

Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет имени Н. И. Лобачевского,  
Радиофизический факультет

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

**Работу выполнили:**  
Виноградов И.Д. Понур К.А. Шиков А.П.

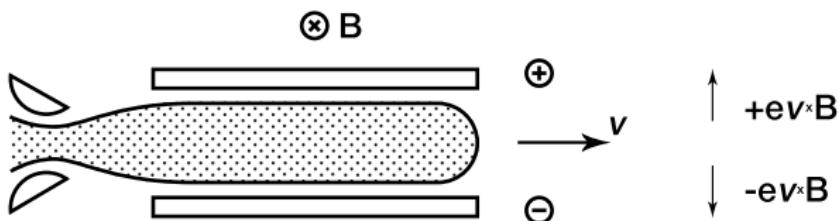
**Научный руководитель:**  
Стриковский А.В.

# 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.

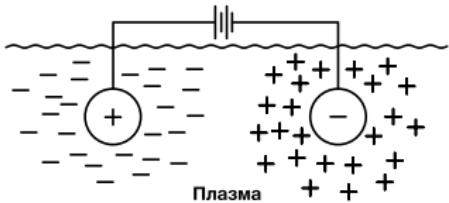
# Актуальность работы

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



Ионный двигатель

# 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 шарика.

Электрическое поле  $\vec{E}$  и плотность электрического заряда  $\rho$  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  $\rho_e$  описывается формулой Больцмана:

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

## Радиус Дебая (продолжение)

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

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

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

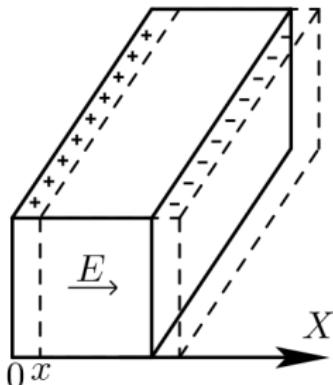
где  $r_D^2 = \frac{kT_e}{4\pi Ne^2}$ . Тогда, решение (5) имеет вид

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

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:

$$\sigma = N e x, \quad (7)$$

где  $N$  – концентрация электронов

$$E = 4\pi\sigma = 4\pi N e x \quad (8)$$

Это поле действует на электроны, придавая им ускорение, равное

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{e E}{m_e} = \frac{4\pi N e^2}{m_e} x \quad (9)$$

Уравнение (9) определяет плазменную частоту коллективных колебаний электронов:

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

# Существующие методы диагностики плазмы

## Контактные методы

- Зонды Ленгмюра
- Рамочные и электрические системы
- Зонд с СВЧ-резонатором

*Преимущества:*

Возможность локальных измерений

*Недостатки:*

Вносят возмущения в плазму

## Бесконтактные методы

- Интерферометр
- Метод "резонансного конуса"

*Преимущества:*

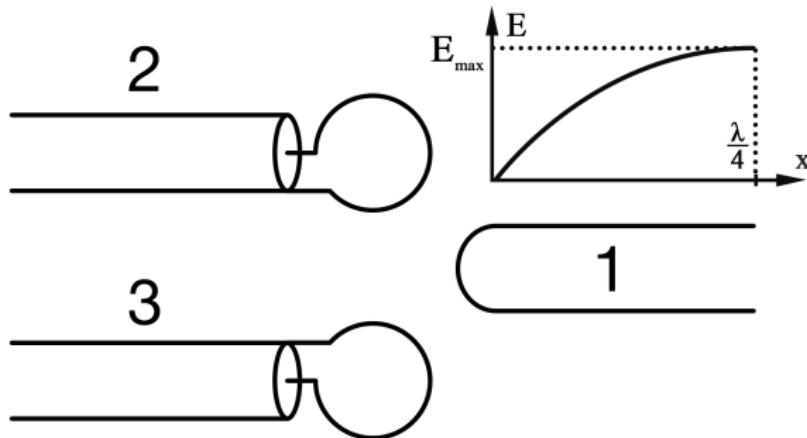
Измерения не влияют на измеряемые величины

*Недостатки:*

Невозможность локальных измерений

# 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- двупроводная линия 2- передающая линия 3- принимающая линия

# Зонд с СВЧ-резонатором

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

где  $\omega_{res}$  – собственная частота резонатора.

В плазме:

$$\varepsilon = \varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega^2}{\omega_p^2} \quad (12)$$

Тогда сдвиг резонансной частоты по сравнению с вакуумом:

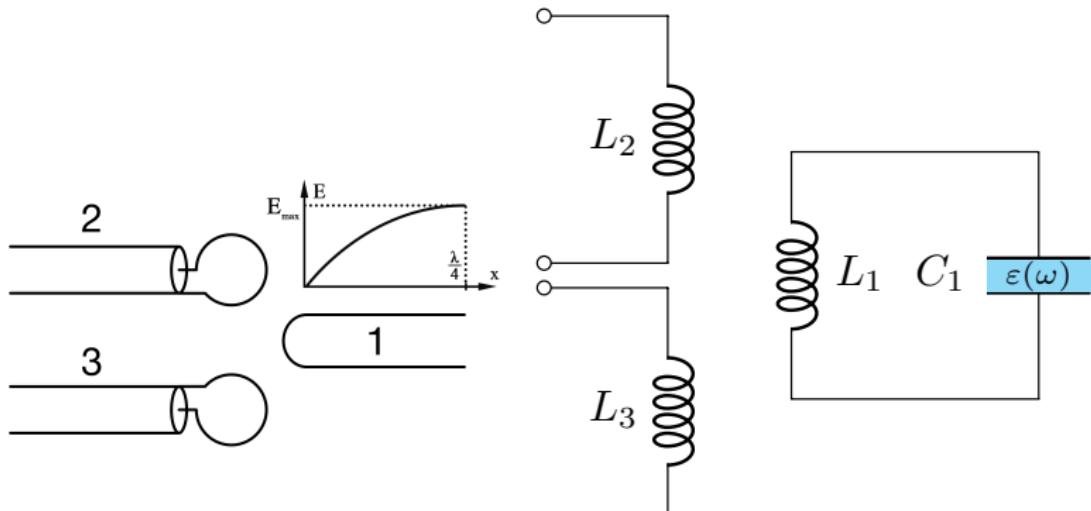
$$\omega_{res}^2 = \omega_{0res}^2 + \omega_p^2, \quad (13)$$

где  $\omega_{0res}$  – собственная частота резонатора в вакууме, а  $\omega_p$  – плазменная частота

При этом концентрация однозначно связана с плазменной частотой:

$$N = \frac{m_e \omega_p^2}{4\pi e^2} \quad (14)$$

# Зонд с СВЧ-резонатором



СВЧ-резонатор

Эквивалентная схема резонатора

- 1- двупроводная линия
- 2- передающая линия
- 3- принимающая линия

# 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.

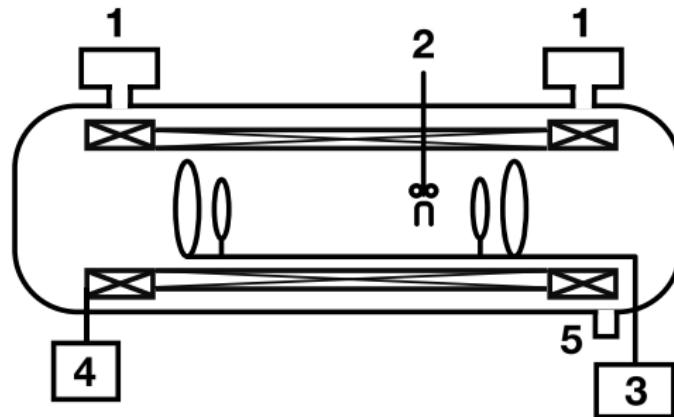
# Экспериментальная установка КРОТ

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.

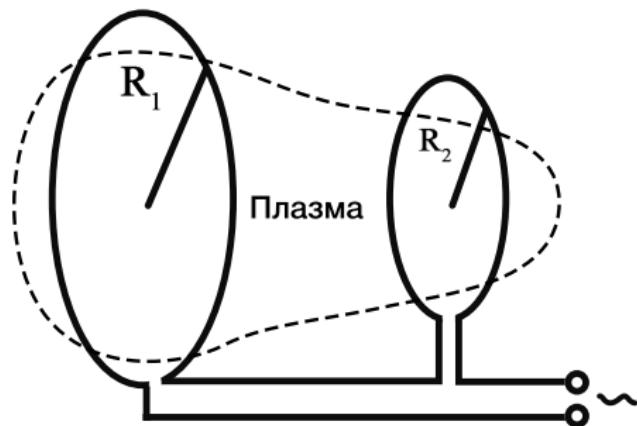
# Экспериментальная установка КРОТ



# Создание плазмы в КРОТе

Для создания плазмы используется индукционный газовый разряд, осуществляемый при помощи высокочастотных вихревых электрических полей, создаваемых индукторами, расположеными внутри установки.

Диаметр витков:  $D_1 = 0.4 \text{ м}$   $D_2 = 1.2 \text{ м}$



Индукторы для генерации плазмы

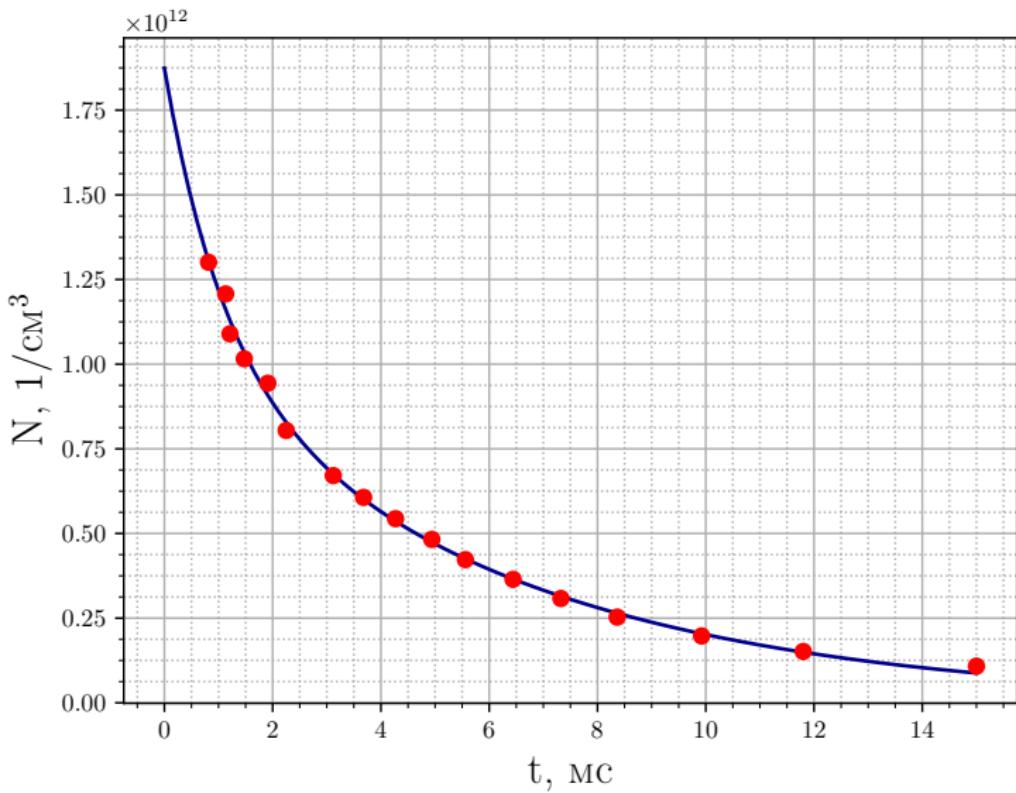


Рис.: Зависимость концентрации плазмы от времени

Характерные времена распада :  $\tau_1 = 1.07 \text{ мс}$  и  $\tau_2 = 6.02 \text{ мс}$ .

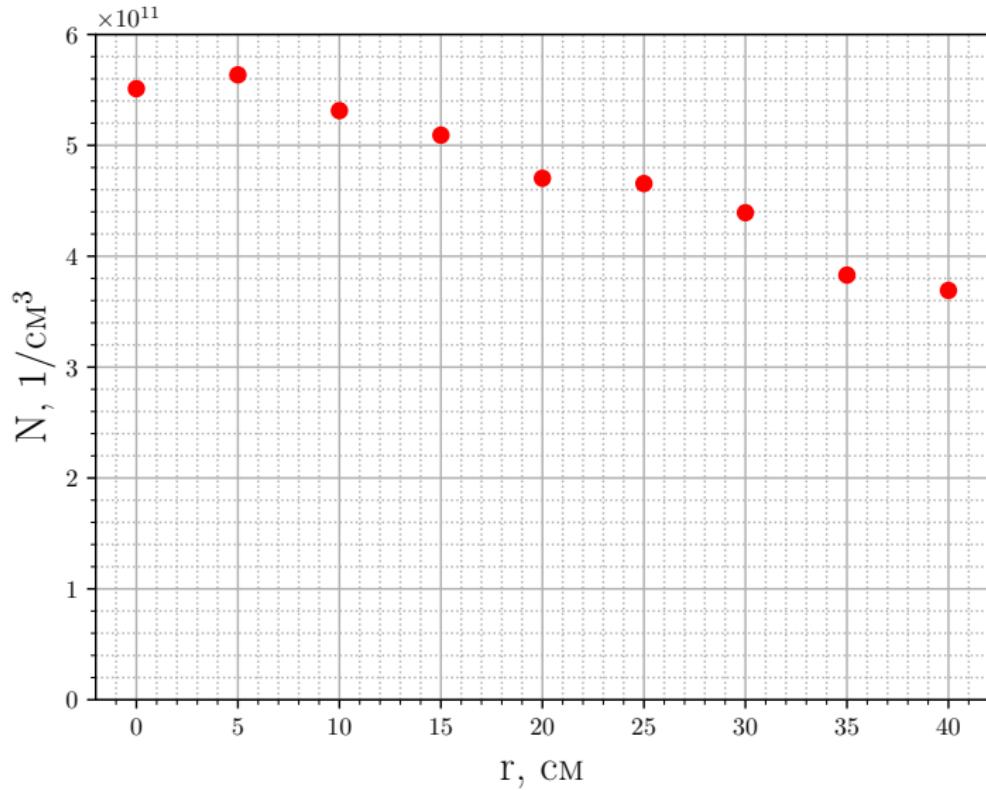


Рис.: Зависимость концентрации на радиальной оси плазменного столба

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

# Выводы

- 1 Был изучен принцип работы зонда с СВЧ-резонатором
- 2 Была измерена зависимость локальной концентрации плазмы от расстояния до центра генерации
- 3 Была изучена временная зависимость концентрации распадающейся плазмы