

Разработка источника отрицательных ионов водорода для нагревных инжекторов установок термоядерного синтеза нового поколения

Сотников Олег Захарович
к.ф.-м.н., с.н.с. ИЯФ СО РАН

- Работы по ВВ инжекторам с использованием ОИ
 - Ускорительный стенд прототипа инжектора ИЯФ
 - Источники отрицательных ионов 1.5 А и 9 А
- Разработка 1.5 А, 120 кВ, 20 сек источника ОИ
 - Поисковые Эксперименты на стенде испытания плазменных эмиттеров
 - Работы на ускорительном стенде

Научная сессия Объединённого учёного совета по физическим наукам СО РАН
17 сентября 2025, г. Новосибирск

Получение быстрых атомов перезарядкой

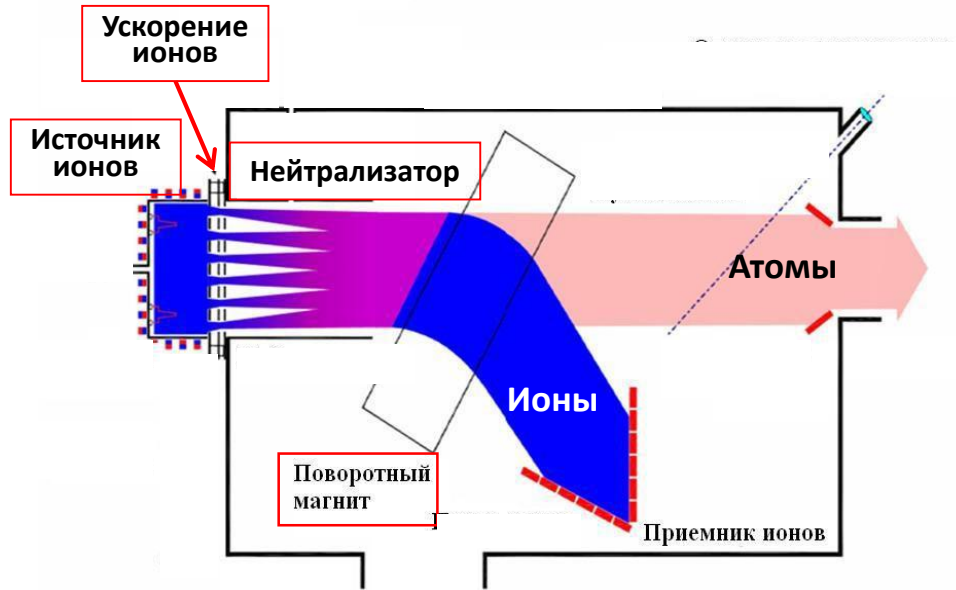
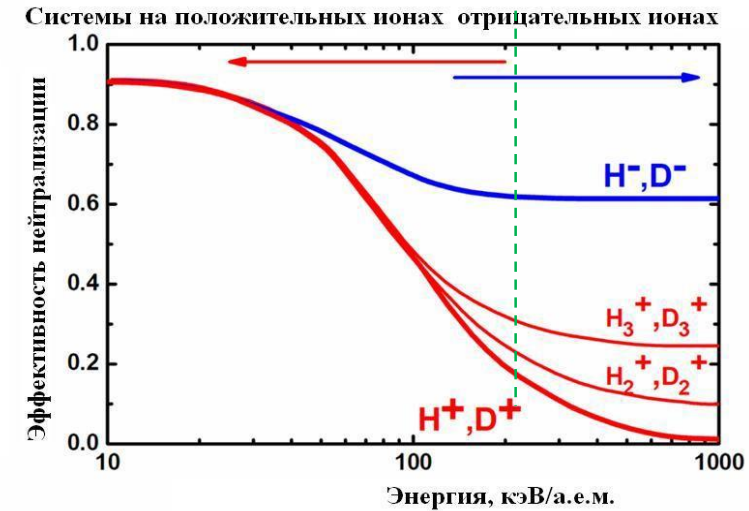


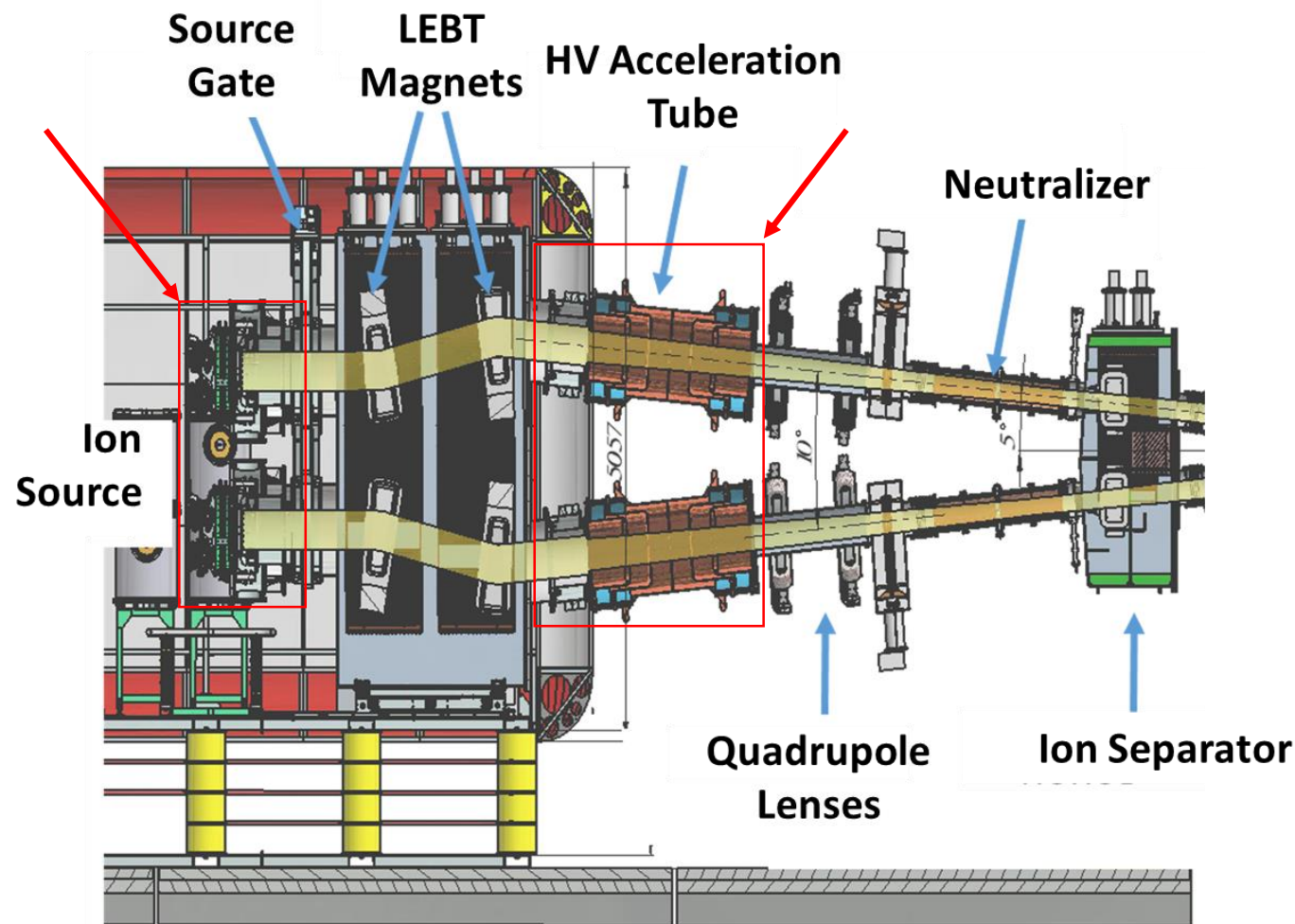
Схема перезарядного инжектора нейтралов



Эффективность нейтрализации ионов

В установках УТС используются для диагностики, для получения и нагрева плазмы, для генерации тока в плазме, для стабилизации неустойчивостей и др.

Концепция высоковольтного инжектора нейтралов ИЯФ



Принципиальная схема инжектора для TRT

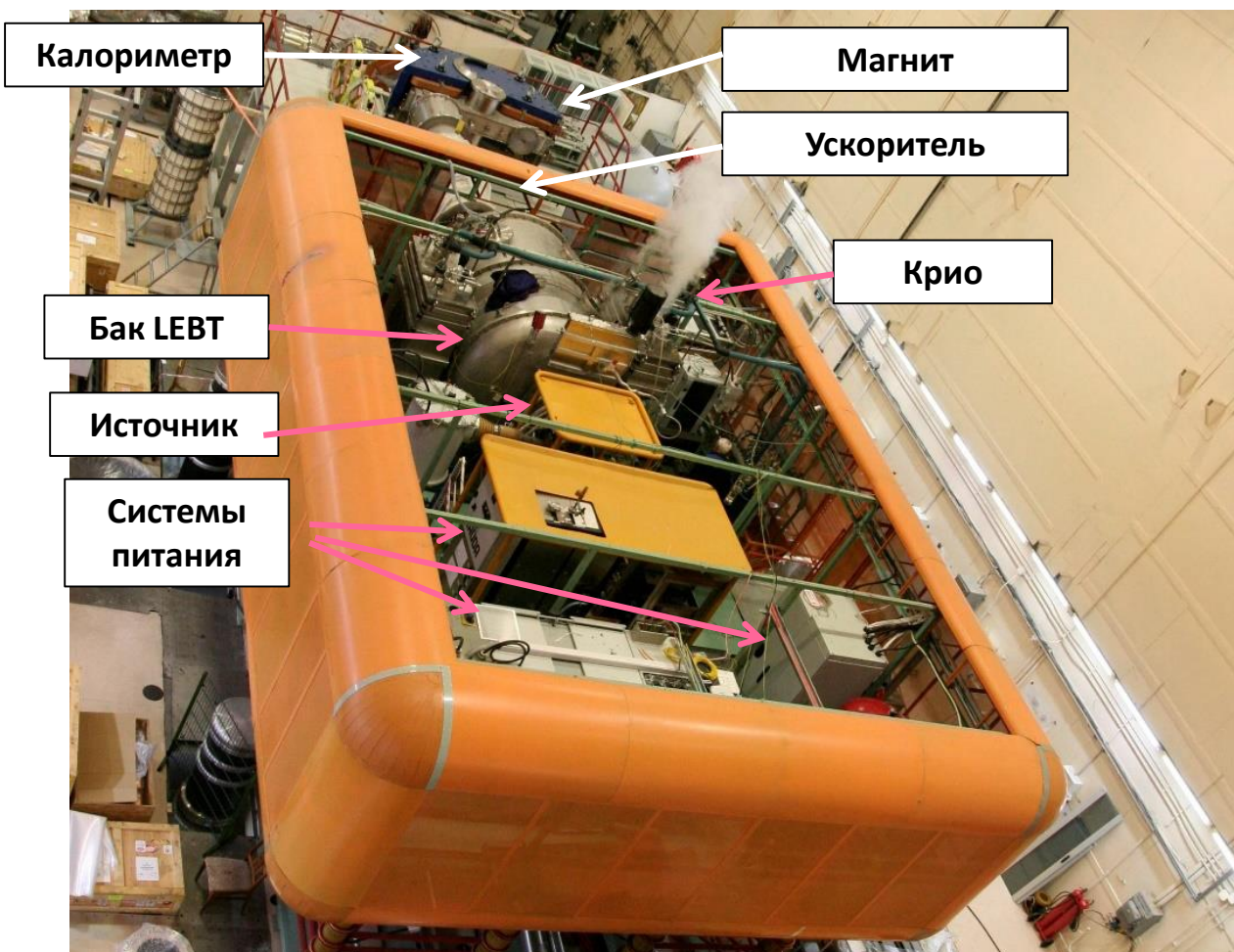
Отличительные особенности:

- Ускорение пучка происходит после его очистки от сопутствующих первичных и вторичных частиц (газ, быстрые нейтралы, электроны, цезий, свет)
- Для ускорения применяется одно-апертурная многоэлектродная ускорительная трубка, имеющая улучшенную откачку с двух сторон. Это уменьшает образование вторичных частиц в ускорителе и увеличивает стабильность его работы.

В ИЯФ ведутся работы:

- ВЧ ППИ с током пучка 1.5 А , энергией 120 кэВ
- ВЧ ППИ с током пучка 9 А , энергией 120 кэВ
- LEVT
- Ускорительная трубка
- HEVT
- Плазменный нейтрализатор пучка
- Фотонный нейтрализатор

Фотографии ускорительного стенда высоковольтного инжектора

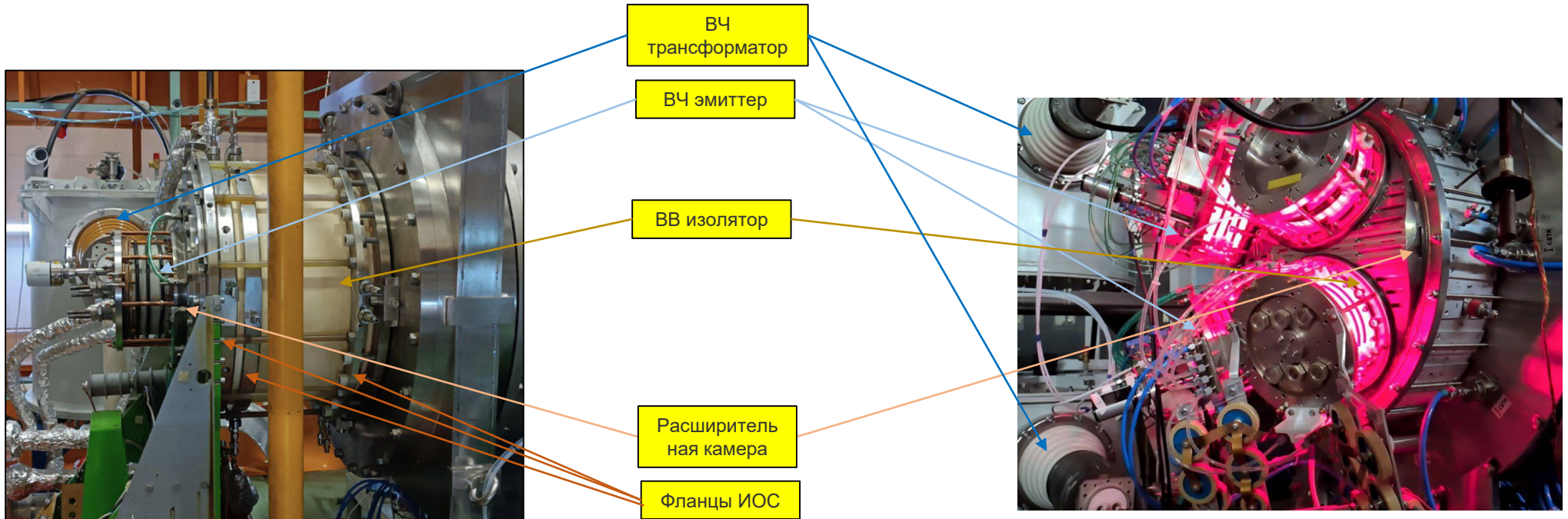


ВВ платформа вид сверху



ВВ платформа вид с боку

ВЧ источники отрицательных ионов ИЯФ



**Прототип источника с 1 ВЧ эмиттером
21 отверстие $\varnothing 16$ мм (площадь 42 см^2)**

**9 А источник с 4 ВЧ эмиттерами
145 отверстий $\varnothing 14$ мм (площадь 227 см^2)**

1. Цезий подается непосредственно на поверхность генерирующего ионы плазменного электрода через распределительную систему
2. Электроды ИОС прогреваются и охлаждаются горячим теплоносителем
3. Магнитная система источника ионов Н- ИЯФ сделана из постоянных магнитов и обеспечивает благоприятную кривизну поля (без пеннинговских ловушек)
4. ВЧ эмиттер оригинальной конструкции

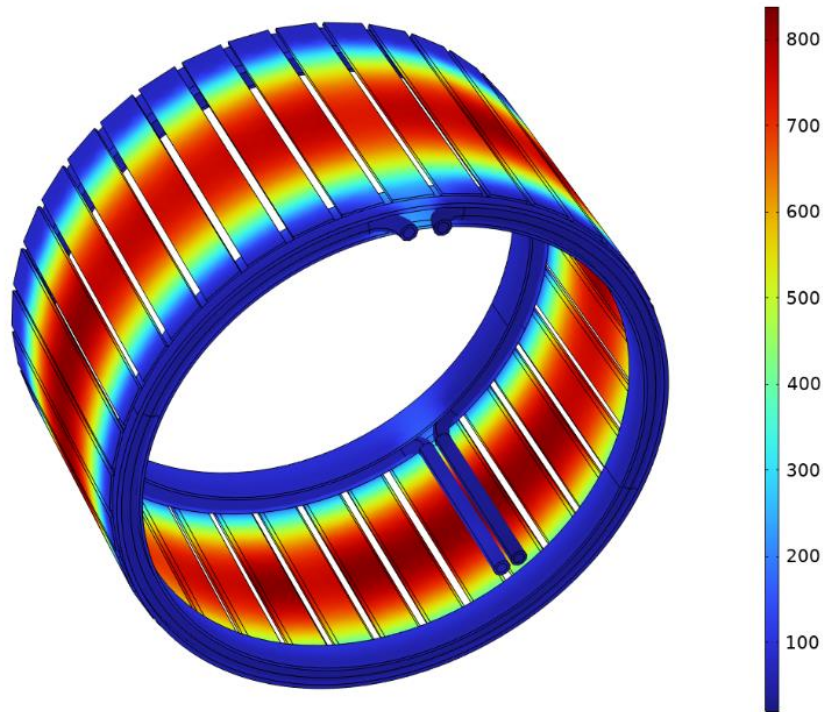
Разработка и испытания ВЧ эмиттера с охлаждаемыми экранами

1. Экран из молибденовых пластин толщиной 1 мм, 2 мм с охлаждением по торцам.
2. Экран с z-образными щелями из набора молибденовых пластин, припаянных к нержавеющей трубкам охлаждения с толщиной 6 мм.
3. Медный экран с z-образными щелями и внутренними каналами охлаждения, изготовленный по заказу в Институте физики плазмы CAS (Китай)

На ускорительном стенде были проведены эксперименты с использованием ВЧ драйверов с защитными экранами 1 и 2 типов.

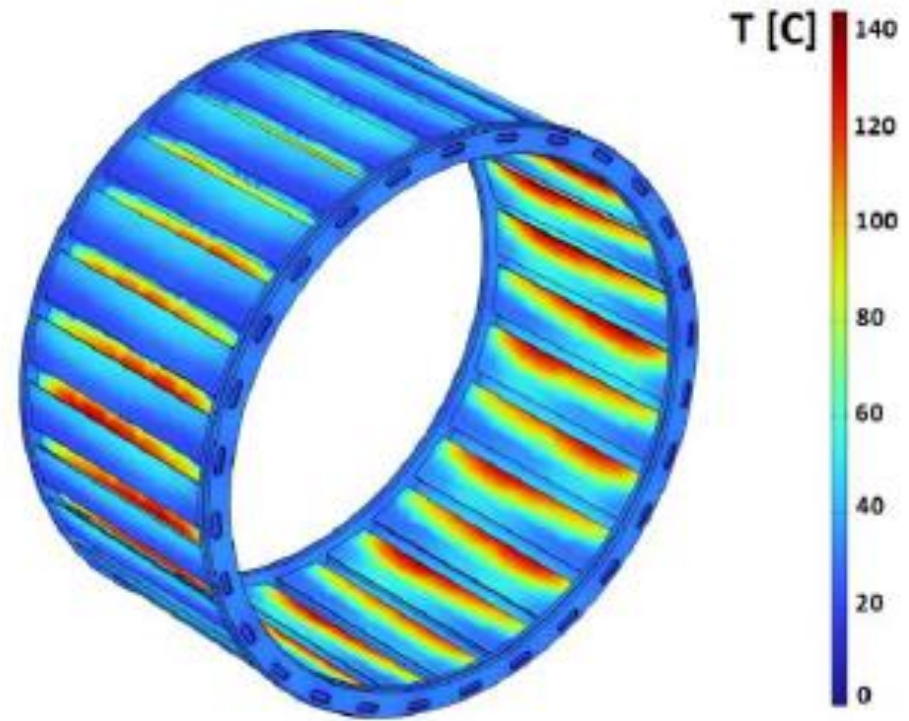
Моделирование нагрева охлаждаемых экранов 1 и 2 типа

Нагрев экрана **1** типа с толщиной пластин 2 мм
при мощности 25 кВт за 20 секунд
COMSOL



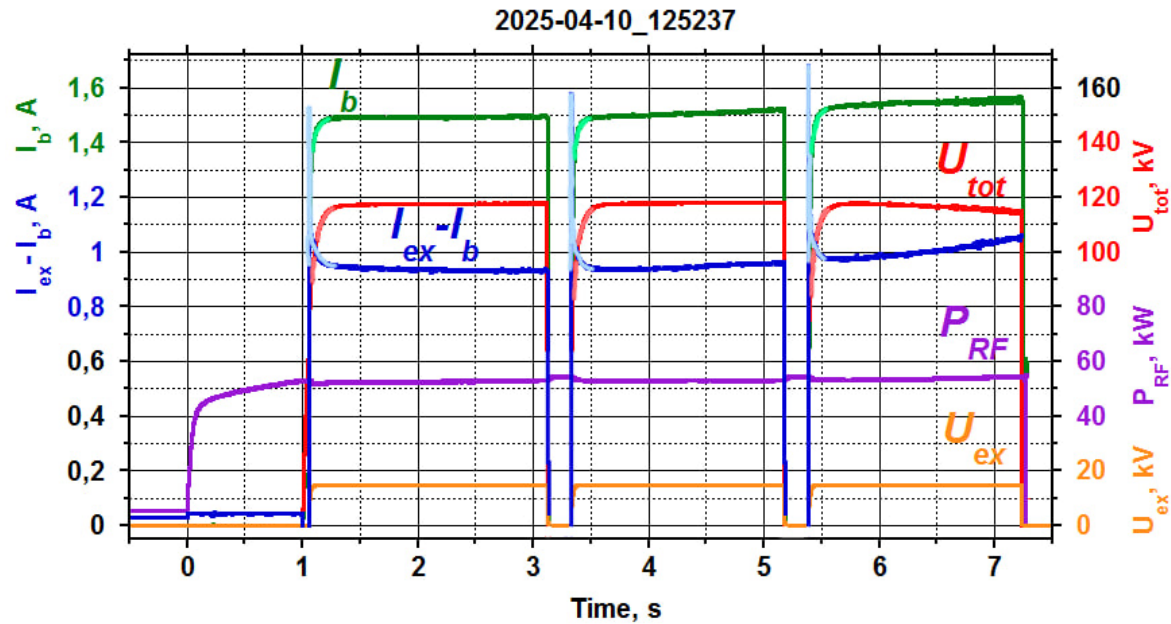
Максимальный нагрев $\sim 800^{\circ}\text{C}$, нагрев торцов 80°C

Нагрев экрана **2** типа с толщиной 6 мм
при мощности 20 кВт в стационаре



Максимальный нагрев $\sim 140^{\circ}\text{C}$, нагрев торцов 30°C

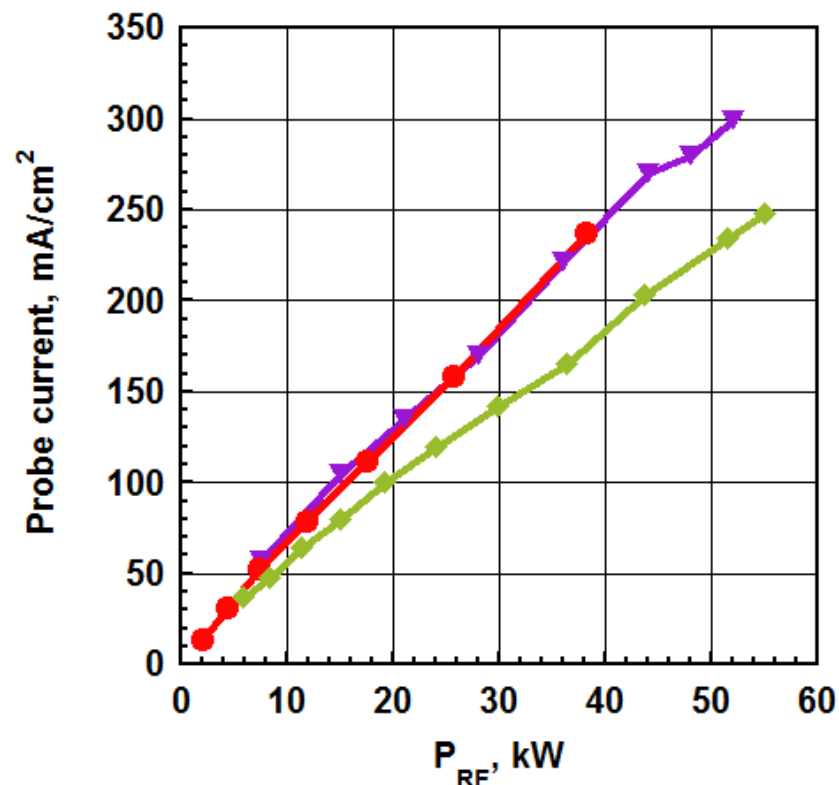
Испытания ВЧ драйверов с охлаждаемыми экранами. Импульсы 6 с



I_b - ток пучка, P_{RF} - мощность ВЧ генератора

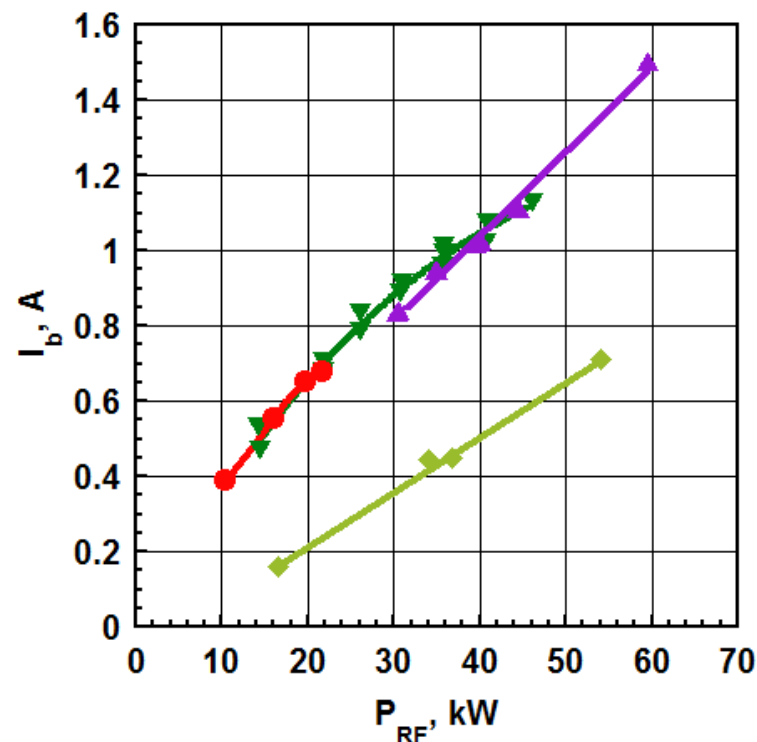
При использовании ВЧ драйвера с экраном
1 типа толщиной 2 мм из источника получен
пучок ОИ с током $I_b = 1.5 \text{ A}$
при энергии **117 кэВ**
в импульсах длительностью **6 с**.
Ток электронов $\sim 1 \text{ A}$

Исследования ВЧ драйверов с охлаждаемыми экранами.



Плотность ионного тока на сеточный зонд vs мощность ВЧ генератора

Экраны 1 типа более эффективны (на 25%) для получения плазмы



Экраны 1 типа:

- с толщиной 0.5 мм,

- с толщиной 1 мм,

- с толщиной 2 мм,

Экран 2 типа:

- с толщиной 6 мм

Ток пучка ОИ vs мощность ВЧ генератора

Экраны 1 типа более эффективны (в 2 раза) для получения пучка ОИ

Высокочастотный плазменный эмиттер с охлаждаемым защитным экраном

- ✓ **Разработан и испытан высокочастотный плазменный эмиттер применяемый в инжекторах быстрых атомов для получения многосекундных атомарных пучков.** Продолжительность рабочего импульса эмиттера новой конструкции составляет несколько десятков секунд, и в проведенных экспериментах ограничивалась системами питания. Увеличенная продолжительность работы эмиттера достигнута за счет уменьшения тепловых потерь в элементах драйвера и установке охлаждаемого экрана . Нагрев экрана при разработанном сценарии работы эмиттера позволяет предотвратить накопление цезия в объеме эмиттера.
- ✓ **Эмиттер был успешно испытан** на отдельном стенде в импульсах длительностью **20 с** при мощности ВЧ генератора **40кВт**, при этом были получены потоки плазмы с плотностью тока положительных ионов **300мА/см²**, достаточной для работы разрабатываемых стационарных поверхностно-плазменных источников отрицательных ионов. При ВЧ мощности 40 кВт после 20 секундного импульса температура внутренней поверхности экрана не превысила **1000°C**
- ✓ **Были проведены испытания эмиттера** при мощности ВЧ генератора до **60 кВт**. В импульсах длительностью **50 мс** получены потоки плазмы с плотностью тока положительных ионов **470 ма/см²**. Произведен анализ работы нового эмиттера , выявлены причины высокой эффективности получения плазмы и их влияние на работу эмиттера в режимах большой продолжительности импульсов.
- ✓ **На поверхностно-плазменном источнике отрицательных ионов** с использование разработанного плазменного эмиттера **был получен ток пучка 1.5 А** (плотность тока 45 мА/см²) **при мощности ВЧ генератора 50 кВт**, ограничение по току пучка было вызвано используемой ионно-оптической системой.

[1] Shikhovtsev I., Sotnikov O., et al. Overview of neutral beam injectors for plasma heating and diagnostics developed at Budker INP// Journal of plasma physics. – 2024. – vol. 90 . – № 1. – P. 155900301 . – DOI: 10.1017/s0022377824000278

[2] Gavrisenko D.Yu., Sotnikov O.Z., et al. – Comparative analysis of high-frequency plasma drivers with various protective screens for atomic injectors with multi-second pulse duration. – Plasma Physics Reports. – 2023. vol. – 49. – № 10.– p. – 1169-1179. – DOI: 10.1134/S1063780X2360069X

[3] Аникеева К.И., Сотников О.З., и др. Разработка и испытания высокочастотного драйвера перезарядного источника отрицательных ионов водорода. – Сибирский физический журнал. – 2023. – vol. – 18. – № 2. – p. – 36-45. – DOI: 10.25205/2541-9447-2023-18-2-36-45

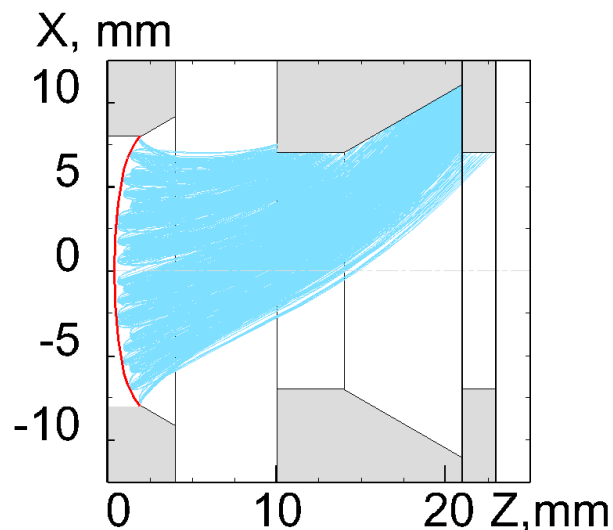
[4] Патент RU 2812968 С1. Российская Федерация, СПК Н05Н 1/46. Способ согласования высокочастотного источника плазмы с источником питания. № 2023124666: заявл. 26.09.2023: опубл. 06.02.2024 / А. А. Кондаков, Д. Ю. Гаврисенко, О. З. Сотников. – 8 с.

В выдвигаемом на премию цикле работ получен ряд следующих ключевых результатов:

- получен пучок ОИ с проектными током и энергией в режиме длинных импульсов;
- проведены расчетно-теоретические и экспериментальные исследования параметров получения сильноточных пучков ОИ в многоапертурном ВЧ источнике;
- исследовано влияние поддержания высокой температуры элементов газоразрядной камеры источника ОИ на образование цезиевого покрытия, которое обуславливает характеристики источника ионов и качество формируемого пучка ОИ;
- достигнута надежная работа ВЧ источника сильноточных пучков ОИ с высокой воспроизводимостью характеристик;
- предложены методы повышения эффективности работы источника ОИ для применения в разрабатываемом инжекторе высокоэнергетичных атомов водорода.

Оптимизация геометрии ИОС для получения 1.5 А пучков ОИ

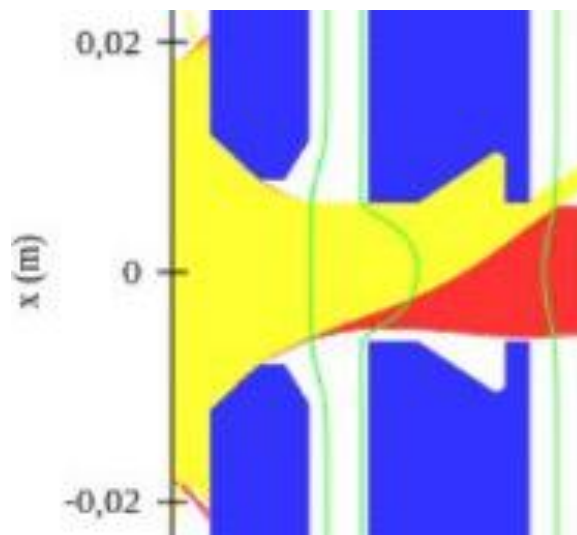
Для достижения целевого тока выходного пучка отрицательных ионов 1.5 А с увеличением эмиссионной плотности тока до 45 мА/см² геометрия ИОС была промоделирована (код IBSIMU).



Накладка на ВЭ толщиной 2 мм,
плотность эмиссии 30 мА/см².

$U_{ex}=10kV$

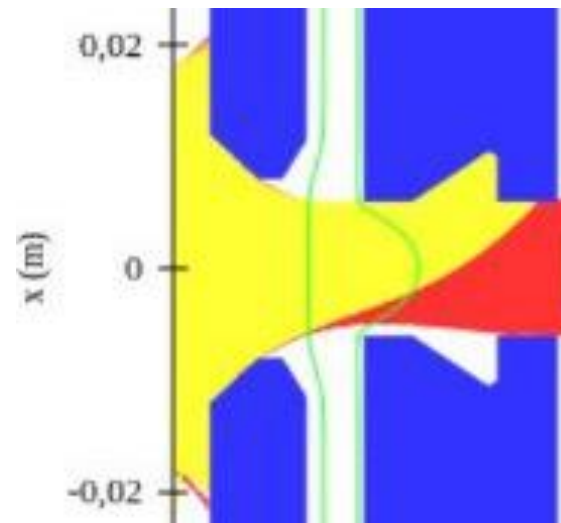
MAGEL3D (М.Тиунов). Пучок Н- не показан,
сопутствующих электроны (голубым)



Накладка на ВЭ толщиной 2 мм,
плотность эмиссии 40 мА/см².

$U_{ex}=12kV$

IBSIMU (Ильенко, Сотников), Пучок Н- (красным) и
сопутствующих электронов (желтым)



Накладка на ВЭ толщиной 6 мм,
плотность эмиссии 45 мА/см².

$U_{ex}=12kV$

Результаты моделирования позволяют получить **лучшее прохождение** отрицательных ионов через ИОС и обеспечить формирования пучка с током 1.5 А и малой угловой расходимостью при эффективном **перехвате сопутствующих электронов**.