

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа физики и исследований им. Ландау

# Плазма. Газовый разряд

Автор:  
Шахматов Андрей Юрьевич  
Б02-304

Долгопрудный 2024

## Аннотация

Исследованы характеристики плазмы в тлеющем газовом разряде. Получена вольт - амперная характеристика плазмы. При помощи двойного зонда определены характеристики плазмы: плазменная частота колебаний электронов и дебаевский радиус экранирования. Определено, что плазма в тлеющем газовом разряде хорошо описывается моделью идеальной плазмы.

## Введение

Цель работы заключается в исследовании характеристик плазмы тлеющего газового разряда при помощи двойного зонда.

## Методика

### Основные характеристики плазмы

Определяющими свойствами плазмы являются коллективный характер её движения и квазинейтральность (равенство нулю средней плотности заряда). Таким образом можно рассмотреть коллективные колебания плазмы относительно квазинейтрального состояния. Для этого выделим в нейтральной плазме некоторый объём в виде параллелепипеда. При перемещении всех электронов на расстояние  $x$  относительно ионов на боковых гранях образуются нескомпенсированные поверхностные заряды с плотностью

$$\sigma = \pm n_e e \Delta x.$$

Эти заряды создадут электрическое поле

$$E = 4\pi n_e e \Delta x.$$

В таком случае можно записать уравнение колебаний

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{eE}{m} = -\frac{4\pi n_e e^2}{m} \Delta x.$$

В таком случае плазменная частота гармонических колебаний будет выражаться как

$$w_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}}. \quad (1)$$

Также можно ввести характерный размер плазменных явлений как отношение тепловой скорости частиц к плазменной частоте

$$r_D = \sqrt{\frac{k_B T_e}{4\pi n_e e^2}}, \quad (2)$$

где величину  $r_D$  называют Дебаевским радиусом. Также можно показать, что дебаевский радиус является характерным радиусом экранирования действия заряженной частицы на другие частицы. В таком случае потенциал частицы будет иметь вид

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

## 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  $U_3$  на зонд и снимать значение зондового тока  $I_3$ . Максимальное значение тока  $I_{en}$  — электронный ток насыщения, а минимальное  $I_{in}$  — ионный ток насыщения. Значение из эмпирической формулы Бомона:

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

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

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

Аналогично через второй получим

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

С учётом последовательного соединении зондов ( $I_1 = -I_2 = I$ ):

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

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

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока

$$U = \frac{kT_e}{e} \ln \frac{1 - I/I_{iH}}{1 + I/I_{iH}}, \quad I = I_{iH} \operatorname{th} \frac{eU}{2kT_e}. \quad (3)$$

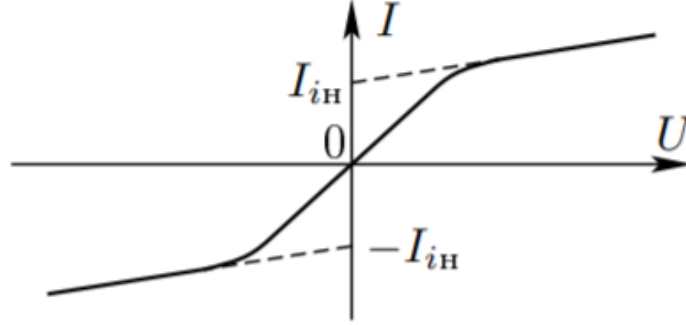


Рис. 1: Экспериментальный вид зависимости тока  $I$  от напряжения  $U$  на двойном зонде

Зависимость выглядит как показано на 1. Из формулы можно найти формулу для  $T_e$ : для  $U = 0$  мы найдём  $I_{iH}$ , продифференцируем в точке  $U = 0$  и с учётом  $\operatorname{th} \alpha \approx \alpha$  при малых  $\alpha$  и  $A \rightarrow 0$  получим:

$$kT_e = \frac{1}{2} \frac{eI_{iH}}{\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0}}. \quad (4)$$

## Описание установки

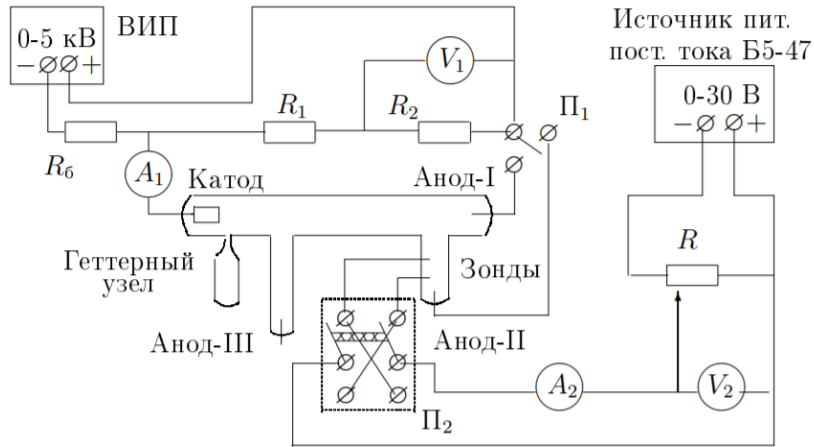


Рис. 2: Схема установки

Стеклянная газоразрядная трубка имеет холодный (ненакаливаемый) полый катод, три анода и *геттерный* узел – стеклянный баллон, на внутреннюю повехность которого напылена газопоглощающая плёнка (*геттер*). Трубка наполнена изотопом неона  $^{22}\text{Ne}$  при давлении 2 мм рт. ст. Катод и один из анодом (I и II) с помощью переключателя  $\Pi_1$  подключается через балластный резистор  $R_6$  ( $\approx 450$  кОм) к регулируемому 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 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  $\Pi_2$  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  $V_2$ . Для измерения зондового тока используется мультиметр  $A_2$ .

## Результаты и их обсуждение

Измерено напряжение зажигания разряда  $U = 267$  В. проведено измерение вольт-амперной характеристики, данные представлены в таблице 1.

$U$ , В	260,0	251,0	250,0	237,0	225,0	207,0	180,0	167,0	145,0	120,0	104,0
$I$ , мА	1,63	1,81	2,00	2,22	2,40	2,61	2,81	3,00	3,21	3,40	3,62
$U$ , В	94,5	102,6	117,0	141,0	163,0	178,0	211,0	220,0	228,0	237,0	
$I$ , мА	3,80	3,60	3,40	3,21	3,00	2,80	2,60	2,40	2,20	2,00	

Таблица 1: Данные зависимости тока через газовый разряд  $I$  от напряжения между электродами  $U$ .

Построен график вольт-амперной характеристики (Рис. 3). С его помощью определено максимальное дифференциальное сопротивление  $R_{\text{дифф}} \approx 1,0 \cdot 10^5$  Ом.

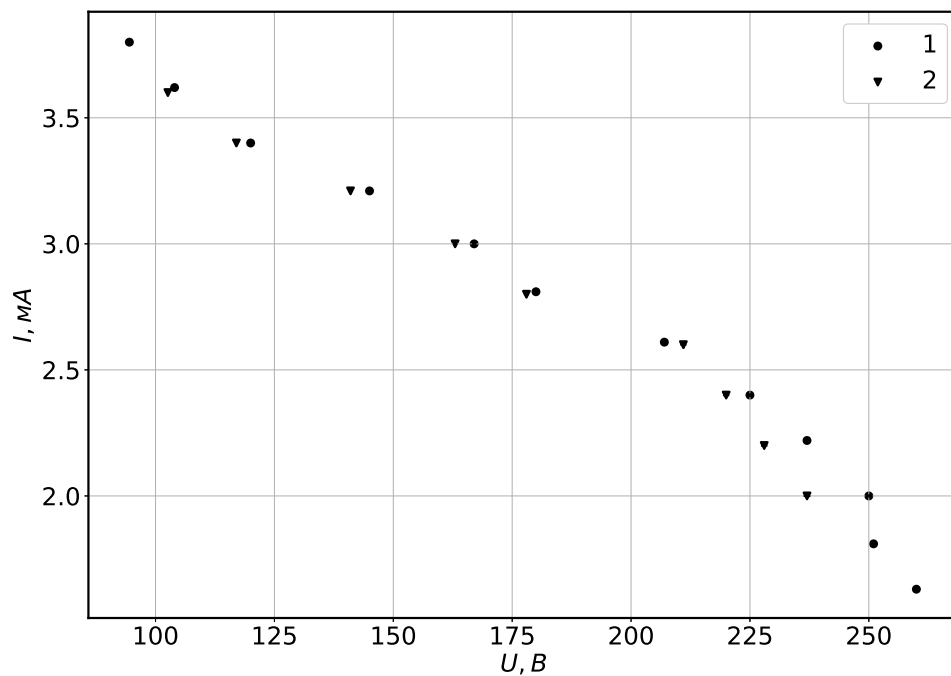


Рис. 3: График зависимости тока через газовый разряд  $I$  в зависимости от напряжения между электродами  $U$ . Цифрами обозначены 1 — прямой ход измерений, 2 — обратный ход измерений.

С помощью амперметра  $A_2$  и вольтметра  $V_2$  снята зависимость тока от напряжения на двойном зонде в зависимости от тока в газовом разряде (Таблица 4). После центрирования графиков построены соответствующие зависимости (Рис. 4).

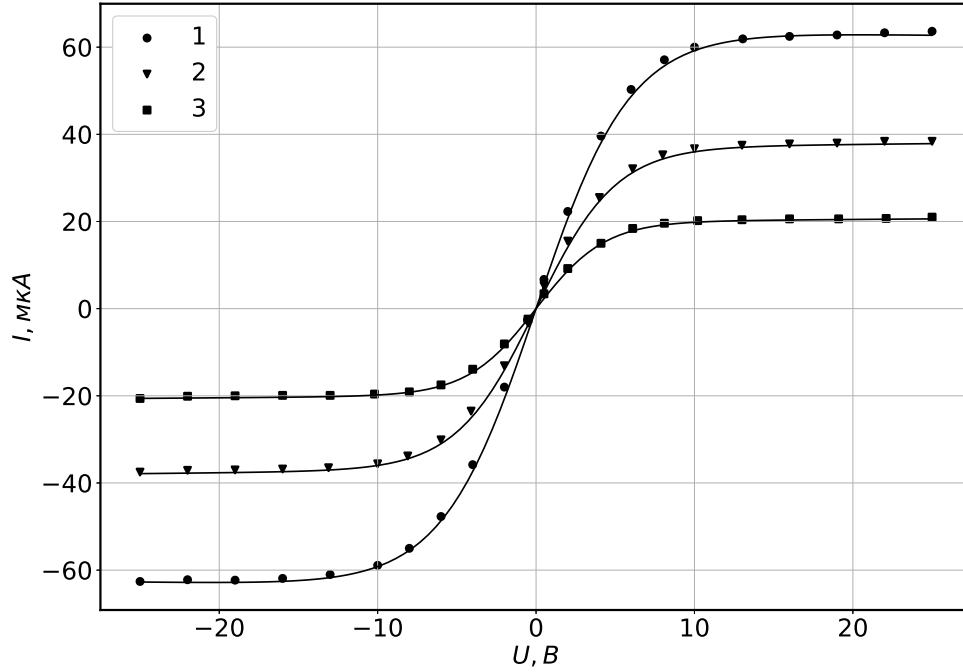


Рис. 4: Графики зависимости тока через двойной зонд  $I$  от напряжения на зонде  $U$ . Цифрами обозначены графики соответствующие токам через газовый разряд 1 — 4,25 мА, 2 — 3,01 мА, 3 — 2,04 мА.

Проводя асимптоты к графикам при  $U \rightarrow \infty$ , найдены значения токов насыщения. Проводя касательную к графику при  $U = 0$  В, найдены температуры электронов. После чего согласно выражениям 1, 2 найдены дебаевский радиус  $r_D$  и ленгморовская частота  $w_p$ . Рассчитанные значения представлены в таблице 2.

$I$ , мА	$I_{in}$ , мкА	$T_e$ , К	$n_e$ , $10^{16} \cdot \text{м}^{-3}$	$w_p$ , $10^9 \cdot \text{с}^{-1}$	$r_e$ , $10^{-3} \cdot \text{м}$	$r_D$ , $10^{-4} \cdot \text{м}$
$4,25 \pm 0,01$	$64,0 \pm 2,0$	$34700 \pm 1200$	$6,1 \pm 0,2$	$1,4 \pm 0,3$	$5,1 \pm 0,13$	$4,85 \pm 0,09$
$3,01 \pm 0,01$	$37,0 \pm 1,0$	$29000 \pm 1200$	$3,8 \pm 0,1$	$1,1 \pm 0,2$	$6,0 \pm 0,16$	$6,15 \pm 0,10$
$2,04 \pm 0,01$	$19,9 \pm 0,5$	$25500 \pm 1200$	$2,2 \pm 0,1$	$0,8 \pm 0,1$	$7,5 \pm 0,21$	$8,12 \pm 0,14$

Таблица 2: Параметры плазмы, определённые на основе зондовых характеристик.  $r_D$  рассчитан в предположении, что  $T \approx 300$  К.

На основе полученных параметров рассчитаны степень ионизации плазмы газового разряда и среднее количество частиц в сфере Дебая 3. По полученным значениям можно сделать вывод о том, что плазма в газовом разряде хорошо подчиняется модели идеальной плазмы.

$I, \text{ мА}$	$N_D, 10^7$	$\alpha, 10^{-7}$
$4,25 \pm 0,01$	$2,9 \pm 0,2$	$8,6 \pm 0,3$
$3,01 \pm 0,01$	$3,7 \pm 0,2$	$5,3 \pm 0,2$
$2,04 \pm 0,01$	$4,9 \pm 0,3$	$3,0 \pm 0,1$

Таблица 3: Результаты вычислений количества частиц в сфере Дебая  $N_D$  и степени ионизации  $\alpha$ .

Построены графики зависимости концентрации электронов  $n_e$  и их температуры  $T_e$  от тока в разряде  $I$  (Рис. 5, 6). В обоих случаях зависимость возрастающая, это происходит потому, что при увеличении величины поля увеличивается количество электронов, вовлечённых в движение.

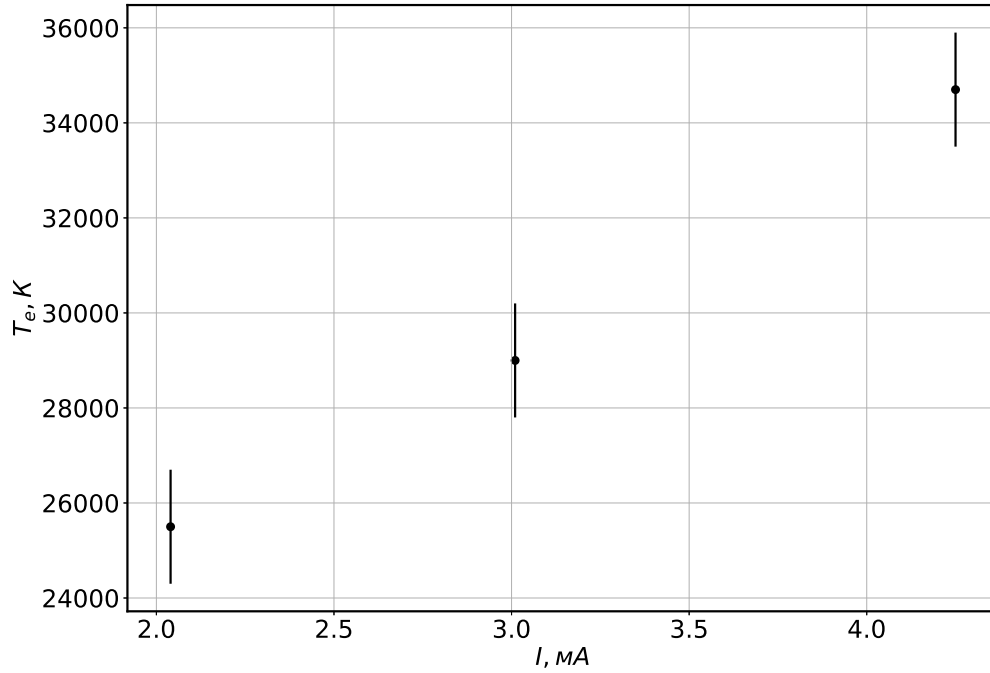


Рис. 5: График температуры электронов  $T_e$  от тока в плазме  $I$ .



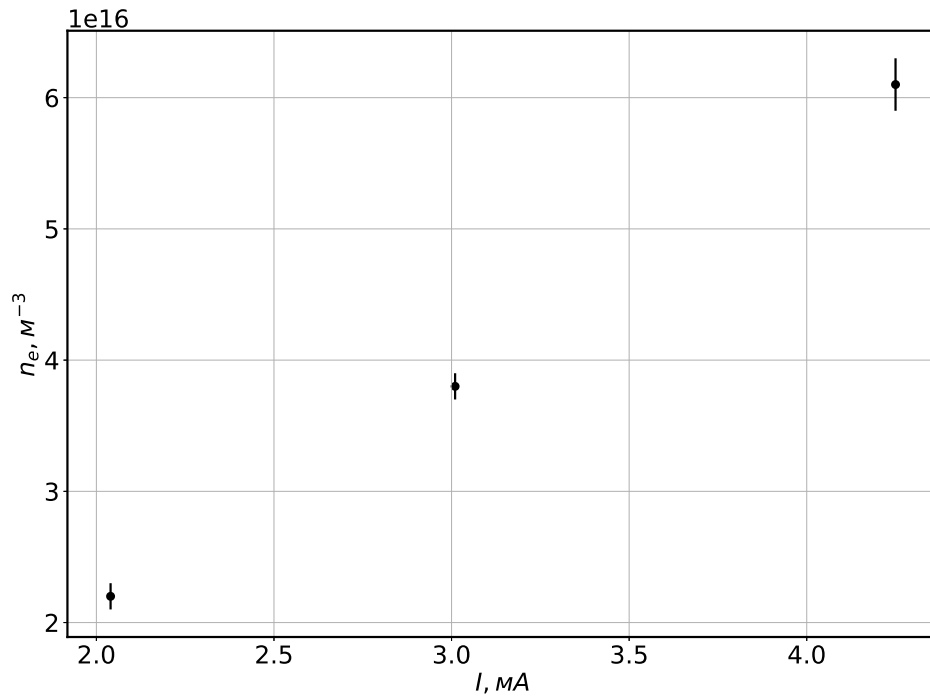


Рис. 6: График концентрации электронов  $n_e$  от тока в плазме  $I$ .

## Выводы

Исследована вольт-амперная характеристика газового разряда. Получены вольт-амперных характеристики двойного зонда, помещённого в газовый разряд при различных токах в разряде. Определены основные характеристики плазмы. На основе полученных данных сделан вывод о том, что плазму в газовом разряде можно считать идеальной ( $N_D \gg 1$ ).

## Использованная литература

### Список литературы

[1] Лабораторный практикум по общей физике, Том 2, под редакцией А. Д. Гладуна

$I_1$ , мкА	$U_1$ , В	$I_2$ , мкА	$U_2$ , В	$I_3$ , мкА	$U_3$ , В
52,4	25,0	41,4	25,0	41,4	25,0
52,7	22,0	41,4	22,0	41,4	22,0
53,2	19,0	41,8	19,0	41,8	19,0
53,5	16,0	42,0	16,0	42,0	16,0
54,1	13,0	42,3	13,0	42,3	13,0
56,0	10,0	43,1	10,0	43,1	10,0
58,9	8,1	44,5	8,0	44,5	8,0
65,7	6,0	47,7	6,1	47,7	6,1
76,4	4,1	54,3	4,0	54,3	4,0
93,7	2,0	64,3	2,0	64,3	2,0
109,3	0,5	74,5	0,5	74,5	0,5
53,4	25,0	42,3	25,0	42,3	25,0
53,8	22,0	42,7	22,0	42,7	22,0
53,7	19,0	42,8	19,0	42,8	19,0
54,1	16,0	43,0	16,0	43,0	16,0
55,0	13,0	43,3	13,1	43,3	13,1
57,1	10,0	44,2	10,0	44,2	10,0
61,0	8,0	46,0	8,1	46,0	8,1
68,3	6,0	49,7	6,0	49,7	6,0
80,2	4,0	56,3	4,1	56,3	4,1
98,0	2,0	66,7	2,0	66,7	2,0
113,4	0,5	76,5	0,5	76,5	0,5

Таблица 4: Вольт-амперные характеристики двойного зонда для различных токах в разряде.  $U_1, I_1$  — для тока  $I = 4,25$  мА,  $U_2, I_2$  — для тока  $I = 3,01$  мА,  $U_3, I_3$  — для тока  $I = 2,04$  мА