

Лабораторная работа № 3.5.1
Изучение плазмы газового разряда в неоне

Илья Прамский

Ноябрь 2023

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.

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 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

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

и, разрешая это равенство относительно I , получим

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

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_{in} 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

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

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

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

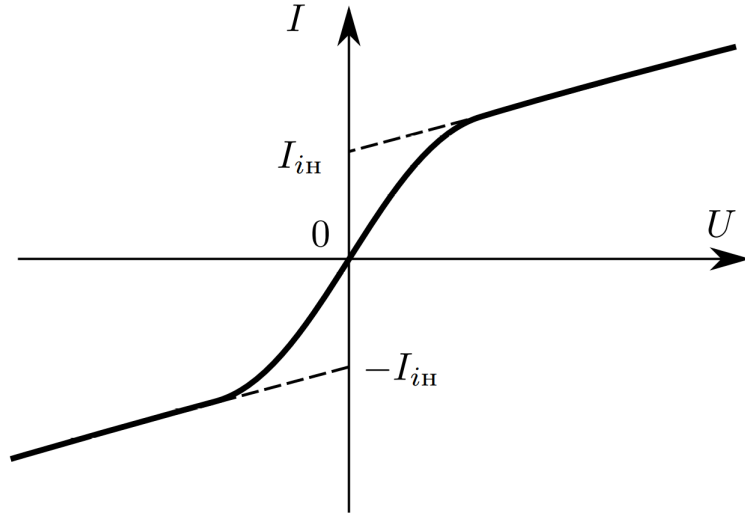


Рис. 1 — Вольт-амперная характеристика двойного зонда

Экспериментальная установка

Схема установки для исследования плазмы газового разряда в неоне представлена на рисунке 2. Стеклообразная газоразрядная трубка имеет холодный (ненагреваемый) полый катод, три анода и *геттерный узел* – стеклообразный 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 ($\sim 450 \text{ к}\Omega$) к регулируемому высоковольтному источнику питания (ВИП) с выходным напряжением до 5 кВ.

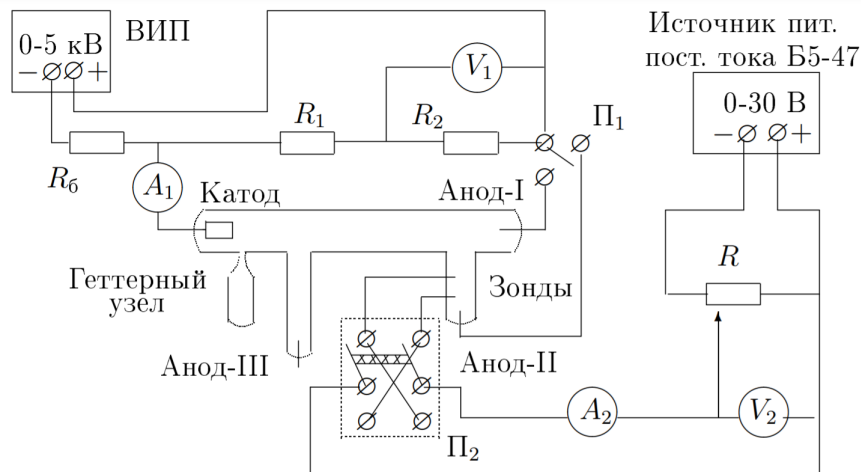


Рис. 2 — Схема установки для исследования газового разряда

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 ($25 \text{ М}\Omega$) 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.

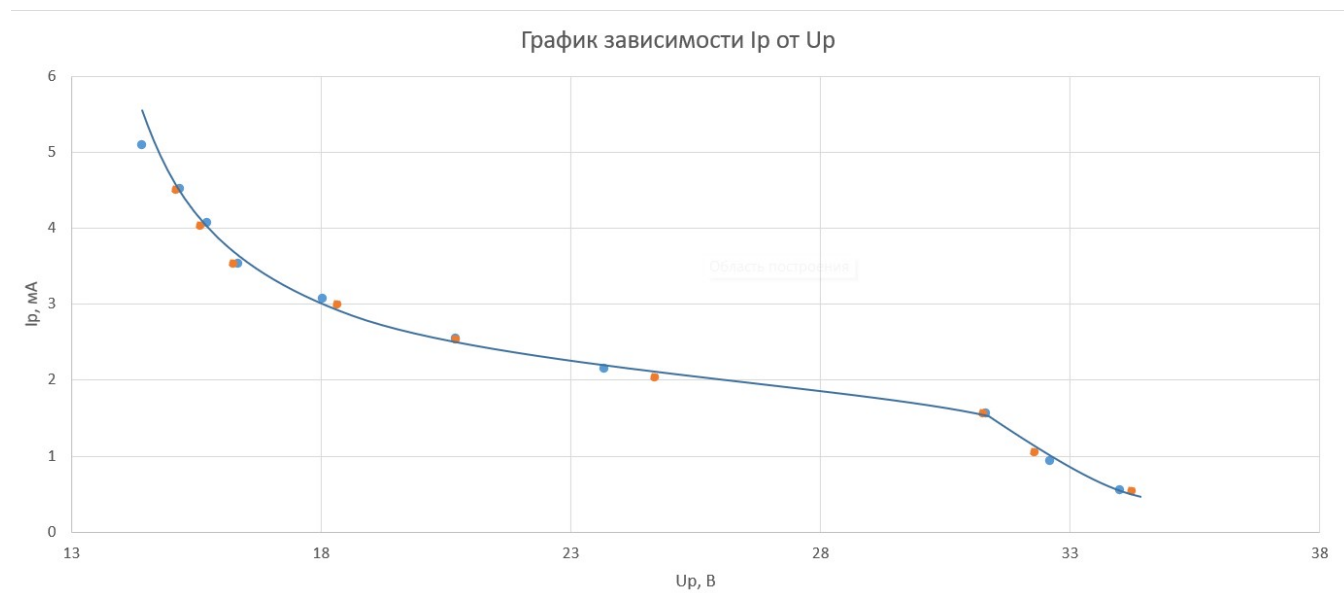
Зонды изготовлены из молибденовой проволоки диаметром $d = 0,2 \text{ мм}$ и имеют длину $l = 5,2 \text{ мм}$. Они подключены к источнику питания GPS через потенциометр R . Переключатель Π_2 позволяет изменять полярность напряжения на зондах. Величина напряжения на зондах изменяется с помощью дискретного 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

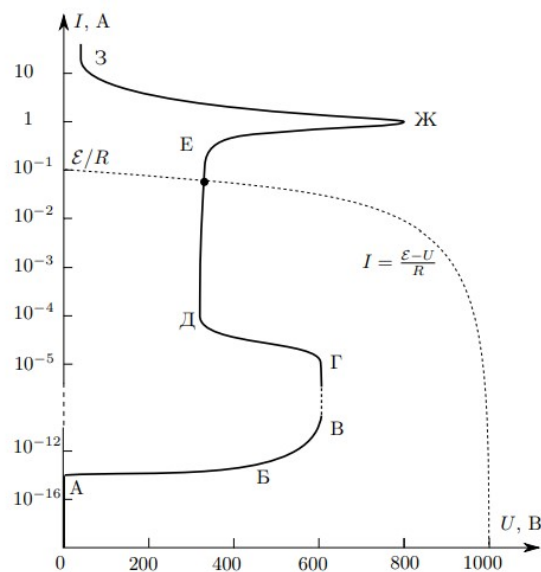
Для начала установим переключатель Π_1 в положение „Анод-Г“. Затем, плавно увеличивая напряжение ВИП, найдем напряжение зажигания разряда. В нашем случае $U_{\text{зж}} = 193 \text{ В}$.

Теперь будем менять ток разряда I_p и снимать вольт-амперную характеристику разряда. Данные внесем в таблицу и по ним изобразим график зависимости $I_p(U_p)$.

нарастание U_p , В	тока I_p , мА	убывание U_p , В	тока I_p , мА
34,00	0,55	15,10	4,50
32,60	0,93	15,60	4,02
31,32	1,55	16,26	3,53
23,69	2,14	18,33	3,00
20,70	2,55	20,70	2,53
18,05	3,07	24,70	2,03
16,35	3,53	31,26	1,55
15,72	4,07	32,30	1,04
15,19	4,51	34,24	0,54
14,43	5,09		

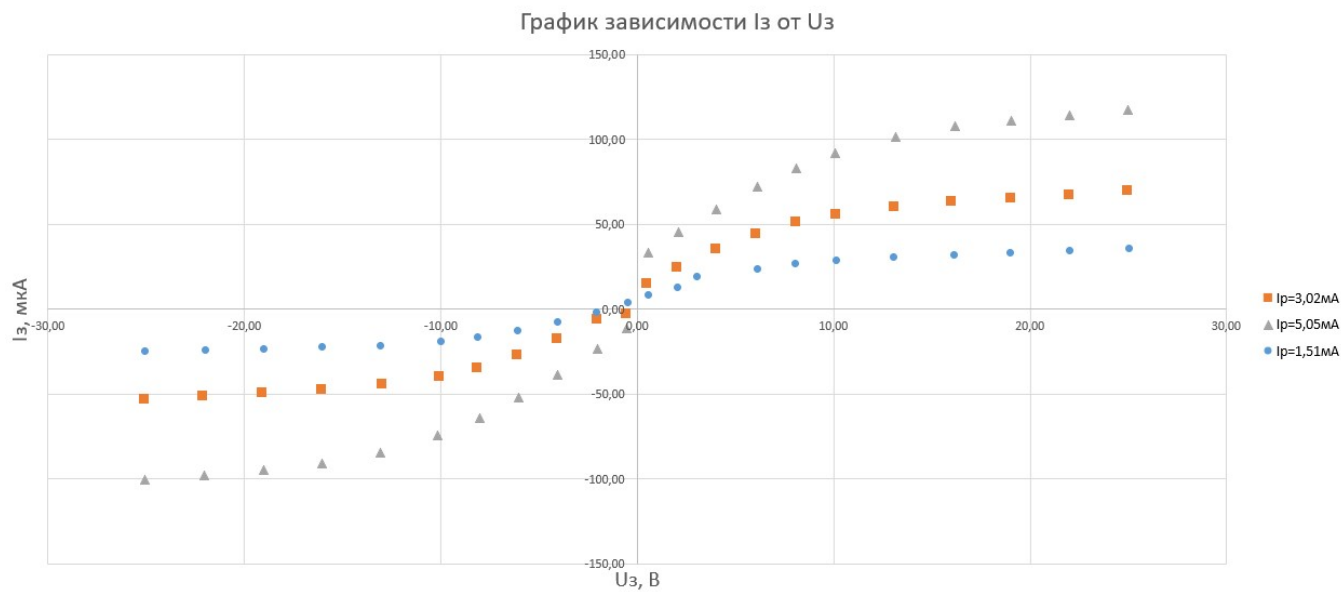


По минимальному наклону кривой, определим максимальное дифференциальное сопротивление разряда $R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} = -13200 \text{ Ом}$. Также сравним наш участок с графиком из приложения. Легко заметить, что данный участок соответствует участку Г-Д на рисунке из приложения.



Теперь же установим переключатель Π_1 в положение „Анод-II“, а переключатель Π_2 в положение „+“. Сначала зафиксируем ток разряда (в нашем случае он будет принимать 3 значения: 5,05; 3,02; 1,51 мА), а затем, установив на зонде максимальное напряжение $U = 25$ В, будем снижать его до $U = -25$ В (отрицательные напряжения получаются при изменении положения переключателя 2 на „-“) и фиксировать значения напряжения и тока двойного зонда. По этим данным построим зависимость $I_3(U_3)$.

$I_p=5,05\text{mA}$	$U_3, \text{В}$	$I_3, \text{мкА}$		$I_p=3,02\text{mA}$	$U_3, \text{В}$	$I_3, \text{мкА}$		$I_p=1,51\text{mA}$	$U_3, \text{В}$	$I_3, \text{мкА}$
	25,01	117,12		25,00	69,30			25,05	36,01	
	22,04	114,30		22,02	67,24			22,04	34,75	
	19,03	111,32		19,03	65,20			19,01	33,50	
	16,20	107,70		16,04	63,10			16,12	32,30	
	13,15	101,60		13,10	60,33			13,03	30,87	
	10,10	92,02		10,13	55,80			10,13	28,80	
	8,09	83,20		8,12	50,95			8,05	26,60	
	6,10	72,30		6,08	44,10			6,14	23,55	
	4,01	58,80		4,04	35,20			3,05	18,99	
	2,10	45,50		2,05	24,50			2,02	13,08	
	0,55	33,33		0,50	15,00			0,56	8,20	
	-0,56	-11,60		-0,55	-3,20			-0,48	3,92	
	-2,02	-23,40		-2,03	-6,02			-2,10	-1,84	
	-4,04	-38,67		-4,04	-17,50			-4,04	-7,75	
	-6,03	-52,37		-6,07	-27,20			-6,08	-12,90	
	-8,02	-64,47		-8,13	-34,70			-8,11	-16,62	
	-10,14	-74,70		-10,04	-39,90			-10,01	-19,10	
	-13,10	-84,87		-13,00	-44,50			-13,07	-21,32	
	-16,03	-90,93		-16,04	-47,80			-16,05	-22,35	
	-19,05	-94,70		-19,06	-49,65			-19,01	-23,13	
	-22,06	-97,70		-22,10	-51,40			-22,02	-23,93	
	-25,05	-100,66		-25,05	-53,20			-25,05	-24,74	



По полученным графикам определим несколько величин. Ток насыщения получим при пересечении асимптоты с осью ординат. $\frac{dI}{dU}|_{u=0}$ найдем из касательной к кривой в нуле. ΔU определим, как напряжение в точке, полученной пересечением горизонтали при токе равном току насыщения с касательной графика в нуле.

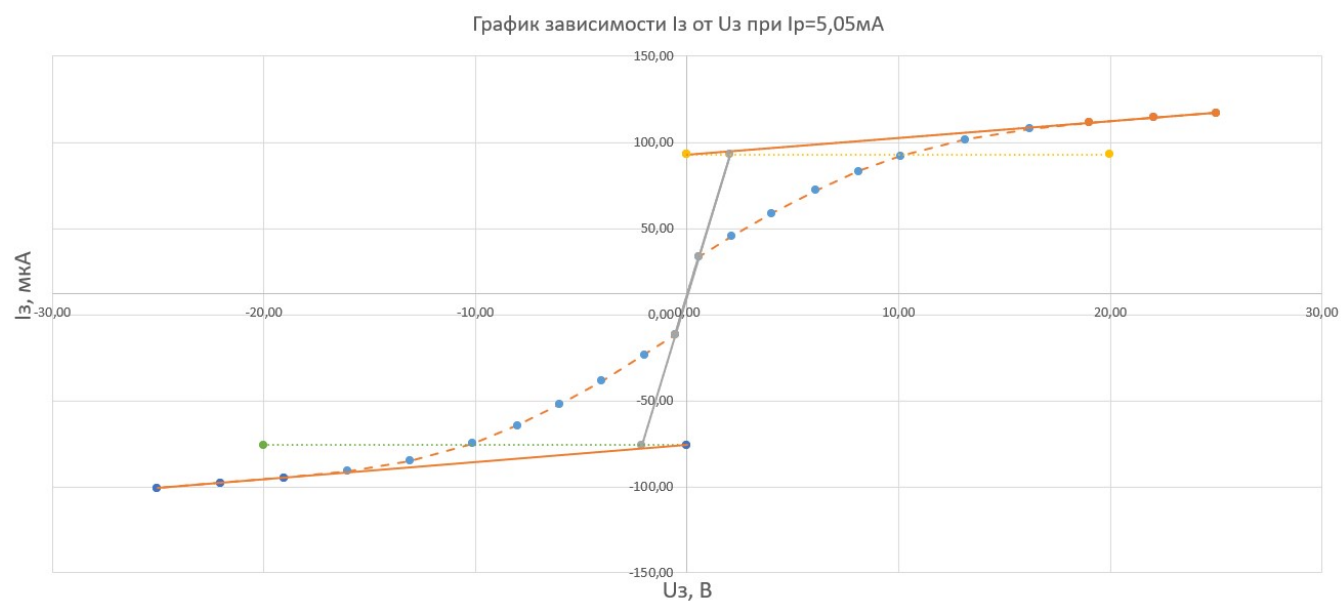


График зависимости I_z от U_z при $I_p=3,02\text{mA}$

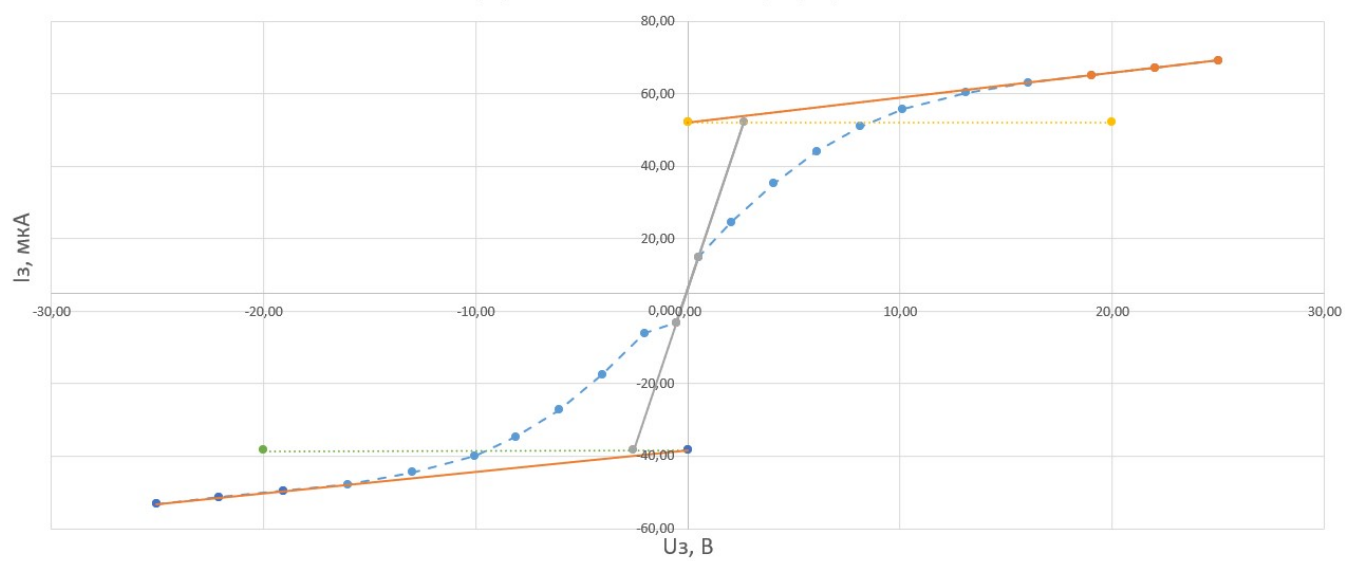
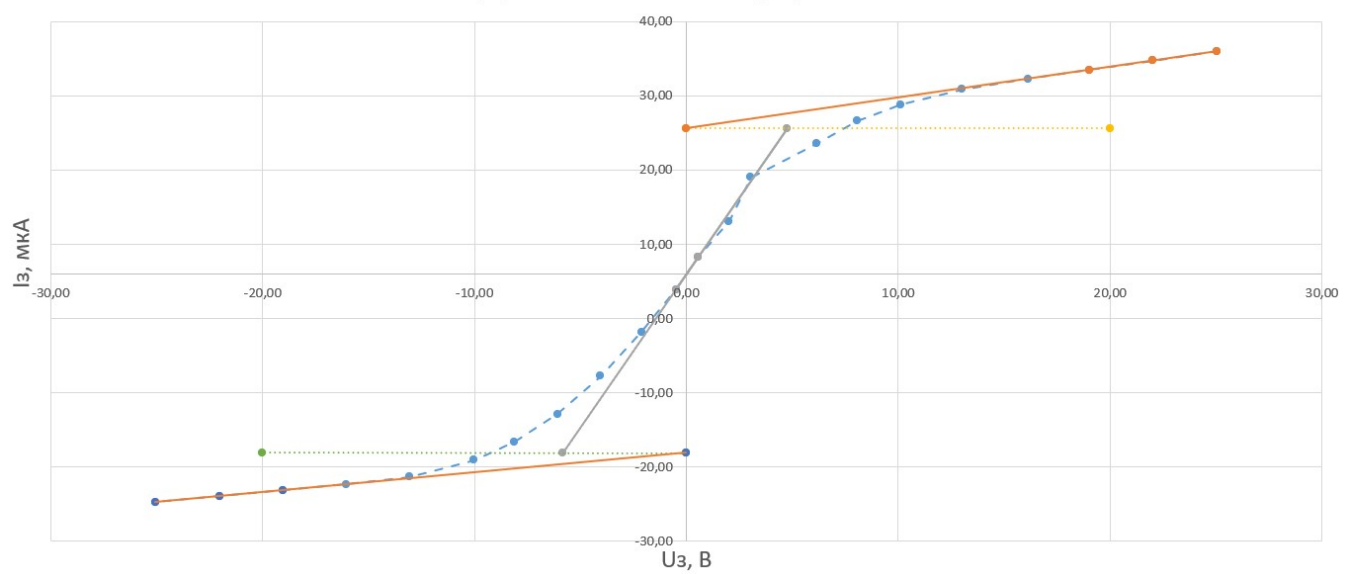


График зависимости I_z от U_z при $I_p=1,51\text{mA}$



Полученные значения приведены в таблице

I_p , мА	ΔU_+ , В	ΔU_- , В	I_{H+} , мкА	I_{H-} , мкА	$dI/dU _{U=0}$
5,05	2,02	2,13	92,90	72,78	40,65
3,02	2,64	2,57	52,13	38,34	17,36
1,51	4,78	5,81	25,60	18,06	4,12

Будем брать значение ΔU_+ , т.к. оно более точное (при смене полярности подключения возникли колебания напряжения и тока). Зная ΔU , найдем значение температуры электрона по формуле

$$kT_e = \frac{e \cdot \Delta U}{2} = \frac{\Delta U}{2} \text{ эВ}$$

Результаты занесём в итоговую таблицу

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

$$I_{iH} = 0,4 n_e e S \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}} \Rightarrow n_e = \frac{2,5 I_{iH}}{e S} \sqrt{\frac{m_i}{2kT_e}}$$

где $S = \pi dl$ – 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.

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

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

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

Рассчитаем теперь электронную дебаевскую 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.

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. 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. 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

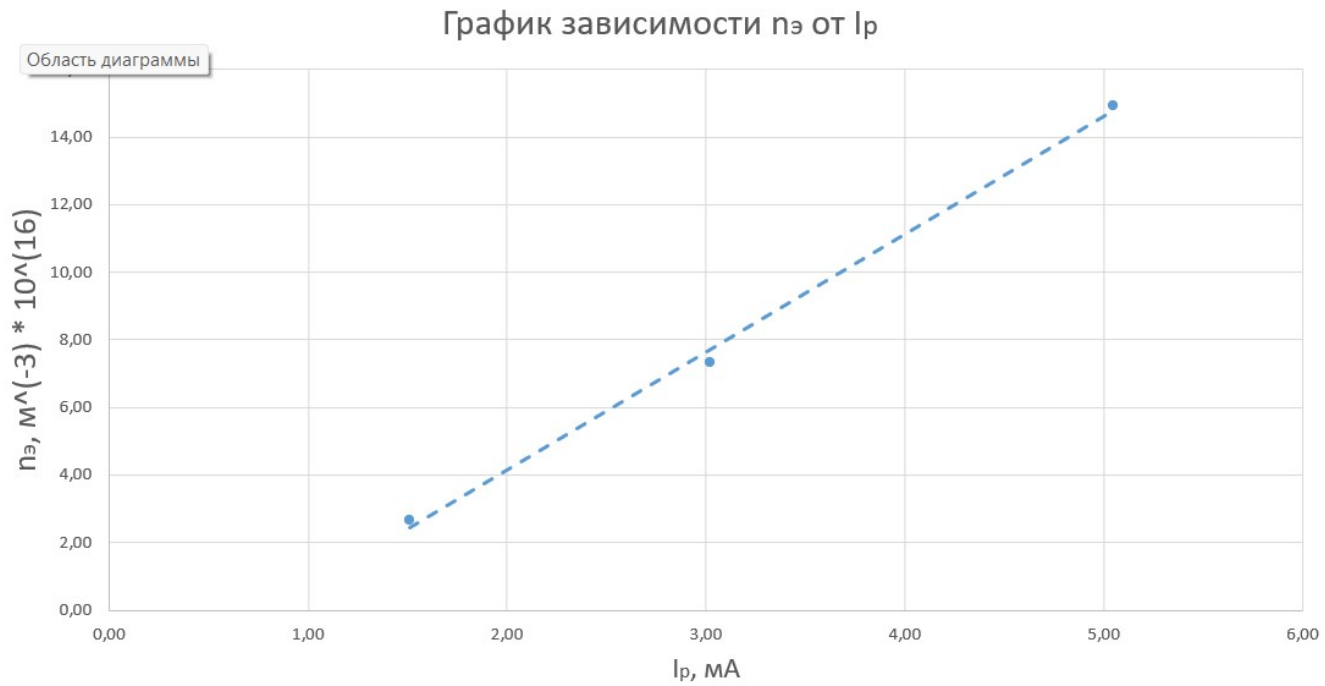
$$\alpha = \frac{n_i}{n},$$

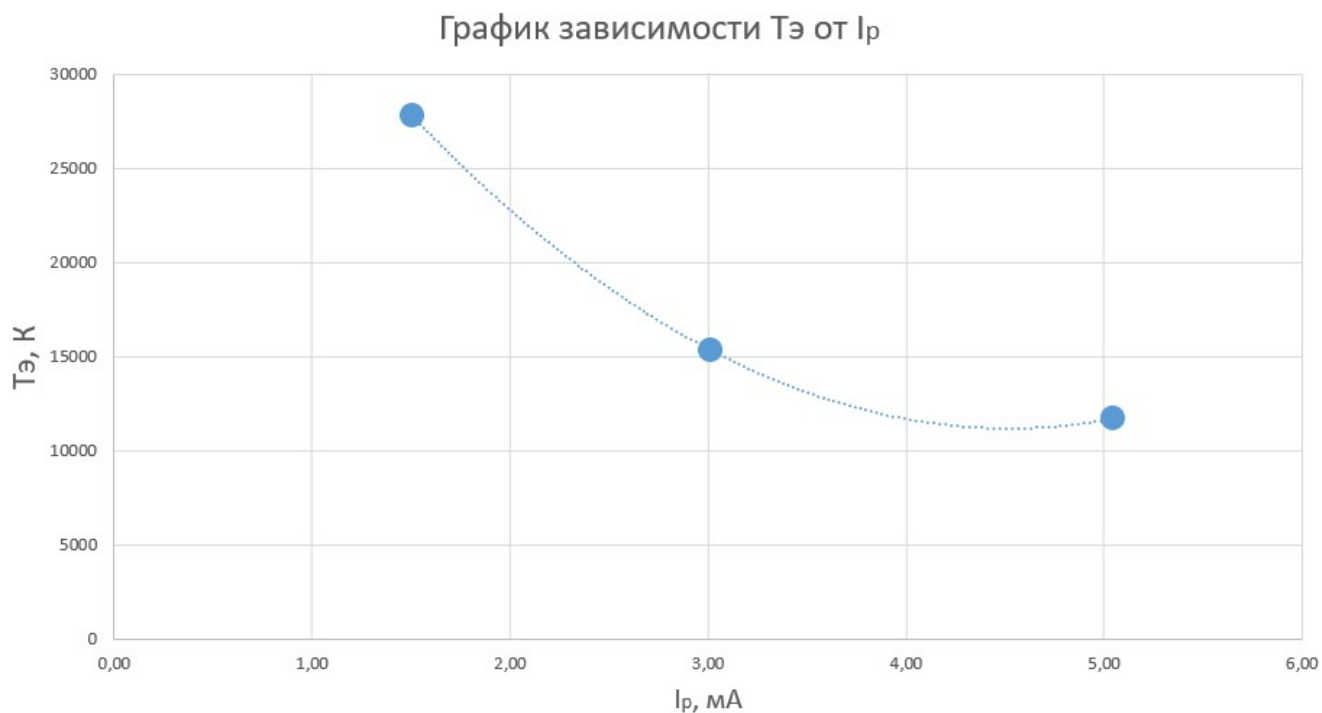
посчитанные по этой формуле значения занесём в таблицу.

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

Rдиф, Ом	I _p , мА	kT _э , эВ	n _э , м ⁻³ * 10 ⁽¹⁶⁾	ω _p , рад/сек * 10 ⁽⁹⁾	γ _{De} , мкм	γ _D , мкм	<N _D >	α, * 10 ⁽⁻⁷⁾
854,00	5,05	1,01	14,93	21,64	19,46	3,12	18,91	23,19
3333,00	3,02	1,32	7,33	15,16	31,76	4,45	26,99	11,38
9310,00	1,51	2,39	2,68	9,16	70,74	7,36	44,68	4,15

Теперь построим графики зависимостей $T_э(I_p)$ и $n_э(I_p)$.





Вывод

В ходе данной работы была изучена вольт-амперная характеристика тлеющего заряда. Также было замечено, что получившийся график является участком истинного графика (Г-Д). Также были изучены свойства плазмы методом зондовых характеристик. Используя двойной зонд, были получены основные характеристики, описывающие плазму, также была исследована зависимость различных величин от тока разряда.