

Измерение плотности плазмы на экспериментальном стенде КРОТ зондом с СВЧ-резонатором

Виноградов И.Д. Понур К.А. Шиков А.П.

Радиофизический факультет ННГУ, 430 группа

Нижний Новгород, 2018

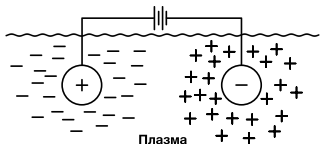
Цели работы

- 1 Изучить принцип работы зонда с СВЧ-резонатором.
- 2 Измерить зависимость локальной концентрации плазмы от расстояния до центра генерации.
- 3 Изучить временную зависимость концентрации для распадающейся плазмы.

Актуальность работы

- 1 Изучение космического окружения Земли. Например, изучение ионосферы.
- 2 Современная астрофизика. Например, для предсказания хода эволюции галактик применялась кинетическая теория плазмы.
- 3 МГД-преобразование энергии и ионные двигатели.
- 4 Накачка газового лазера газовым разрядом.
- 5 Газоразрядные электронные приборы.

Радиус Дебая



Дебаевское экранирование

Предположим, что мы попытались создать электрическое поле внутри плазмы, поместив в неё два шарика, соединив их батарейкой. Рассмотрим пространство вокруг положительно заряженного иона.

Электрическое поле \vec{E} и плотность электрического заряда ρ связаны соотношением:

$$\operatorname{div} \vec{E} = 4\pi\rho \quad (1)$$

$$\Delta\varphi = -4\pi\rho, \Delta - \text{оператор Лапласа} \quad (2)$$

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

$$\rho_e = Ne \cdot \exp\{-e\varphi/kT_e\}. \quad (3)$$

Радиус Дебая (продолжение)

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

При $\frac{e\varphi}{kT_e} \ll 1$ можем разложить экспоненту в ряд и (4) станет линейным:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{2}{r} \frac{d\varphi}{dr} = \frac{1}{r_D^2} \varphi, \quad (5)$$

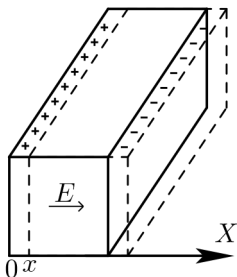
где $r_D^2 = \frac{kT_e}{4\pi Ne^2}$. Тогда, решение (5) имеет вид

$$\varphi = \frac{A_0}{r} \cdot e^{-r/r_D} \quad (6)$$

Решение уравнения (6) показывает, что поле иона убывает с расстоянием экспоненциально с характерной длиной, равной r_D – дебаевскому радиусу экранирования.

Плазму можно считать **квазинейтральной** в областях, размеры которых существенно превосходят дебаевскую длину.

Плазменная частота



Объем, занимаемый ионами обозначен сплошной линией, а электронами – пунктирной.

Сместим все электроны на x относительно ионов. Тогда на гранях выделенного нами параллелепипеда возникнут поверхностные заряды:

$$\sigma = Nex, \quad (7)$$

где N – концентрация электронов

$$E = 4\pi\sigma = 4\pi Nex \quad (8)$$

Это поле действует на электроны, придавая им ускорение, равное

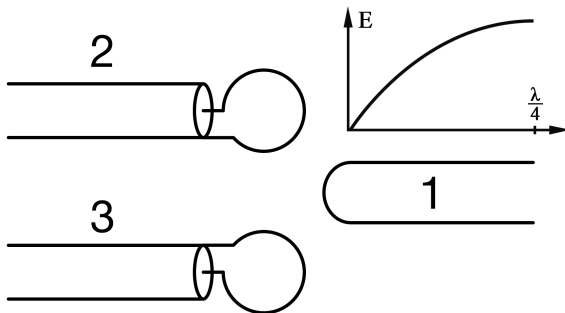
$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{eE}{m_e} = \frac{4\pi Ne^2}{m_e} x \quad (9)$$

Уравнение (9) определяет плазменную частоту коллективных колебаний электронов:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi Ne^2}{m_e}} \quad (10)$$

Зонд с СВЧ-резонатором

Идея метода замера локальной плотности плазмы заключается в измерении собственной частоты резонатора, помещенного в неё. В нашем случае резонатором является четвертьволновый отрезок двупроводной линии (четвертьволновый резонатор), замкнутый на одном конце и разомкнутый на другом.



Четвертьволновый резонатор(1-? 2-? 3-?)

Зонд с СВЧ-резонатором

$$\omega_{res} = \left(\frac{\pi}{2l} \right) \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad (11)$$

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:

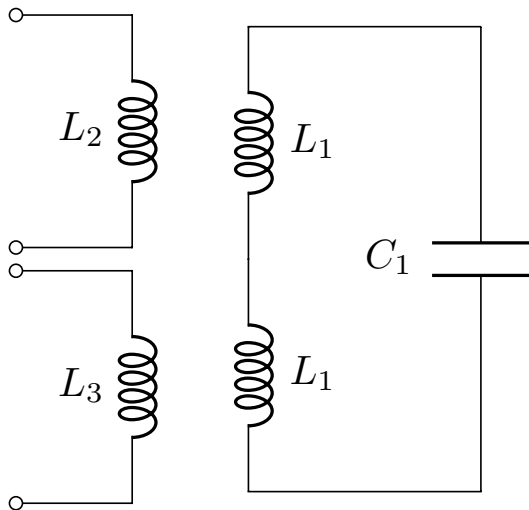
$$\omega_{res}^2 = \omega_{0res}^2 + \omega_p^2,$$

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

При этом концентрация однозначно связана с плазменной частотой:

$$N = \frac{m_e \omega_p^2}{4\pi e^2} \quad (12)$$

Зонд с СВЧ-резонатором



Эквивалентная схема резонатора

Недостатки зонда с СВЧ-резонатором

- 1 Контактный метод измерения приводит к возмущению некоторой области около зонда. Характерный размер такой области определяется дебаевским радиусом экранирования и, как правило, оказывается существенно меньше размеров плазменного объема.
- 2 Нелинейные свойства и гистерезисные явления. При сильных СВЧ-полях плазма вытесняется из области между проводами резонатора.

Преимущества зонда с СВЧ-резонатором

- 1 Позволяет определять локальное, слабовозмущенное значение плотности плазмы.
- 2 В сравнении с ленгмюровскими зондами, результаты измерений с помощью зонда с СВЧ-резонатором не зависят в допустимых пределах от электронной температуры плазмы.

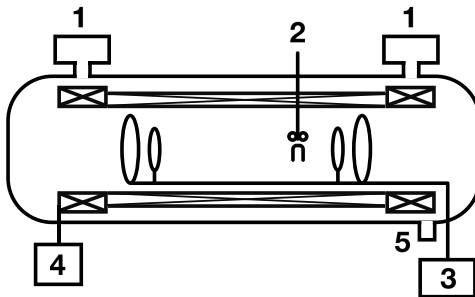
Экспериментальная установка КРОТ

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.

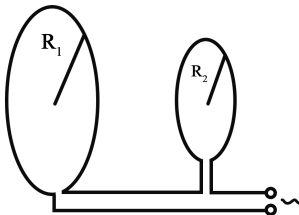
Предельный вакуум, достигаемый в объеме камеры $P = 3 \cdot 10^{-6}$ Торр.



1 - вакуумная откачка, 2 - зонд с СВЧ-резонатором, 3 - ВЧ-генератор, 4 - соленоид с источником магнитного поля, 5 - напуск рабочего газа.

Генерация плазмы в КРОТе

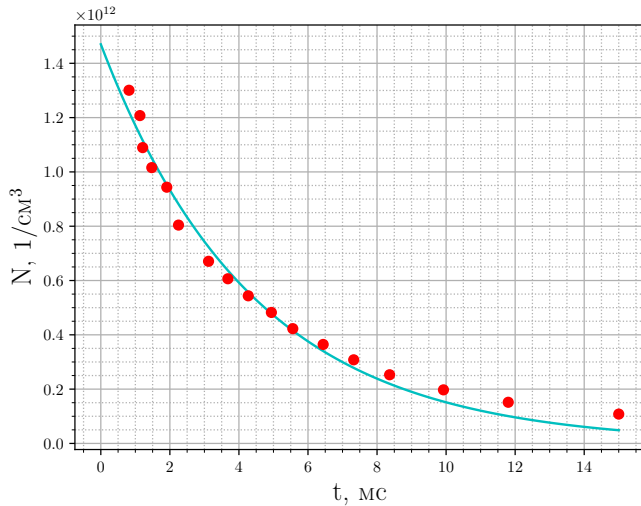
Для генерации плазмы используется индукционный газовый разряд, осуществляемый при помощи высокочастотных вихревых электрических полей, создаваемых катушками индуктивности, расположенными внутри установки.



Генерация ВЧ поля

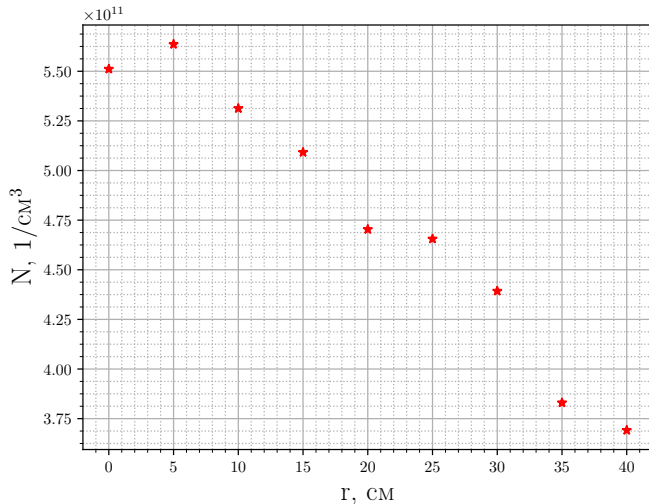
Распад плазмы

Из графика определили характерное время распада $\tau_N = 4.4$ мс.



Зависимость на радиальной оси

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



- 1 Был изучен принцип работы зонда с СВЧ-резонатором
- 2 Была измерена локальная концентрация плазмы в зависимости от удалённости до её центра генерации
- 3 А также, снята временная зависимость концентрации для распадающейся плазмы