



ПРИМЕНЕНИЕ ЭЦР- ПЛАЗМЫ В ТЕХНОЛОГИИ НАНОСТРУКТУР

С. Шаповал

*Институт проблем технологии
микроэлектроники РАН, 142432
Черноголовка, Россия,*

План



- n Мотивация
- n Второе поколение ЭЦР-плазменных установок
- n Некоторые особенности ЭЦР-разряда
- n Применение ЭЦР-плазмы в:
 - n технологии СВЧ широкозонных транзисторов
 - n Микромостиков,
 - n Микромеханике,
 - n Технологии сенсоров.

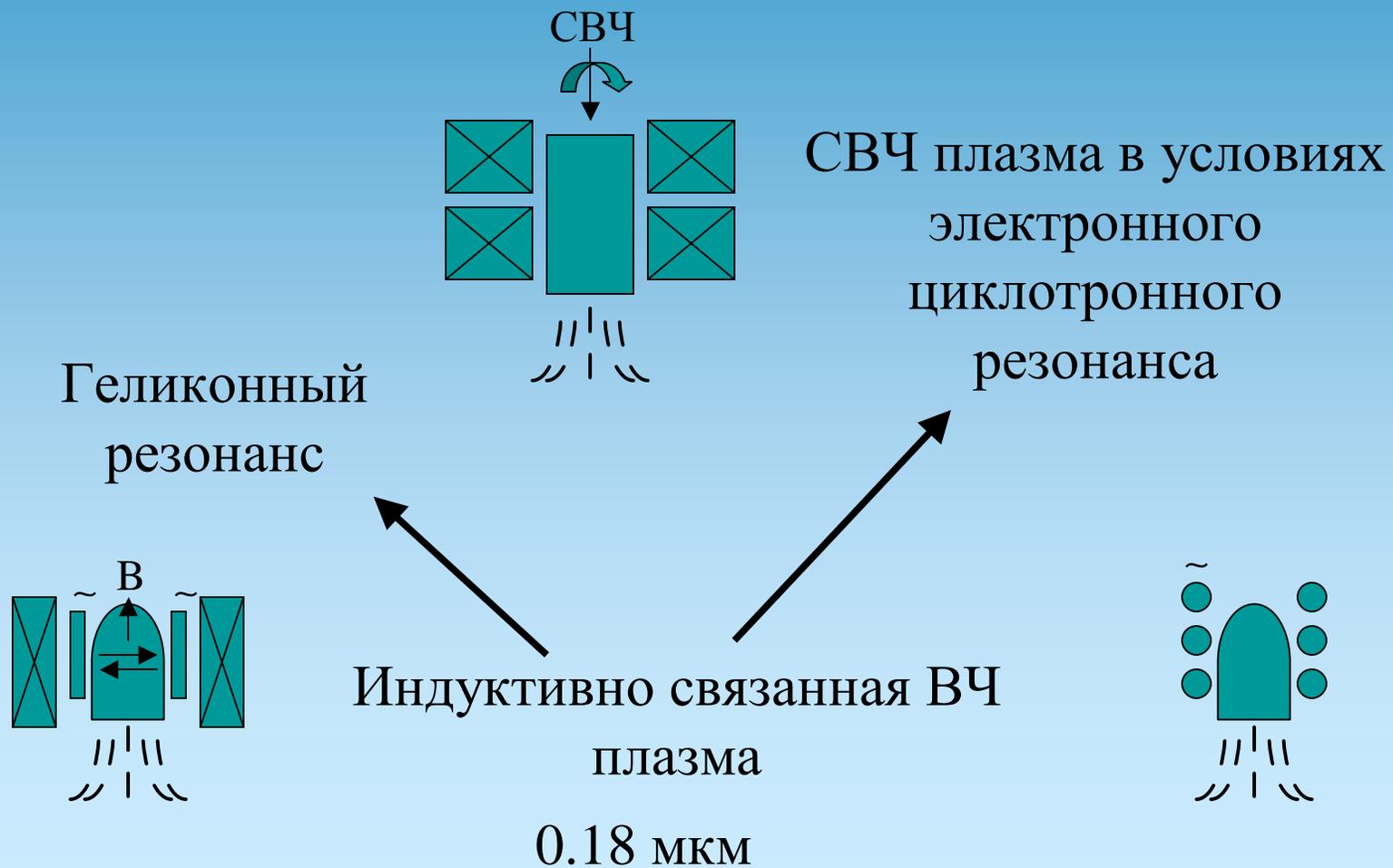
CLASSIFICATION OF COLD PLASMAS

Low-temperature Plasma (LTP)		High-temperature Plasma (HTP)
Thermal LTP $T_e \approx T_i \approx T \approx 2 \times 10^4 \text{ K}$ e.g., arc plasma at normal pressure	Non-thermal LTP $T_e \approx T \approx 300 \text{ K}$ $T_i \ll T_e \approx 10^5 \text{ K}$ e.g., low-pressure glow discharge	$T_e \approx T_i \approx 10^7 \text{ K}$ e.g., fusion plasmas

Plasma enhanced processing is done in the non-thermal regime

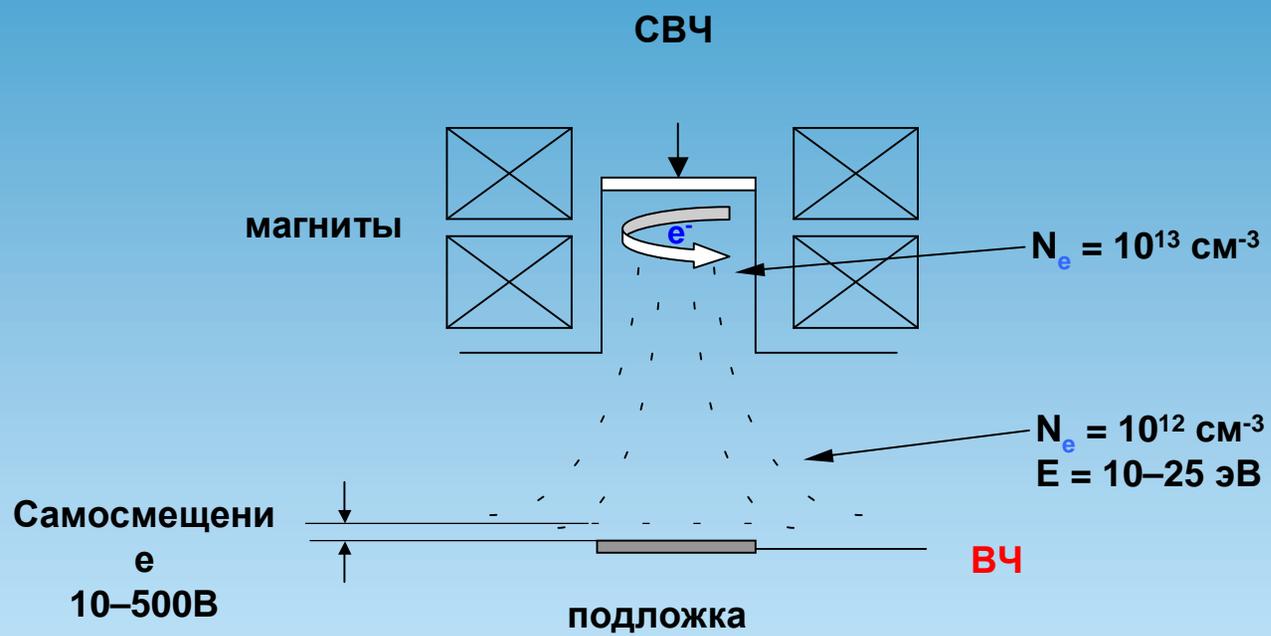
Non thermal equilibrium plasmas are difficult to measure & model

Применение плазмы в нанотехнологии





ЭЦР-плазма



1³D

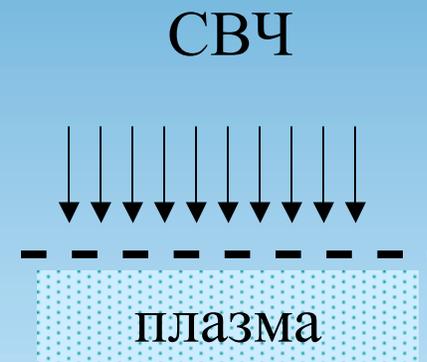
Условия формирования ЭЦР-разряда

$$t = eV / mC$$

$$\omega t \gg 1 \quad (l \ll D)$$

$$N_{cr} = m^2 \omega^2 / 4\pi e^2 = 7.4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$$

Для плоского фронта

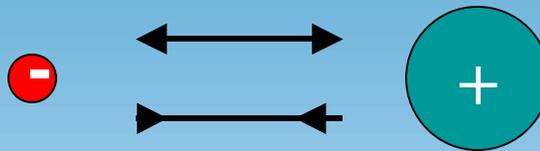


Экспериментально достигается

$$N_e = (2-4) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

Сверхплотная плазма

$$N \gg N_{cr}$$



Трансформация энергии за счет
формирования плазменных волн

Требования к технологическим процессам:

- наличие дельта-легированных слоев с моноатомными переходными слоями в эпитаксиальных структурах,
- размер элементов порядка 1 нм с боковым уходом менее 0.1 нм,
гетерогенные реакции,
длина пробега активных частиц порядка 10 см,
- отсутствие радиационных повреждений от различных технологических операций,
- предохранение образцов от проникновения атомарных газов,
- пассивация поверхности активных областей с контролируемым зарядом поверхности.

Ряд негативных эффектов, присущих и ЭЦР-плазменным методам:

- глубина распространения радиационных дефектов достигает 50 нм,
- в объеме реактора и на поверхности образца формируются моноатомные газы, их диффузия в объем образца может изменять его электронную структуру при взаимодействии моноатомных газов с электрически активными центрами,
- возможно частичное проникновение СВЧ излучения в область подложкодержателя, приводящее к его разогреву.

ЭЦР плазма применяется более 40 лет

Осаждение из газовой фазы:

- Полупроводники
- Диэлектрики
- Металлы
- Сверхпроводники
- Алмаз

Двигатели
коррекции орбиты в
космосе

Эпитаксия

- СВЕ
- МВЕ
- MOVPE

Прецизионное
травление

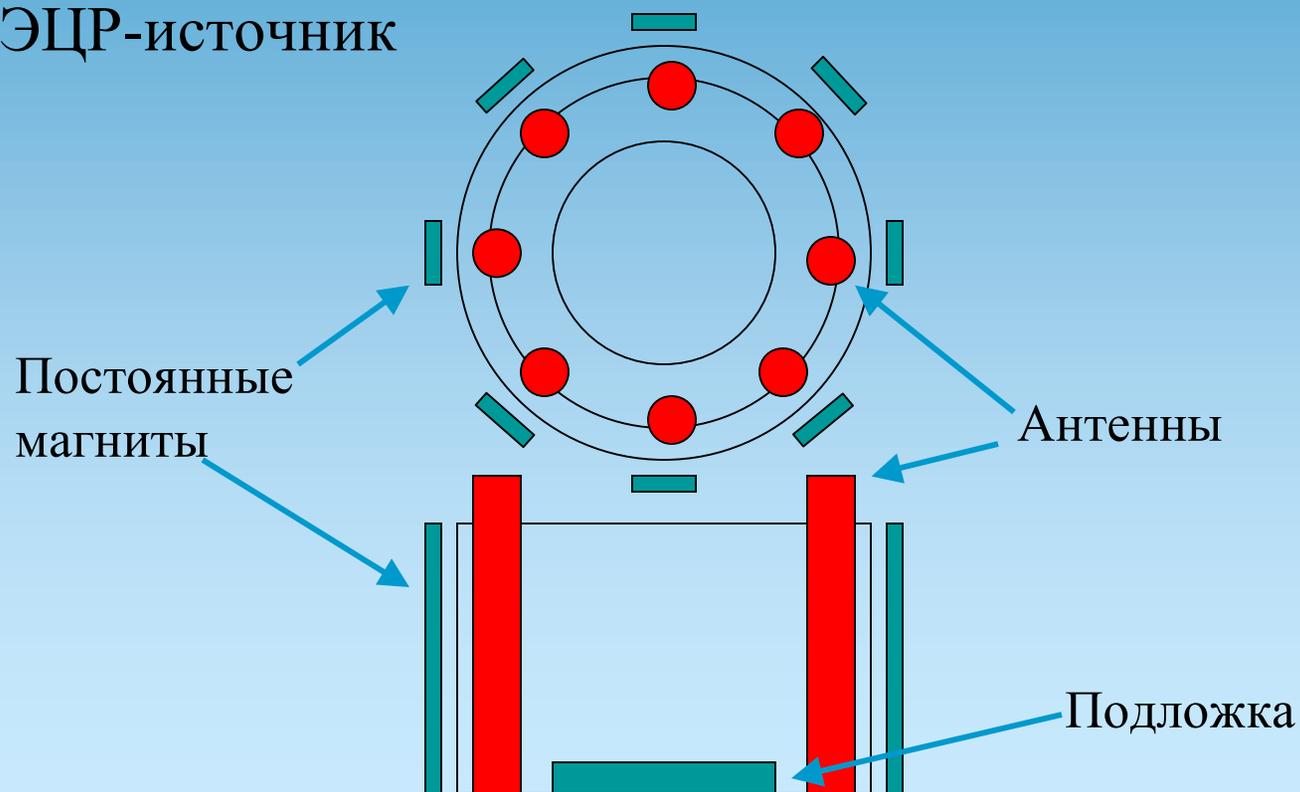
Распыление

Обработки:

- имплантация
- разделение изотопов
- Пассивация электрически активных центров

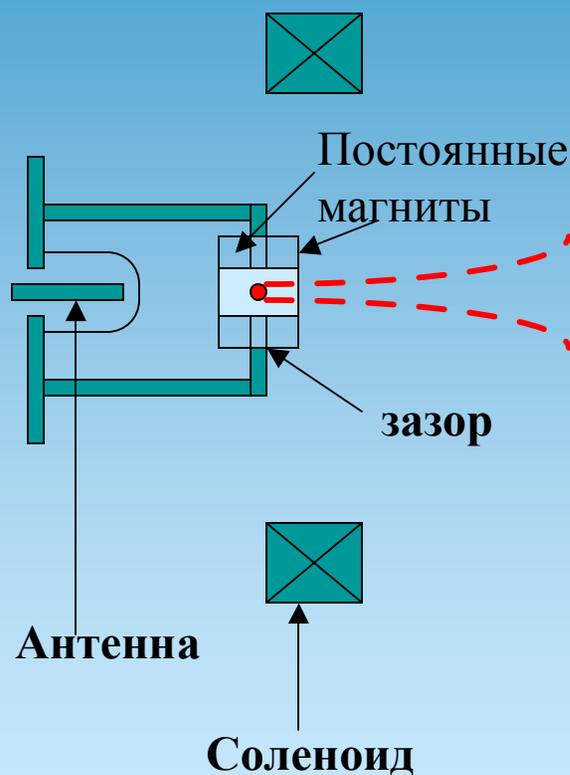
Конструкции ЭЦР-плазменных источников

Распределенный
ЭЦР-источник

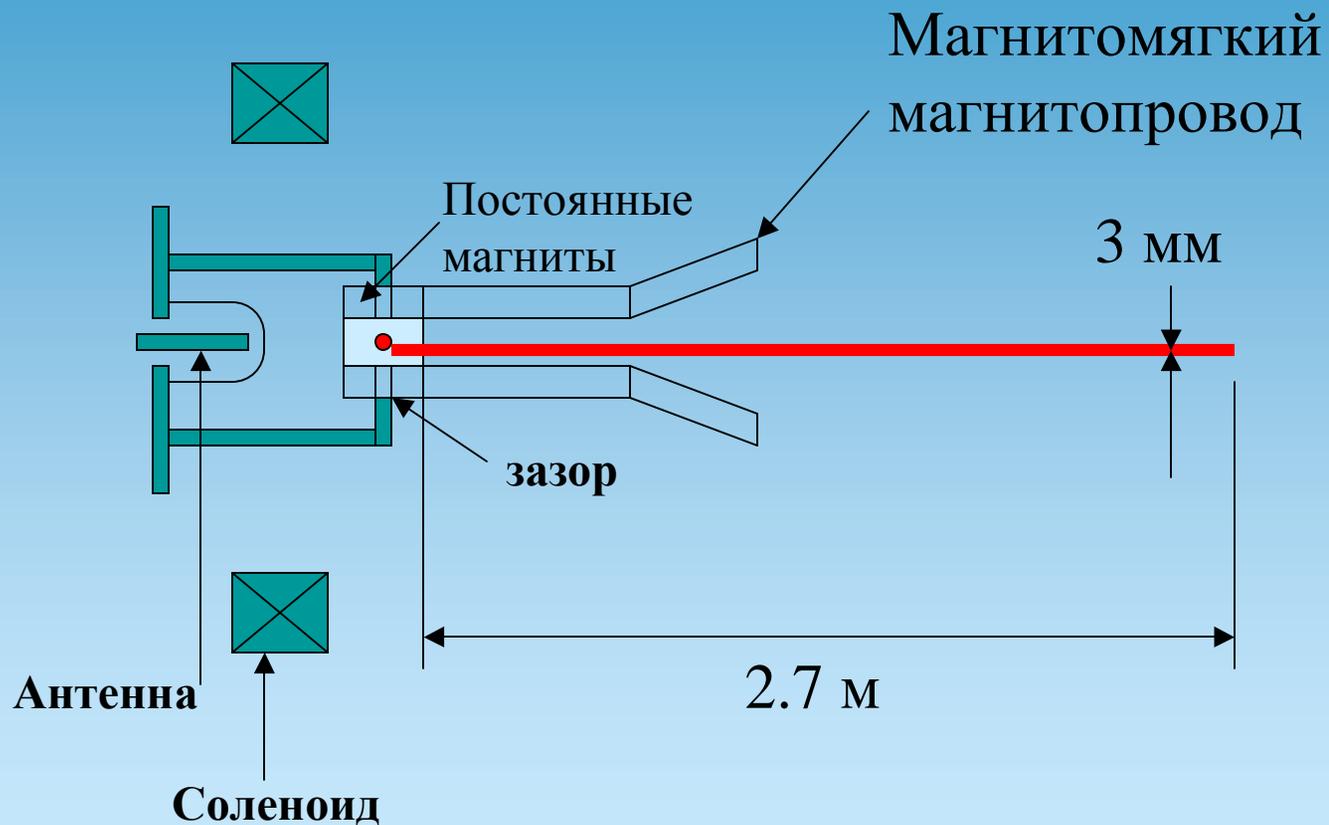


Конструкции ЭЦР-плазменных ИСТОЧНИКОВ

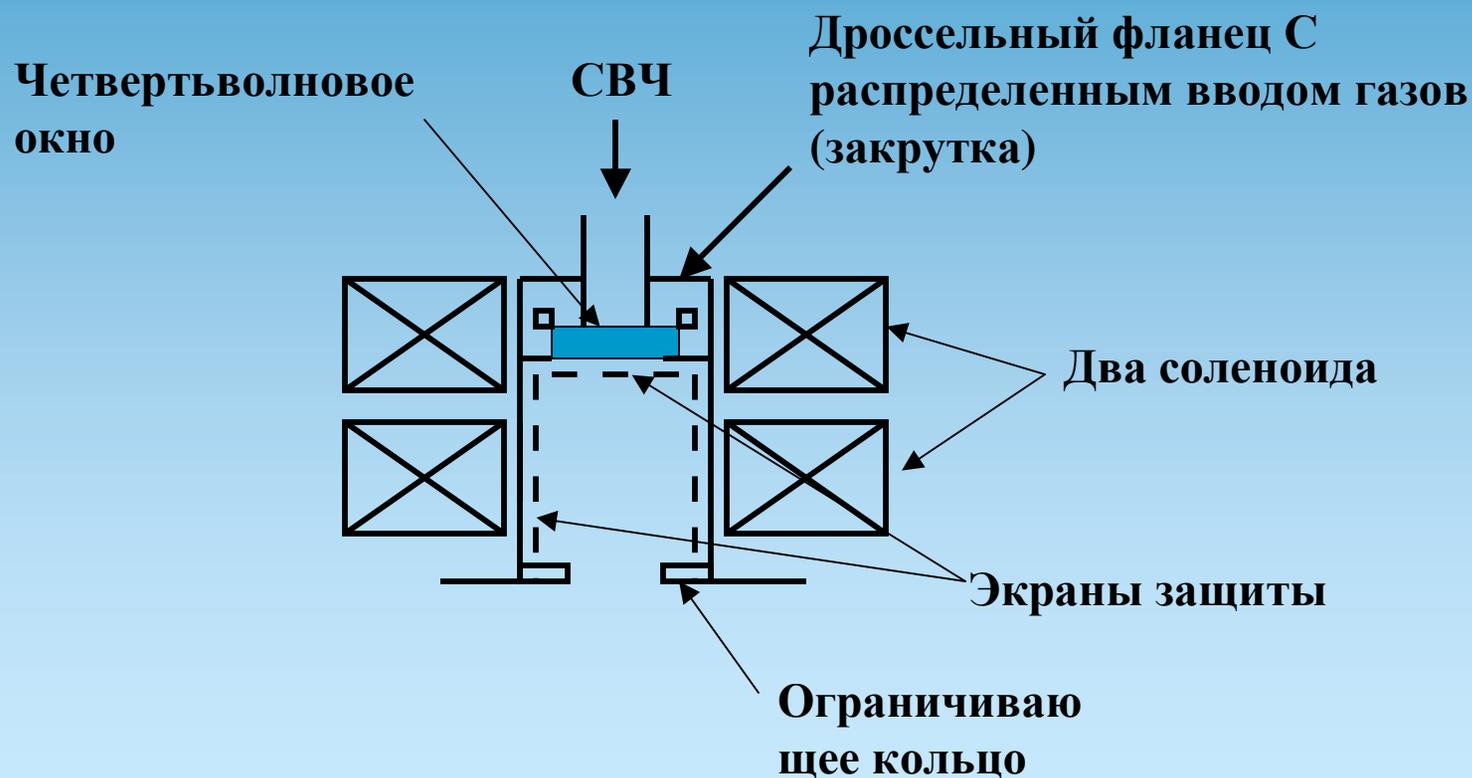
Компактный источник с постоянными магнитами



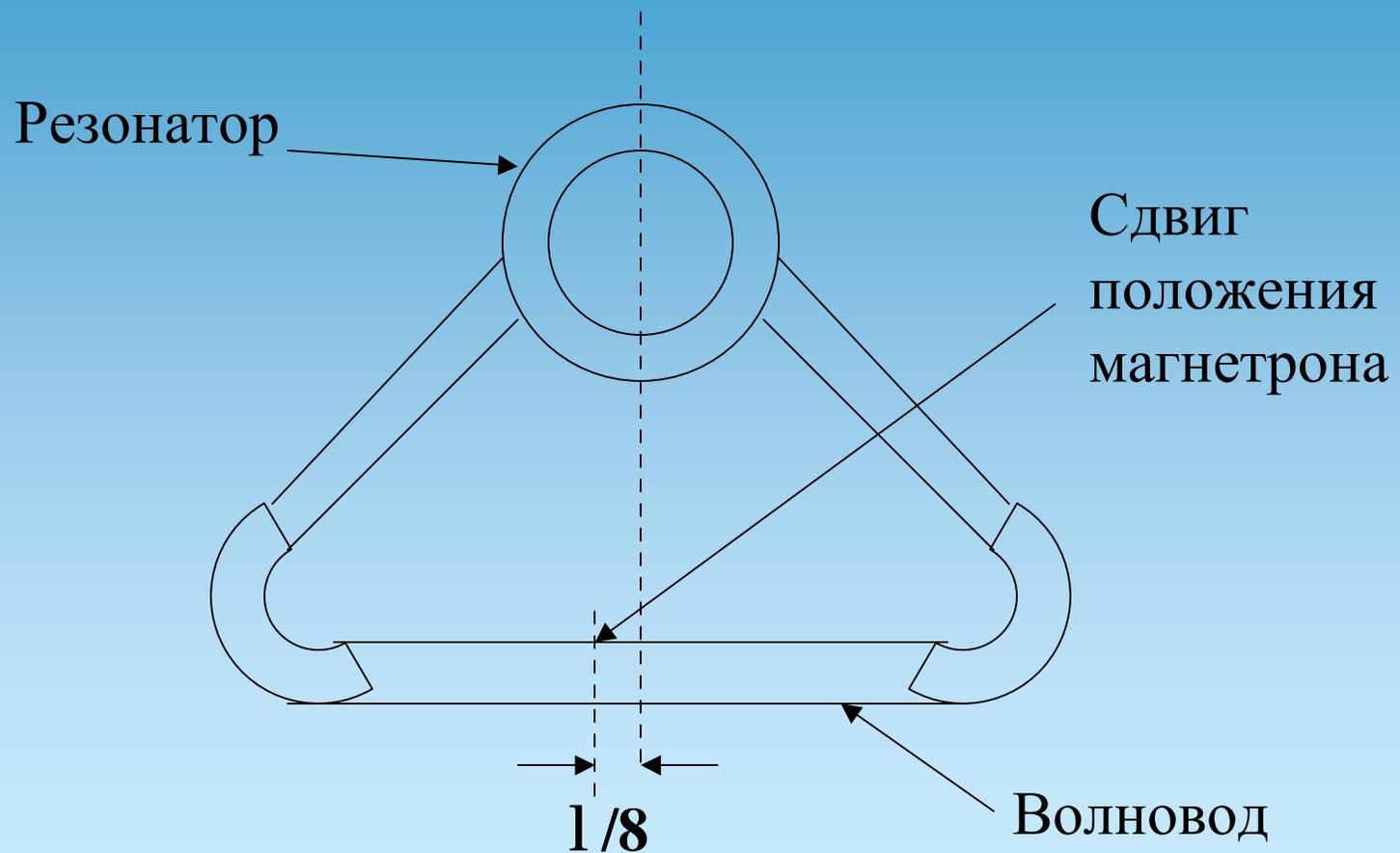
«Схлопывание» потока плазмы



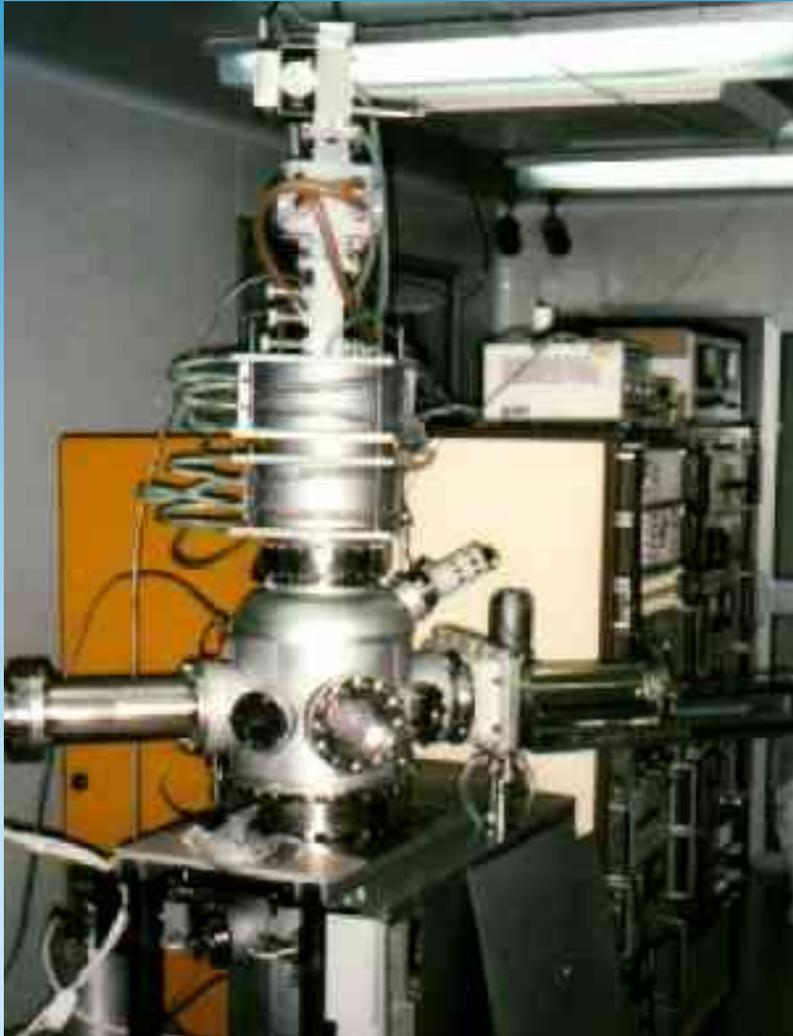
Конструкции ЭЦР-плазменных источников



Круговая поляризация



ЭЦР-плазменное оборудование



ИПТМ РАН

NRL, USA

IBM, USA

IMT, USA

Lund Univ.,
Sweden

Chalmers Univ.,
Sweden

HSRI, China

ChREI, China

Новая ЭЦР-плазменная установка

- п Низкотемпературное осаждение
- п Прецизионное травление
- п Рост эпитаксиальных структур III-N
- п Диаметр подложек 150 мм
- п Электростатический прижим
- п Охлаждение через гелиевую подушку
- п Компьютерное управление



Общий вид установки ЭЦР-плазменного прецизионного травления



Лабораторная установка эпитаксии широкозонных полупроводников (ЕСR-MOVPE)



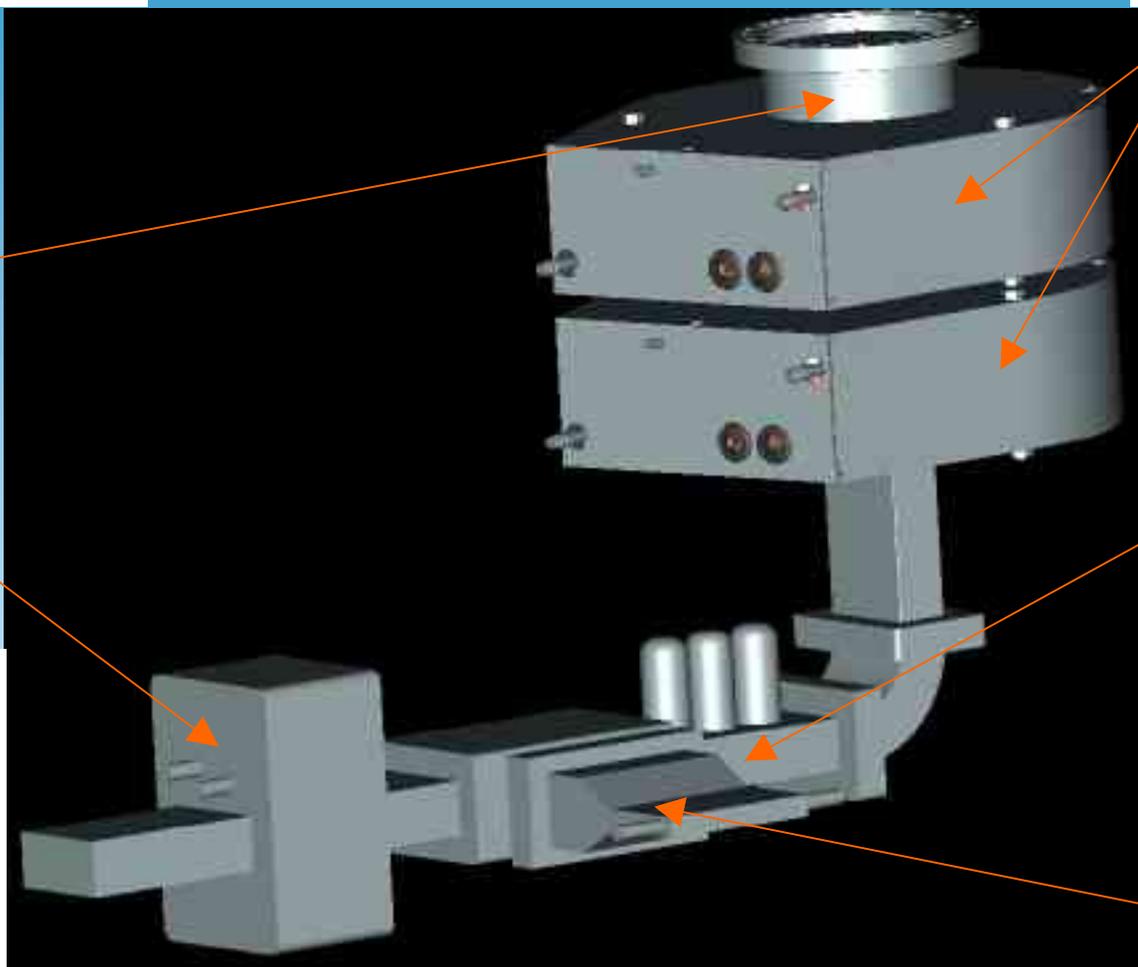
ЭЦР - ИСТОЧНИК



Система резонансного
катушки источника

Резонатор

Магнетрон



Циркулятор



Новая ЭЦР-плазменная установка

Ранее подобные установки конструировались нами для ведущих зарубежных лабораторий (Военно-морская лаборатория США, Лундский университет (Швеция), Хебейский институт полупроводников (Китай) и др.). Теперь впервые удалось совместно с ЭЗАН создать очень близкий к производственному варианту полностью автоматизированный технологический комплекс, использующий ЭЦР-плазменный разряд.

Использовались три моды ЭЦР-плазмы:

- однородная – плотность ионного тока постоянная на 80% сечения источника, магнитное поле около окна 1000-1100 Гс, в устье источника – 875 Гс,
- стержневая – максимальная плотность ионного тока (плотность плазмы) на оси источника, магнитное поле около окна 870-930 Гс,
- кольцевая – уменьшение ионного тока около оси источника, магнитное поле около окна 930-1000 Гс.

Зависимость давления в реакторе от поглощенной СВЧ мощности.

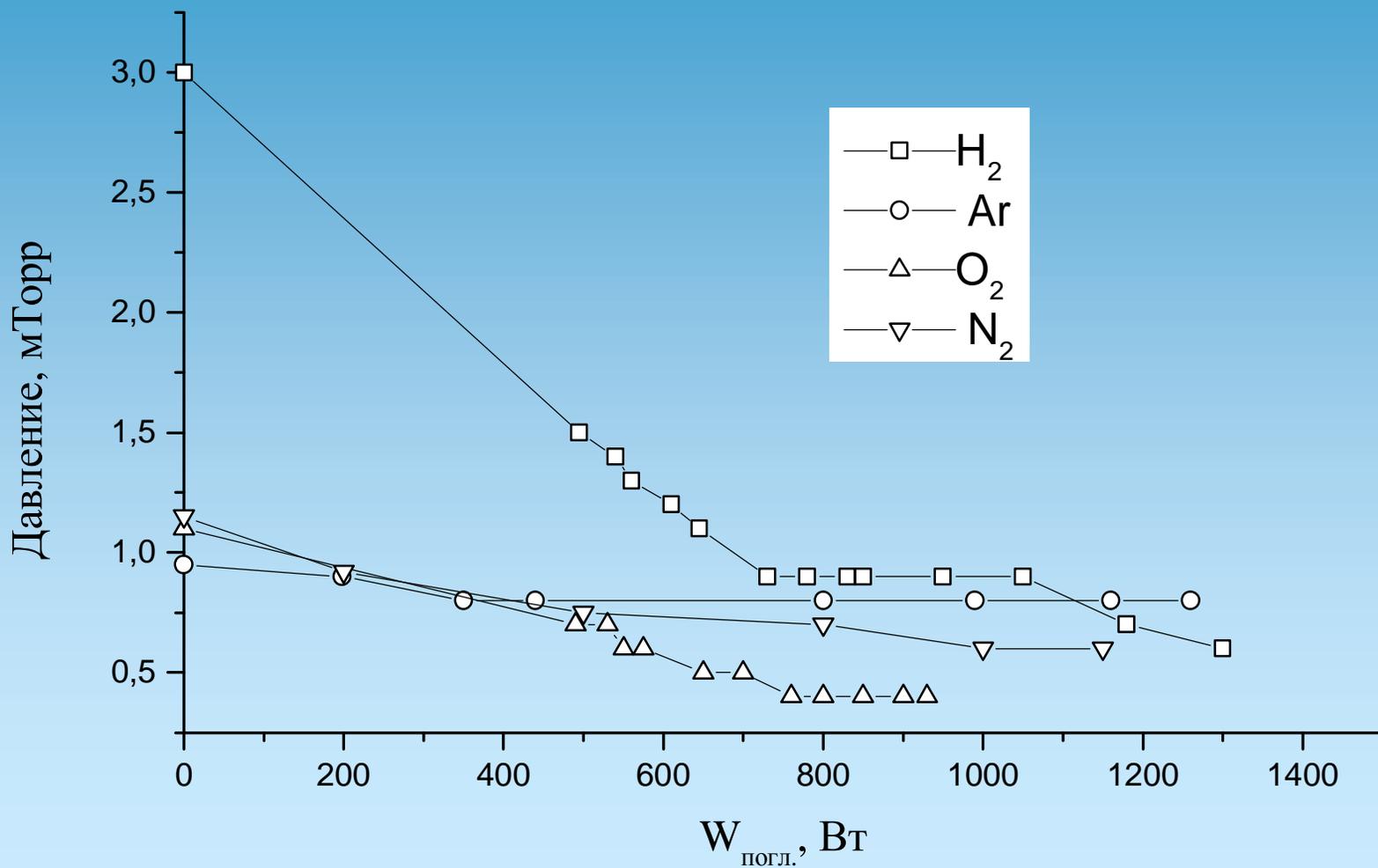
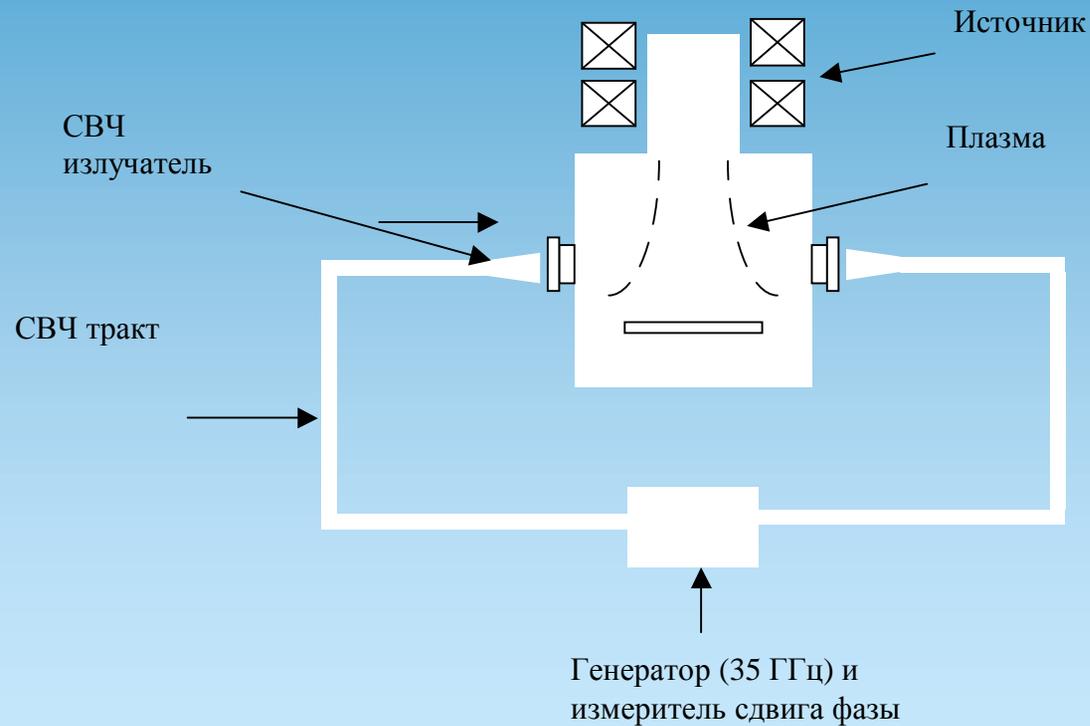


Схема измерения усредненной по диаметру потока плотности плазмы



Усредненная вдоль линии плотность плазмы N_e может быть рассчитана из измеренной с помощью СВЧ

интерферометра величины $n_e d$

Интерферометр определяет сдвиг фазы в СВЧ сигнале при прохождении через объем плазмы. Сдвиг фазы может быть определен из уравнения

$$\Delta\varphi = (2\pi/\lambda) \int [1 - (1 - n_e(x)/n_c)^{1/2}] dx, \quad (1)$$

Где интеграл взят вдоль пути СВЧ сигнала, λ – длина волны СВЧ излучения, $n_e(x)$ – плотность электронов как функция расстояния поперек плазмы, n_c – критическая плотность электронов для используемой длины волны, которая задается выражением

$$n_c = (\epsilon_0 m/e^2) \omega^2 = (f^2/8.1) \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}, \quad (2)$$

где f в GHz. На практике для случая, когда $n_e < 0.3 n_c$, уравнение (1) может быть хорошо аппроксимировано линейной функцией

$$\Delta\varphi = 2\pi(d/\lambda)(n_e/2n_c) \quad (3)$$

Где плазма имеет ширину d со средней плотностью электронов n_e .



Усредненная вдоль линии плотность плазмы N_e

Критическая плотность электронов для частоты сигнала $f = 35$ ГГц равна 1.51×10^{13} см⁻³. Линейный интервал для измерения плотности достигает величины 5×10^{12} см⁻³ ($0.3 n_c$). Максимальный сдвиг фазы, который может быть измерен, равен 2π или одному периоду; это соответствует теоретическому максимуму усредненной вдоль линии плотности 2.56×10^{13} см⁻² или для ширины плазмы 10 см максимальной средней объемной плотности плазмы 2.56×10^{12} см⁻³. Предел плотности может быть установлен либо по возможностям инструмента (2π) и размеру плазмы или по величине $0.3 n_c$, т.е. по меньшему параметру.

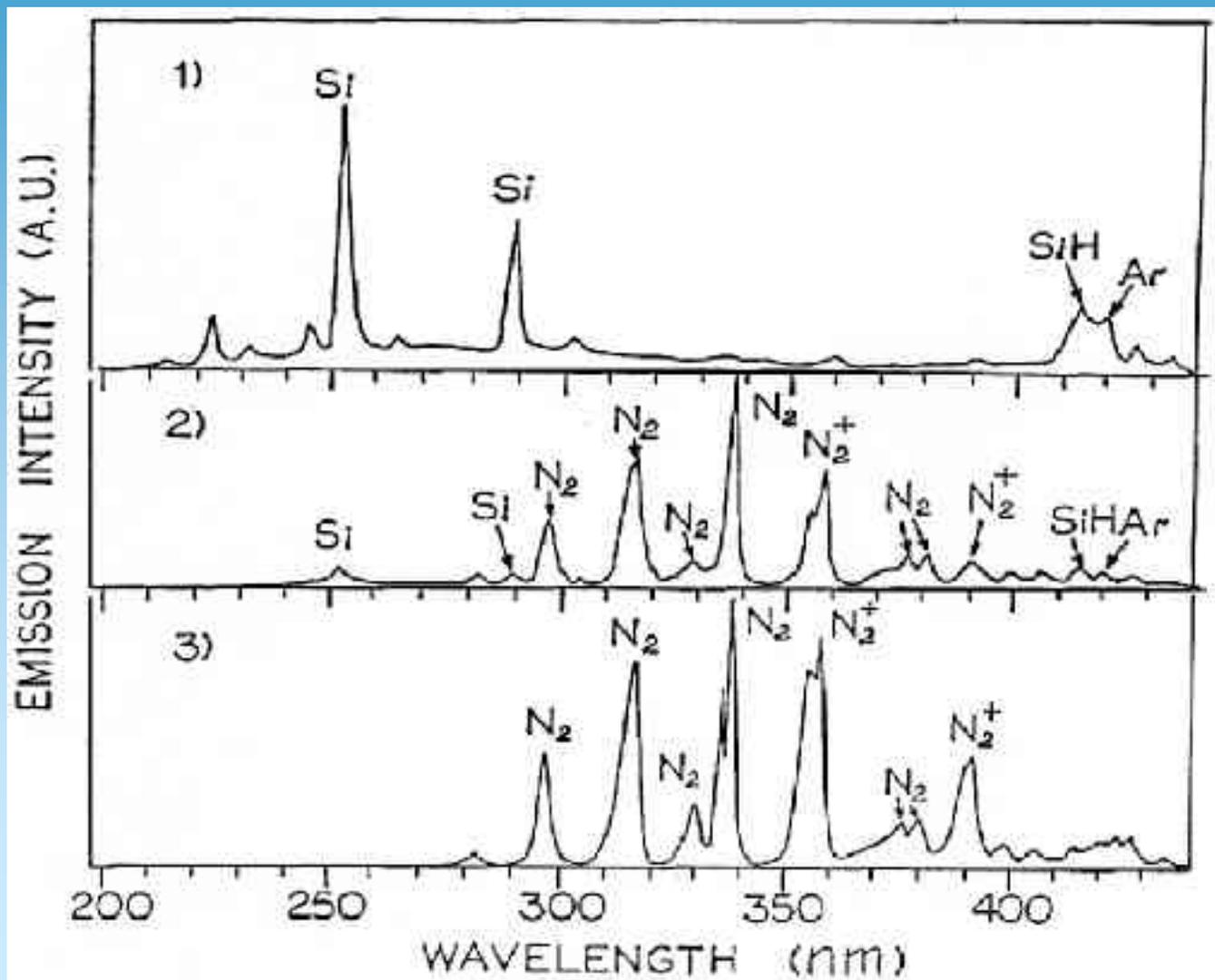


Усредненная вдоль линии плотность плазмы N_e

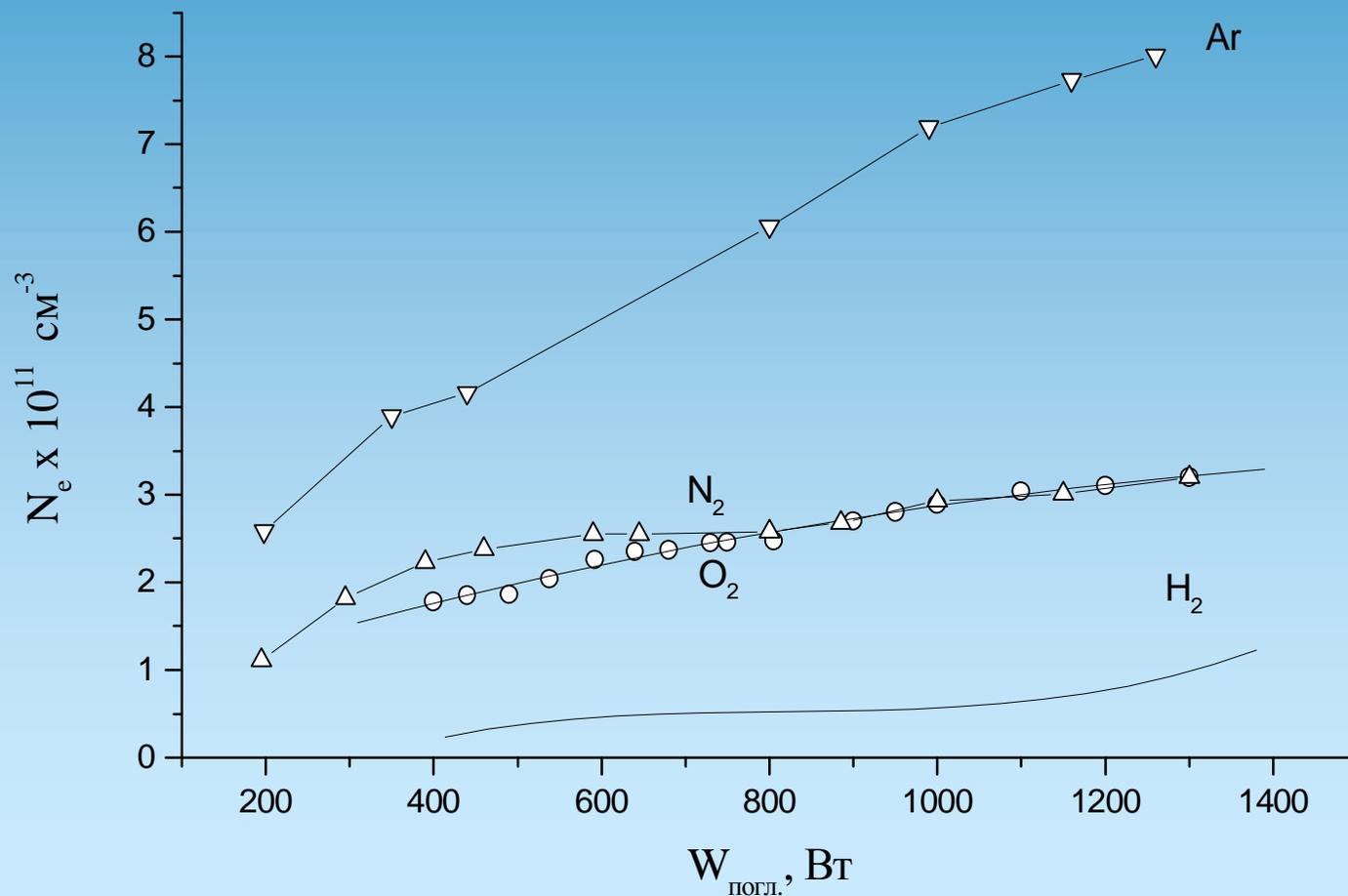
Этот метод не дает информацию о профиле плотности плазмы, но позволяет измерить усредненную по линии плотность плазмы \bar{n}_e .

В нашем случае \bar{n}_e в два-три раза меньше максимальной плотности плазмы при использовании кольцевой моды плазмы и немного меньше максимальной плотности плазмы при использовании однородной плотности плазмы (имеется в виду плотность плазмы на удалении от источника). В нашем случае расстояние между излучателем и приемником около 35 см при диаметре потока плазмы около 25 см. Таким образом, ошибка измерения усредненной по линии плотности плазмы не превышает 20% при использовании однородной моды плазмы, в которой неоднородность по сечению не превышает 5%..

Эмиссионный спектр



Зависимость плотности плазмы от поглощенной СВЧ мощности для различных газов (40 см от устья источника).



Распределение плотности ионного тока и толщины слоя по диаметру

