

Измерение плотности плазмы

Виноградов И.Д. Понур К.А. Шиков А.П.

Радиофизический факультет ННГУ, 430 группа

Нижний Новгород, 2018

1 Введение

- Цели работы
- Актуальность работы

2 Краткая теория

- Некоторые свойства плазмы
- Зонд с СВЧ-резонатором
- Генерация плазмы

3 Эксперимент

- Описание экспериментальной установки

4 Практическая часть

- Измерение концентрации плазмы
- Распад плазмы
- Зависимость на радиальной оси
- Выводы

- 1 Изучить принцип работы зонда с СВЧ-резонатором
- 2 Измерить локальную концентрацию плазмы на экспериментальной установке "КРОТ"
- 3 Изучить временную зависимость концентрации для распадающейся плазмы

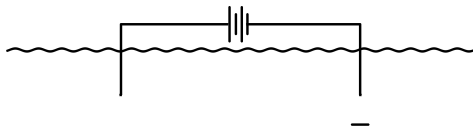
Актуальность работы

- 1 Моделирование космических явлений
- 2 Моделирование процессов в ионосфере
- 3 Идея управляемого термоядерного синтеза
- 4 МГД-преобразование энергии и ионные двигатели
- 5 Газовые лазеры
- 6 Газоразрядные электронные приборы

Плазма – частично или полностью ионизированный газ, образованный из нейтральных атомов (или молекул) и заряженных частиц.

- 1 Квазинейтральный газ
- 2 Экранирует действующие на неё на неё электрические поля
- 3 Высокая проводимость
- 4

Плазма является электрически нейтральной системой.



Плазма

Рис.:

$$\Delta\varphi = -4\pi\rho, \quad (1)$$

Δ – оператор Лапласа

Распределение электронов, а значит, и их пространственного заряда ρ_e описывается формулой Больцмана:

$$\rho_e = -ne \cdot e^{e\varphi/kT_e}. \quad (2)$$

Радиус Дебая (продолжение)

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{2}{r} \frac{d\varphi}{dr} = -4\pi Ne \left[1 - e^{e\varphi/kT_e} \right] \quad (3)$$

При $\frac{e\varphi}{kT_e} \ll 1$ можем разложить экспоненту в ряд и (3) станет линейным:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{2}{r} \frac{d\varphi}{dr} = \frac{1}{r_D^2} \varphi, \quad (4)$$

где $r_D^2 = \frac{kT_e}{4\pi Ne^2}$. Тогда, решение (4) имеет вид

$$\varphi = \frac{A_0}{r} \cdot e^{-r/r_D} \quad (5)$$

Решение уравнения (5) показывает, что поле иона убывает с расстоянием экспоненциально с характерной длиной, равной r_D – дебаевскому радиусу экранирования.

Плазму можно считать нейтральной^{7/86} (квазинейтральной) в областях, размеры которых существенно превосходят дебаевскую длину.

$$\sigma = Nex \quad (6)$$

$$E = 4\pi\sigma = 4\pi Nex \quad (7)$$

Это поле действует на электроны, придавая им ускорение, равное

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{eE}{m} = -\frac{4\pi Ne^2}{m}x \quad (8)$$

Уравнение (8) определяет плазменную частоту коллективных колебаний электронов:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi Ne^2}{m}} \quad (9)$$

Зонд с СВЧ-резонатором

Идея метода замера локальной плотности плазмы заключается в измерении собственной частоты резонатора, помещенного в неё.

$$\omega_{res} = \left(\frac{\pi}{2l} \right) \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad (10)$$

где ω_{res} – собственная частота резонатора.

В плазме:

$$\varepsilon = \varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega^2}{\omega_p^2}.$$

Тогда сдвиг резонансной частоты по сравнению с вакуумом:

$$\omega_{res}^2 = \omega_{0res}^2 + \omega_p^2,$$

где ω_{0res} – собственная частота резонатора в вакууме, а ω_p – плазменная частота

При этом концентрация однозначно связана с плазменной частотой:

$$N = \frac{m_e \omega_p^2}{4\pi e^2} \quad (11)$$

Зонд с СВЧ-резонатором

В нашем случае резонатором является четвертьволновый отрезок двупроводной линии (четвертьволновый резонатор), замкнутый на одном конце и разомкнутый на другом.

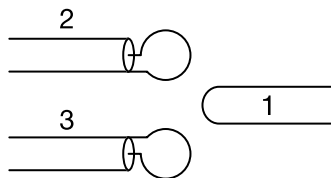


Рис.: Четвертьволновый резонатор

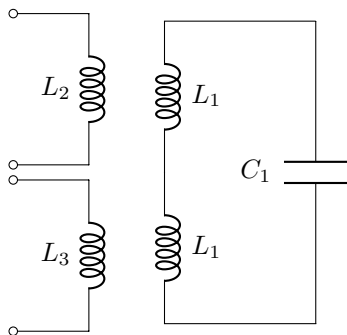


Рис.: Эквивалентная схема резонатора

Генерация плазмы в КРОТе

Для генерации плазмы используется индукционный газовый разряд, осуществляемый при помощи высокочастотных вихревых электрических полей, создаваемых мощными катушками индуктивности, расположенными внутри установки.

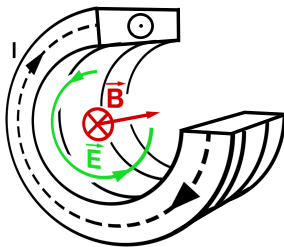


Рис.: Генерация ВЧ поля

Экспериментальная установка КРОТ

Размеры камеры: диаметр 3 м, длина 10 м.

Размеры соленоида: длина 3.5 м, диаметр 2 м.

Магнитное поле достигает величины $B \approx 1000$ Эрстед.

Предельный вакуум, достигаемый в объеме камеры $P = 3 \cdot 10^{-6}$ Торр.

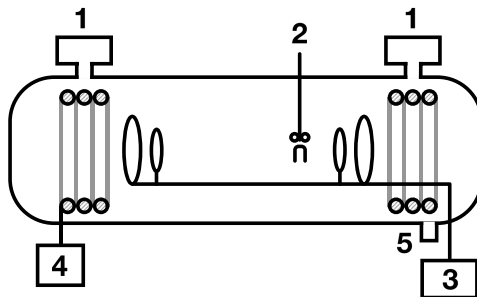
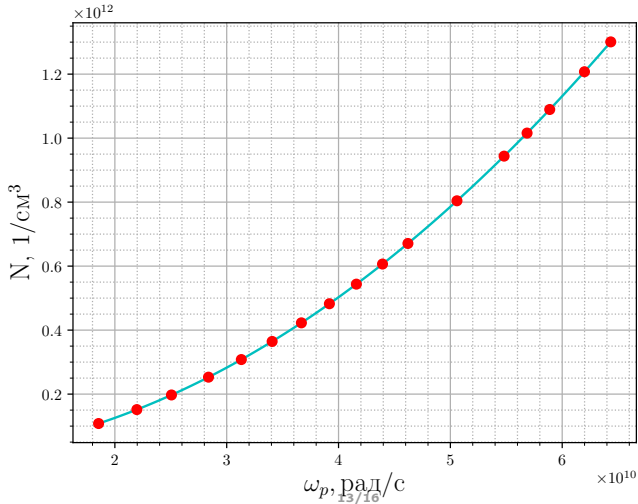


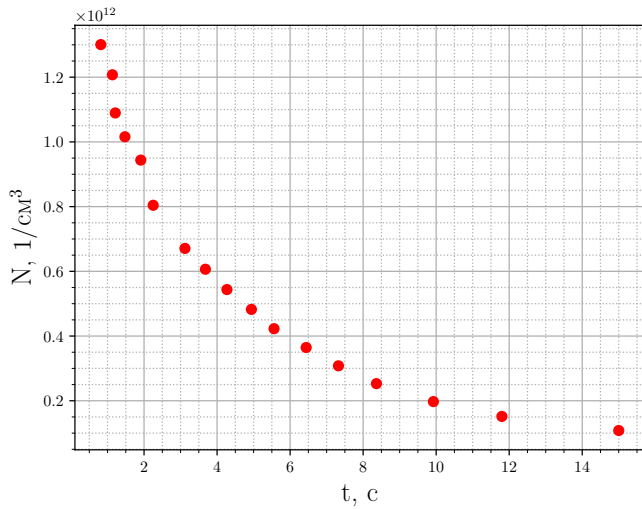
Рис.: 1 - вакуумная откачка, 2 - зонд с СВЧ-резонатором, 3 - ВЧ-генератор, 4 - соленоид с источником магнитного поля.

Измерение концентрации плазмы

Рабочий газ – аргон (Ag), $P = 4 \cdot 10^{-1}$ Торр.

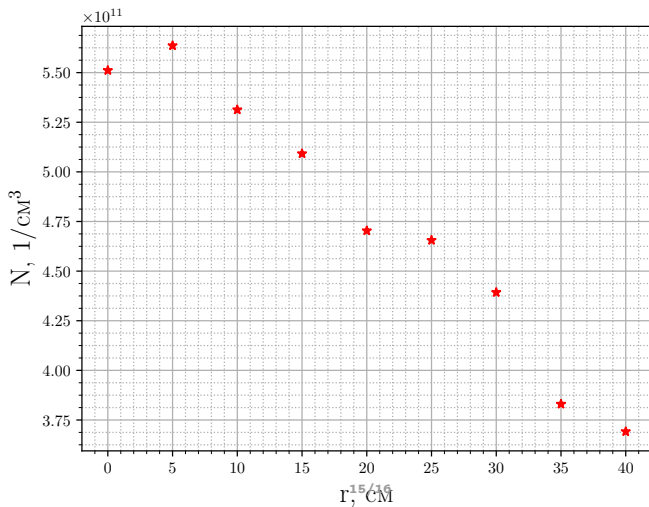


Распад плазмы



Зависимость на радиальной оси

Время после отключения ВЧ-генератора $t = 4.13$ мс



- 1 Мы изучили принцип работы зонда с СВЧ-резонатором
- 2 Измерили локальную концентрацию плазмы на экспериментальной установке "КРОТ"
- 3 Изучили временную зависимость концентрации для распадающейся плазмы