

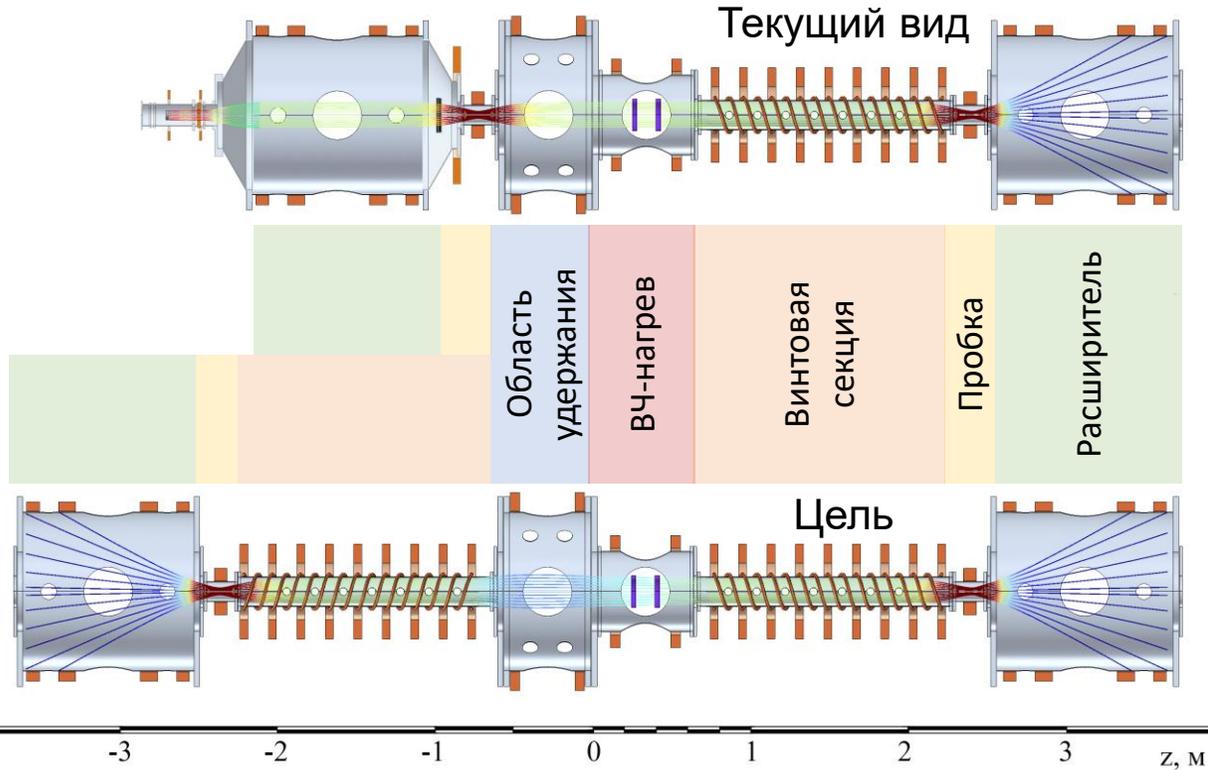
Развитие термоядерных исследований в лаборатории 10

Д.И. Сковородин
от имени команды лаб. 10

Работы по УТС в лаборатории 10:

- ❖ Установка СМОЛА* – начало работ.
- ❖ Установка ГОЛ-НВ.
 - ❖ Инжекция электронного пучка.
- ❖ Взаимодействие плазмы с поверхностью.
 - ❖ Испытания вольфрама с использованием частотно-импульсного электронного пучка.
- ❖ Исследование взаимодействия мощных РЭП с плазмой и электродинамическими структурами.

СМОЛА*: начало работ

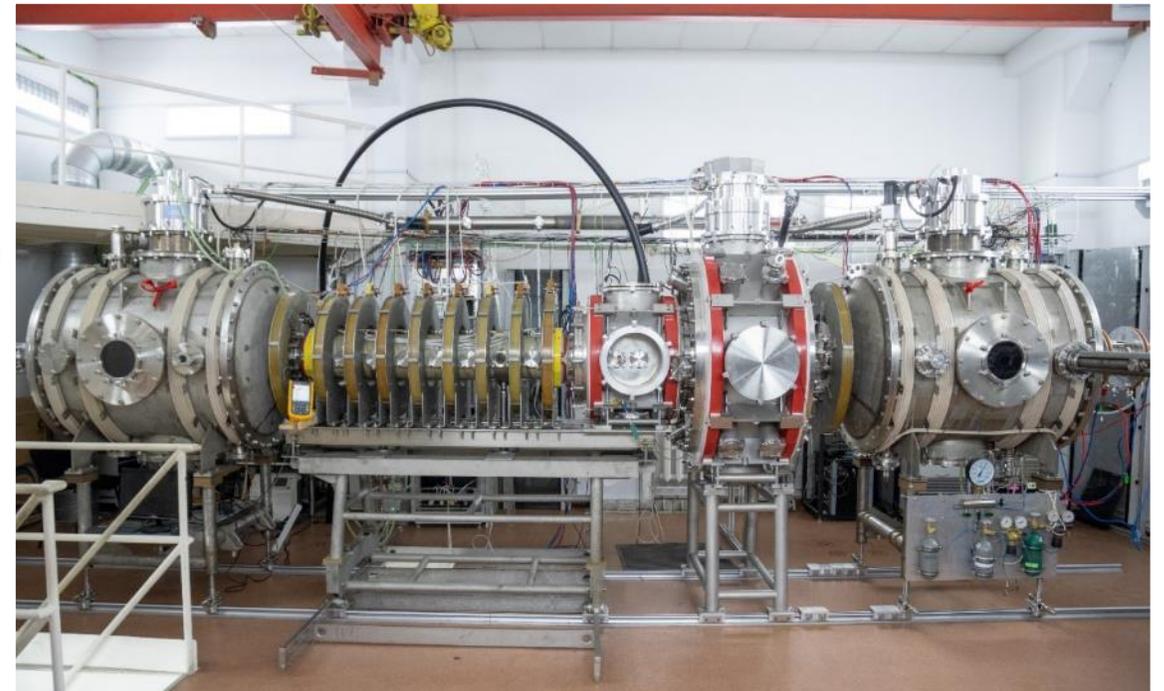


Основные задачи новой установки:

- Многопробочное удержание при слабой кулоновской столкновительности
- Вращение плазмы в ловушке
- Подавление потерь различными типами пробок
- Ввод вещества в ловушку через винтовые пробки

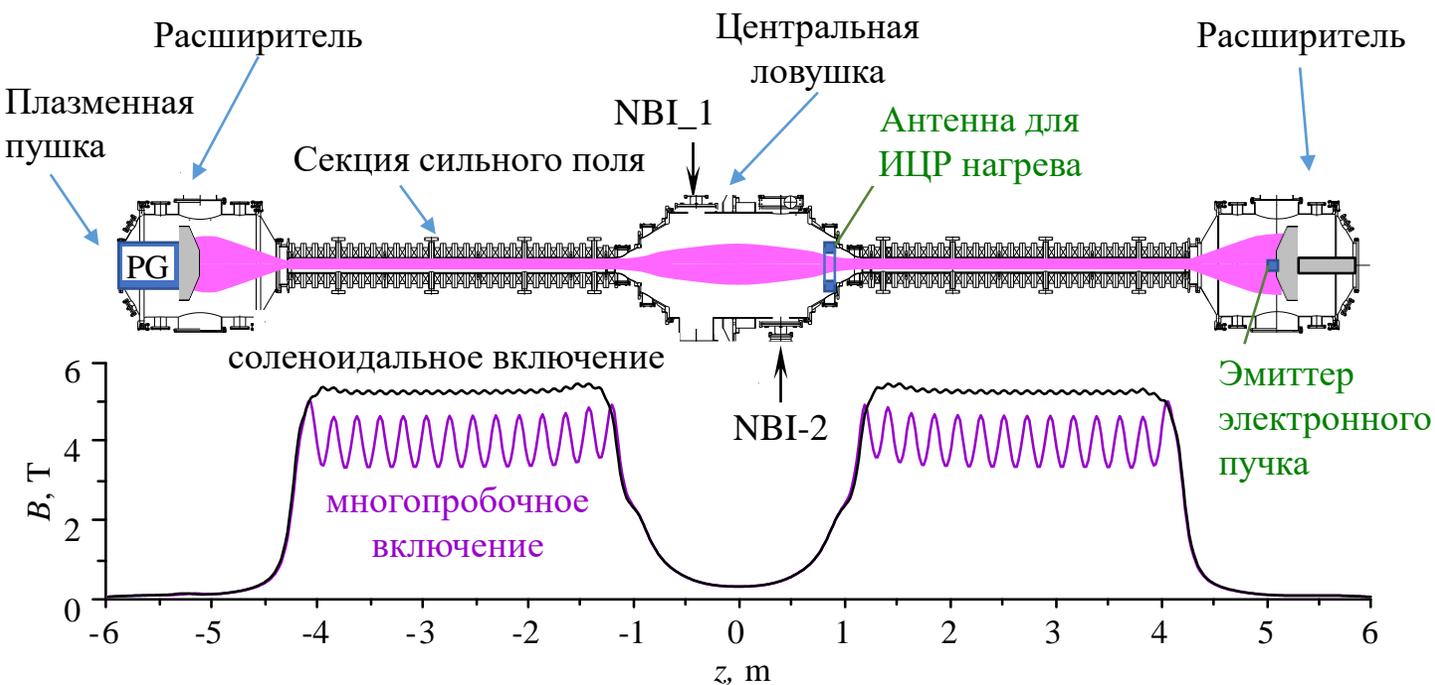
* Установка СМОЛА была разобрана и пересобрана в существенно новой конфигурации. Новые центральная секция, секция ВЧ-нагрева, две симметричные винтовые пробки (на сегодня установлена одна), ВЧ-генератор и др.

Винтовые пробки короче предыдущей, но дают бóльшую глубину гофрировки.



Работы по УТС в лаборатории 10:

- ❖ Установка СМОЛА* – начало работ.
- ❖ **Установка ГОЛ-НВ.**
 - ❖ **Инжекция электронного пучка.**
- ❖ Взаимодействие плазмы с поверхностью.
 - ❖ Испытания вольфрама с использованием частотно-импульсного электронного пучка.
- ❖ Исследование взаимодействия мощных РЭП с плазмой и электродинамическими структурами.



Основная цель исследований:

изучение технологии подавления продольных потерь частиц и энергии из открытых ловушек с плазмой реакторного класса и создание физической базы для ГДМЛ.

Работы на ГОЛ-НВ входят в Мероприятие 1.1.6 приоритетного направления научно-технического развития «Термоядерные и плазменные технологии».

Этапы работ:

2021: собрана проектная конфигурация.

2022: оптимизация сценариев эксперимента.

2023: изучение физики стабилизации плазмы.

2024: сравнение многopробочной и солeноидальной конфигураций при низкой температуре.

2025: - улучшение вакуумных условий,
 - эмиттер электронного пучка с $E_e < 400$ эВ,
 - система ИЦР нагрева на 13.56 МГц.

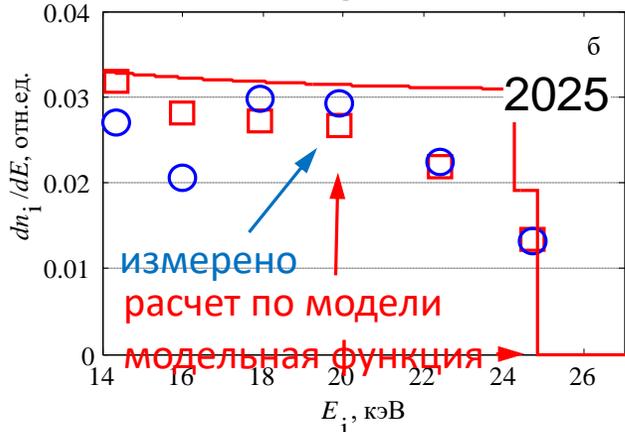
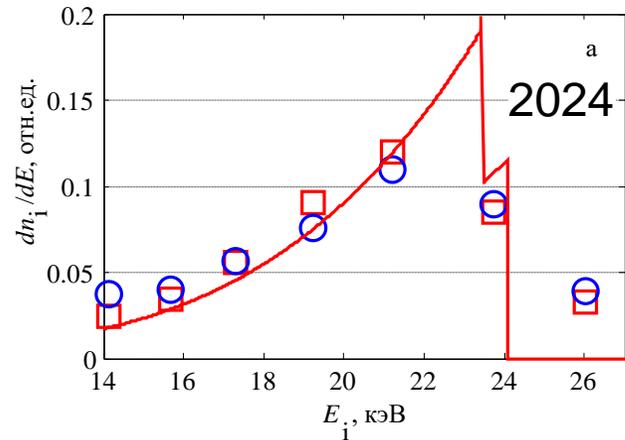


фото А.В. Судникова 2022-03-16

Уменьшение перезарядных потерь

- Установлены распылители титана
- Вакуум улучшился до $(1-2) \times 10^{-6}$ Па
- Температура выросла с 15 до 25 эВ

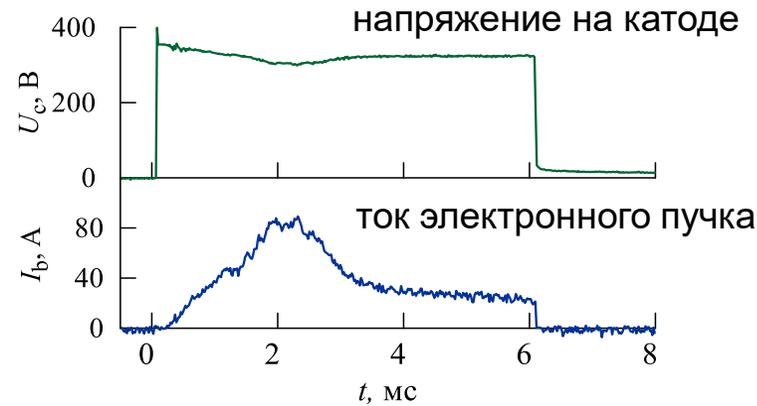
Спектр нейтралов перезарядки



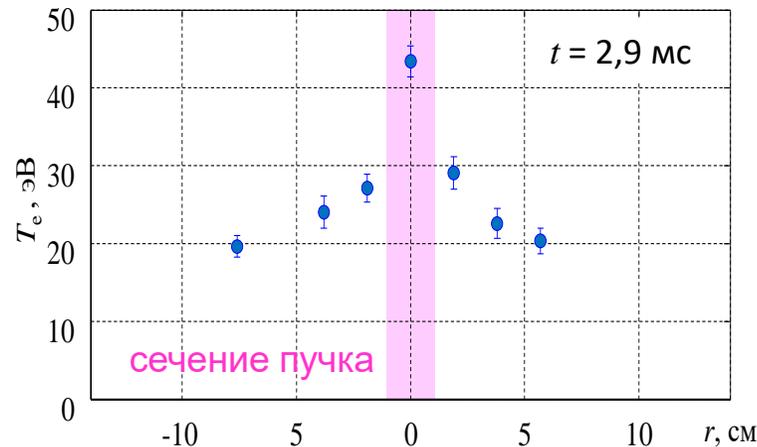
(совместно слаб. 9-1)

Электронный пучок низкой энергии

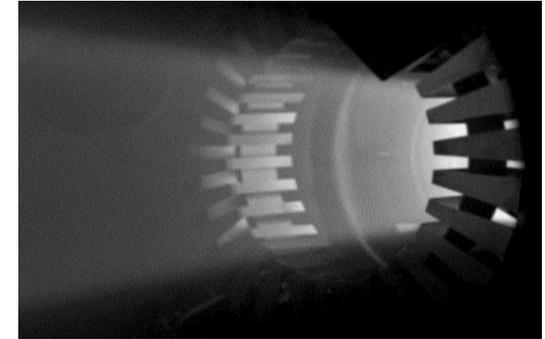
- Катод LaB_6 с диаметром 50 мм
- Анодом является плазма
- Пучок есть только в потоке плазмы
- Энергия до 400 эВ при токе до 100 А



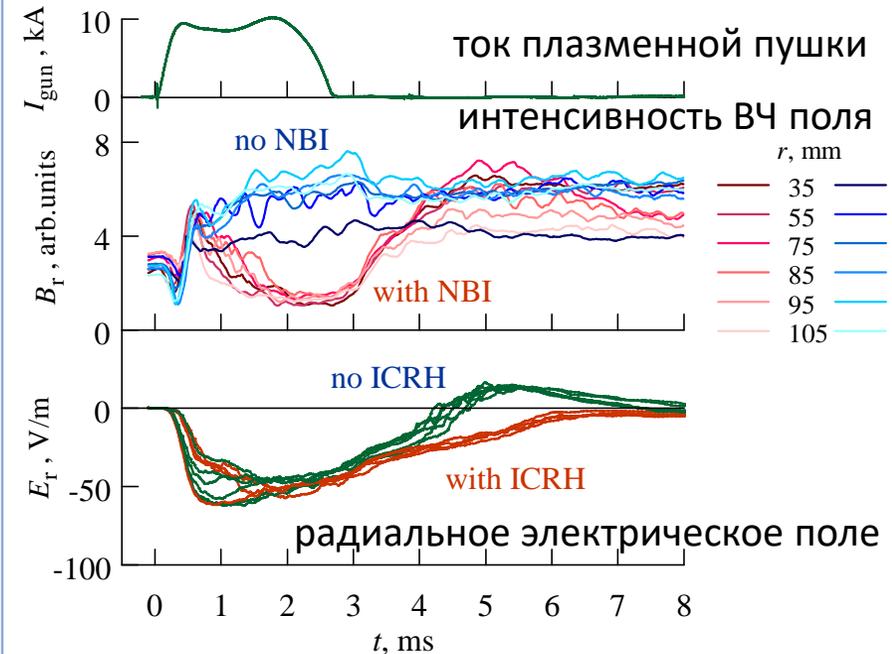
Радиальный профиль электронной температуры



Нагрев на частоте ионного циклотронного резонанса

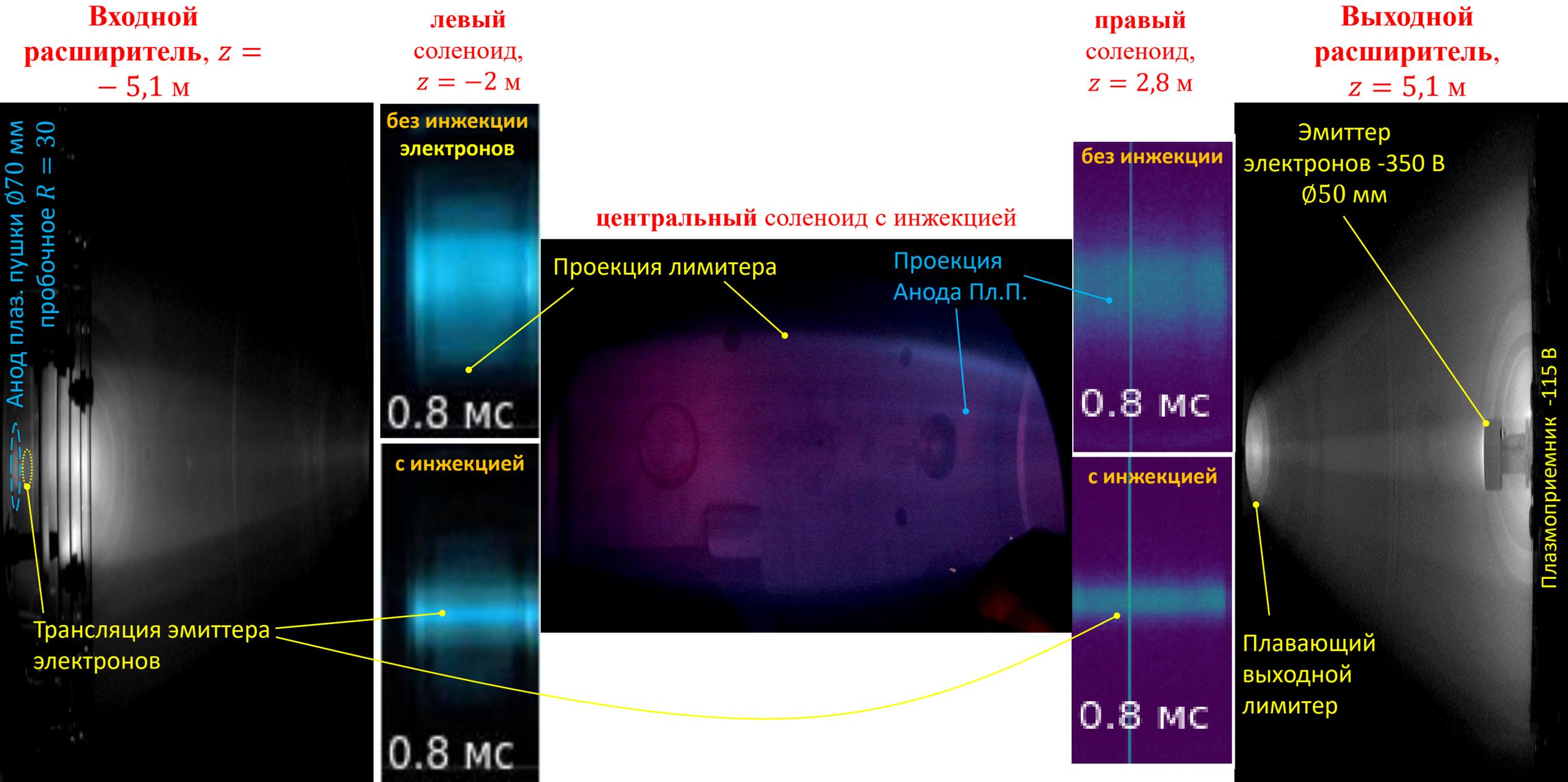


$$P_{ICRH} = 7 \text{ kW}, f = 13.56 \text{ MHz}$$



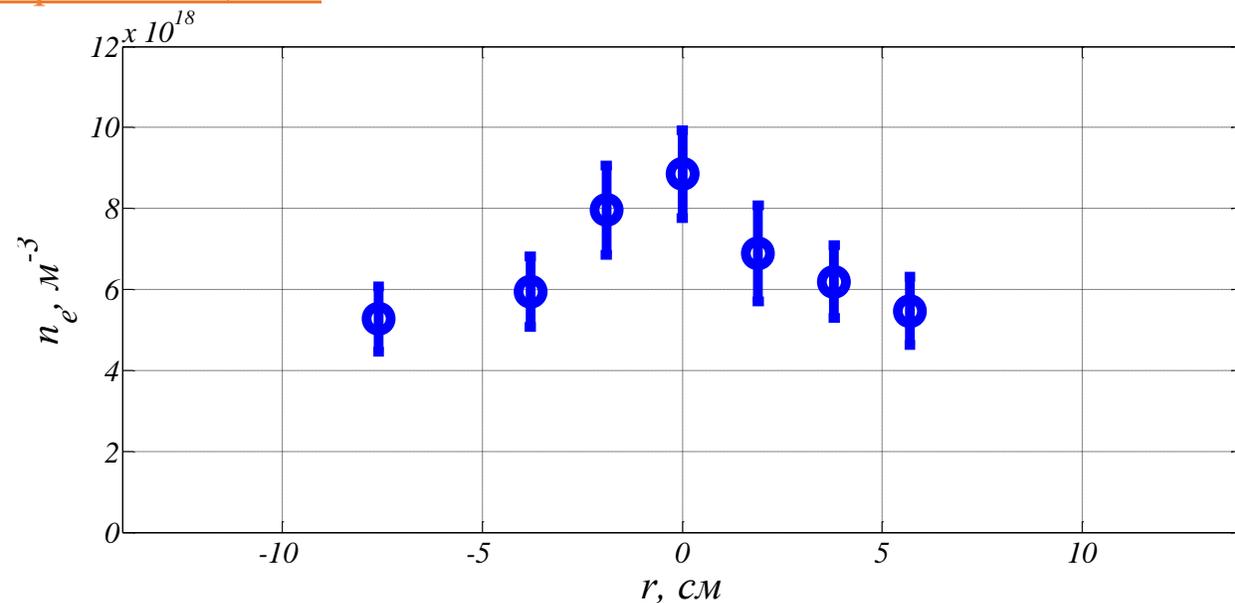
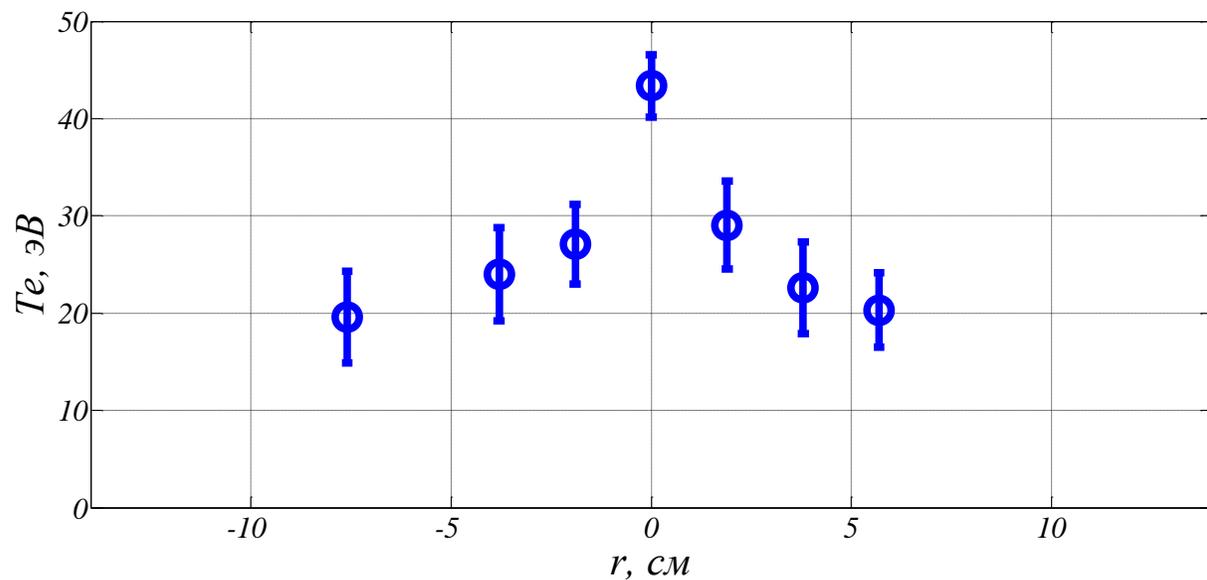
(совместно с лаб. 6-2 и лаб. 9-0)

Фотографии транспортировки электронов вдоль ловушки

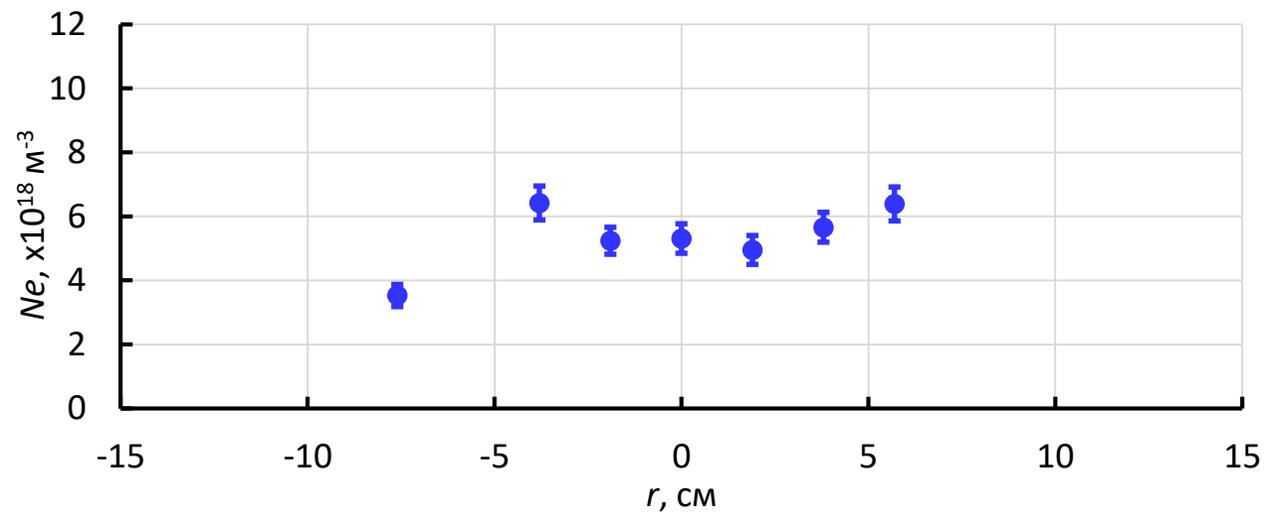
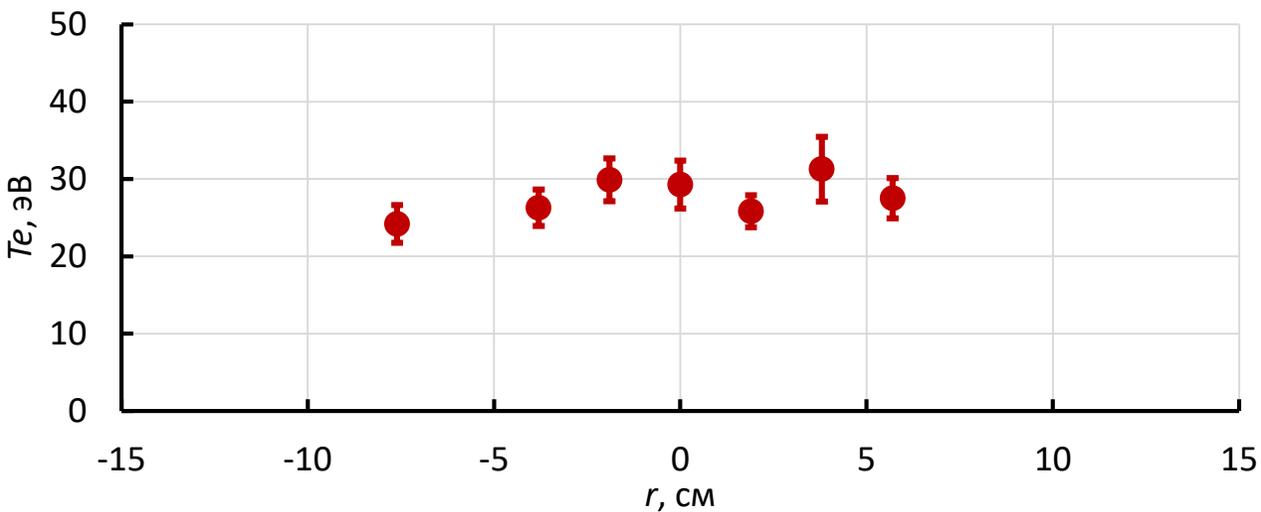


Измерение влияния низковольтного электронного пучка на параметры плазмы

Выстрел 11396 с NB-пучками (старт 0,0 мс) и Эмиттером. Измерение в 2,9 мс



Выстрел NB11381 с NB-пучками (старт 0,0 мс). Измерение в 2,9 мс.



Возможная причина повышения электронной температуры

+ Заметен эффект увеличения флуктуаций плотности плазмы при инжекции электронов

Инжекция электронов даже низкой энергии, $E \geq 3T_e$, приводит к возникновению сильной Ленгмюровской турбулентности уже при

$$\frac{n_b}{n_p} > \left(\frac{T_e}{E_b}\right)^2 \sim \left(\frac{10 \div 20}{300}\right)^2 \sim 10^{-3} \div 4 \cdot 10^{-3} \quad (*)$$

Исследуемые в ГОЛ-NB режимы работы электронного эмиттера:

$n_p \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $T_e \sim 10 \text{ эВ}$ (в течение Пл. пушки) или $n_p \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $T_e \sim 20 \text{ эВ}$ (после Пл. пушки)

$E_b \sim 300 \text{ В}$, $I_b \sim 30 \text{ А}$, $S_{cath} = 20 \text{ см}^2$

$$R_{min} = \frac{B_{cent}}{B_{cath}} = \frac{0,35}{0,075} = 4,6$$

$$R_{max} = \frac{B_{sol}}{B_{cath}} = \frac{4,5}{0,075} = 60$$

$$\frac{n_b}{n_p} \sim R \frac{I_b}{4 \cdot 10^7 \cdot S_{cath} \cdot \bar{e} n_p \sqrt{E_b}} \Big|_{R_{min}} \sim 8 \cdot 10^{-4} \div 8 \cdot 10^{-3}$$

(*) D.M. Karfidov, A.M. Rubenchik, K.F. Sergeichev and I.A. Sychev // Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki (ISSN 0044-4510) vol, 98:1592–1604, Soviet physics, JETP, 71(5), 892-898, 1990.

Электронный пучок для рассеяния ионов?

V.T. Astrelin, A.V. Burdakov and V.V. Postupaev // Plasma Physics Reports, 24(5):414, 1998.



Подавление электронной теплопроводности в 10^3 раз на ГОЛ-3

A.V. Burdakov, I.A. Kotelnikov and V.I. Erofeev // Fusion science and technology, 47(1T):74–77, 2005.



$\nu_{eff} = \alpha\gamma,$
где γ – инкремент пучковой неустойчивости

A.D. Beklemishev // In 35th EPS Conference on Plasma Physics 2008, EPS 2008-Europhysics Conference Abstracts, pages 349–352, 2008.



Локализованные возмущения плотности
 $\lambda_i \sim \lambda_e$

D.M. Karfidov, A.M. Rubenchik, K.F. Sergeichev and I.A. Sychev // Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki (ISSN 0044-4510) vol, 98:1592–1604, Soviet physics, JETP, 71(5), 892-898, 1990.



$$\gamma_{min} \sim \left(\frac{n_b}{n_p}\right) \omega_{pe} \quad \frac{n_b}{n_p} > \left(\frac{V_{Te}}{V_b}\right)^4$$

$$\lambda_i \sim \lambda_e \sim \frac{V_{Te}}{\alpha \cdot \gamma_{min}} \sim \frac{V_{Te}}{\alpha \cdot \left(\frac{n_b}{n_p}\right) \omega_{pe}} \sim r_{de} \left(\alpha \cdot \frac{n_b}{n_p}\right)^{-1}$$

$n_b/n_p \sim 10^{-3}$ достаточно для оптимального темпа рассеяния ионов при $V_b \sim 3V_{Te}$

Работы по УТС в лаборатории 10:

- ❖ Установка СМОЛА* – начало работ.
- ❖ Установка ГОЛ-НВ.
 - ❖ Инжекция электронного пучка.
- ❖ **Взаимодействие плазмы с поверхностью.**
 - ❖ **Испытания вольфрама с использованием частотно-импульсного электронного пучка.**
- ❖ Исследование взаимодействия мощных РЭП с плазмой и электродинамическими структурами.

Исследование проблем взаимодействия плазма-поверхность

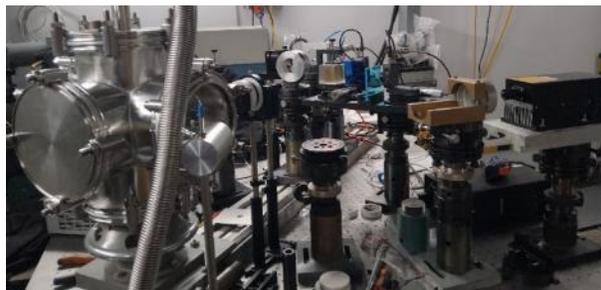
Экспериментальное моделирование взаимодействия плазма-поверхность

• Источник электронного пучка БЕТА



- Длительность нагрева: $\sim 0.1 - 1$ мс.
- Энергия электронов: $\sim 50 - 120$ кэВ.
- Мощность: $\sim 0.5 - 1$ МВт.
- Характерная площадь облучаемой области: ~ 10 см².

• Стенд с лазерным нагревом



- Длительность нагрева: от ~ 0.2 мс до стационарного.
- Длина волны: 1.06 мкм и 1.07 мкм (два источника).
- Плотность мощности: $\sim 0.5 - 5$ ГВт/м².
- Характерная площадь облучаемой области: ~ 5 см².

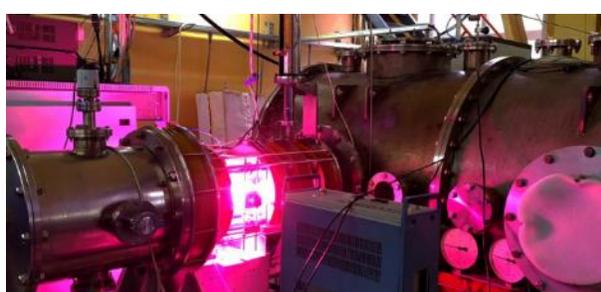
• Частотно-импульсный источник электронного пучка



Совместно с сектором 5-13

- Длительность нагрева: $\sim 0.1 - 10$ мс.
- Энергия электронов: до 20 кэВ.
- Мощность в импульсе: до 0.2 МВт.
- Характерная площадь облучаемой области: ~ 1 см².
- Частота повторения импульсов: до 100 Гц (средняя мощность до 3 кВт).

• Плазменный источник ГИМП-1



Совместно с лаб. 9-0

- Длительность: до 20с.
- Энергия ионов: $\sim 10 - 300$ эВ.
- Плотность мощности: $\sim 0.5 - 2.3$ МВт/м².
- Характерная площадь облучаемой области: до 17 см².

1. Тепловые нагрузки

- Использование электронных и лазерных пучков для моделирования тепловых нагрузок позволяет применять *in situ* системы диагностики.
- Лазерные источники проще в эксплуатации (стандартный промышленный лазер, а также позволяют облучать непроводящие материалы).
- Источники электронных пучков позволяют получать большую площадь нагрева и/или большую мощность.

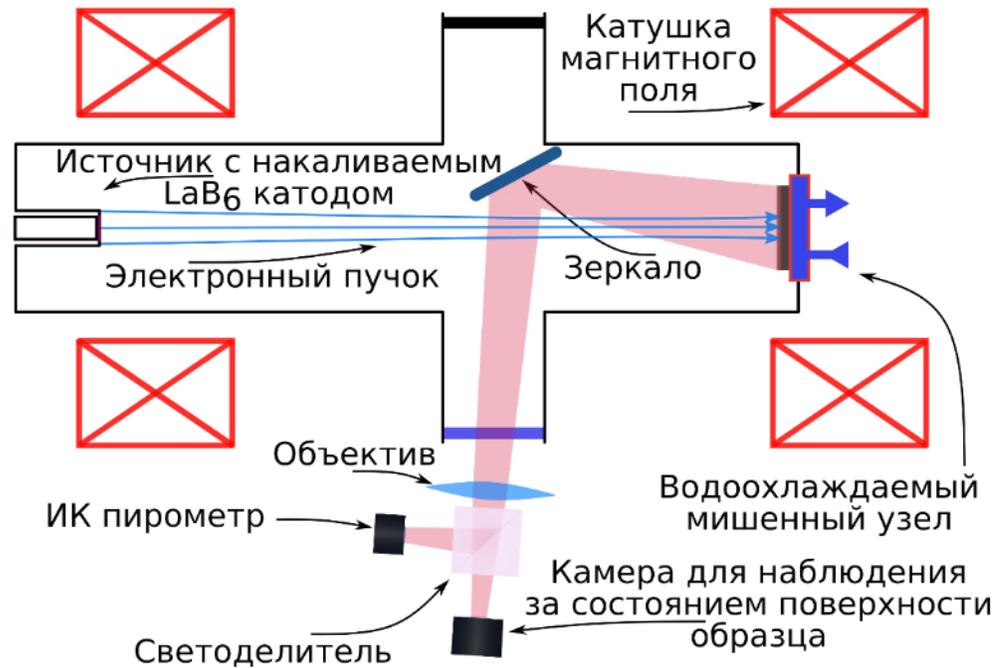
2. Воздействие плазмы

- Геликонный источник плазмы является оптимальным инструментом для исследования проблем распыления материалов быстрыми ионами и удержания изотопов водорода.

Исследование проблем взаимодействия плазма-поверхность

Испытания вольфрама с использованием частотно-импульсного источника электронного пучка

Схема установки и диагностических систем



Параметры облучения:

- Длительность нагрева: $\sim 0.1 - 10$ мс.
- Энергия электронов: до 20 кэВ.
- Мощность в импульсе: до 0.2 МВт.
- Характерная площадь облучаемой области: ~ 1 см².
- Частота повторения импульсов: до 100 Гц (средняя мощность до 3 кВт).
- Ведущее магнитное поле: ~ 0.1 Тл

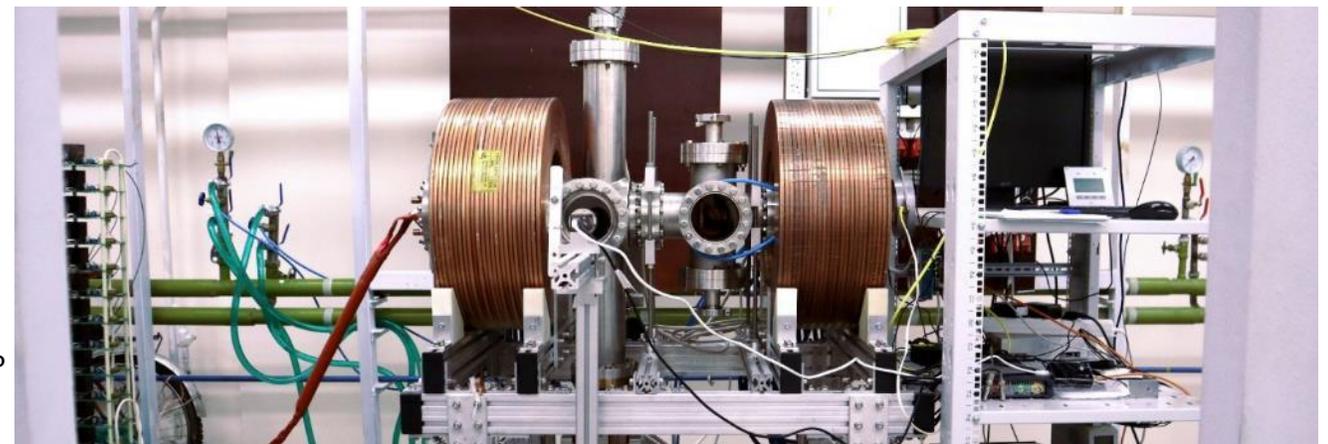
Описание установки:

Установка основана на источнике частотно-импульсного электронного пучка с накаливаемым LaB₆ катодом и предназначена для термоциклических испытаний материалов в условиях многократного ЭЛМ-подобного импульсного нагрева.

Задача первых экспериментов:

Исследование эрозии поверхности вольфрама в результате многократного импульсного ($\sim 10^7$) ЭЛМ-подобного нагрева с параметрами, приводящими к нагреву до температуры существенно ниже порога плавления. Число импульсов соответствует ожидаемому за время работы токамака ИТЭР в режиме улучшенного удержания (H-mode).

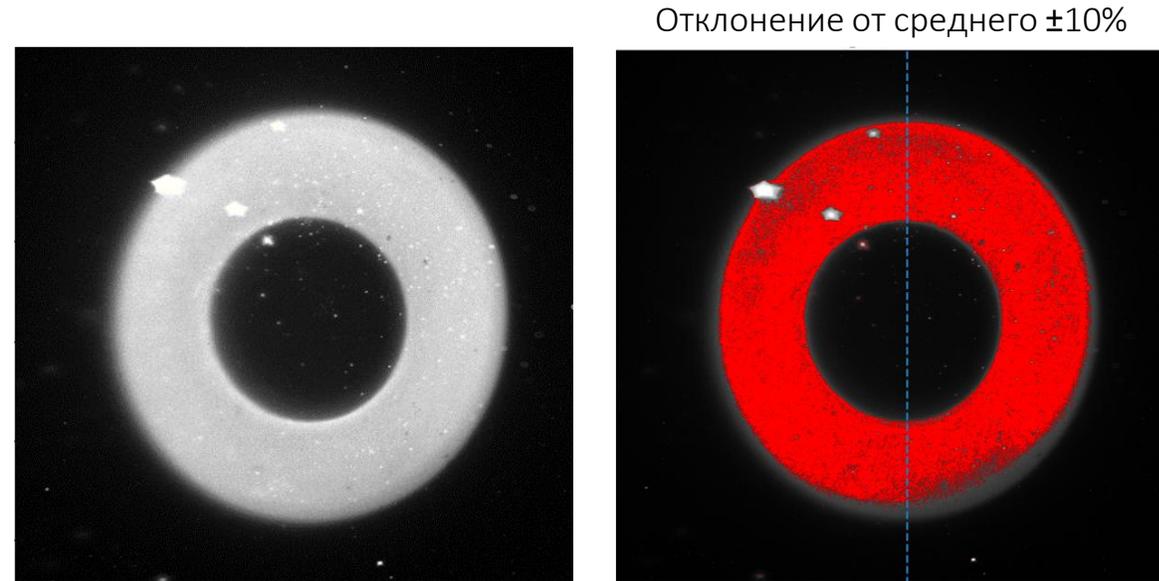
Фото установки



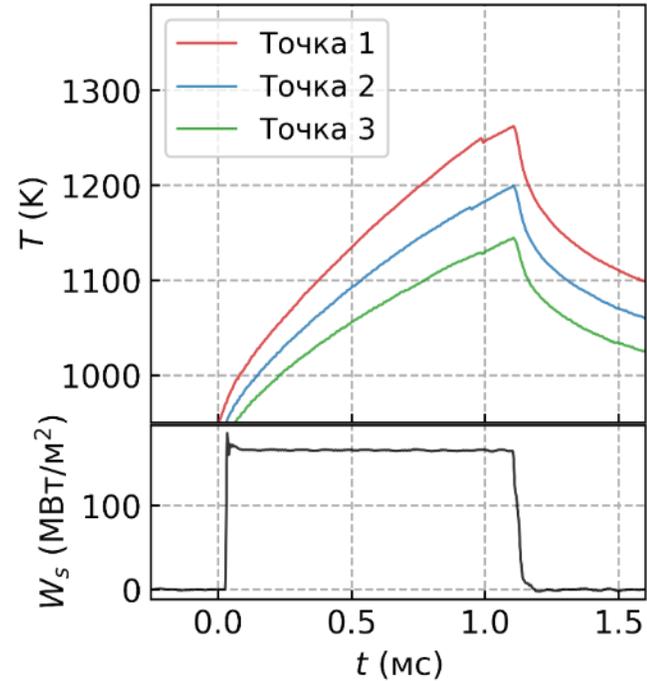
Исследование проблем взаимодействия плазма-поверхность

Испытания вольфрама с использованием частотно-импульсного источника электронного пучка

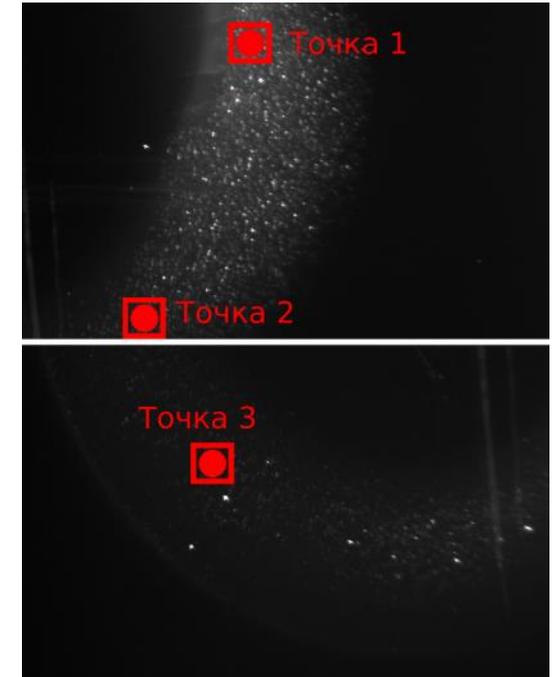
Отпечаток пучка в переходном излучении



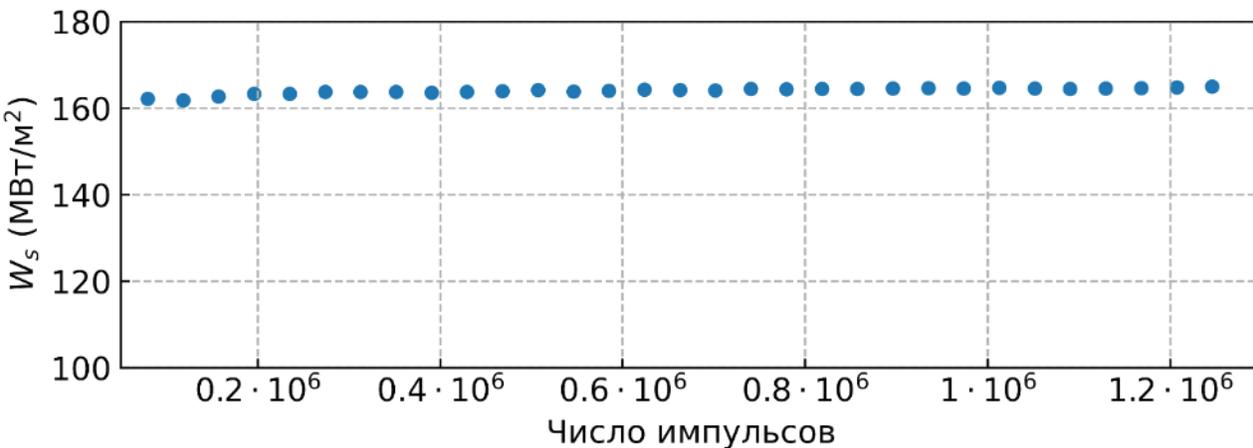
Динамика нагрева в импульсе



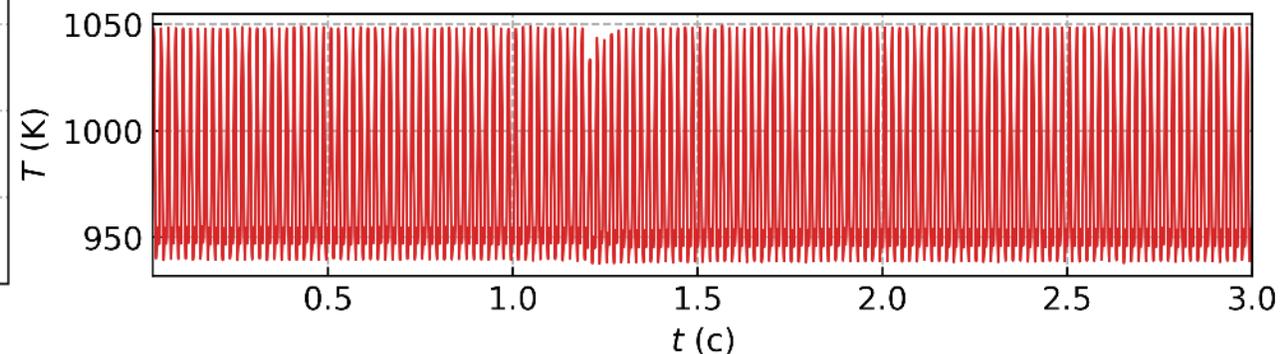
Тепловое излучение



Стабильность плотности мощности нагрева



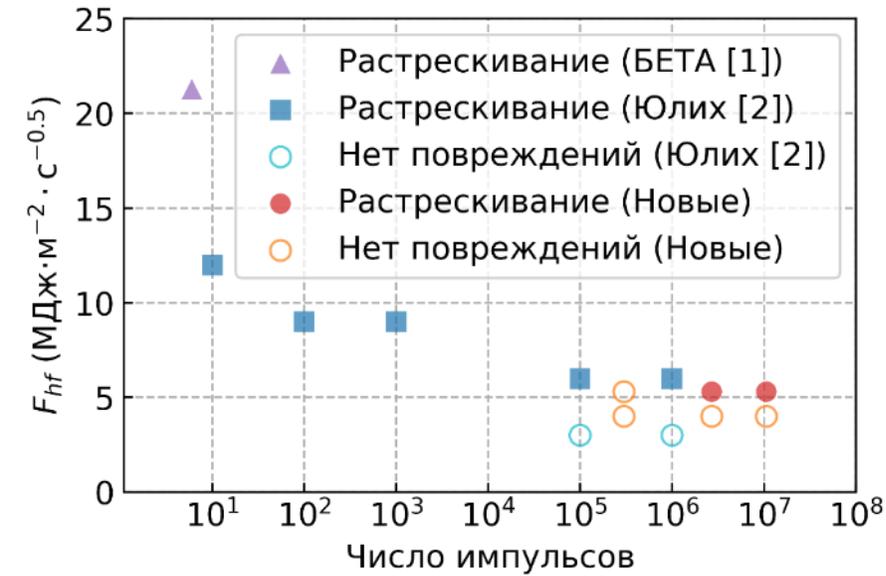
Температура поверхности (пример для нескольких импульсов)



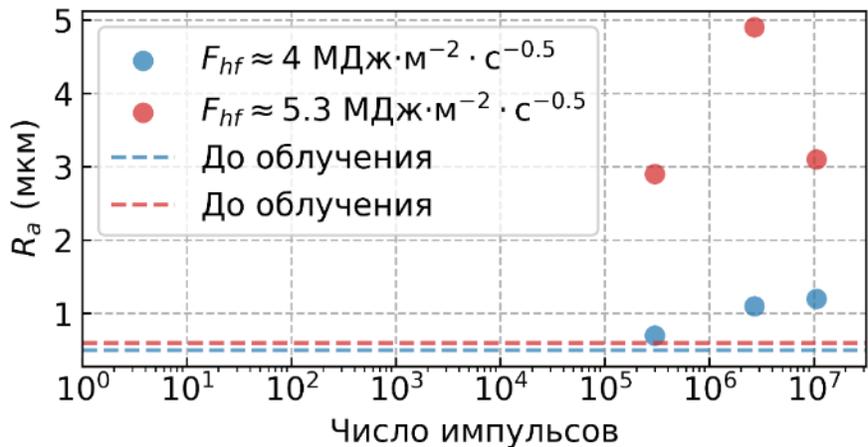
Исследование проблем взаимодействия плазма-поверхность

Испытания вольфрама с использованием частотно-импульсного источника электронного пучка

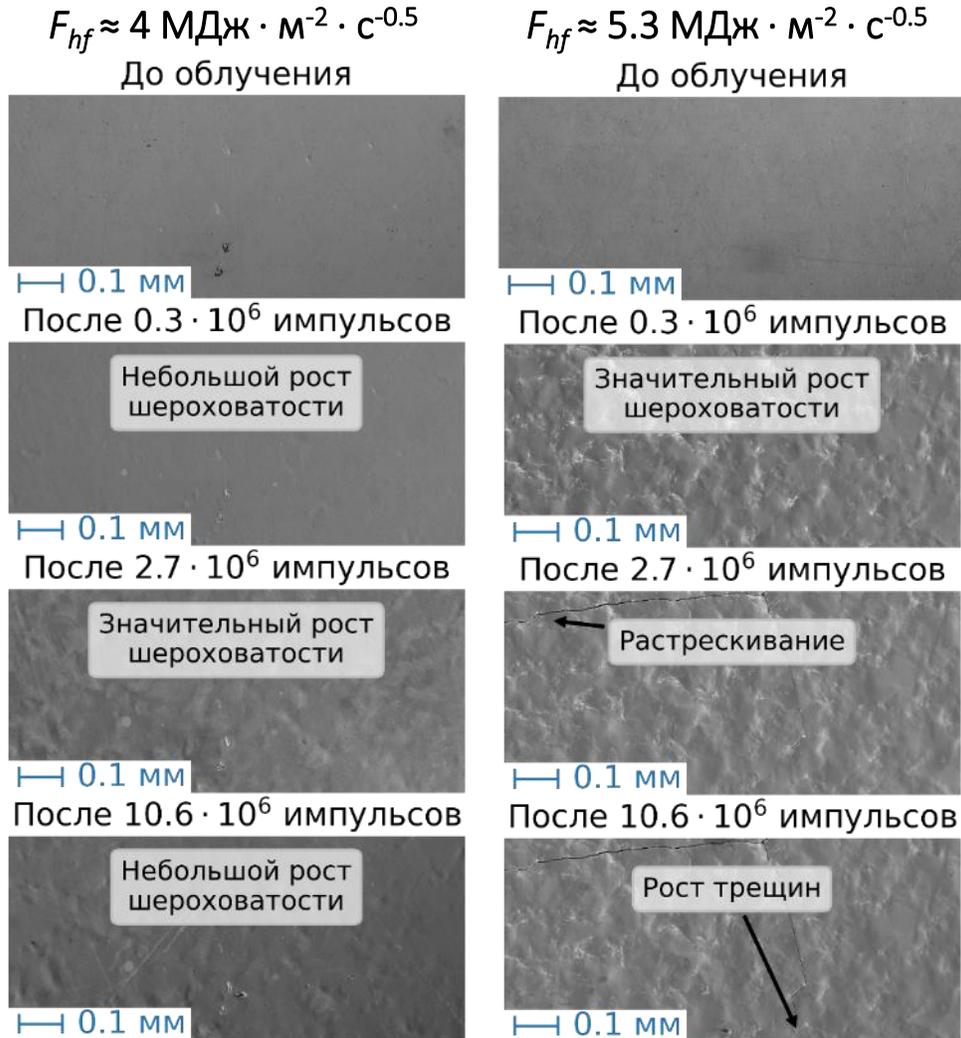
Порог растрескивания в зависимости от числа импульсов



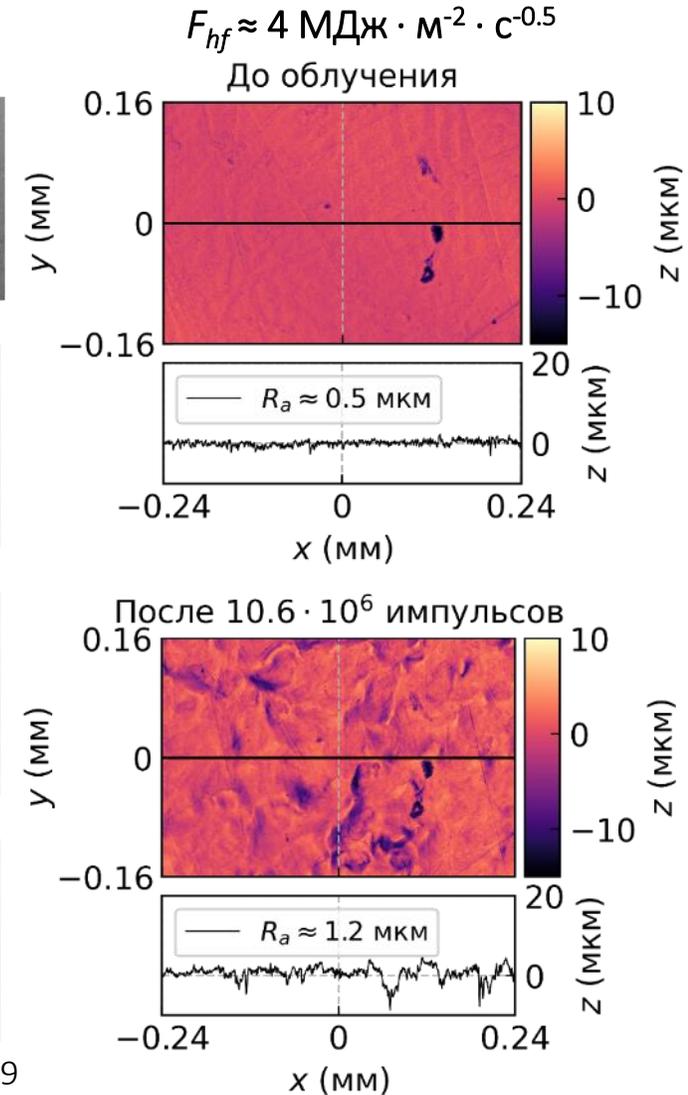
Изменение шероховатости поверхности



Микрофотографии



Профилометрия



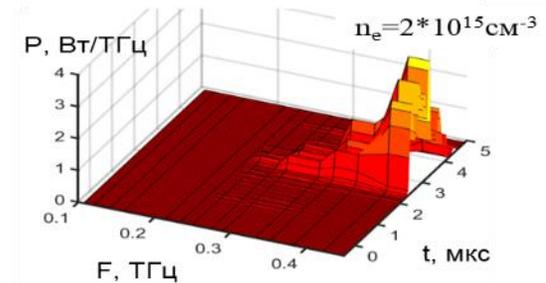
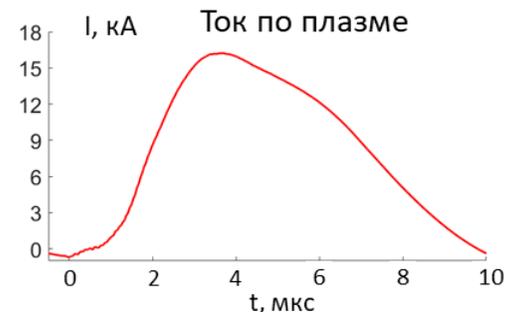
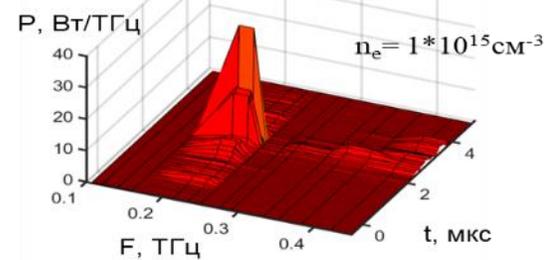
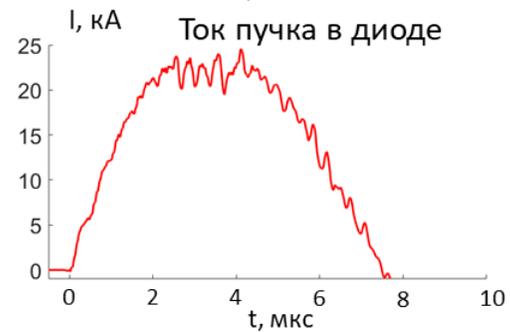
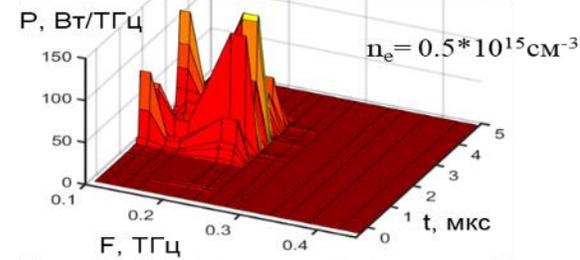
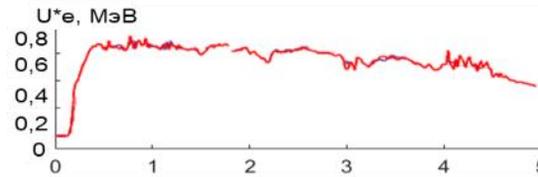
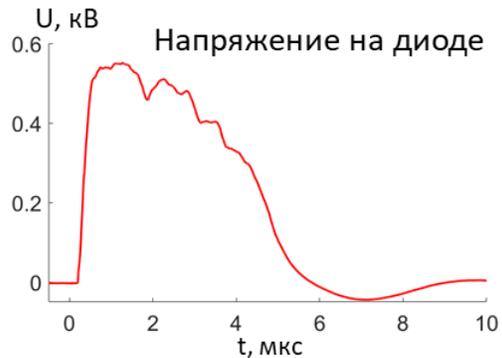
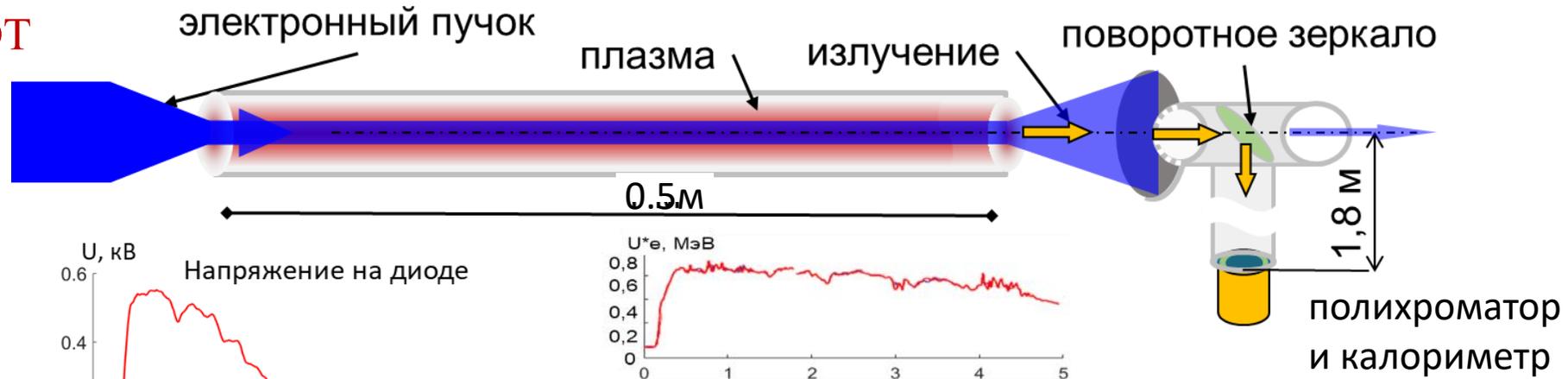
[1] L.N. Vyacheslavov et al., J. Nucl. Mater. (2021), V. 544, 152669
 [2] M. Wirtz et al., Nucl. Mater. Energy (2017), V. 12, 148-155

Работы по УТС в лаборатории 10:

- ❖ Установка СМОЛА* – начало работ.
- ❖ Установка ГОЛ-НВ.
 - ❖ Инжекция электронного пучка.
- ❖ Взаимодействие плазмы с поверхностью.
 - ❖ Испытания вольфрама с использованием частотно-импульсного электронного пучка.
- ❖ **Исследование взаимодействия мощных РЭП с плазмой и электродинамическими структурами.**

Импульсы ТГц-излучения на частоте верхнегибридных плазменных колебаний

ГОЛ-ПЭТ



Повышение плотности плазмы смещает спектр генерируемого излучения из области 0.15 ТГц в окрестность 0.4 ТГц.

ПОЛУЧЕНИЕ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАНАРНОМ ЧЕРЕНКОВСКОМ МАЗЕРЕ НА ОСНОВЕ ЛЕНТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА УСТАНОВКЕ ЭЛМИ

Выбор геометрии ленточного магнитно-изолированного диода для получения листового РЭП с сечением 1x150 мм в транспортном канале мазера по результатам 3D моделирования в CST Studio

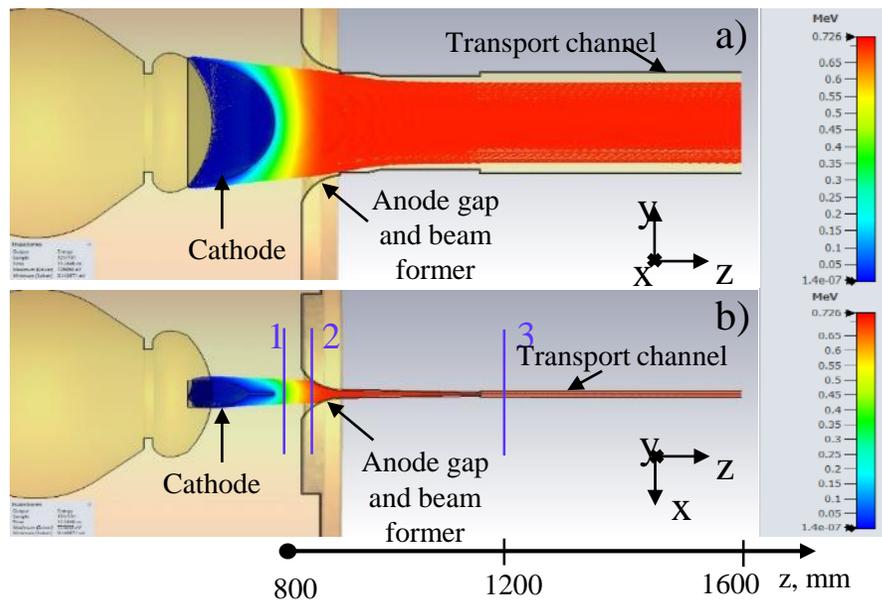
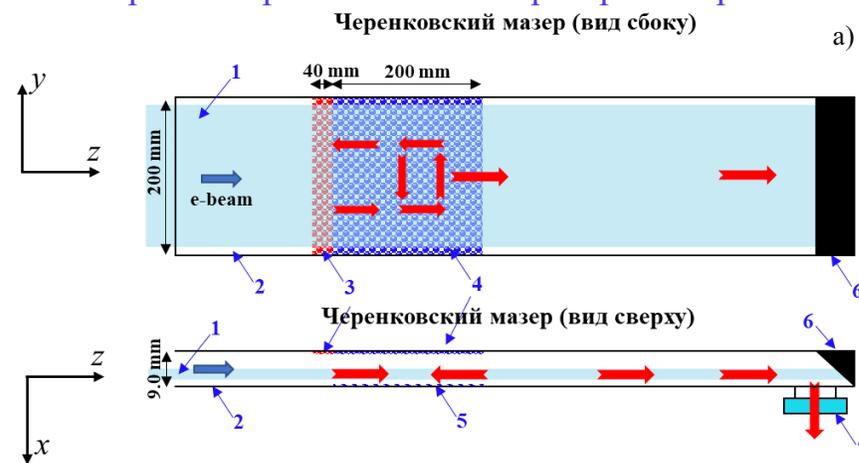
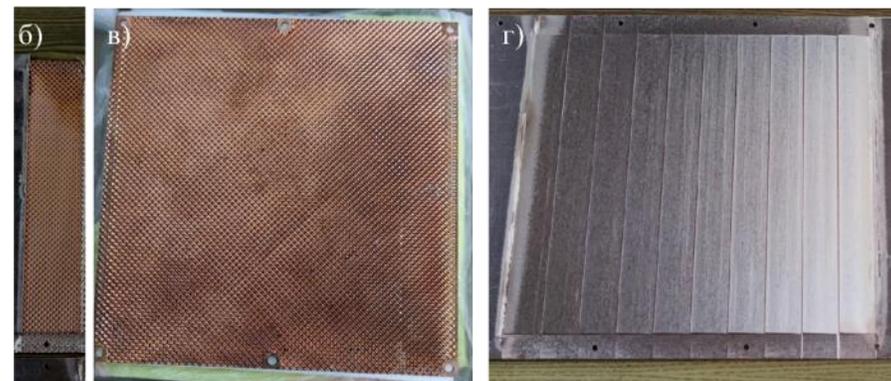


Схема планарного черенковского генератора поверхностной волны

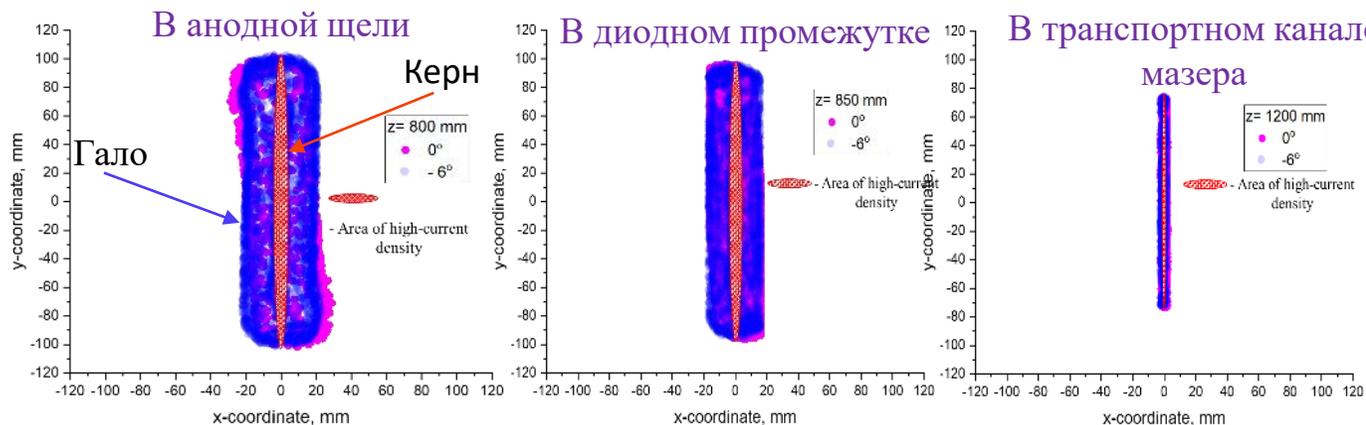


1 – ленточный электронный пучок после формирователя, 2 – прямоугольный волновод, одновременно служащий каналом транспортировки пучка, 3 – двумерный брэгговский отражатель, 4 – замедляющая структура (ЗС), 5 – гребенчатая структура для рассеяния квазикритических мод, 6 – поверхность коллектора пучка, 7 – окно для вывода излучения в атмосферу. Красные стрелки показывают направления направления парциальных волновых потоков в ЗС.

Фотографии элементов мазера: б)-входного отражателя, в) - двумерной ЗС, г) рассеивателя квазикритических мод (5)

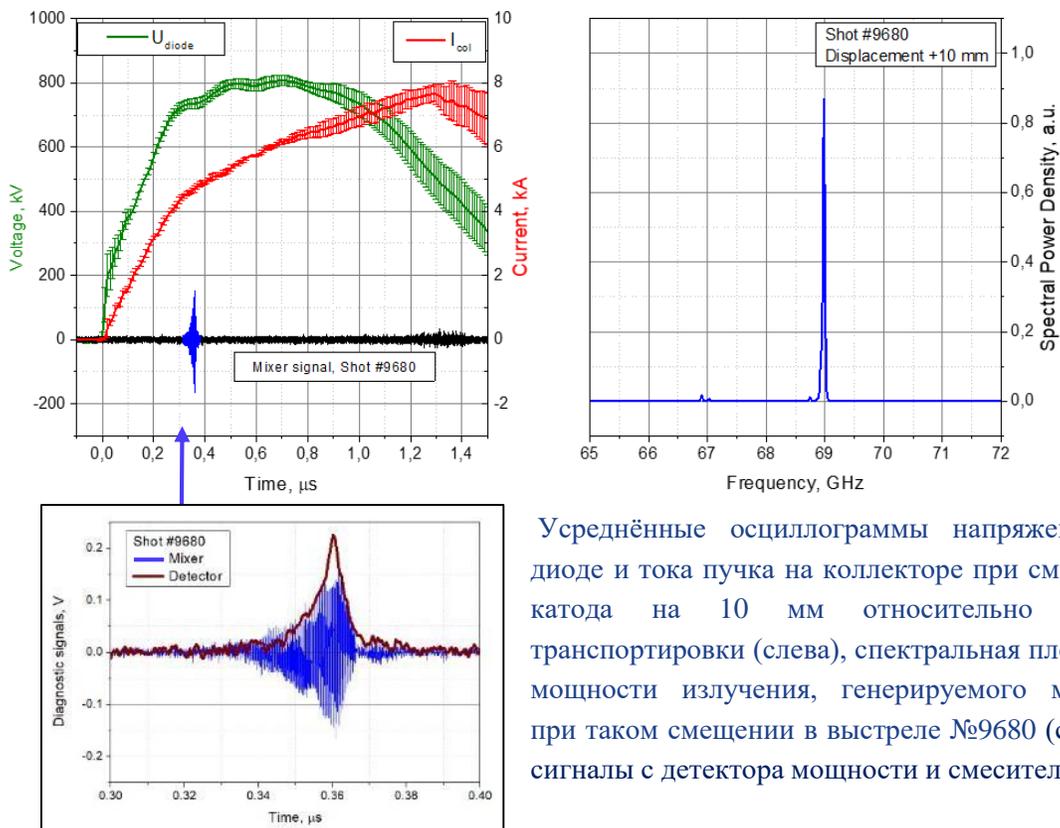


Распределения плотности тока пучка в трех поперечных сечениях- мониторах 1,2 и 3



Совместно с ИПФ РАН

ПОЛУЧЕНИЕ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАНАРНОМ ЧЕРЕНКОВСКОМ МАЗЕРЕ НА ОСНОВЕ ЛЕНТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА УСТАНОВКЕ ЭЛМИ



Усреднённые осциллограммы напряжения на диоде и тока пучка на коллекторе при смещении катода на 10 мм относительно канала транспортировки (слева), спектральная плотность мощности излучения, генерируемого мазером при таком смещении в выстреле №9680 (справа), сигналы с детектора мощности и смесителя (низ)

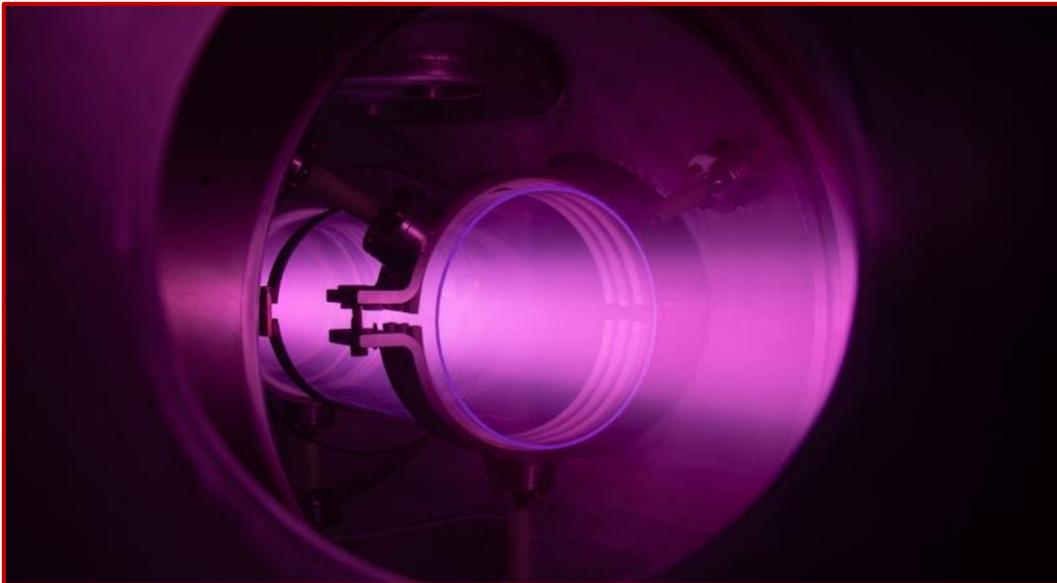
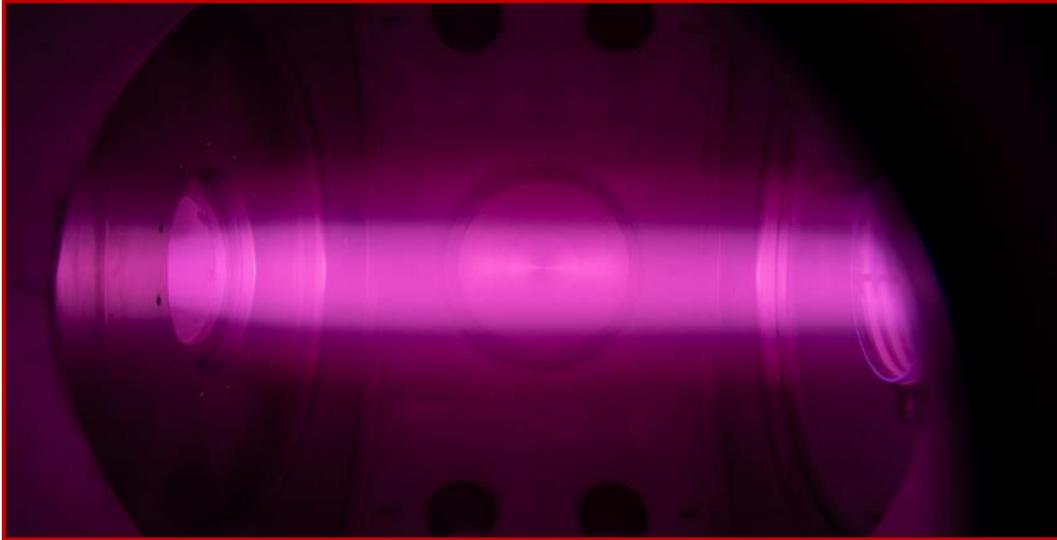
На установке «ЭЛМИ» проведена серия экспериментов по генерации мощных импульсов когерентного мм-излучения в планарном черенковском мазере с двумерно-периодической замедляющей структурой на основе ленточного релятивистского электронного пучка 0.8 МэВ/7 кА/2 мкс с поперечным сечением 1.5x150 мм. В ходе экспериментов по варьированию расстояния между ленточным пучком и поверхностью замедляющей структуры найдены условия достижения одночастотного режима генерации излучения на резонансной частоте поверхностной волны. В этих экспериментах в оптимальном режиме работы черенковского мазера, когда зазор между границей керна пучка и двумерно-гофрированной поверхностью замедляющей структуры составлял от 0.2 до 1 мм, были получены импульсы мм-излучения с уровнем мощности ~10-20 МВт, частотой 69 ГГц, длительностью ~100 нс и шириной спектра около 20 МГц.

Публикации

1. Peskov, N.Y., Zaslavsky, V.Y., Arzhannikov, A.V. et al. Planar Sub-THz/Sub-GW Cherenkov Masers with Two-Dimensional Distributed Feedback Based on the ELMI Accelerator: Current Tasks of Implementation. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 89, 1451–1456 (2025). <https://doi.org/10.1134/S106287382571267X>. (импакт-фактор Scopus 0.253)
2. А.В. Аржанников, Н.С. Гинзбург, В.Ю. Заславский и др. «Планарный черенковский мазер W-диапазона с двумерно-периодической замедляющей системой на базе ускорителя «ЭЛМИ»: расчетные параметры и первые эксперименты». *Журнал Радиоэлектроники*, eISSN 1684-1719, №5, 2025 DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.5.11> (импакт-фактор РИНЦ 0.525)
3. S. L. Sinitsky, E. S. Sandalov, P. V. Kalinin et al. “Generation of a High-power MM-radiation with a Kiloampere Sheet Relativistic Electron Beam in a Planar Cherenkov Maser”. 2025 PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium Fall, Chiba, Japan, 5- 9 November (to be published)

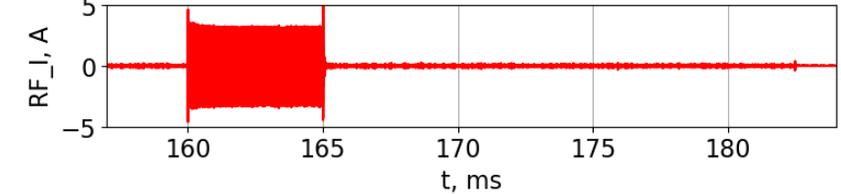
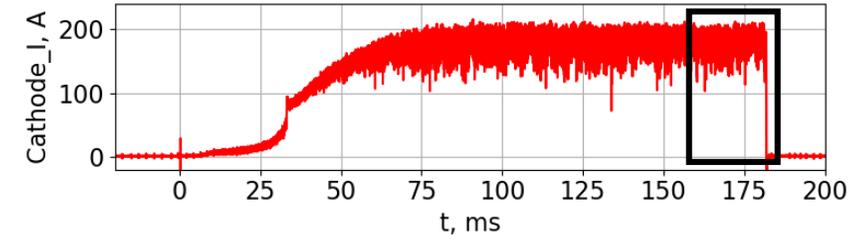
Спасибо за внимание!

СМОЛА*: начало работ

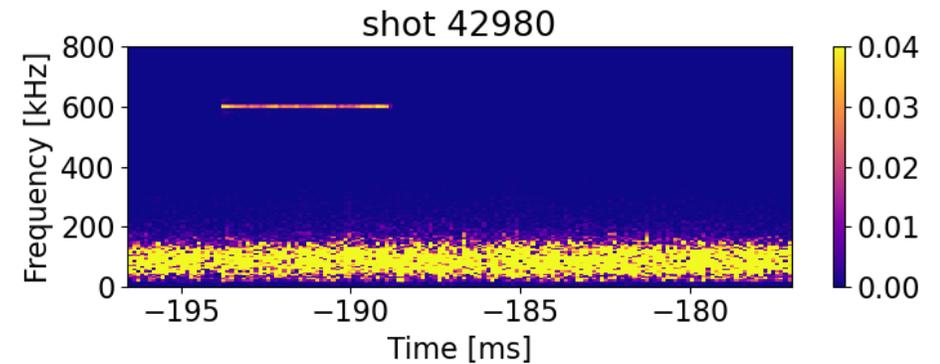


Получена плазма, отработаны режимы работы

Антенна согласована с ВЧ-источником

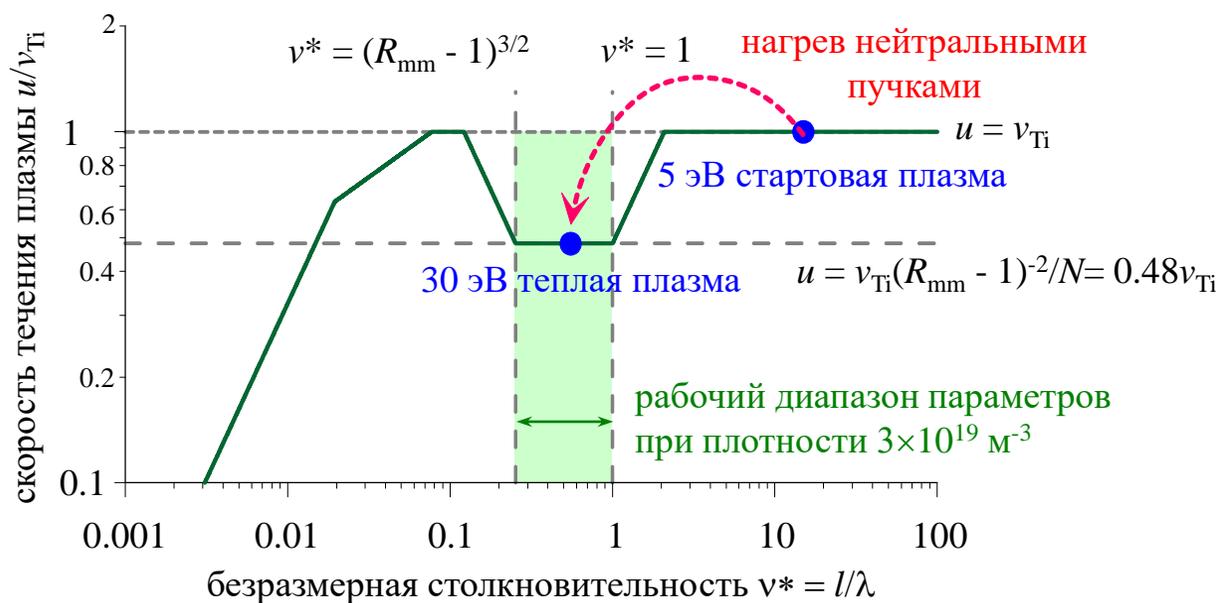


На малой мощности электромагнитные колебания проникают внутрь плазменного шнура



Предсказания теории:

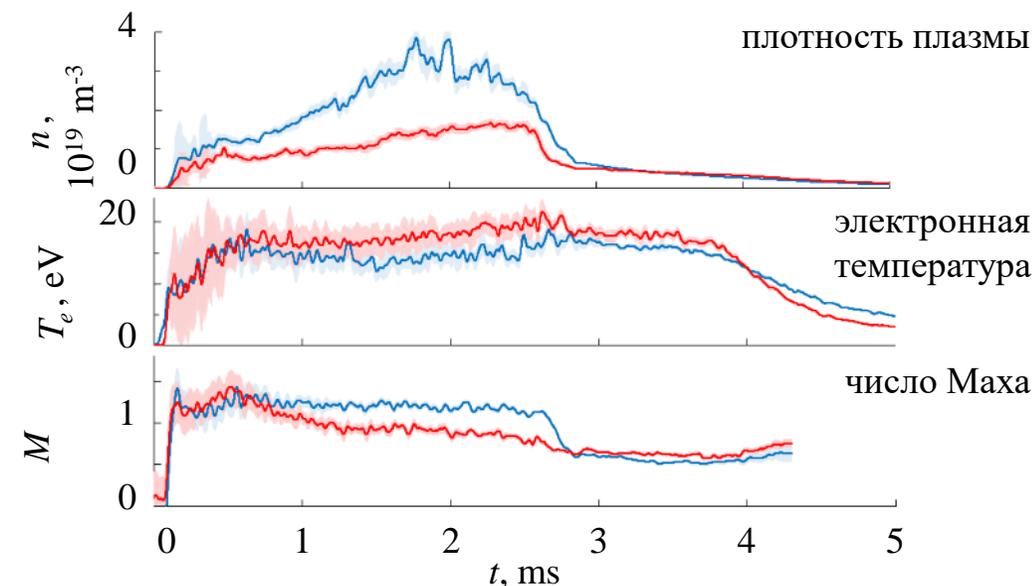
- для многопробочного удержания важна соразмерность длины свободного пробега ионов и периода гофрировки поля;
- число ячеек гофрировки должно быть большим ($N = 13$ для ГОЛ-NB);
- система работает только в строго определённом диапазоне параметров.



Эксперимент при низкой температуре:

- ионная температура плазмы была 5-7 эВ (ниже «многопробочного» оптимума);
- сравнивалось течение плазмы в двух конфигурациях при мощности нагрева 1 МВт.

Многопробочная и соленоидальная конфигурации, измерения в выходной секции сильного поля



→ даже при низкой температуре есть некоторое торможение потока плазмы

2024-2025

всегда считал, что 300 кВт, но Никита сказал такую цифру

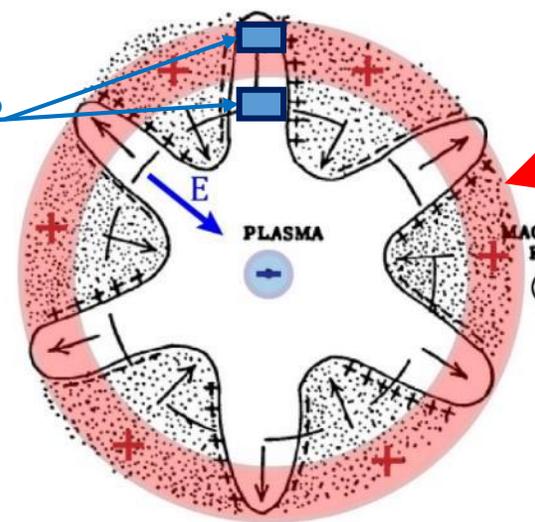
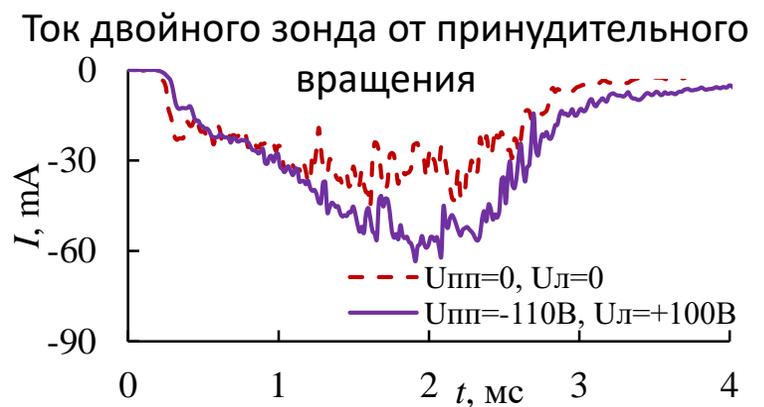
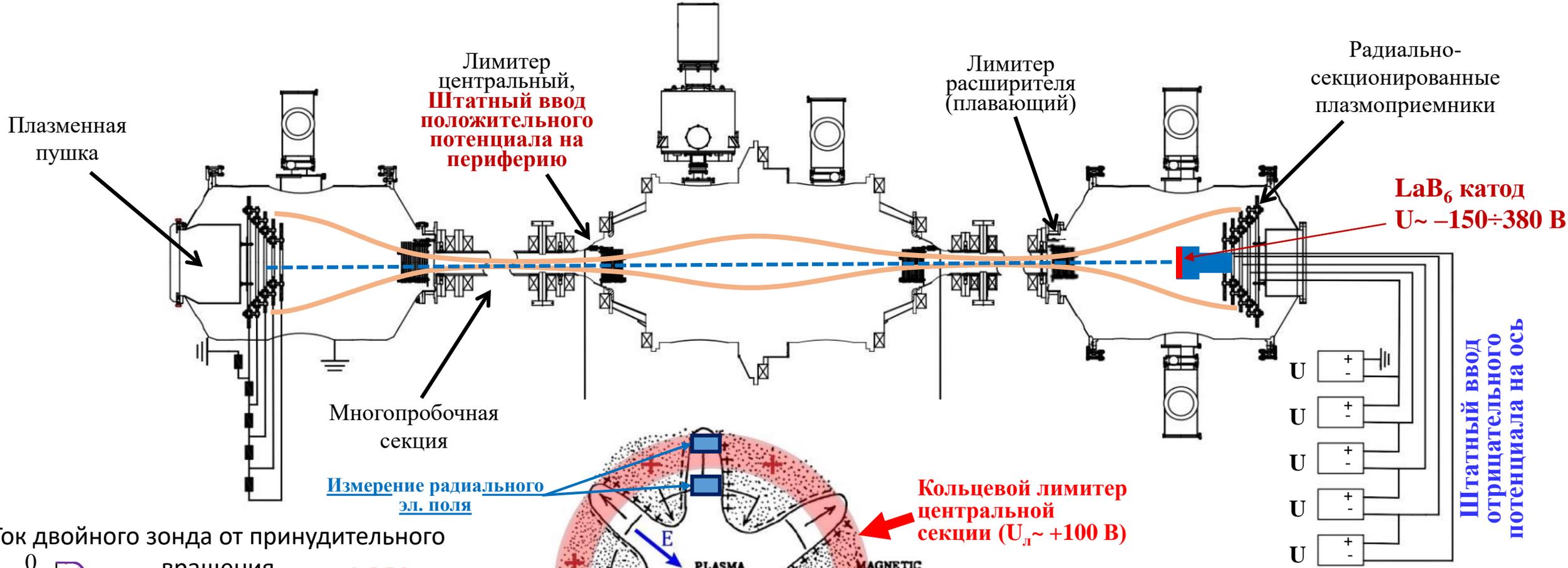
- Изучены физические закономерности нагрева и удержания плазмы в ловушке в многопробочной конфигурации при нагреве плазмы методом нейтральной инжекции с мощностью 1 МВт;
- Меры по уменьшению рециклинга газа со стенок камеры привели к увеличению эффективности нагрева нейтральными пучками в 4 раза и к соответствующему росту электронной температуры с 15 до 25 эВ;
- Проведены эксперименты по продольной инжекции электронов с энергией до 400 эВ при токе до 100 А, при этом достигнута электронная температура до 45 эВ в сечении электронного пучка;
- Проведены предварительные эксперименты с вводом электромагнитной волны в ионно-циклотронном диапазоне частот на мощности до 12 кВт, создаётся система с мощностью до 200 кВт (совместно с Лаб. 6).

2026 – основные направления работ (мероприятие 1.1.6 ФП УТС и госзадание)

- Опробовать в эксперименте систему подпитки веществом с целью повышения плотности и ионной температуры плазмы на стадии удержания;
- Изучить динамику электронной температуры в центральной ловушке методом томсоновского рассеяния;
- Изучить пространственные характеристики функции распределения быстрых ионов вблизи их точки остановки по регистрации нейтралов перезарядки в диапазоне 8-25 кэВ;
- Выполнить эскизное проектирование системы нагрева на частоте электронного циклотронного резонанса (диапазон 70 ГГц), имеющую мощность не менее 300 кВт (совместно с ИПФ РАН, Нижний Новгород).

Введение и постановка задачи

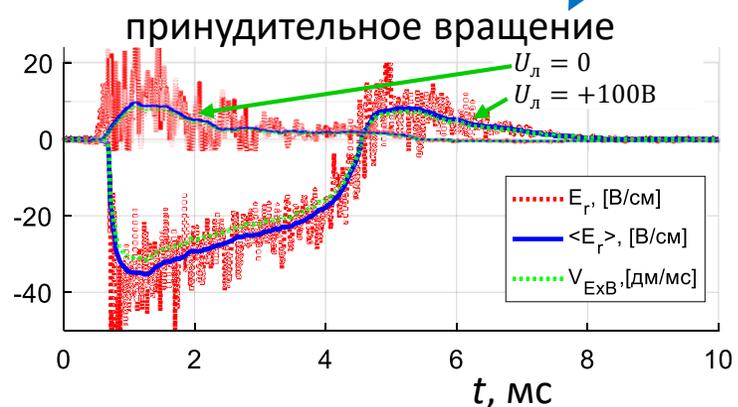
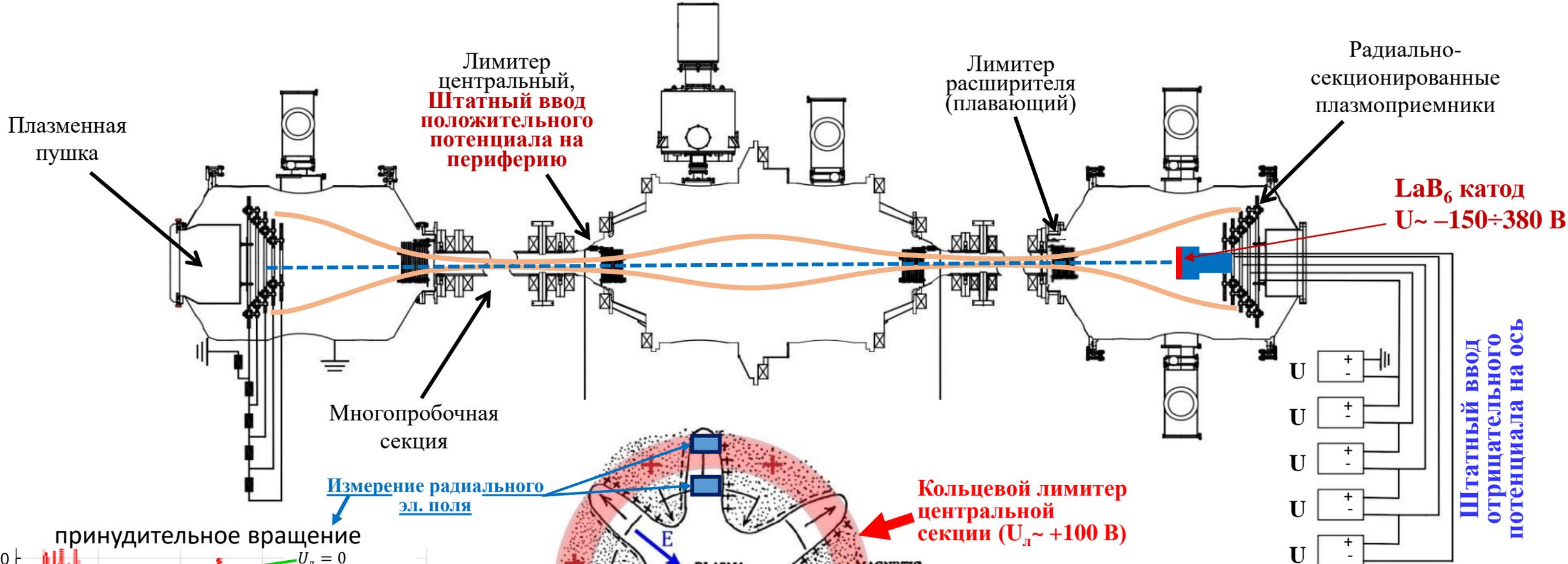
Схема установки ГОЛ-NB



Схематичное изображение желобковой неустойчивости, показывающая поляризационные поля и направления неустойчивого движения.
 R.F. POST, The Magnetic Mirror Approach To Fusion // 1987 Nucl. Fusion 27 1579

Введение и постановка задачи

Схема установки ГОЛ-NB

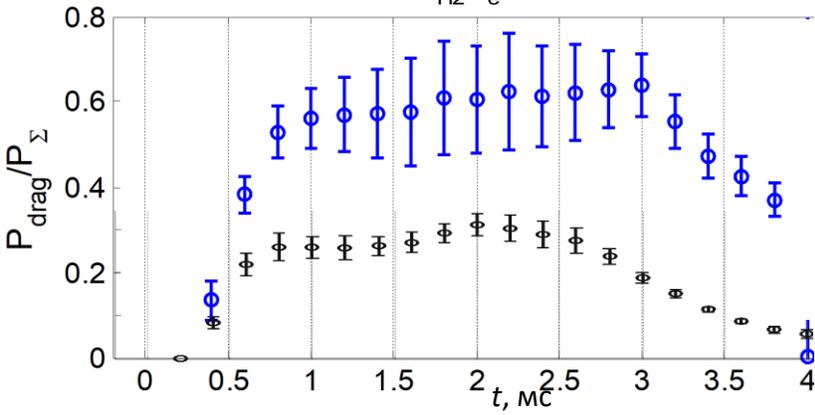
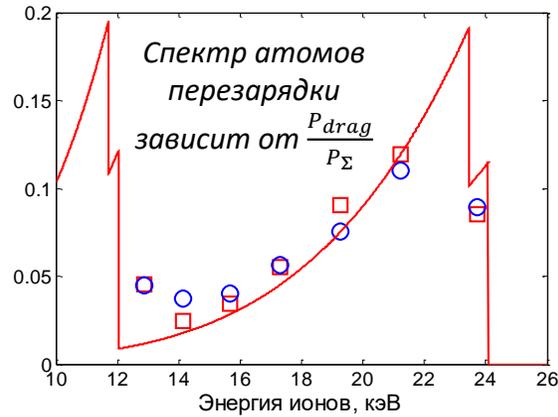
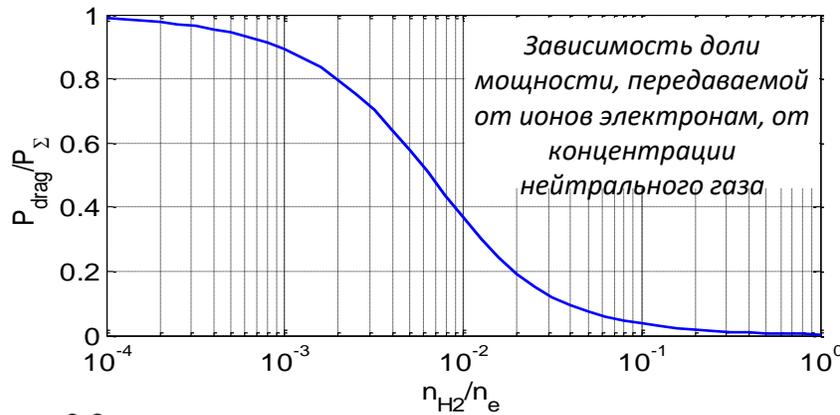


Схематичное изображение желобковой неустойчивости, показывающая поляризационные поля и направления неустойчивого движения.
 R.F. POST, The Magnetic Mirror Approach To Fusion // 1987 Nucl. Fusion 27 1579

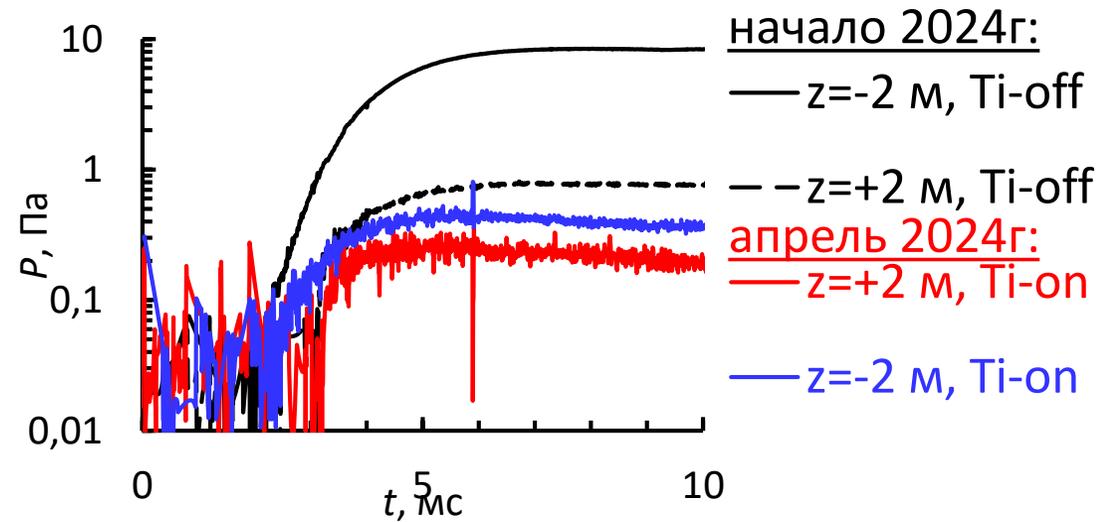
Введение и постановка задачи

Задачи для электронного пучка:

- Улучшение эффективности вноса отрицательного потенциала на ось для реализации механизма вихревого удержания
- Ионизация газа, поступающего в центральный пробкотрон со стенок и т.п.
- **Дополнительный нагрев плазмы**

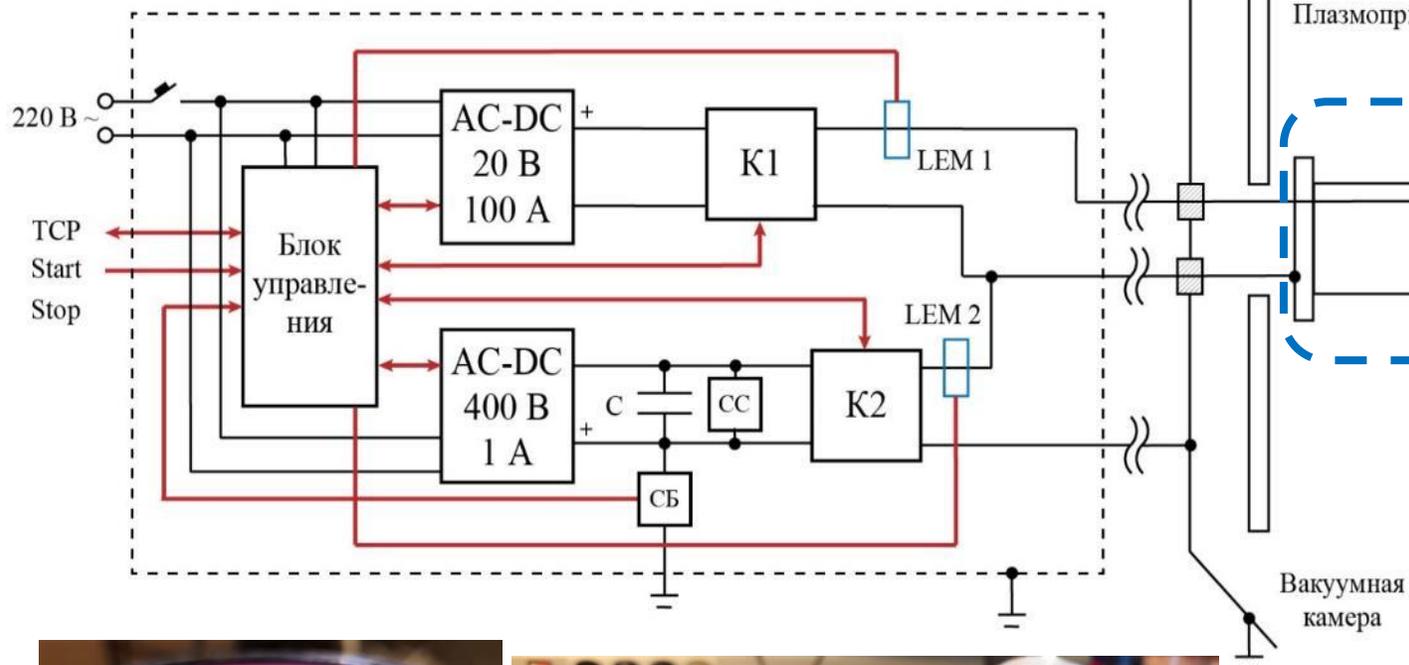


Результат улучшения вакуумных условий при титанировании стенок центрального пробкотрона

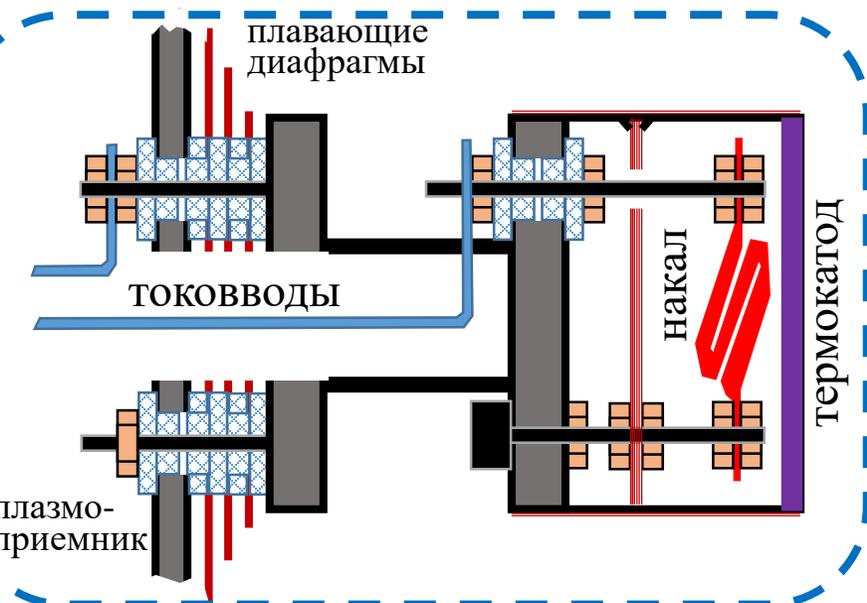


Устройство системы инжекции

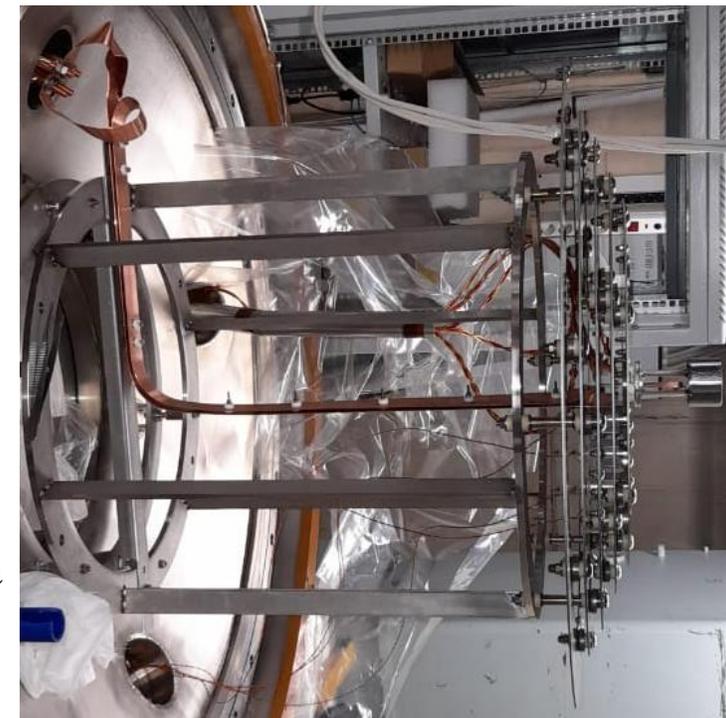
Блок-схема системы питания и управления катодом



Геометрия катода,
 LaB_6 , $\varnothing 50$ мм.

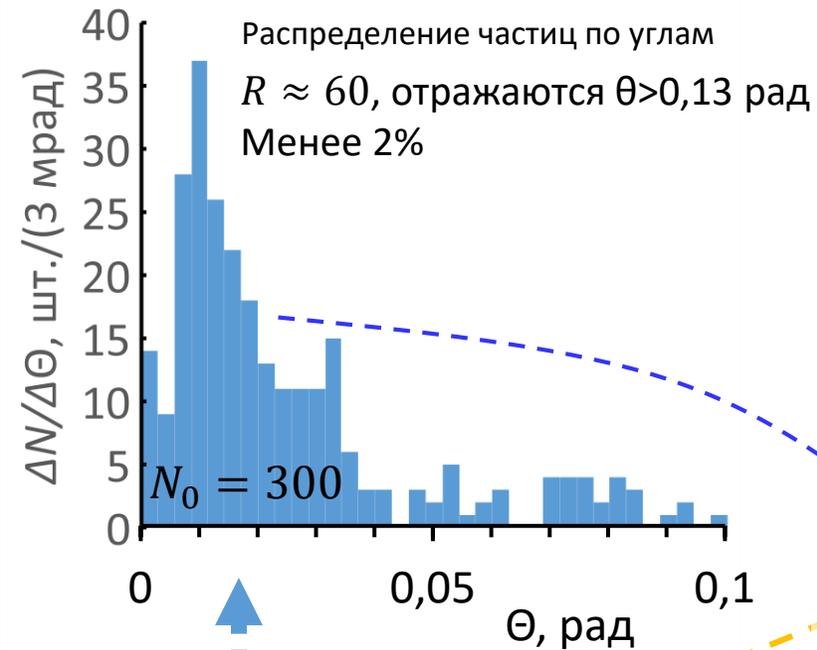


Фотографии катода:
в собранном и
разобранном состоянии;
установленного на
плазмоприемник.



Расчет генерации пучка в POISSON-2

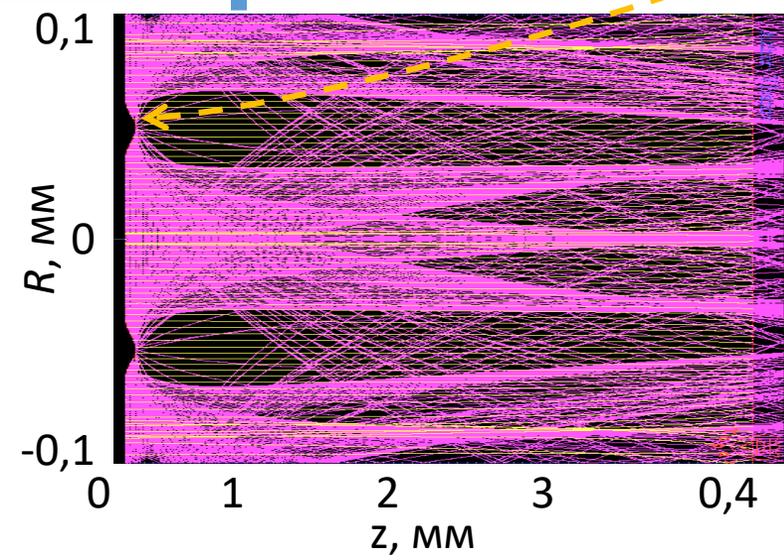
Граница плазмы самосогласована для генерации пучка $I_e = 50$ А, $U_{K-Пл} = 250$ В



Dx , мм	R_a , мкм	R_z , мкм	R_{max} , мкм	S_m , мкм
0	1.7	7.4	13.4	14
5	0.84	3.8	7.1	15
10	0.39	1.9	4.3	9
15	0.49	2.2	5	14

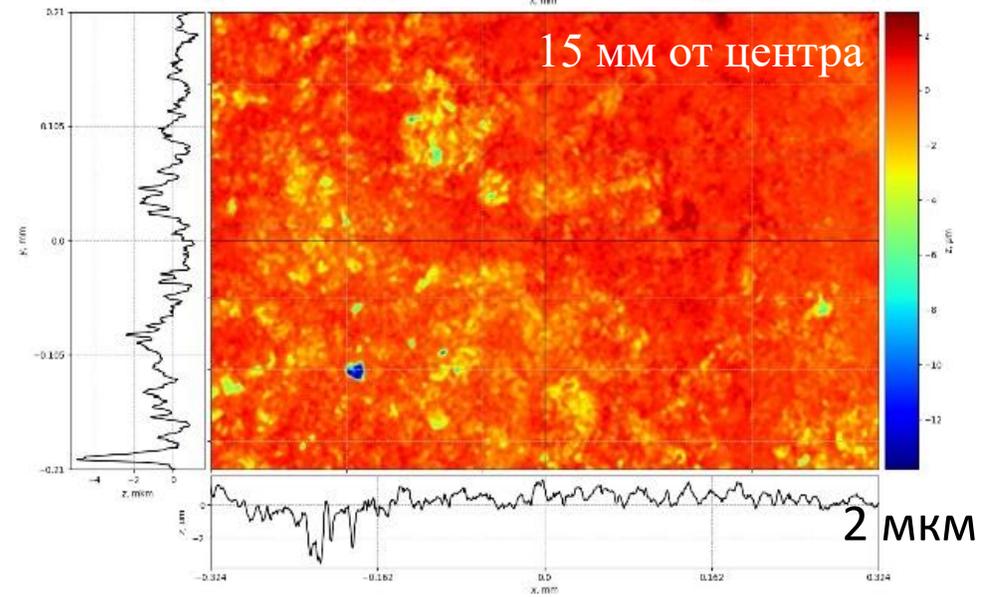
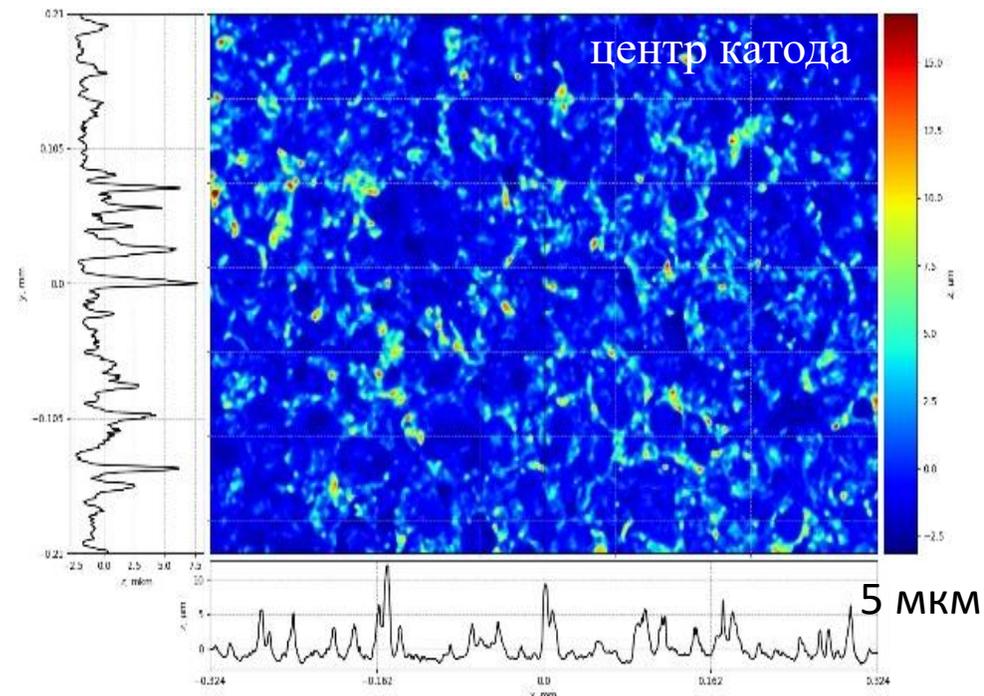
$\sqrt{\langle \theta^2 \rangle} \approx 62$ мрад, отражённые есть

$\sqrt{\langle \theta^2 \rangle} \approx 51$ мрад, отражённых нет



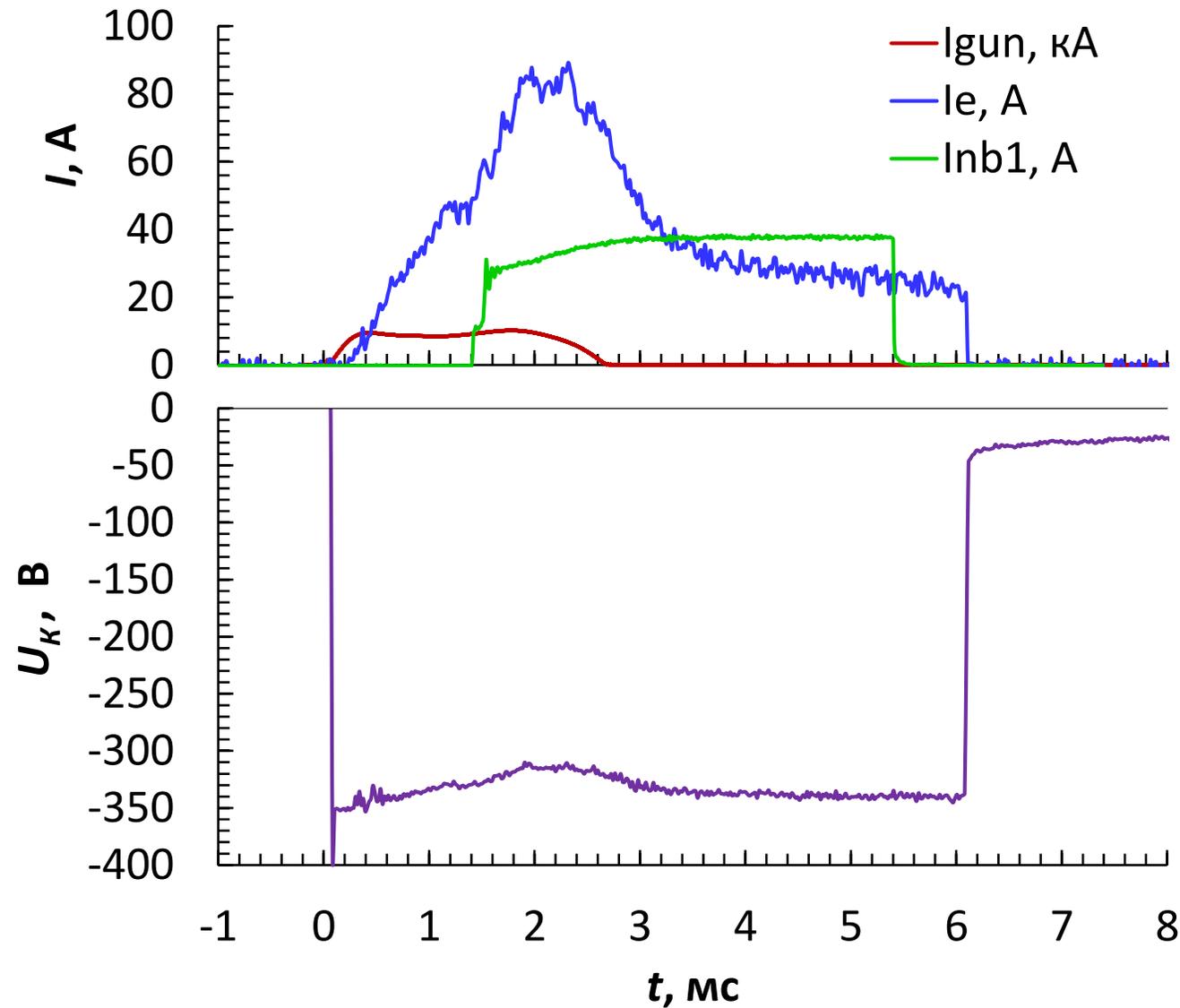
Учтены:

- Тепловой вклад: $T_c \sim 0,15$ эВ.
- Неколлинеарность магнитного и электрического полей на поверхности: $\Delta \theta_{\Sigma} \sim 35$ мрад.
- Шероховатость поверхности катода.



Сценарий эксперимента

Временные диаграммы источников питания эмиттера электронов в течение сценария эксперимента с нагревом нейтральными пучками



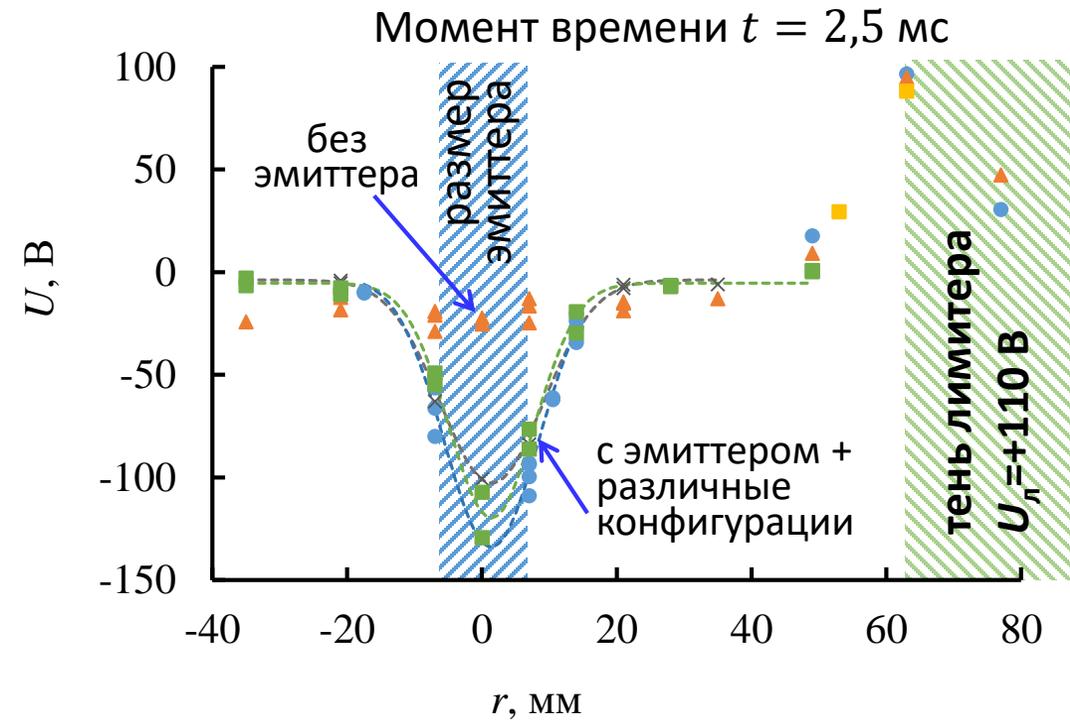
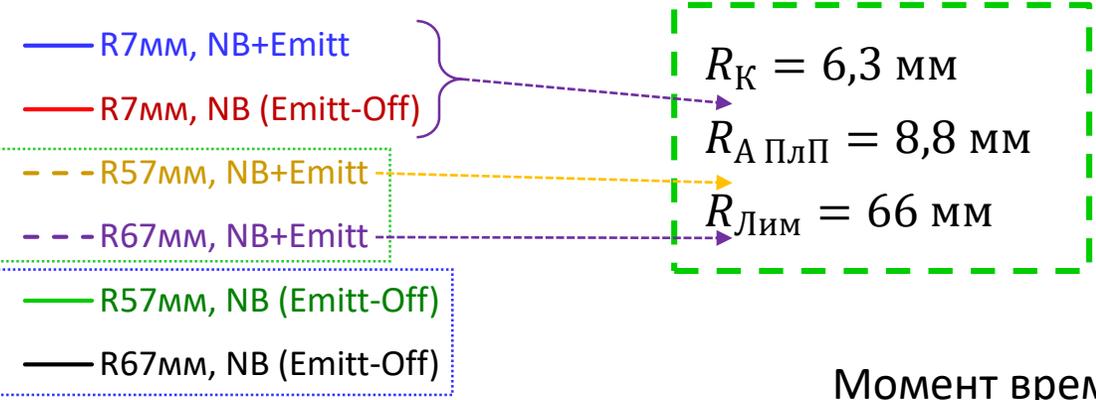
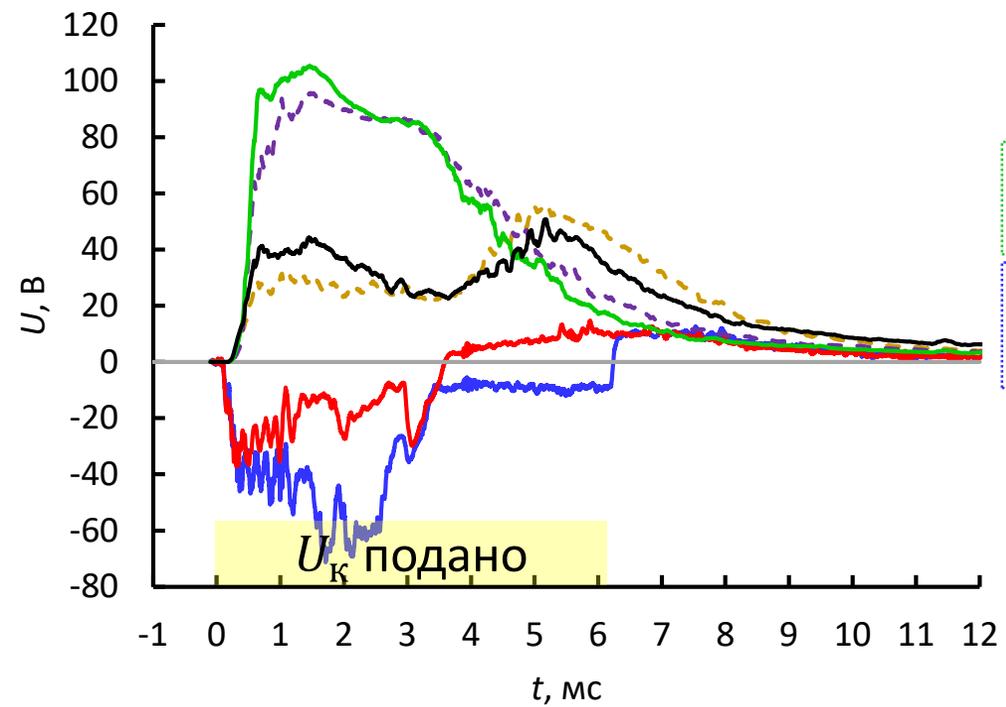
$$I_{\text{H}} \approx 40 \text{ A}$$

$$U_{\text{к}} \approx -350 \text{ V}$$

$$U_{\text{ПП}} \approx -115 \text{ V}$$

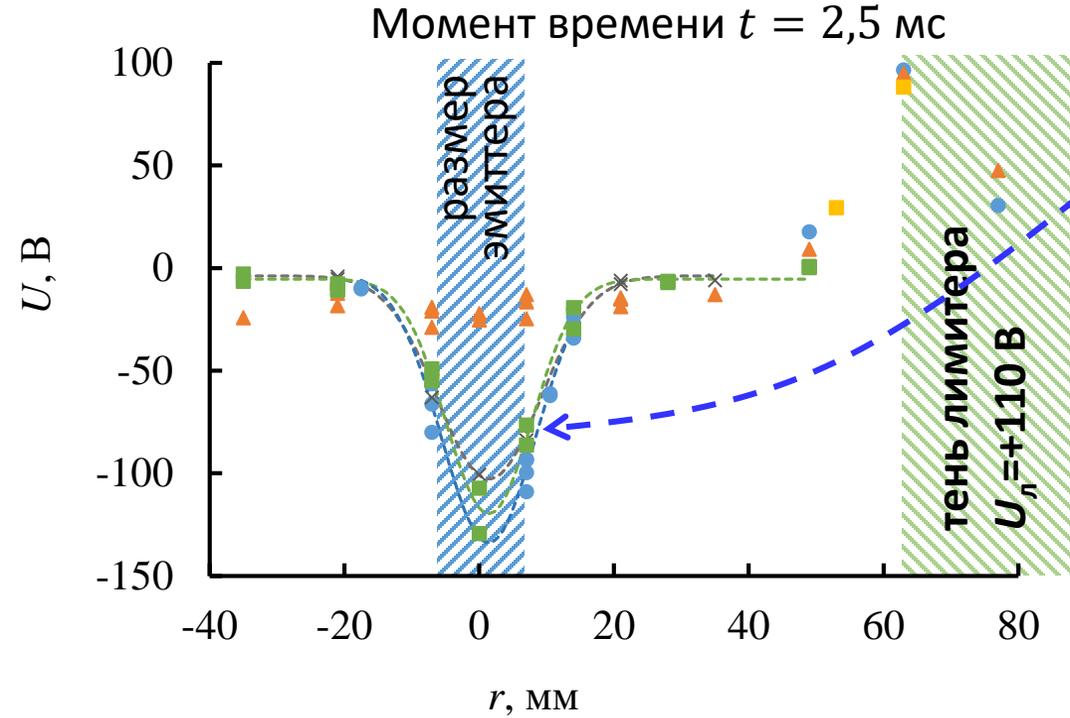
Внос потенциала в центральную секцию установки ($z = -86$ см, $B_z = 1,14$ Тл)

Измерения НЕ эмиссионным электростатическим зондом



Возможная причина повышения электронной температуры

+ Заметен эффект увеличения флуктуаций плотности плазмы при инъекции электронов

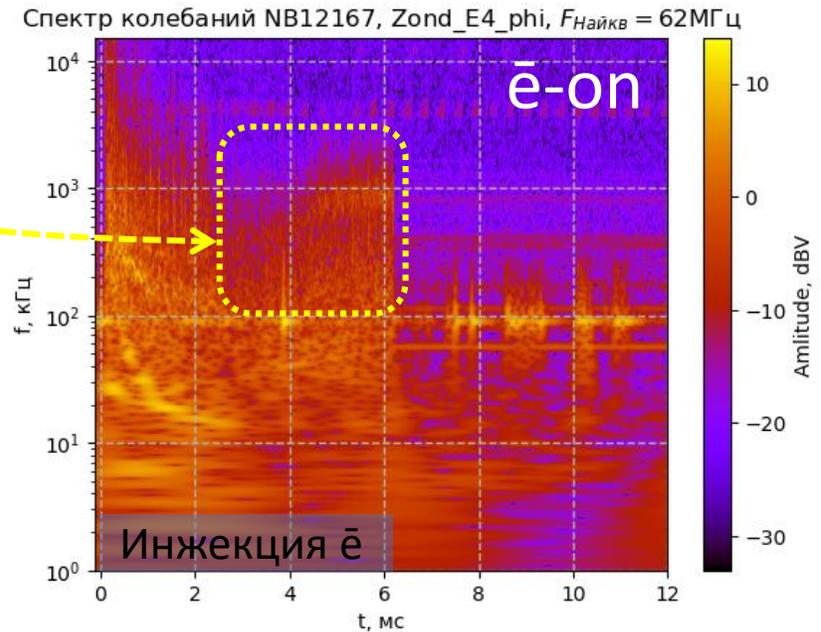
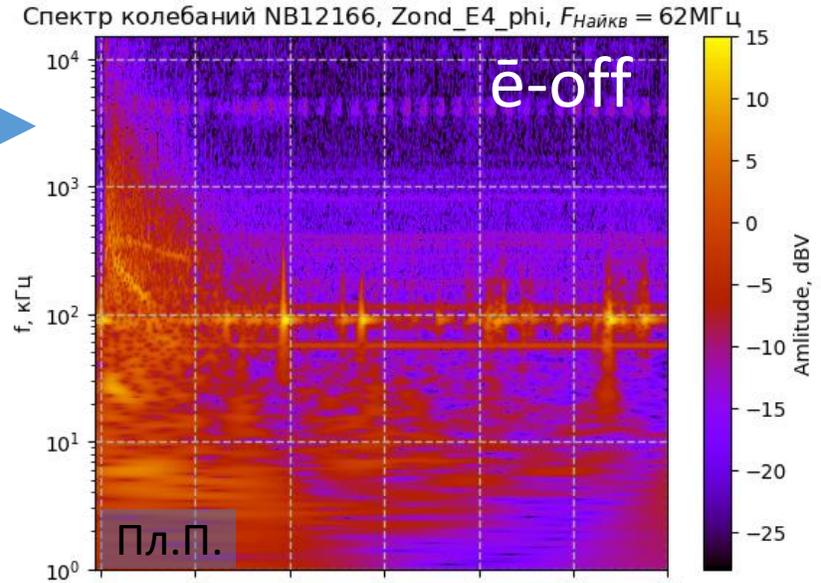


Спектры колебаний потенциала зонда в области границы \bar{e} -пучка

$$E_r \sim 100 \frac{\text{В}}{\text{см}}$$

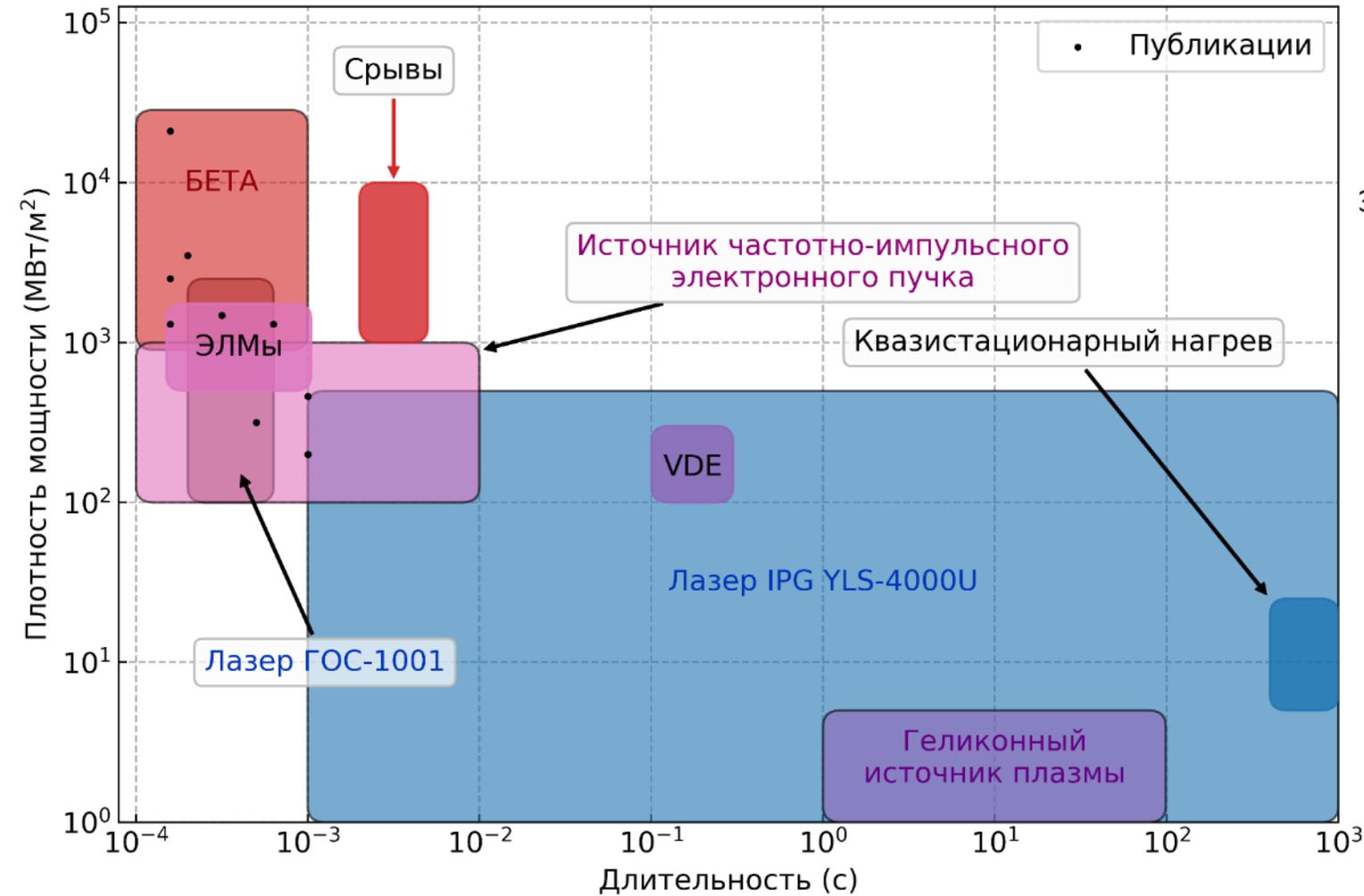
$$f_{rot} \sim \frac{v_{ExB}}{2\pi r} \sim 200 \text{ кГц}$$

Возможно возбуждение неустойчивости Кельвина-Гельмгольца

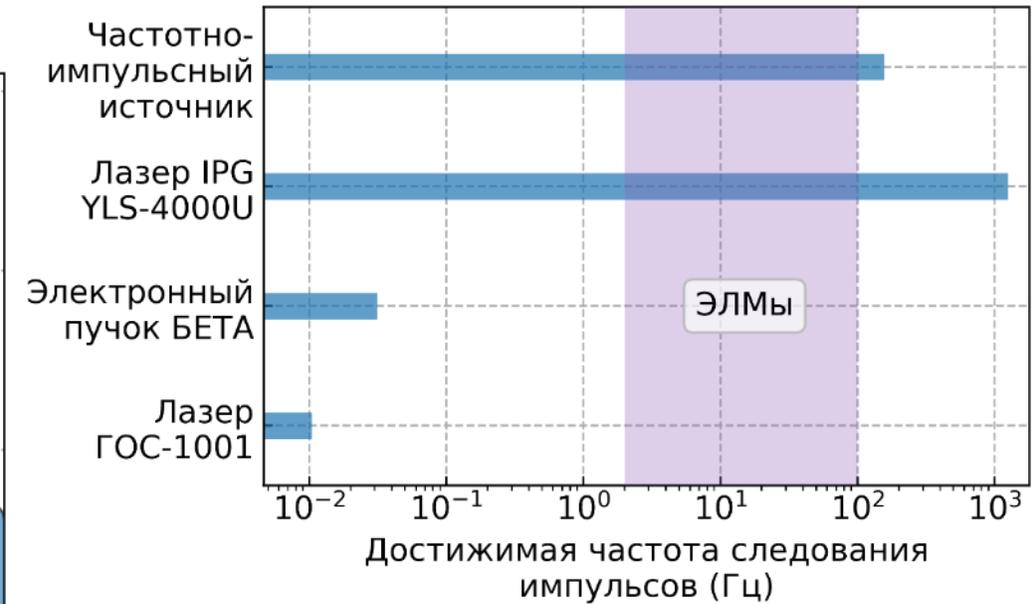


Исследование проблем взаимодействия плазма-поверхность

Экспериментальное моделирование нагрева



- БЕТА – установка на основе источника мощного электронного пучка с плазменным катодом
- Источник частотно-импульсного электронного пучка – источник с накаливаемым LaB₆ катодом



- Доступны источники, позволяющие воспроизводить ожидаемые в современных термоядерных установках тепловые нагрузки на обращенные к плазме компоненты.
- Источники электронных и лазерных пучков позволяют применять широкий набор *in situ* диагностических систем.
- Возможно моделирование как квазистационарного, так и импульсно-периодического теплового воздействия.
- Опубликованные работы сосредоточены на описании результатов экспериментов с импульсным нагревом.
- Использование как лазерных, так и электронных пучков позволяет расширить диапазон моделируемых параметров нагрева.
- Указаны нагрузки, характерные для токамаков ИТЭР и ТРТ.