



Определение плотности плазмы
по ионному току
на цилиндрический зонд Ленгмюра
с проверкой на измерения СВЧ зондом

Д.Г. Волошин, в.н.с., к.ф.-м.н.

Лаборатория физики плазмы и физических основ микро-технологии

Отдел микроэлектроники НИИЯФ МГУ

в рамках совместной работы с ярославским филиалом ФТИАН (Амиров Ильдар Искандерович - лаборатория технологии микро- и наносистемной техники)

Результаты данного исследования опубликованы в статье:

по приглашению в спец выпуск PSST

Special Issue on Verification, Validation and Benchmarking of Low-temperature Plasma Models

в раздел валидации - проверка предложенной теории на экспериментальные данные

IOP Publishing

Plasma Sources Science and Technology

Plasma Sources Sci. Technol. 32 (2023) 044001 (12pp)

<https://doi.org/10.1088/1361-6595/acc355>

Plasma density determination from ion current to cylindrical Langmuir probe with validation on hairpin probe measurements

D Voloshin^{1,*} , T Rakhimova¹ , A Kropotkin¹ , I Amirov² , M Izyumov², D Lopaev¹ ,
A Zotovich¹  and S Ziryanov¹ 

¹ Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University (SINP MSU), 1(2), Leninskie gory, GSP-1, Moscow 119991, Russia

² Valiev Institute of Physics and Technology RAS, Yaroslavl branch, 26 Universitetskaya st., Yaroslavl 150007, Russia

E-mail: dvoloshin@mics.msu.su

Received 22 February 2023

Accepted for publication 10 March 2023

Published 11 April 2023



CrossMark

Развитие методов диагностики плазмы

- Потоки и энергии частиц из плазмы на обрабатываемую поверхность
- Экспериментальные исследования в сочетании с численным моделированием могут обеспечить лучшую диагностику ВЧ разрядов (“computationally assisted experiment”)

- Энергетический спектр ионов – виртуальный датчик

2021 “Virtual IED sensor” for df rf CCP discharges

Bogdanova M., Lopaev D., Rakhimova T., Voloshin D., Zotovich A., Zyryanov S.

Plasma Sources Science and Technology, **30**, 075020

- Плотность плазмы по ионному току на зонд

Цикл работ по зондовой диагностике

Voloshin D., Rakhimova T., Mankelevich Y.

“The plasma sheath around planar probes: effects of ion collisions”

Plasma Sources Science and Technology, 2016, vol. 25, № 1, p. 015018.

Волошин Д.Г., Васильева А.Н., Ковалев А.С., Манкелевич Ю.А., Рахимова Т.В.

“Определение плотности плазмы по данным ионного тока на цилиндрический и плоский зонд”

Физика плазмы, 2016, том 42, № 12, с. 74-83

D. Voloshin, A. Kovalev, Yu. Mankelevich, O. Proshina, Rakhimova, and A. Vasilieva

“Evaluation of plasma density in rf ccp discharges from ion current to langmuir probe: experiment and numerical simulation”

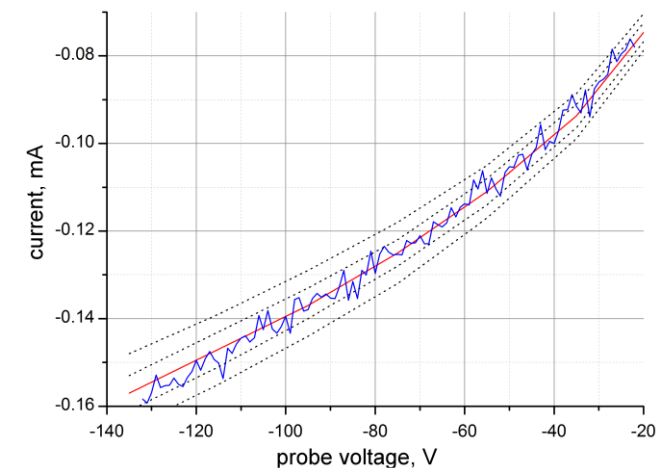
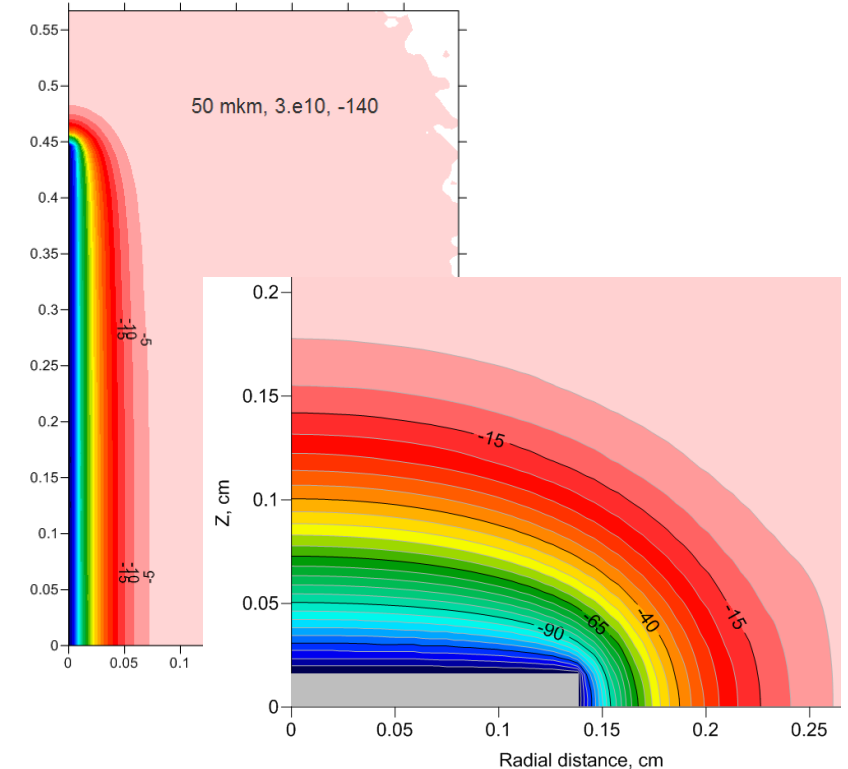
European Physical Journal D, Vol. 69, No. 1, P. 23, 2015

D Voloshin, T Rakhimova, A Kropotkin, I Amirov, M Izyumov,

D Lopaev, A Zotovich and S Ziryanov,

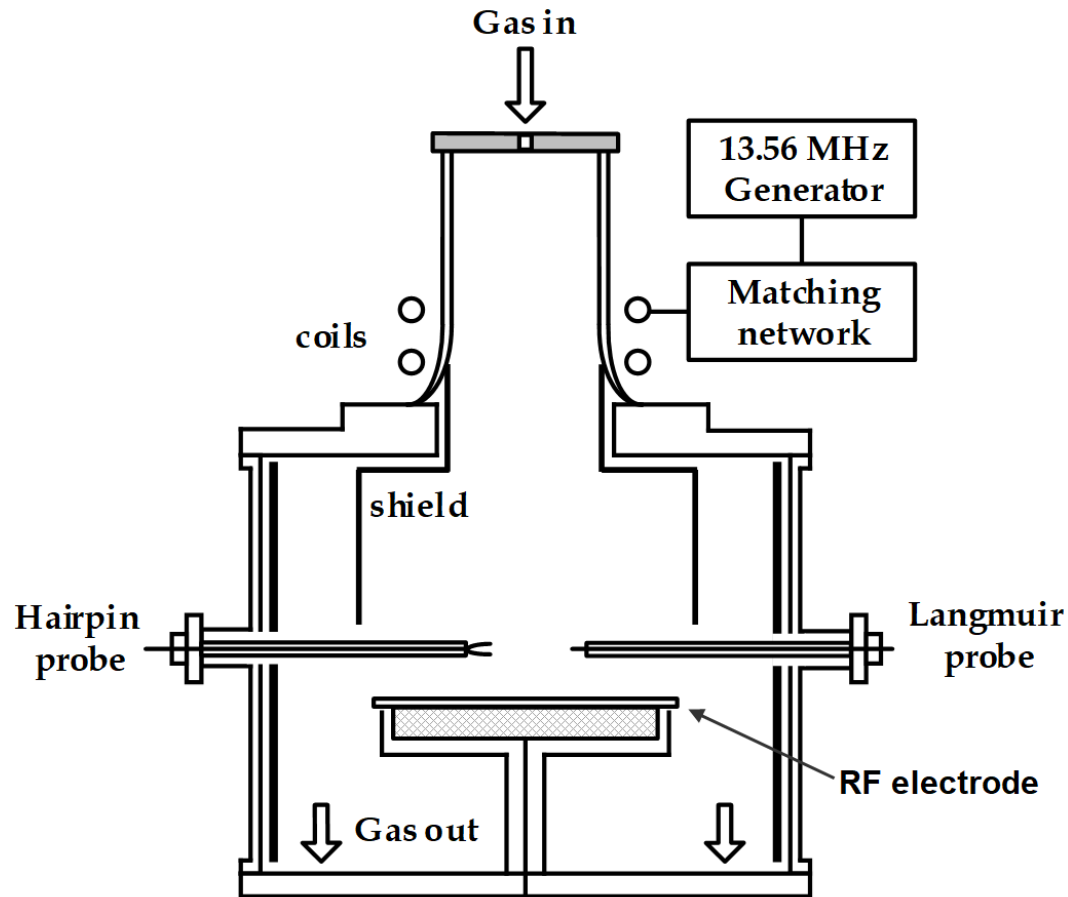
“Plasma density determination from ion current to cylindrical Langmuir probe with validation on hairpin probe measurements”

2023 *Plasma Sources Sci. Technol.* **32** 044001



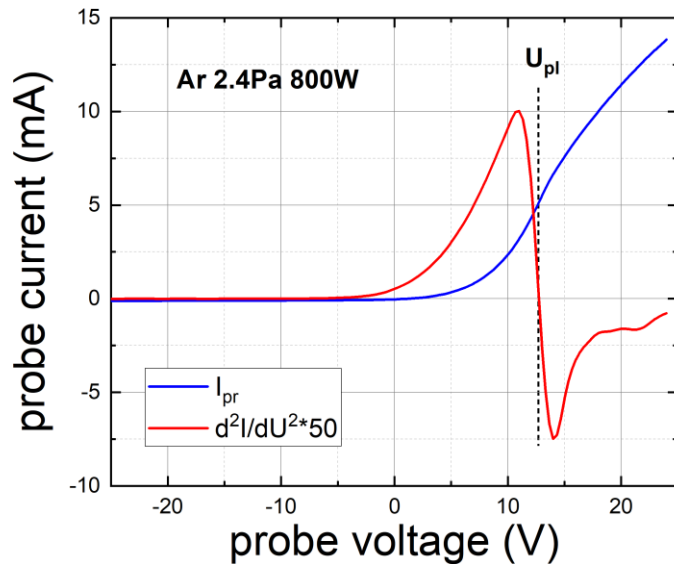
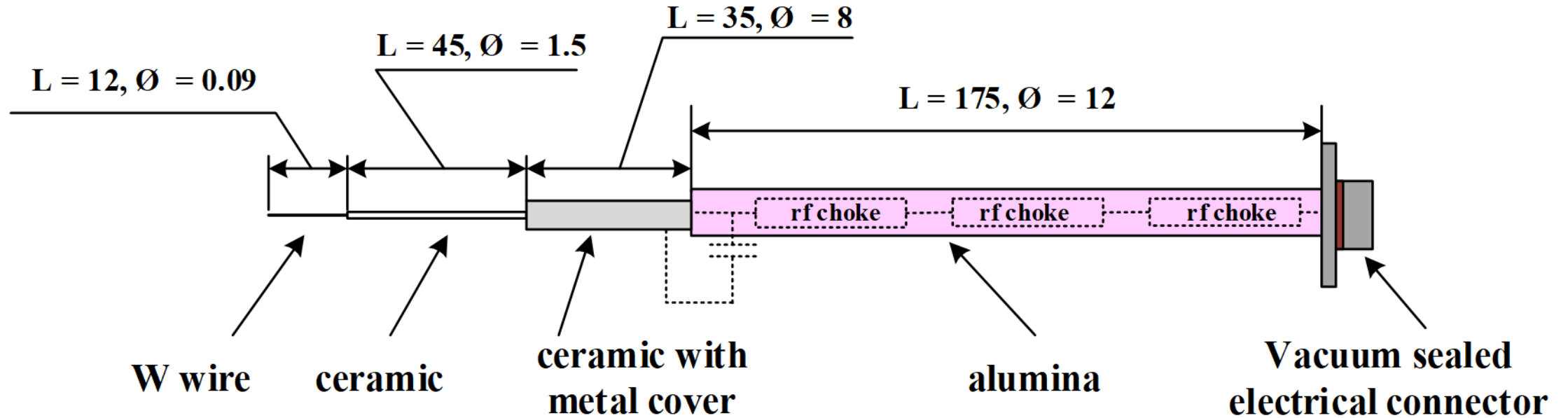
Экспериментальная установка

- Индукционный разряд, двухкамерная геометрия
- Инертный газ - аргон, реакционный газ – хлор, кислород



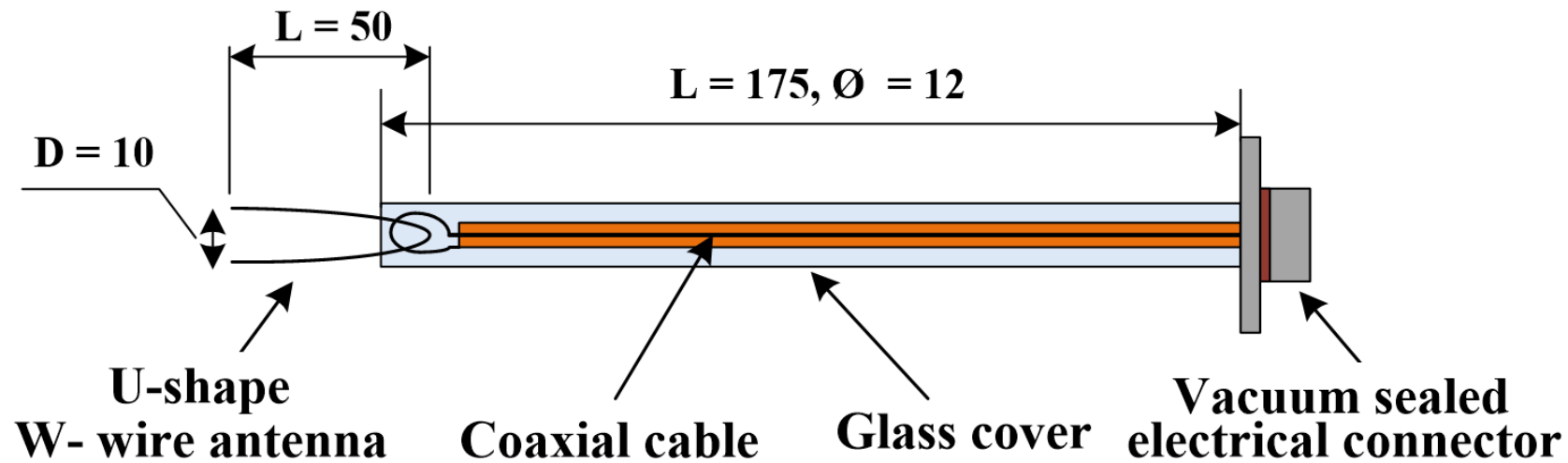
- ВЧ компенсированный цилиндрический зонд
- Hairpin зонд для измерения концентрации электронов
- Давление газа 0.6 – 3.6 Па, 4.5 – 27 мТорр
- Мощность 200 - 800 Вт ($n_e = 10^9 - 10^{11} \text{ см}^{-3}$)
- Дополнительное ВЧ смещение на нижнем электроде
- Постоянное магнитное поле (ток 0-0.6А)
- Ионный анализатор энергии (RFEA)
- регистрация оптического спектра плазмы
- лазерно-интерферометрического метод для определения скорости травления образца

Зонд Ленгмюра



Потенциал плазмы, плавающий потенциал, функция распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) и концентрация электронов измеряются цилиндрическим зондом Ленгмюра с ВЧ компенсацией.

СВЧ зонд - Hairpin probe



Диапазон изменения частоты сигнала, подаваемого на зонд от 1,4 ГГц до 3 ГГц.

Резонанс в отраженной мощности за счет возбуждающих колебаний в U-образной проволоке смещается за счет плазмы, что позволяет по сдвигу определять плотность электронов

$$n_e = \left(f_r^2 - f_0^2 \right) \frac{2\pi m_e \tilde{\epsilon}_0}{e^2}$$

Численные модели

- Кинетическая модель

метод "Частиц в ячейке" с Монте-Карло столкновениями для описания движения ионов

с учетом упругого рассеяния и резонансной перезарядки ионов Ar^+ на атомах Ar

Больцмановское равновесие для электронов

$$n_e(r) = N_0 \exp(-e\phi(r)/kT_e)$$

Электрический потенциал описывается одномерным уравнением Пуассона в цилиндрических координатах

набор ВАХ для данного давления рассчитывался для плотности N_0 в диапазоне от 10^9 до $1.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ с шагом $dN_0 = 10^9 \text{ см}^{-3}$. экспериментальные ВАХ сравниваются с этим расчетным набором.

- Полуаналитическая модель

одномерная гидродинамическая модель ионного тока на зонд с учетом столкновений ионов

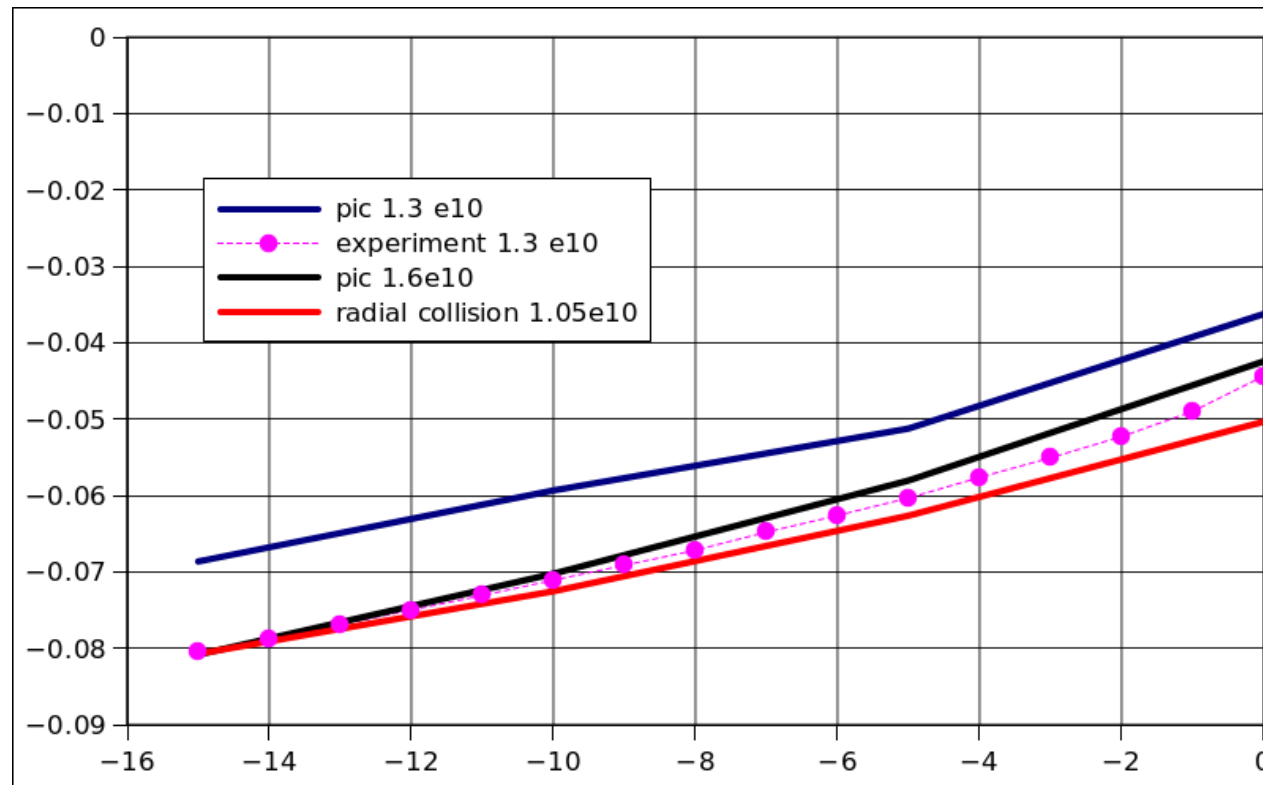
$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) = 4\pi e \left(\frac{I}{2\pi r l e \sqrt{2e\varepsilon_i/M_i}} - N_0 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT_e}\right) \right),$$

$$\frac{\partial \varepsilon_i}{\partial r} = -e \frac{\partial \phi(r)}{\partial r} + \frac{\varepsilon_i}{\lambda_i},$$

$$\lambda_i = \frac{1}{N\sigma(\varepsilon_i)},$$

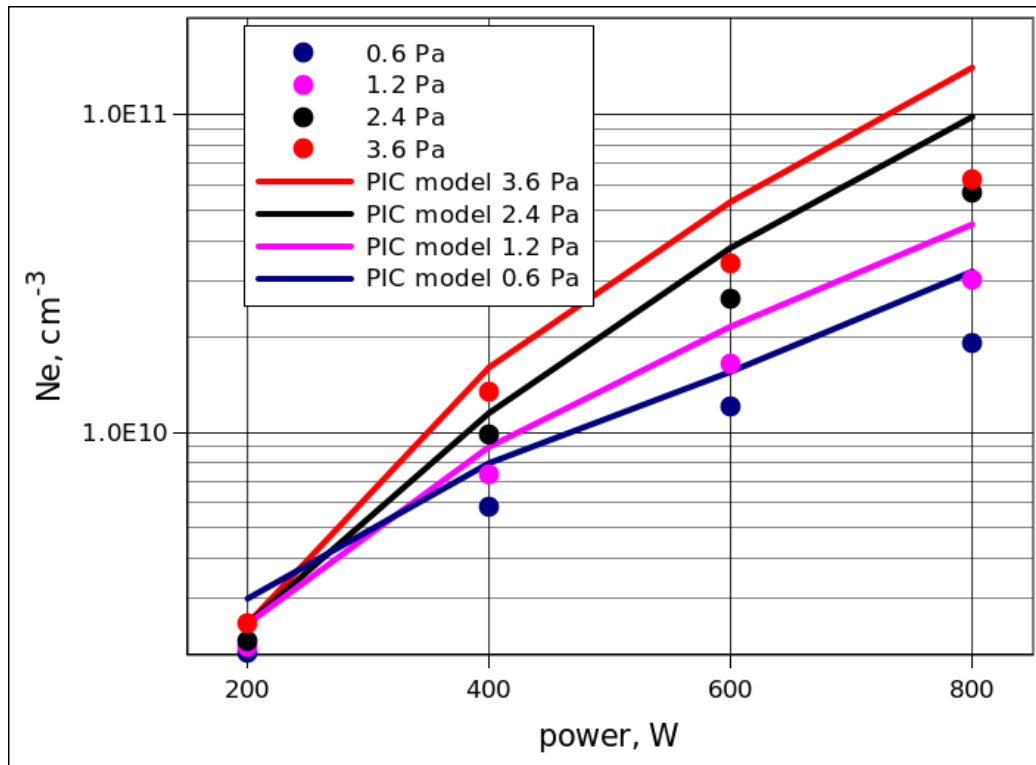
$$\sigma(\varepsilon_i) = 1.8 \times 10^{-16} (40 + 100 \exp(-\varepsilon_i[\text{eV}]/0.3) + 35 \exp(-\varepsilon_i[\text{eV}]/20)),$$

Определение плотности плазмы сопоставление кривых ВАХ

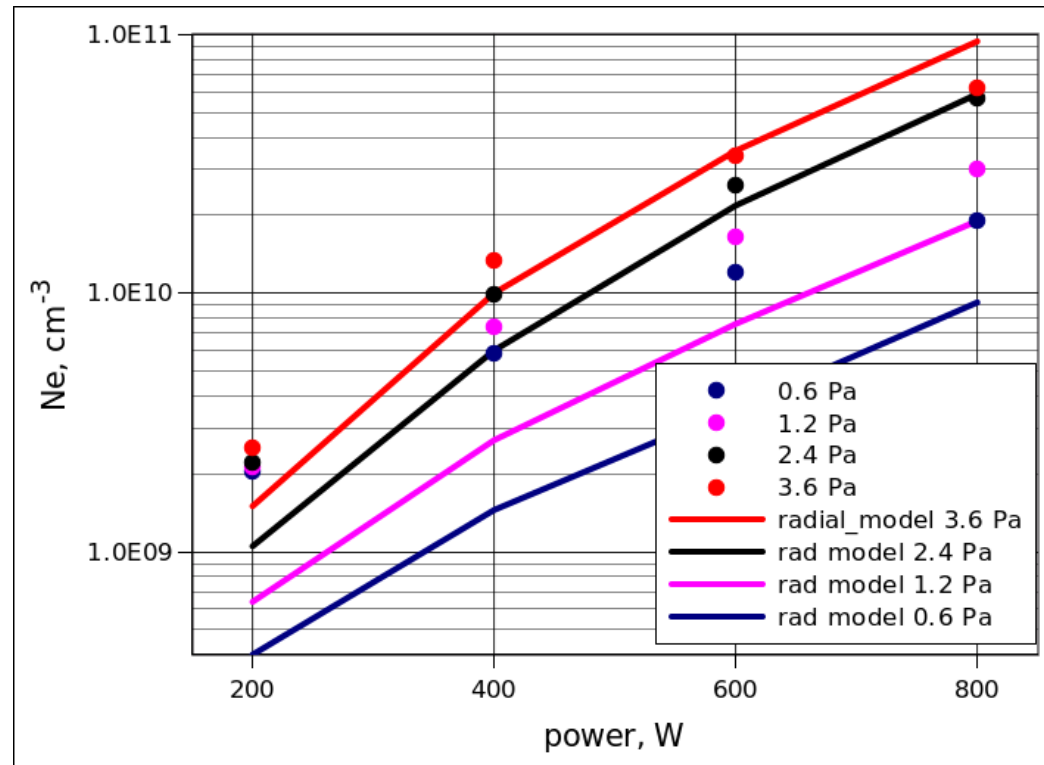


Экспериментальные и численные ВАХ.
Давление газа 3,6 Па, мощность разряда 400. В.

Результаты моделей

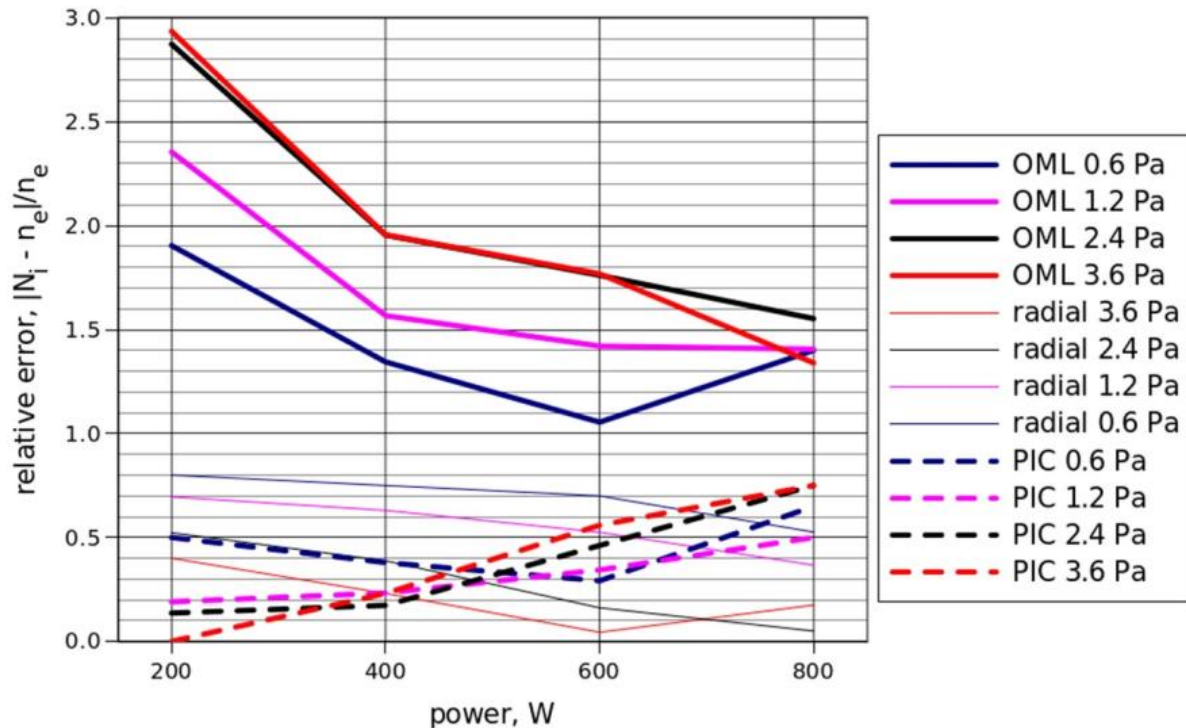


Плотность плазмы по измерениям СВЧ зонда и МЧЯ (PIC) модели



Плотность плазмы по измерениям СВЧ зонда и радиальной модели

Относительная ошибка результатов различных моделей по сравнению с измерениями СВЧ зондом



широко используемая бесстолкновительная аналитическая теория OML дает максимальную погрешность определения плотности плазмы

Полуаналитическая теория радиального движения ионов, изначально сформулированная для значений давления 30–200 мТорр, дает лучшие результаты для более высоких значений давления 18 и 27 мТорр

Наилучшие результаты в изучаемых условиях получены с кинетической PIC-моделью движения ионов к зонду

по мере увеличения мощности разряда ошибка СВЧ зонда также увеличивается из-за уширения формы резонанса

Рекомендуется использовать теории, которые учитывают столкновения ионов для давлений выше 10 мТорр

Предварительный расчет ВАХ для запланированного эксперимента с известной конфигурацией зонда позволяет интерпретировать экспериментальные данные в реальном времени

Спасибо за внимание!