференциальное сопротивление разряда.

2. ВАХ двойного зонда

$I_p = 5 \text{ мА}$		$I_p = 3 \text{ мА}$		$I_p = 1.5 \text{ мА}$	
$I_z, \text{ мкА}$	$U_z, \text{ В}$	$I_z, \text{ мкА}$	$U_z, \text{ В}$	$I_z, \text{ мкА}$	$U_z, \text{ В}$
124.0	24.98	77.9	25.01	40.4	25.0
127.3	21.98	75.7	22.02	39.0	22.04
125.6	19.00	73.4	19.0	37.7	19.0
121.2	16.02	70.9	15.98	36.3	16.04
113.2	13.03	67.1	13.0	34.5	12.9
99.1	10.00	60.4	10.03	31.5	10.0
85.8	8.00	53.3	8.01	28.3	8.01
68.8	6.0	44.1	6.03	23.8	6.02
48.1	4.01	31.9	4.0	17.6	3.98
23.6	2.0	17.9	2.02	10.3	2.02
4.5	0.50	6.2	0.5	4.1	5.07
8.1	-0.50	1.9	-0.51	0.5	-0.5
-11.8	-2.02	-9.6	-2.02	-5.8	-2.03
-36.3	-4.05	-23.4	-3.98	-13.1	-4.01

-56.7	-6.0	-35.4	-6.04	-18.9	-5.97
-73.9	-8.0	-44.3	-7.99	-23.3	-8.0
-87.0	-9.99	-51.2	-10.0	-26.3	-9.98
-101.3	-13.03	-57.6	-13.06	-29.1	-12.98
-109.1	-16.03	-61.1	-16.02	-30.6	-16.0
-112.9	-19.03	-63.3	-19.01	-31.8	-19.0
-114.1	-22.0	-65.3	-22.02	-32.9	-22.98
-111.2	-25	-67.2	-25.01	-34.1	-25.01

Из-за неточности вольтметра при изменении полярности происходил скачок тока. В следующей таблице этот скачок учтен и по этим данным строим ВАХи зондов.

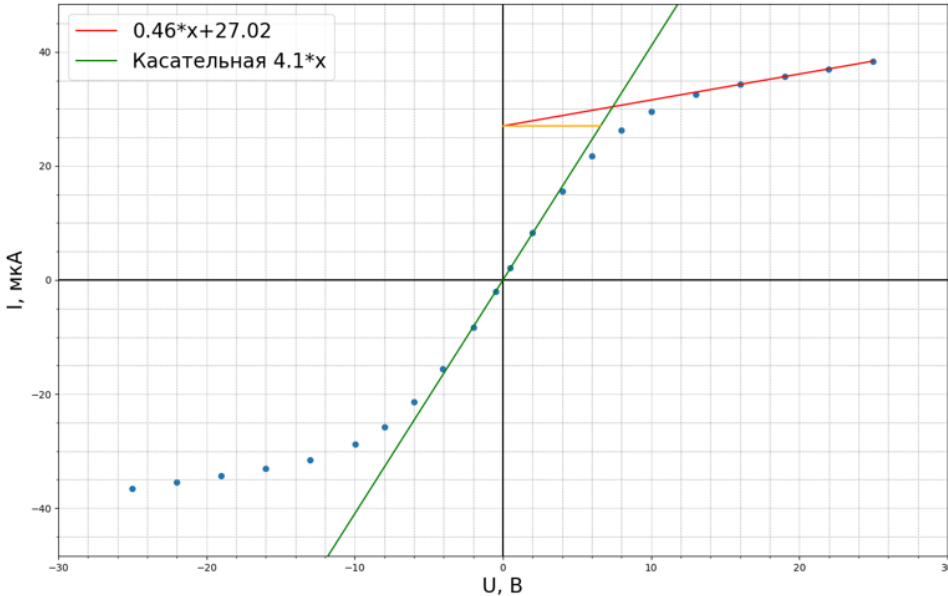
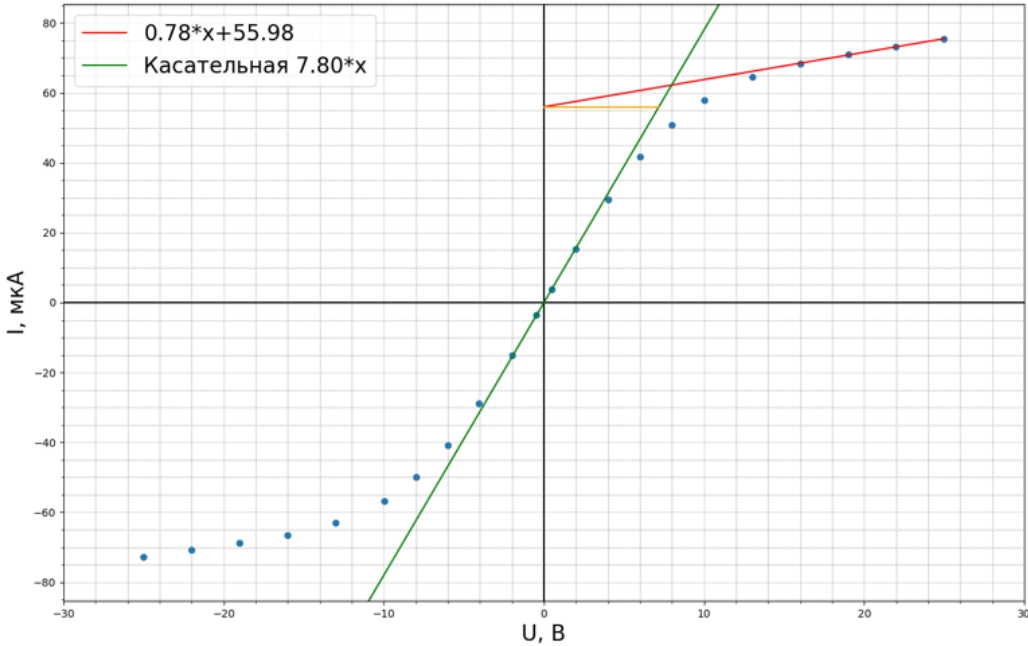
$I_p = 5\text{мА}$ — скачок 0.9-(-13.3)мкА

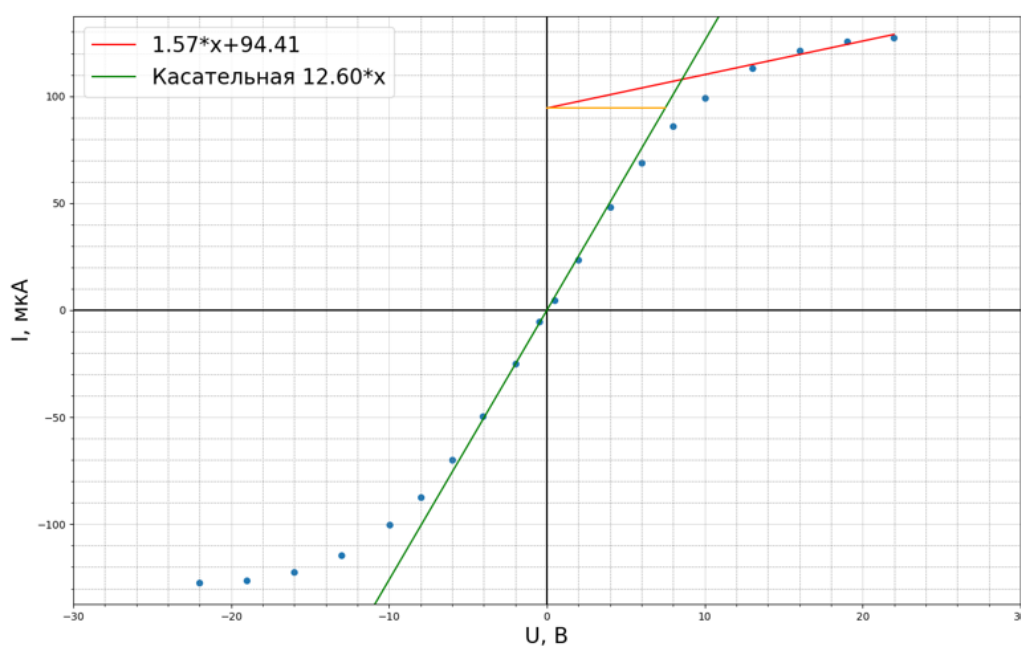
$I_p = 3\text{мА}$ — скачок 2.5-(-5.5)мкА

$I_p = 1.5\text{мА}$ — скачок 2.0-(-2.5)мкА

$I_p = 5\text{мА}$		$I_p = 3\text{мА}$		$I_p = 1.5\text{мА}$	
$I_3, \text{мкА}$	$U_3, \text{В}$	$I_3, \text{мкА}$	$U_3, \text{В}$	$I_3, \text{мкА}$	$U_3, \text{В}$
123.1.	24.98	77.9	25.01	38.4	25.0
126.4	21.98	75.7	22.02	37	22.04
124.7	19.00	73.4	19.0	35.7	19.0
120.3	16.02	70.9	15.98	34.3	16.04
112.3	13.03	67.1	13.0	32.5	12.9
98.2	10.00	60.4	10.03	29.5	10.0

84.9	8.00	53.3	8.01	26.3	8.01
67.9	6.0	44.1	6.03	21.8	6.02
47.2	4.01	31.9	4.0	15.6	3.98
22.7	2.0	17.9	2.02	8.3	2.02
3.6	0.50	6.2	0.5	2.1	0.5
-5.2	-0.50	1.9	-0.51	-2	-0.5
-25.1	-2.02	-9.6	-2.02	-8.3	-2.03
-49.6	-4.05	-23.4	-3.98	-15.6	-4.01
-70.0	-6.0	-35.4	-6.04	-21.4	-5.97
-87.2	-8.0	-44.3	-7.99	-25.8	-8.0
-100.3	-9.99	-51.2	-10.0	-28.8	-9.98
-114.4	-13.03	-57.6	-13.06	-31.6	-12.98
-122.4	-16.03	-61.1	-16.02	-33.1	-16.0
-126.2	-19.03	-63.3	-19.01	-34.3	-19.0
-127.4	-22.0	-65.3	-22.02	-35.4	-22.98
-124.5	-25	-67.2	-25.01	-36.6	-25.01

I_p	Зондовые характеристики	$I_{ин},$ мкА	$\Delta U,$ эВ	T_e, K
1.5	<p>ВАХ зонда</p> 	27.0	6.6	$3.8 \cdot 10^4$
3	<p>ВАХ зонда</p> 	56.0	7.2	$4.2 \cdot 10^4$



Красная линия — асимптота;

Зеленая линия — касательная к графику в точке 0.

3. Характеристики плазмы

- Погрешность ΔU зависит от погрешностей МНК асимптоты и касательной к графику в точке 0, т. к.

$$\Delta U = \frac{I_{in}}{k}, \text{ где } k \text{ — коэффициент наклона касательной.}$$

Тогда

$$\epsilon_U = \sqrt{\epsilon_{I_{in}}^2 + \epsilon_k^2}$$

- Концентрация электронов:

$$n_e = \frac{I_{in}}{0.4 e \pi d l \sqrt{\frac{2 k T_e}{m_i}}}$$

$$\epsilon_n = \sqrt{\epsilon_{I_{in}}^2 + 0.5^2 \epsilon_U^2}$$

$$d = 0.2 \text{ мм}$$

$$l = 5.2 \text{ мм}$$

- Плазменная частота

$$\omega_p = 5.6 * 10^4 \sqrt{n_e} \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$\epsilon_\omega = 0.5 \epsilon_n$$

- Дебаевский радиус

$$\epsilon_r = 0.5 \sqrt{\epsilon_n^2 + \epsilon_U^2}$$

- Среднее число ионов в дебаевской сфере

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

- Степень ионизации плазмы

$$\alpha = \frac{n_i}{n} \quad - \text{доля ионизированных атомов, где } n - \text{общее}$$

число частиц в единице объема: $P = n k T_i$

$$P = 2 \text{ торр}$$

$$T_i \approx 300 \text{ К}$$

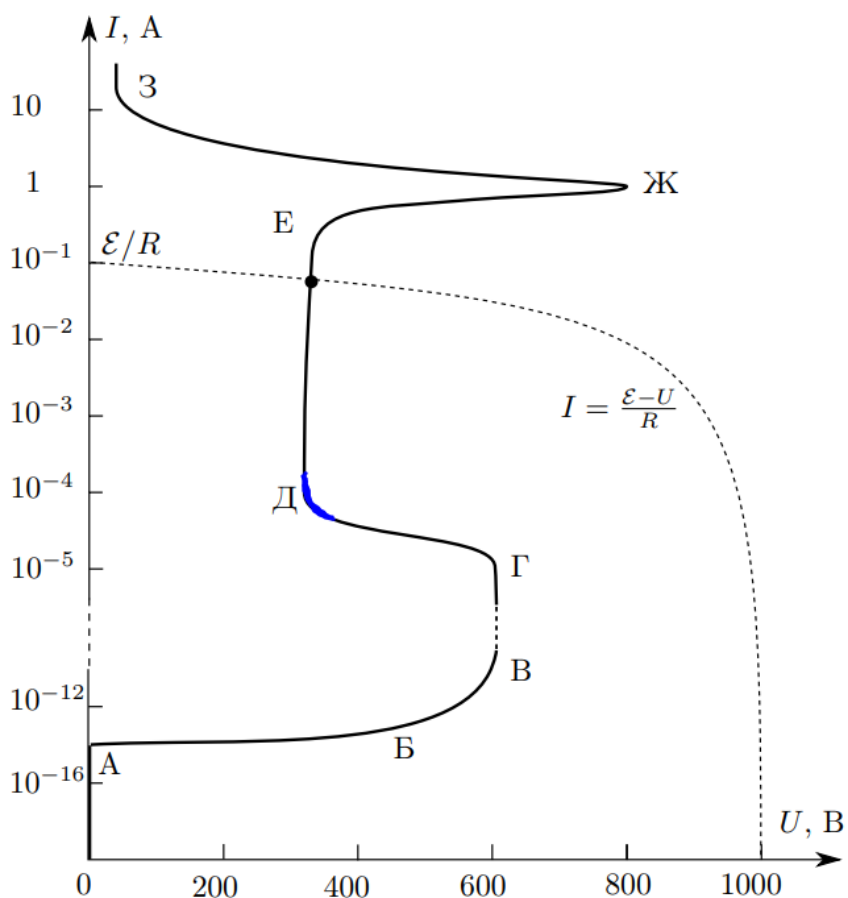
$$n = 6.4 * 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

I_p , MA	R , Ом	kT_e , эВ	n_e , см ⁻³	ω_p , рад/с
5	$(8.1 \pm 0.4) \cdot 10^4$	3.75 ± 0.22	$(7.98 \pm 0.40) \cdot 10^{10}$	$(1.58 \pm 0.04) \cdot 10^{10}$
3	$(8.1 \pm 0.4) \cdot 10^4$	3.6 ± 0.13	$(4.77 \pm 0.19) \cdot 10^{10}$	$(1.22 \pm 0.02) \cdot 10^{10}$
1.5	$(8.1 \pm 0.4) \cdot 10^4$	3.3 ± 0.12	$(2.40 \pm 0.09) \cdot 10^{10}$	$(8.6 \pm 0.2) \cdot 10^9$

I_p , MA	T_e , K	r_{De} , см	r_D , см	$\langle N_D \rangle$	α
5	$(4.36 \pm 0.26) \cdot 10^4$	$(5.1 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$	$(4.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-4}$	25	$1.2 \cdot 10^{-6}$
3	$(4.19 \pm 0.15) \cdot 10^4$	$(6.5 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$	$(5.4 \pm 0.2) \cdot 10^{-4}$	32	$7.4 \cdot 10^{-7}$
1.5	$(3.84 \pm 0.13) \cdot 10^4$	$(8.7 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$(7.7 \pm 0.2) \cdot 10^{-4}$	46	$3.7 \cdot 10^{-7}$

5. Обсуждение результатов

1. В работе исследовалась ВАХ разряда в неоне. Измеренная зависимость соответствует синему участку на рисунке справа.



2. Были измерены такие характеристики плазмы, как температура электронов, ток насыщения ионов, концентрация электронов, лонгмеровская частота, дебаевские радиусы электронов и ионов, среднее число ионов в дебаевской сфере, степень ионизации плазмы.

Сравнивая линейные размеры области плазмы l (порядка 10^1 см) и дебаевский радиус r_D (порядка 10^{-4} см) можно сказать, что $l \gg r_D$, а значит плазма является квазинейтральной.

Число частиц в дебаевской сфере N_D соответствует 2 порядку, при этом оно незначительно больше 1, поэтому газ можно лишь приближенно рассматривать как идеальный.

При увеличении тока разряда увеличиваются температура и концентрация электронов.

6. Вывод

Были измерены ВАХи разряда и двойного зонда, и по полученным данным вычислены основные характеристики плазмы. Результаты совпадают по величине (порядку) с ожидаемыми из теории значениями, а также соответствуют определению и описанию плазмы.