

Источники ОИ в ИЯФ

Лекции 1-2

- Отрицательные ионы, их свойства и применения
- Механизмы образования ОИ
- Основные разновидности источников ОИ
- Процессы генерации ОИ на поверхности

Лекции 3-4

- Поверхностно-плазменный механизм генерации ОИ
- ППИ для ускорителей
- Работы по источникам отрицательных ионов для УТС

Лекция #5 :

- Стационарные 10-15 мА источники ионов Н- для тандема БНЗТ
- Квазистационарный (10-100 с) 1.5 А источник для инжекторов УТС

Источники ионов H- для ускорителей

Импульсные источники ионов H- широко используются в импульсных ускорителях заряженных частиц для “перезарядных” технологий:

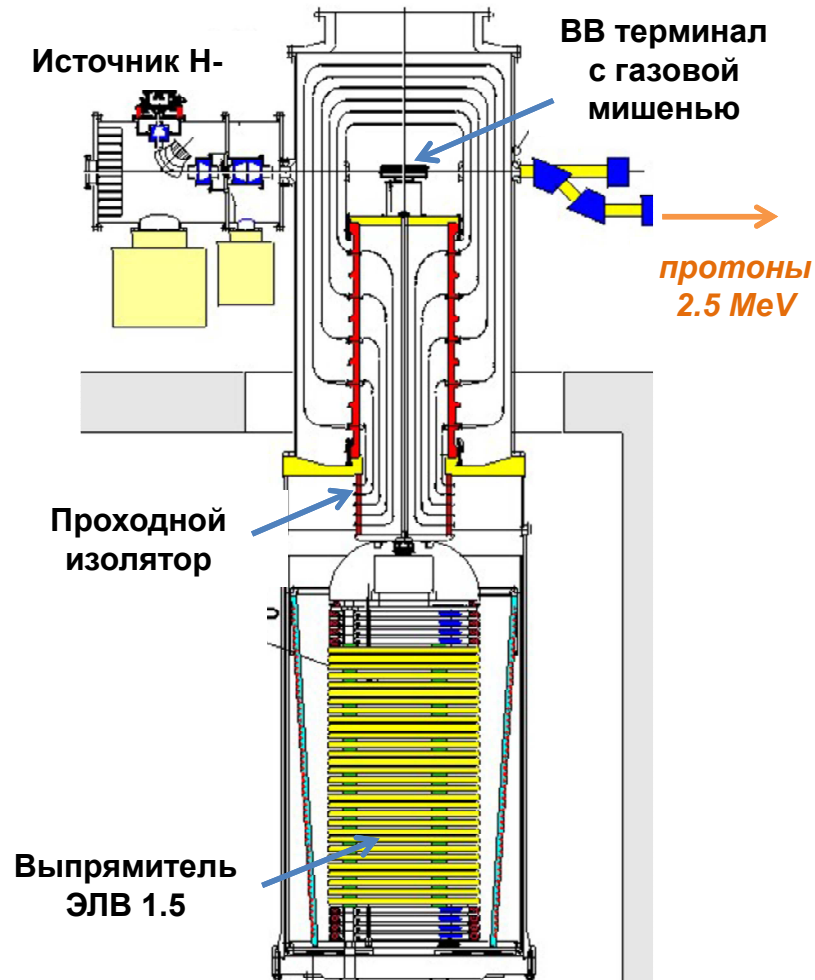
- перезарядной инжекции в накопители
- удвоения энергии заряженных частиц в тандемных ускорителях
- вывода протонов из циклотрона без помощи дефлектора

Современным ускорителям с высокой производительностью необходимы стационарные источники H-

Стационарные источники ионов Н- для тандема БНЗТ

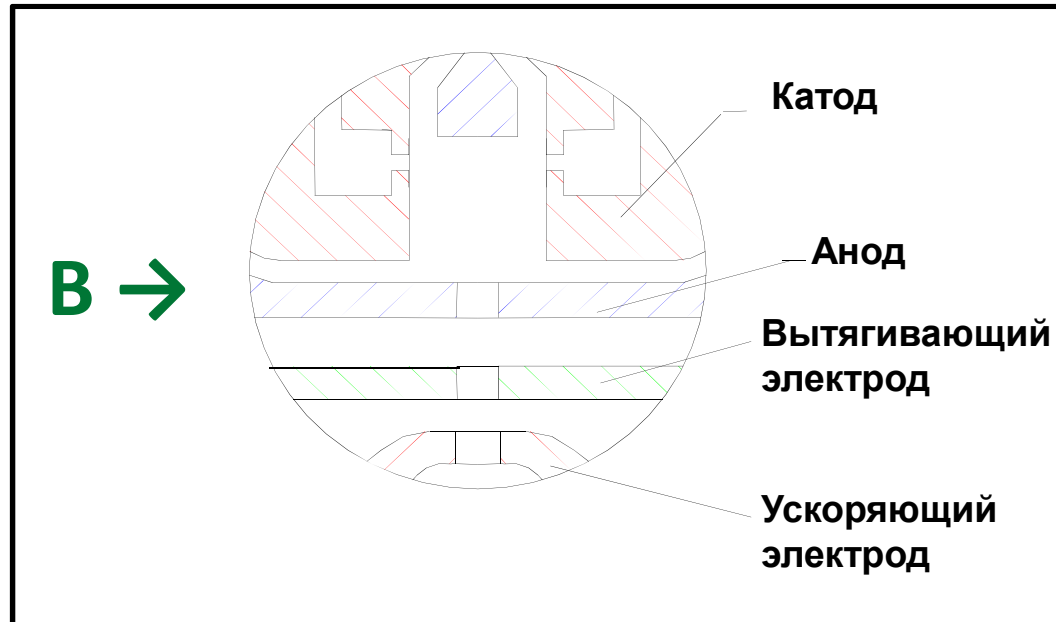
Тандемный ускоритель с вакуумной изоляцией

Работает в ИЯФ с 2006 г.



- Источник и нейтроно-образующая мишень расположены на земляном потенциале
- Перезарядная мишень находится под высоким потенциалом (1 МВ)
- Отрицательные и положительные ионы ускоряются одним и тем же потенциалом

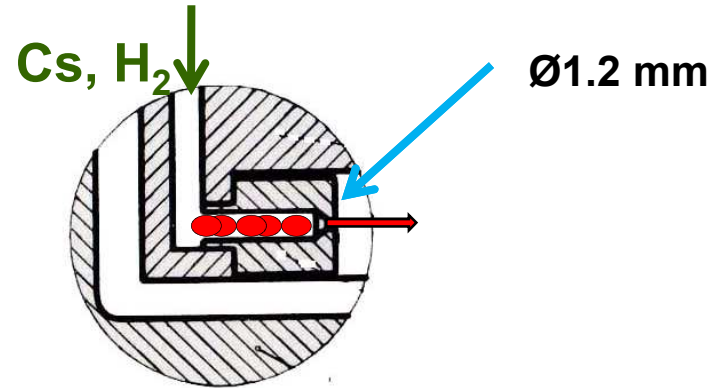
Поверхностно-плазменный источник с пеннинговской геометрией разряда



Принципиальная схема электродов и системы формирования пучка

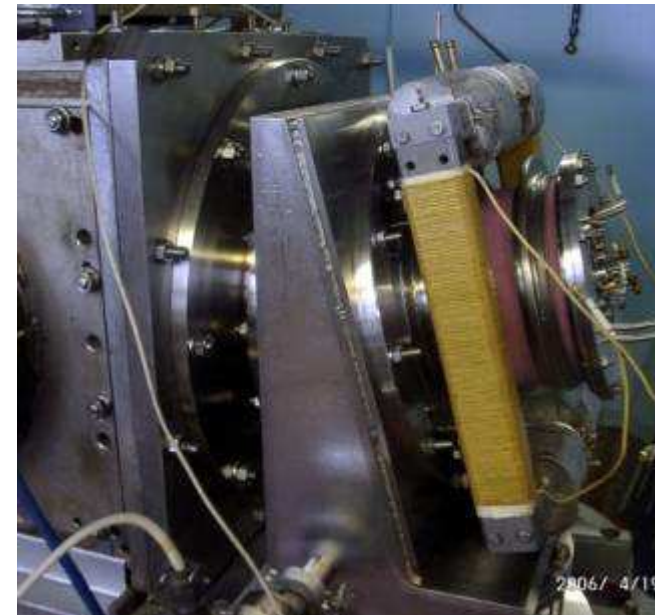
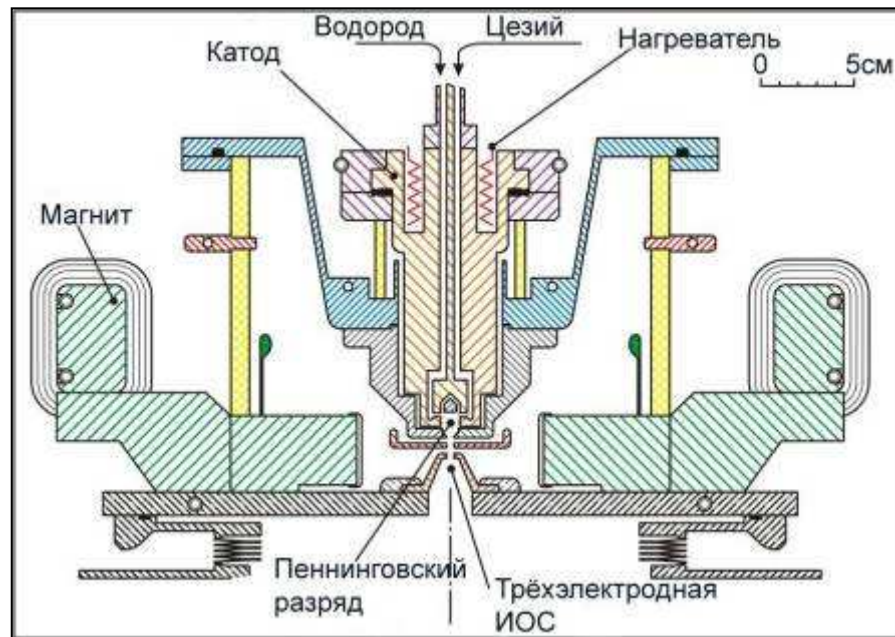
- **Магнитное поле B поддерживает Пеннинговский разряд и уменьшает поток электронов**
- **Инжекция водорода, цезия и плазмы осуществляется через полые катоды**
- **Отрицательные ионы генерируются на поверхности анода пеннинговского разряда, покрытого цезием**

Полые катоды источника



- Запирание цезия - малый расход (1-3 mg/h)
- PIG при низком давлении водорода ~30 mTor
- Высокая длительность эксплуатации (перераспыление молибдена внутри)
- Формирование плазменного шнура в эмиссионной зоне источника

Источник ионов H- на тандеме



**Ток пучка ионов H⁻ на выходе из источника 8-10 мА.
До энергии 2 МэВ ускорен пучок протонов током > 5 мА.**

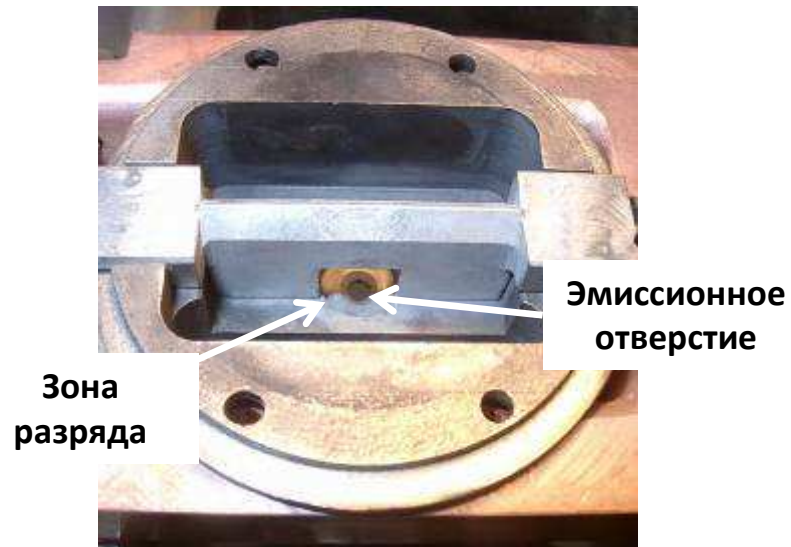
Элементы конструкции источника на тандеме

На катоде выделяется стационарная мощность $0,2 \text{ кВт/см}^2$



Массивный Молибденовый катод с катодными вставками и охлаждением нижнего торца

Элементы конструкции источника на тандеме



Массивный Мо анод



Охлаждаемая крышка анода из молибдена

Элементы конструкции источника на тандеме



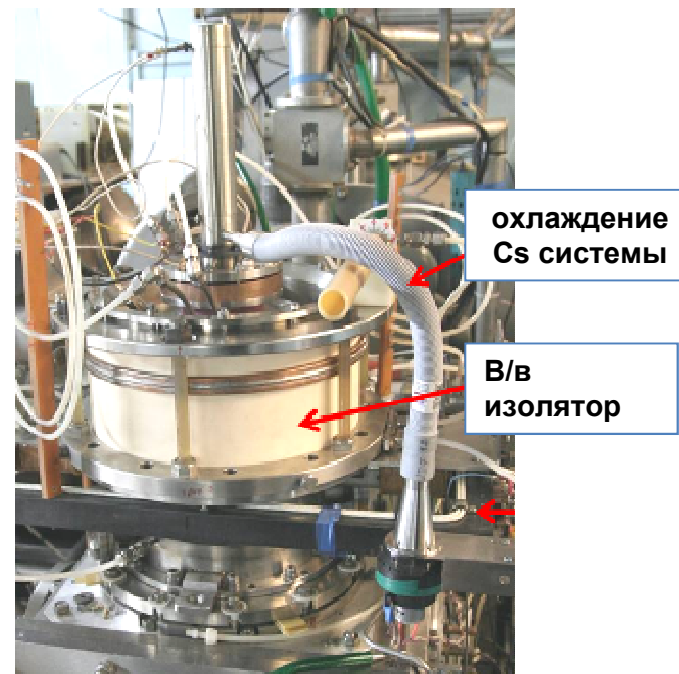
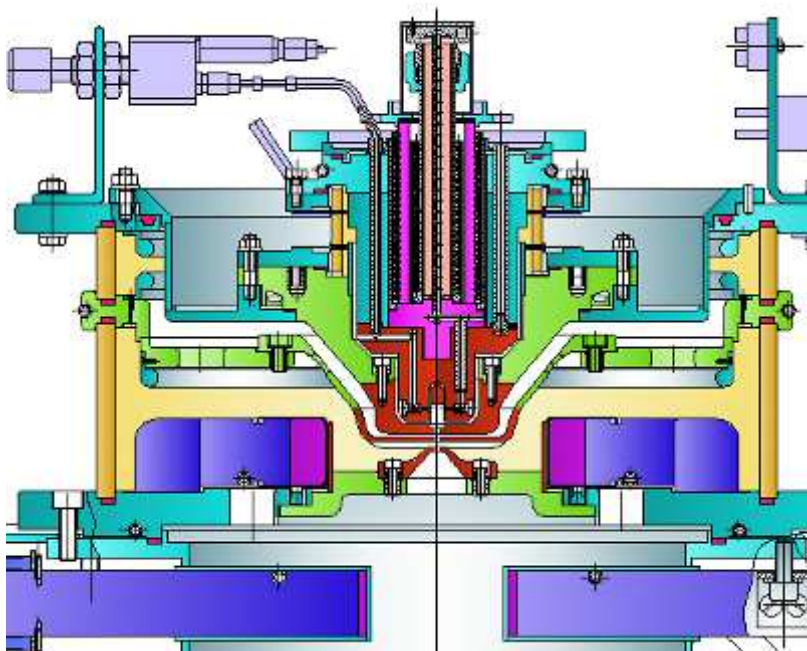
Вытягивающий электрод со сменной вставкой.
Установлен на охлаждаемом фланце
Боковые окна обеспечивают откачку вытягивающего зазора



Охлаждаемый
ускоряющий электрод

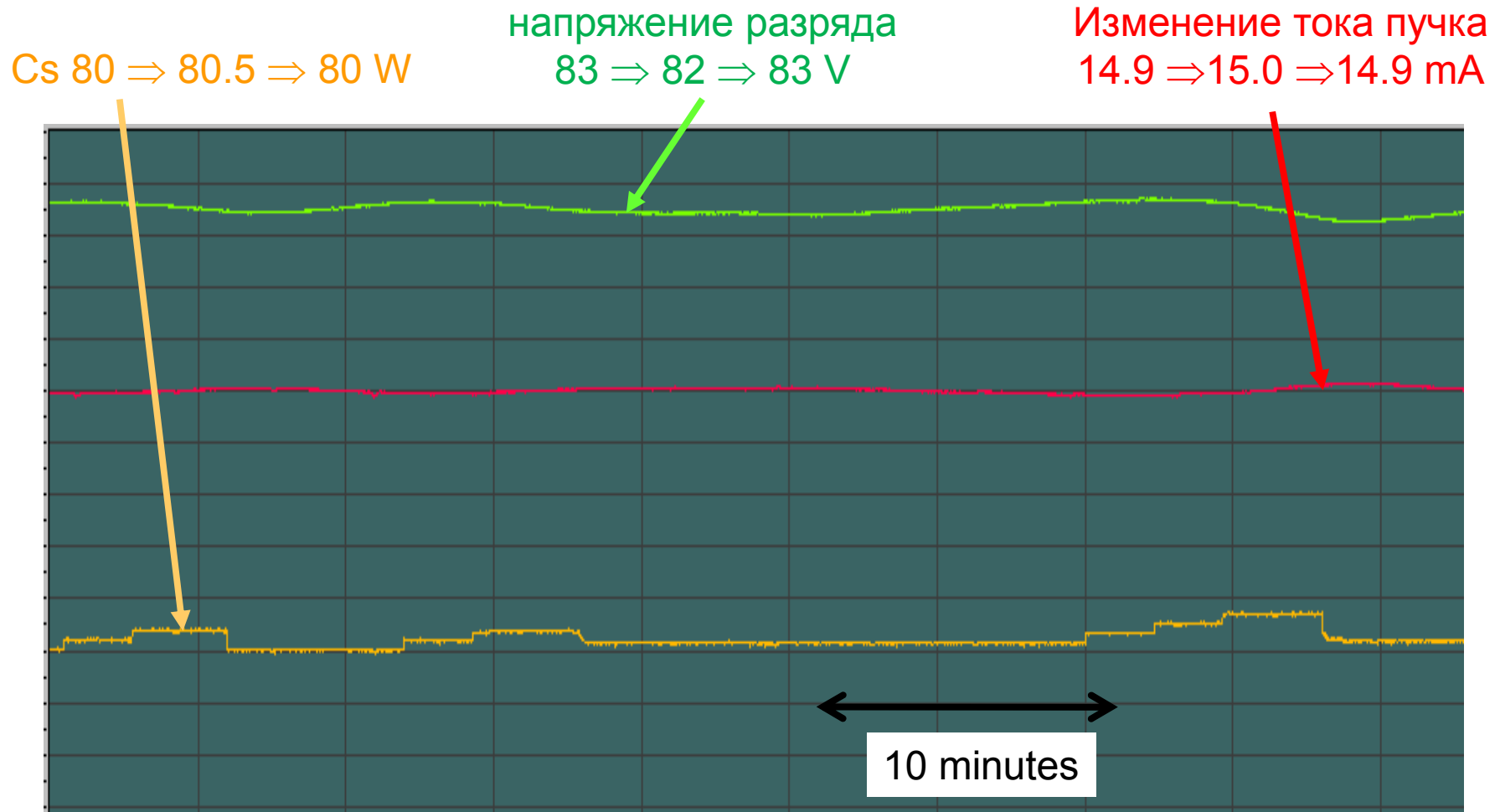
Стационарная мощность на конусе
ускоряющего электрода до 2 кВт/см^2

Модернизация источника для тандема



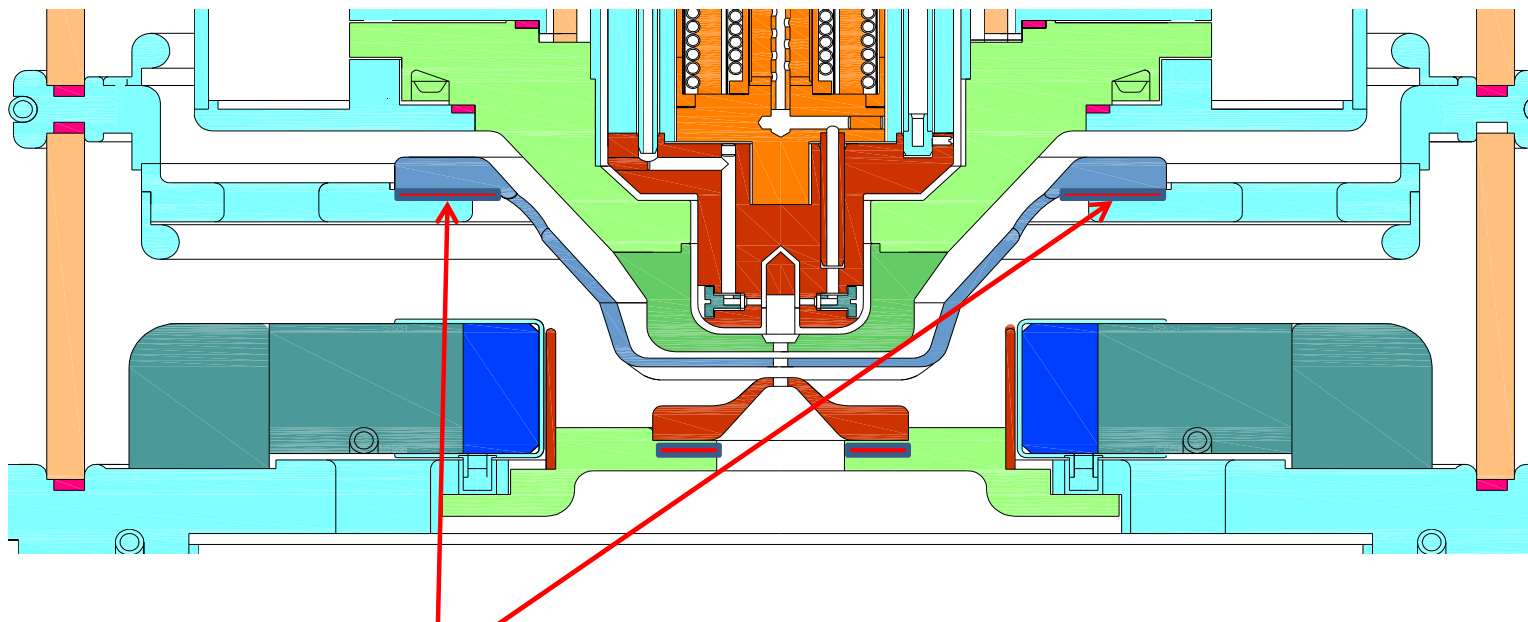
- Заменяемые изоляторы ГРК и ИОС большого диаметра
- Заменяемые нагреватели катода и печи на основе стандартных нагревных кабелей
- Магнитное поле на постоянных магнитах NdFeB
- Дополнительная магнитная система для возврата пучка на вертикальную ось
- Термостабилизация электродов
- Управляемое воздушное охлаждение “холодной точки” Cs системы
- Пучок H- током до 15 мА (в форсированном режиме 25 мА)

Управление компьютером



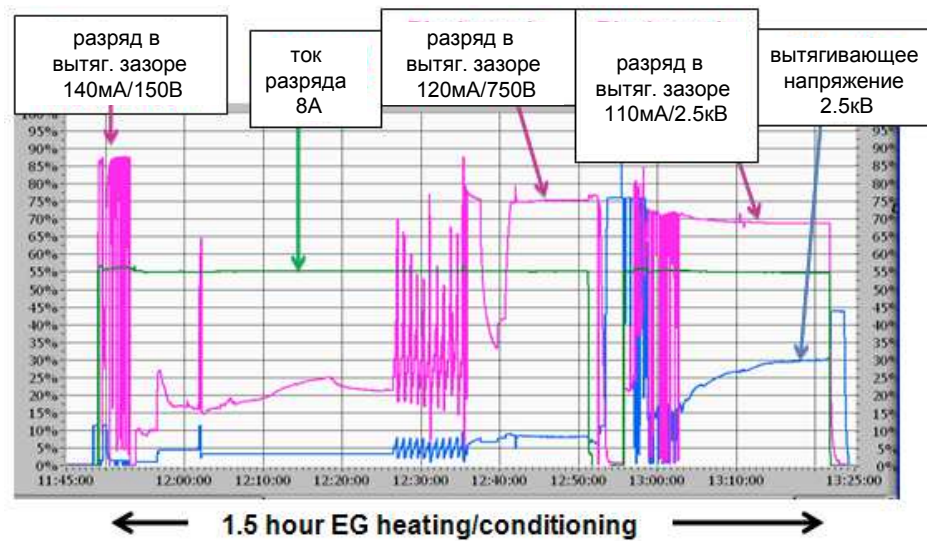
Запуск источника и поддержание необходимого стабильного режима работы осуществляются компьютером по задаваемому сценарию

Термостабилизация электродов (баланс нагрев/охлаждение)



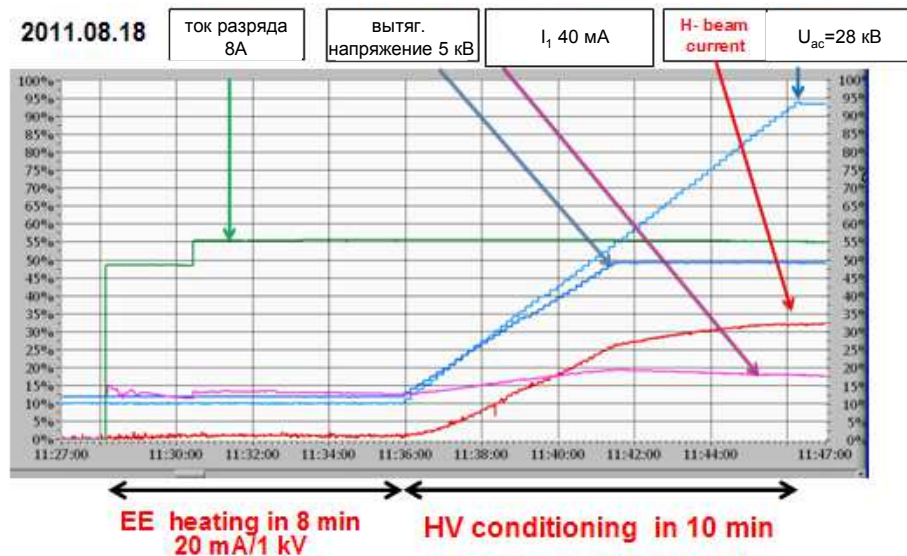
Теплоизолирующие вставки между холодным фланцем и горячей корзиной вытягивающего электрода

Оптимизация температуры ВЭ



без теплоизолирующих вставок

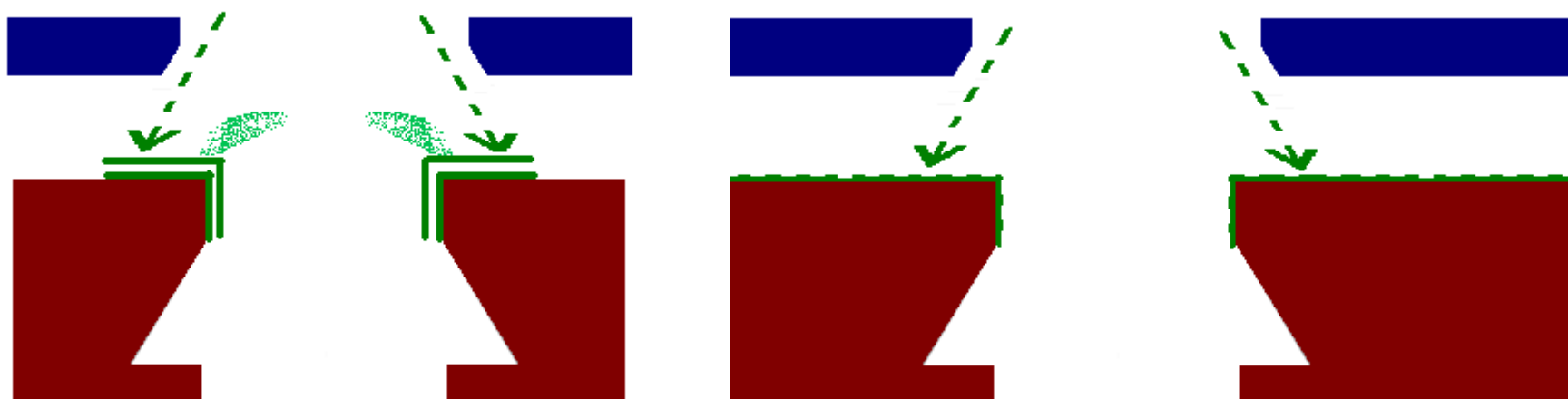
При запуске источника с холодным вытягивающим электродом в вытягивающем зазоре зажигается низковольтный тлеющий разряд



с теплоизолирующими вставками

Горячие электроды позволяют поднять вытягивающее напряжение до рабочих значений 7 кВ

Механизм увеличения ВВ прочности при нагреве электродов



Холодные электроды

Накопление цезия и распыление толстых слоев цезия пучком приводит к пробоям в зазоре ИОС

Горячие электроды

За счет повышенной диффузии и термодесорбции цезий перераспределяется на периферию ИОС.

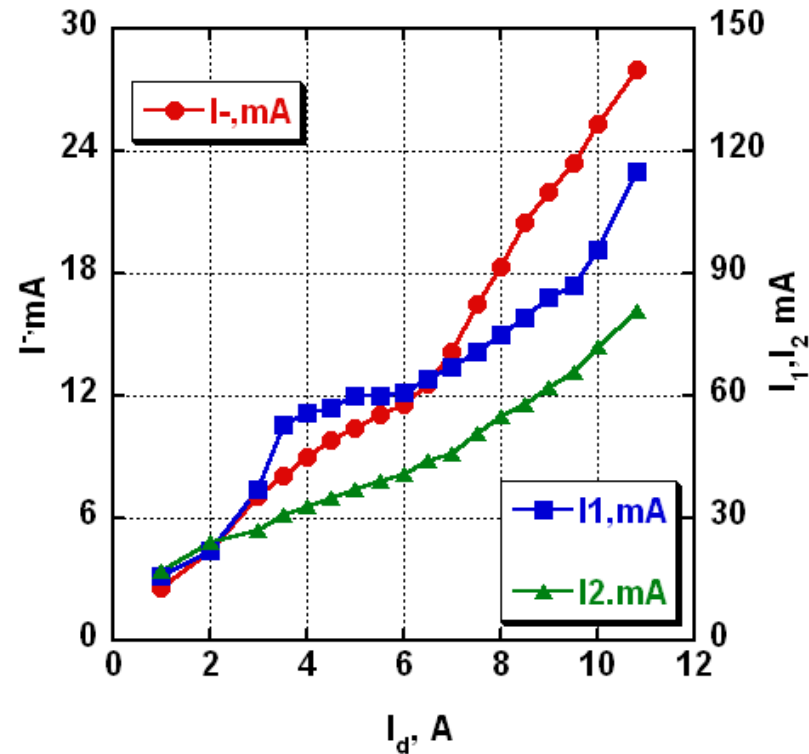
В зонах ИОС, облучаемых пучком нет толстых легкораспыляемых пленок цезия

Характеристики источников

Источник	На тандеме	модернизированный
Ток разряда, А	8-9	11
Магнитное поле, Тл	0.06 – 0.1	0.06 (0.1)
Магниты	электромагнит	NdFeB
Вывод пучка	15°	Параллельно оси
Изоляторы ИОС и ГРК	стационарные	заменяемые
Ток пучка H-, мА	8	15 (25)
nRMS эмиттанс	0.3 п mm mrad	
Энергия пучка, кэВ	25	32
Подача водорода	0.12 л*Тор/с	
Рабочие циклы	4-6 часовые смены	Испытан в 100-часовых циклах непрерывной работы

Характеристики источника

Зависимости от тока разряда

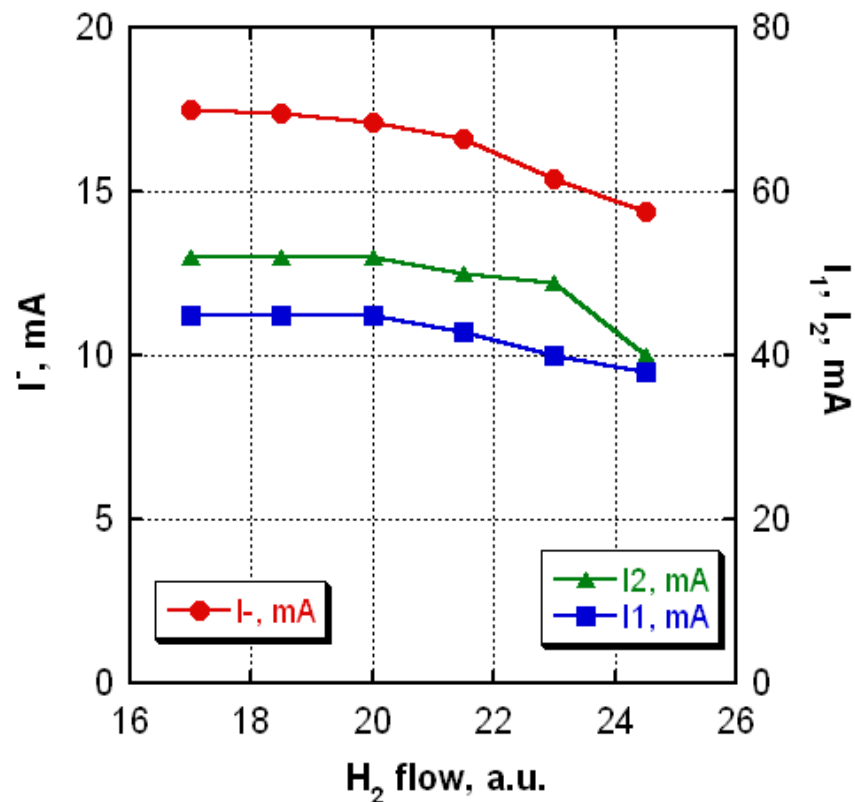


Увеличение тока разряда увеличивает потока частиц плазмы на анод и пропорционально увеличивает тока пучка отрицательных ионов

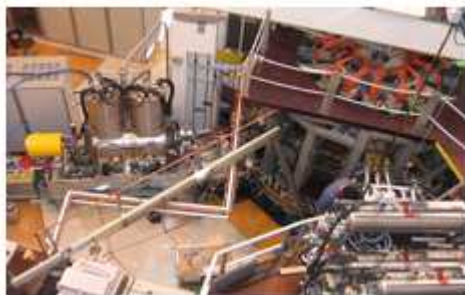
Также увеличиваются ток сопутствующих электронов и ток ускоряемого зазора, что может привести к перегреву электродов ИОС!

Характеристики источника

Зависимости от подачи водорода



- Ток пучка ионов Н- слабо зависит от скорости подачи водорода в широком интервале давлений
- При повышенной подаче водорода >20 а.е. ток пучка Н- уменьшается из-за усиления разрушения отрицательных ионов на вытекающем газе
- Разряд неустойчив при малых подачах водорода < 0.1 лТор/с (<16 а.е.)



TCV



Вандельштейн W-7X



MST



Compass-D



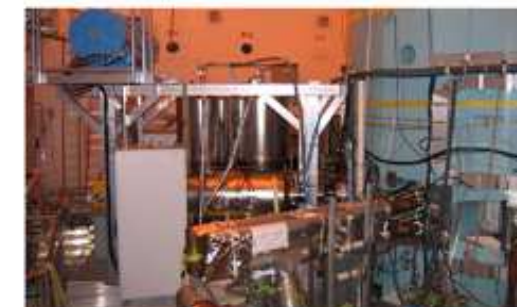
ГДЛ



WB-8



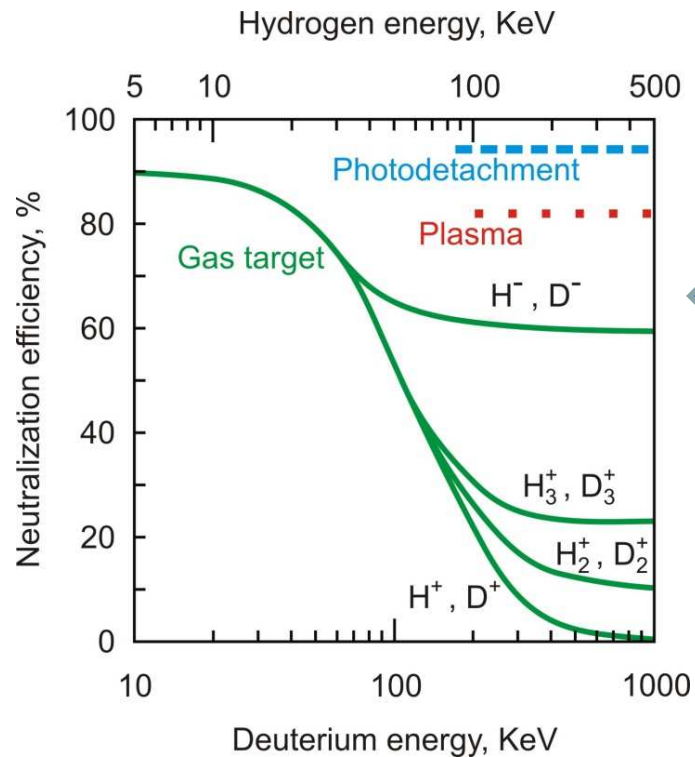
RFX



Алкатор С-мод

Инжекторы ИЯФ успешно работают в Европе, России и Америке

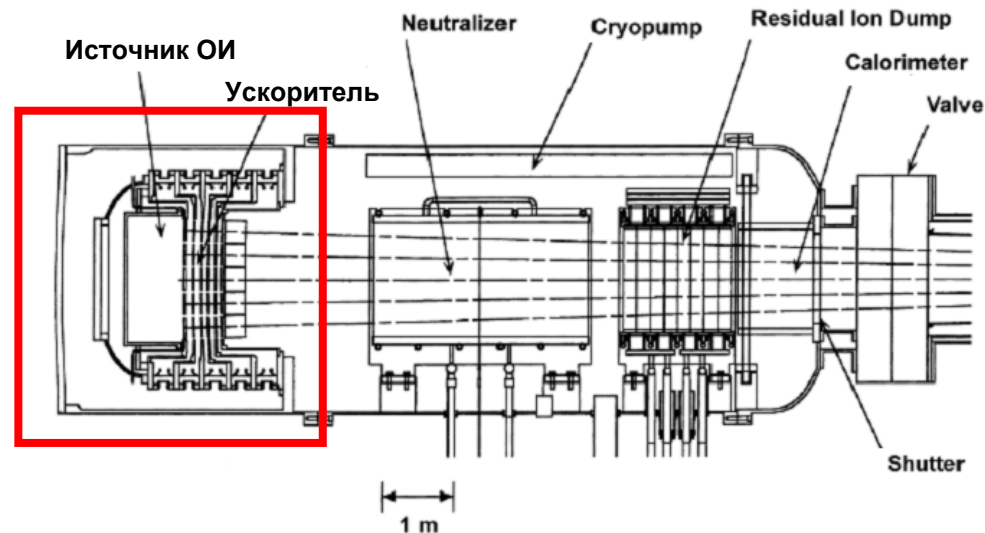
Отрицательные ионы необходимы для инъекции атомов высокой энергии в установки УТС



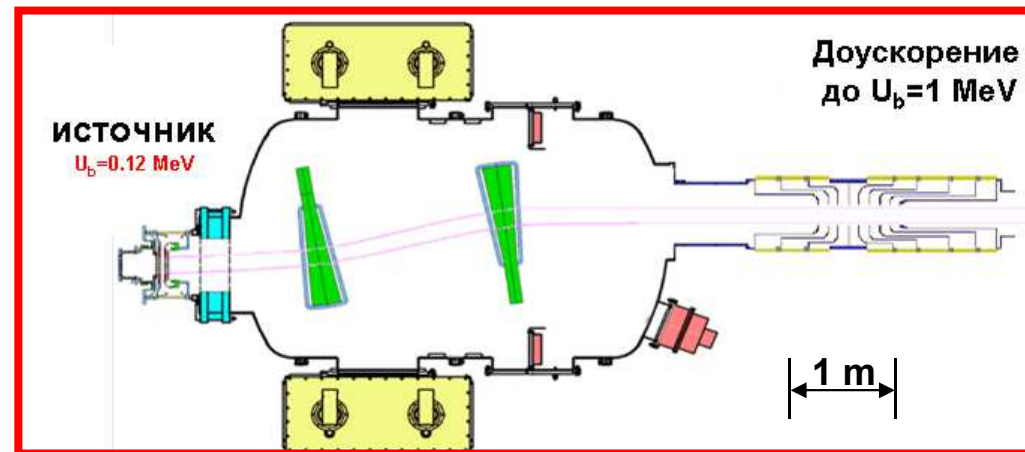
Эффективность получения атомов водорода при перезарядке в различных мишенях

При энергиях более 100 кэВ/нуклон конверсия положительных ионов неэффективна

Схема получения пучков ОИ с энергией 1 МэВ

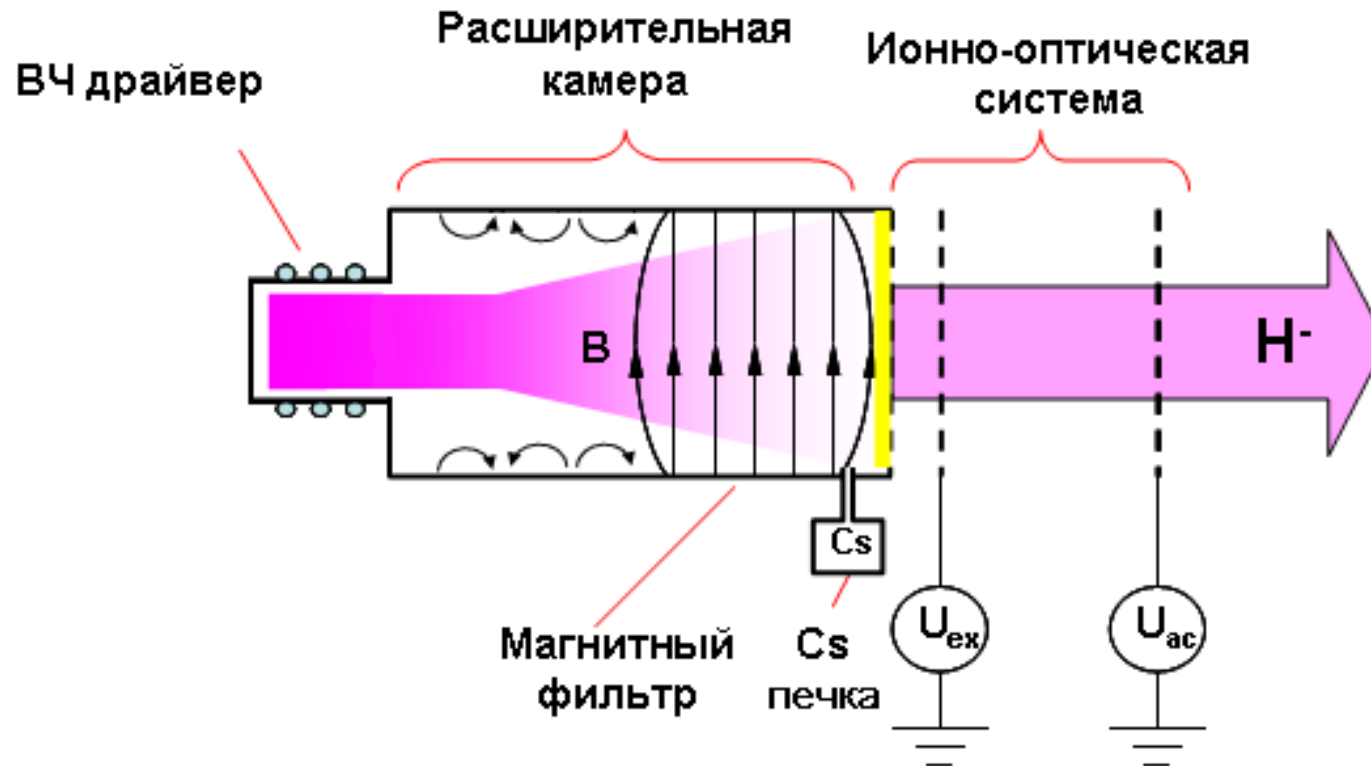


Одноступенчатая (традиционная) схема ускорения пучка ОИ



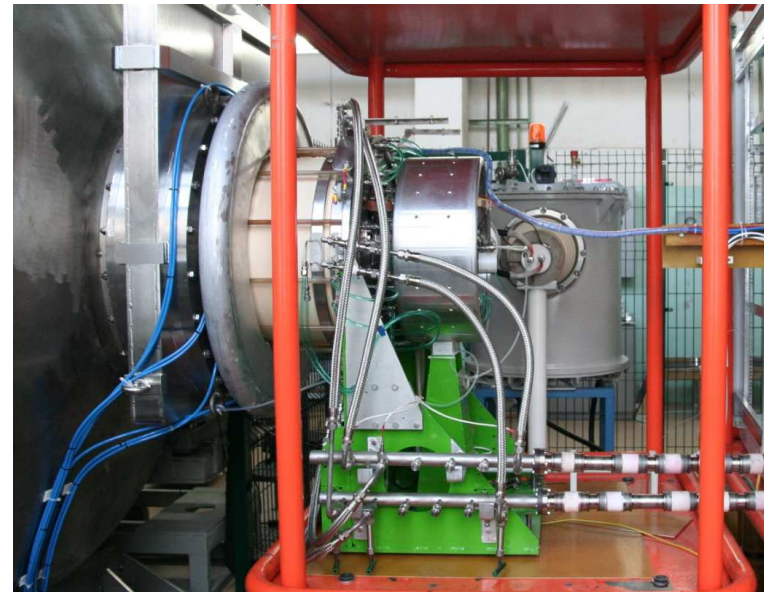
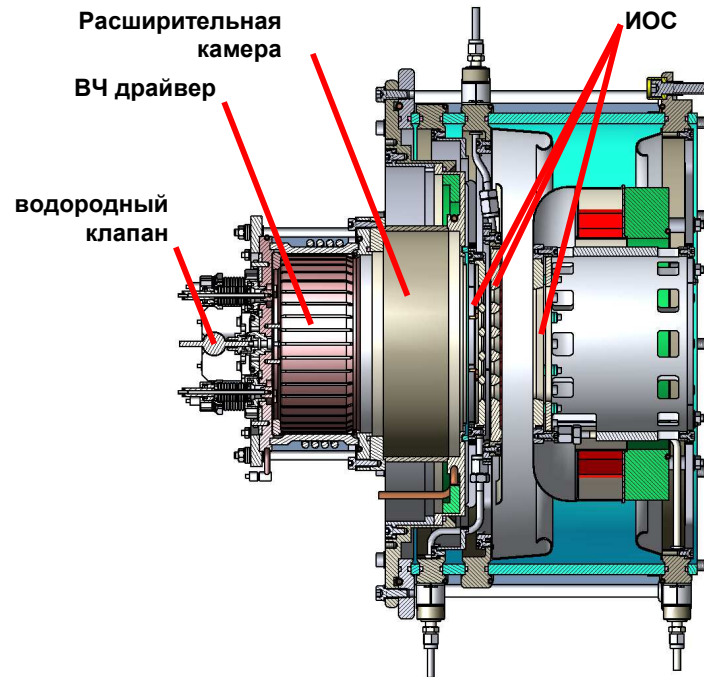
Двухступенчатая схема ускорения пучка ОИ - ИЯФ

Принцип работы ВЧ источника H-



- Плазма создается в ВЧ драйвере и через расширительную камеру направляется на поверхность электрода, на котором генерируются отрицательные ионы
- Образующиеся ионы H⁻ вытягиваются и формируются в пучок с помощью ионно-оптической системы
- Увеличение поверхностной генерации ионов H⁻ обеспечивается за счет адсорбции цезия на поверхности плазменного электрода

Источник 1.5 А ИЯФ



Конструкция источника

Источник на испытательном стенде

основные системы источника: напуск водорода, ВЧ драйвер, расширительная камера, ИОС, магнитная система, цезиевая система, система активного контроля температуры плазменного и вытягивающего электрода

Ионо-оптическая система



Геометрия ИОС

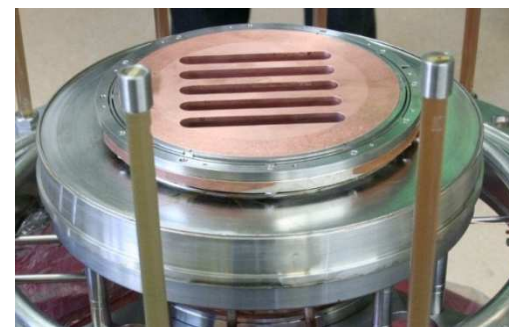
Эмиссионные отверстия	21 x \varnothing 1.6 см = 42 см ²
Область эмиссии	140 см ²
Вытягивающий зазор	12 кВ / 5 мм
Ускоряющий зазор	105 кВ / 49 мм
Длина ИОС	75 мм
Поперечное магнитное поле	12-18 мТ



Плазменный электрод (ПЭ) с 21 отверстием

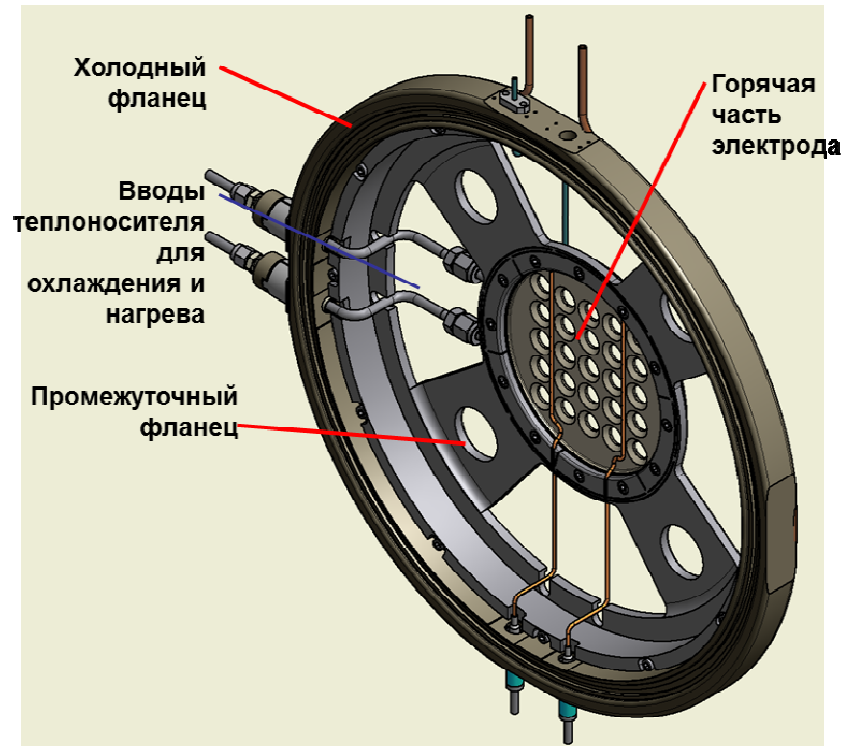


Вытягивающий электрод (ВЭ) с 25 отверстиями



Ускоряющий электрод (УЭ) с 5 щелями

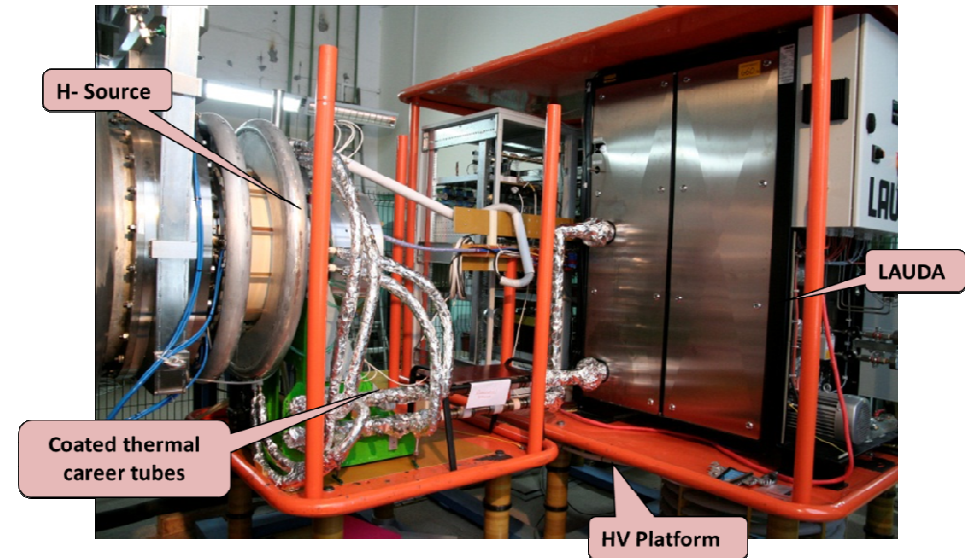
Контроль температуры электродов ИОС



Конструкция нагреваемого плазменного электрода

Рабочая часть электродов прогревается и охлаждается прокачкой нагреваемого (до 250°C) теплоносителя

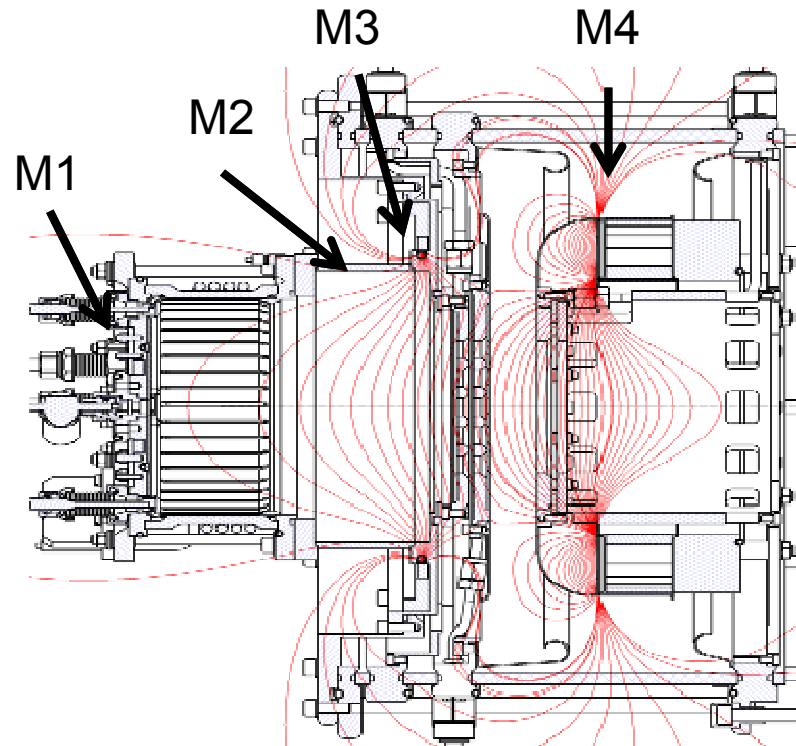
Пружинные пазы в промежуточном фланце обеспечивают сохранение соосности отверстий сеток ИОС при их нагреве и тепловом расширении



Внешняя система термостабилизации

Магнитная система

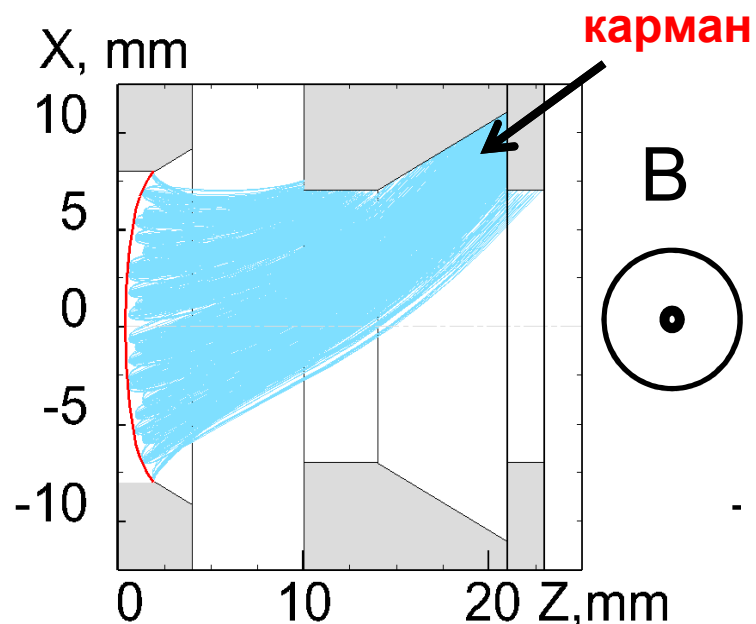
Фильтрует электроны в расширителе, выводит сопутствующие электроны на 10 кВ электрод, повышает ВВ прочность ИОС



M1 - Магниты ВЧ драйвера, M2 – Магниты расширительной камеры
M3 - Магнитный фильтр, M4 - Корректирующий магнит

Нет магнитов внутри электродов ИОС - можно прогревать электроды 25

Отклонение электронов, вытягиваемых совместно с ионами



В отверстиях вытягивающего электрода сделаны карманы
для улучшения поглощения электронов

При оптимальных условиях (положение границы плазмы, T_e)
вытягиваемые электроны перехватываются на вытягивающий
электрод с потенциалом 10 кВ

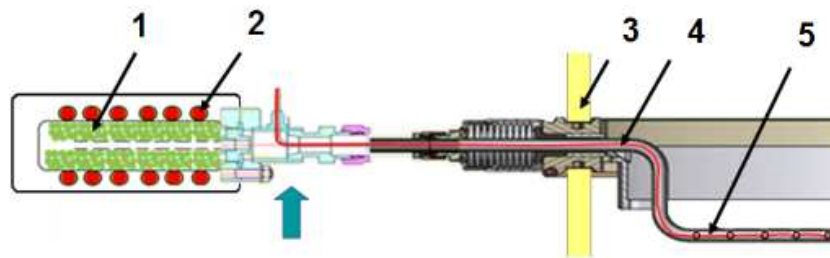
Система подачи цезия

Для выделения цезия используются таблетки (смесь хромат цезия + титан)

Нагрев линии подачи цезия осуществляется **внутренним термокабелем**

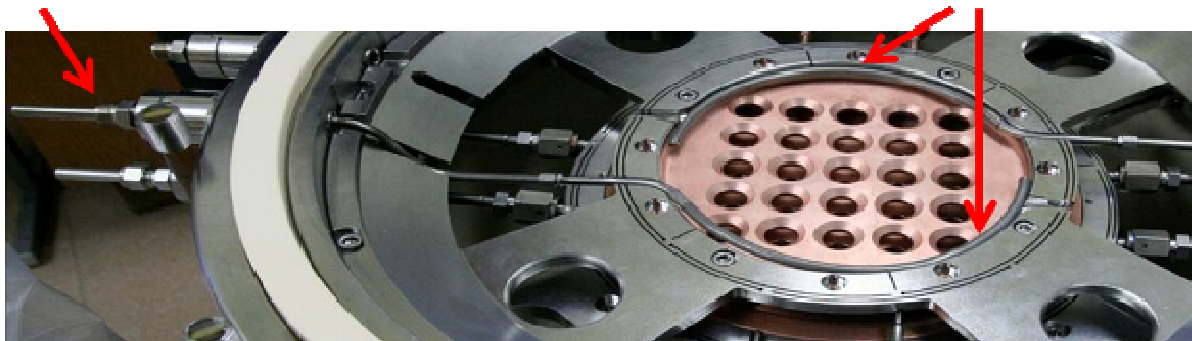
Цезий подается непосредственно на поверхность плазменного электрода с помощью распределительной трубки с отверстиями

Схема подачи цезия в источник



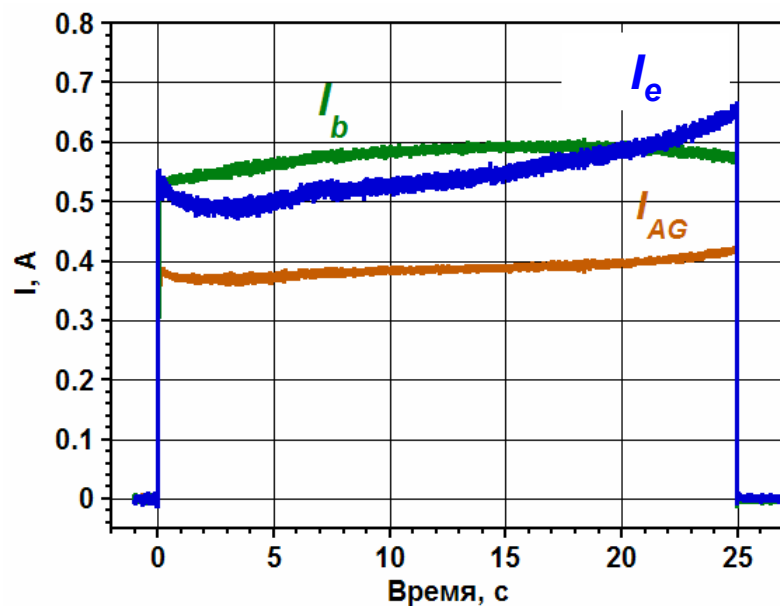
Ввод цезия

Распределительная трубка с отверстиями



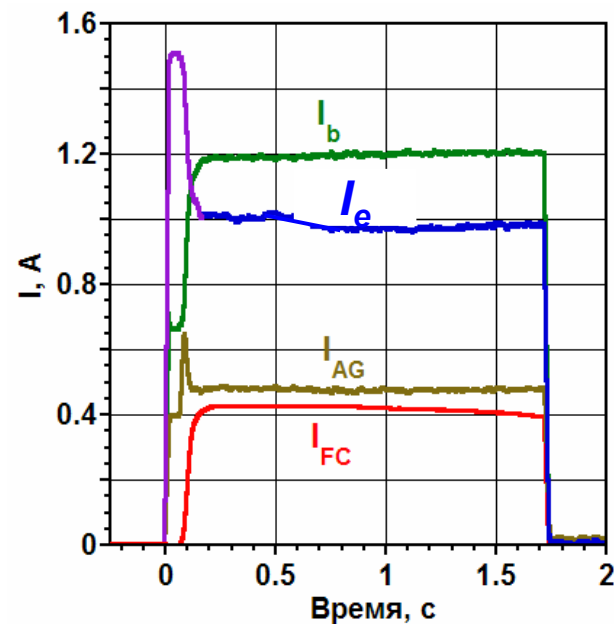
Осциллограммы пучка ионов H- в 25 сек импульсах

Мощность ВЧ ~17 кВт



Ток пучка $I_b = 0.6$ А, 82 кэВ
стабилен в течение 25 сек
импульса

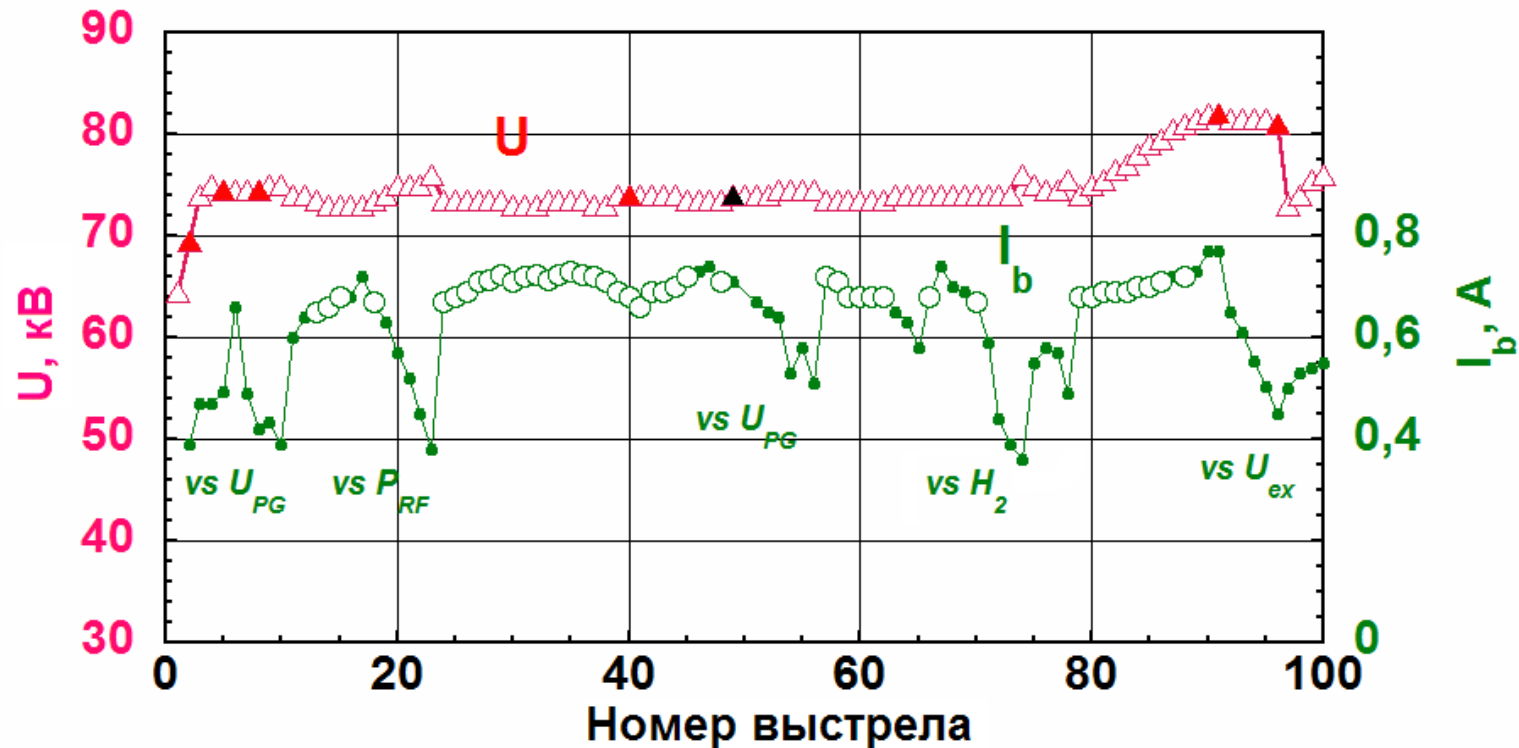
Мощность ВЧ ~34 кВт



Ток пучка $I_b = 1.2$ А, 85 кэВ
стабилен в течение 2 сек
импульса

Ток сопутствующих электронов сравним с током пучка $I_e / I_b \sim 1$

Стабильность работы



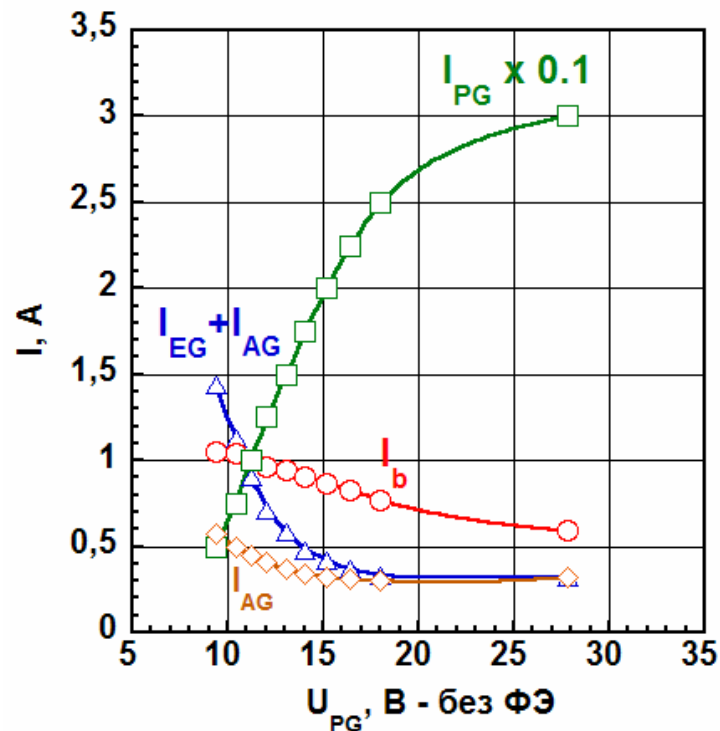
Изменение I_b тока пучка (U - полное напряжение ИОС) в ходе испытаний
7 импульсов с пробоями обозначены треугольными маркерами

Несмотря на существенное варьирование параметров источника при
возврате к рабочим параметрам ток пучка восстанавливается до
стандартного значения 0.7 А

Цезиевое покрытие плазменного электрода стабильно!

Уменьшение тока сопутствующих электронов

Увеличение U_{PG} приводит к быстрому уменьшению тока вытягиваемых электронов (зависимость $I_e \approx I_{AG} + I_{EG}$, I_{AG}), а ток пучка I_b спадает менее существенно.



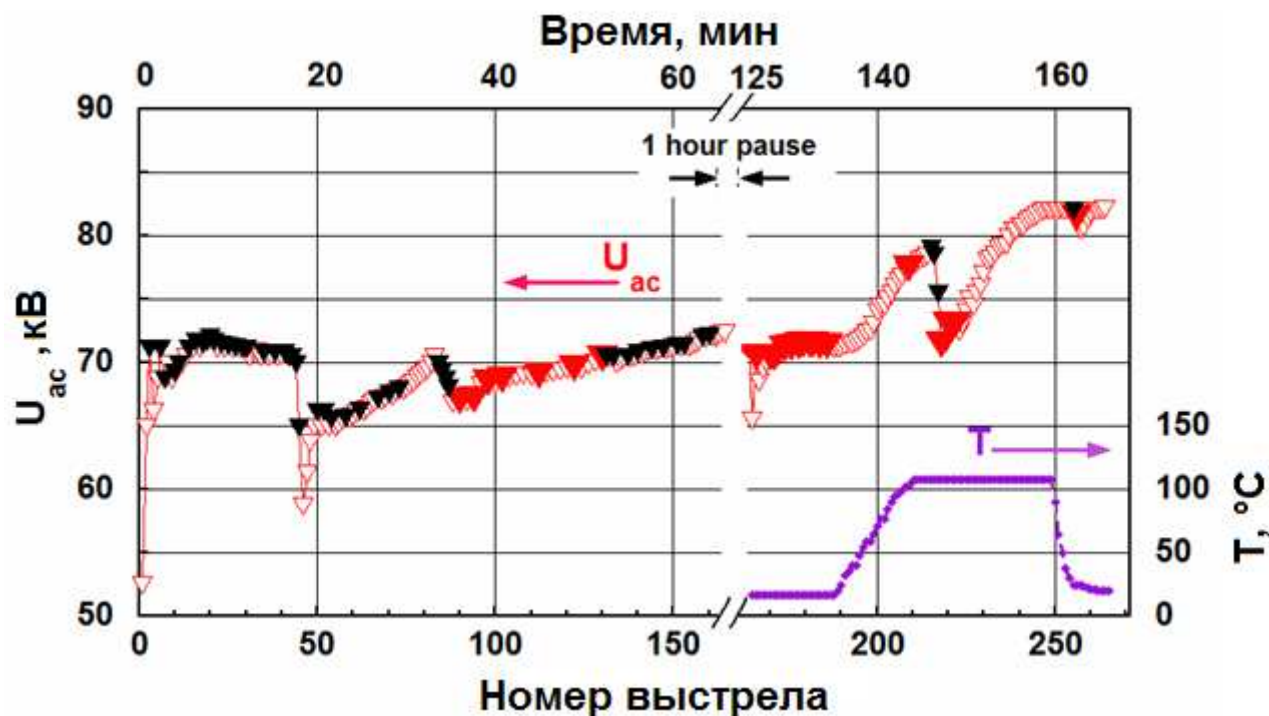
максимальный ток пучка на выходе из ИОС составил ~ 1 А

при увеличении $U_{PG} \sim$ от 9 до 12 В
ток **сопутствующих электронов**
снижается более чем в 2 раза до
величины $\leq 0,6$ А

Зависимость от потенциала
смещения на плазменном
электроде

Влияние нагрева электродов ИОС на ВВ прочность источника - эксперимент

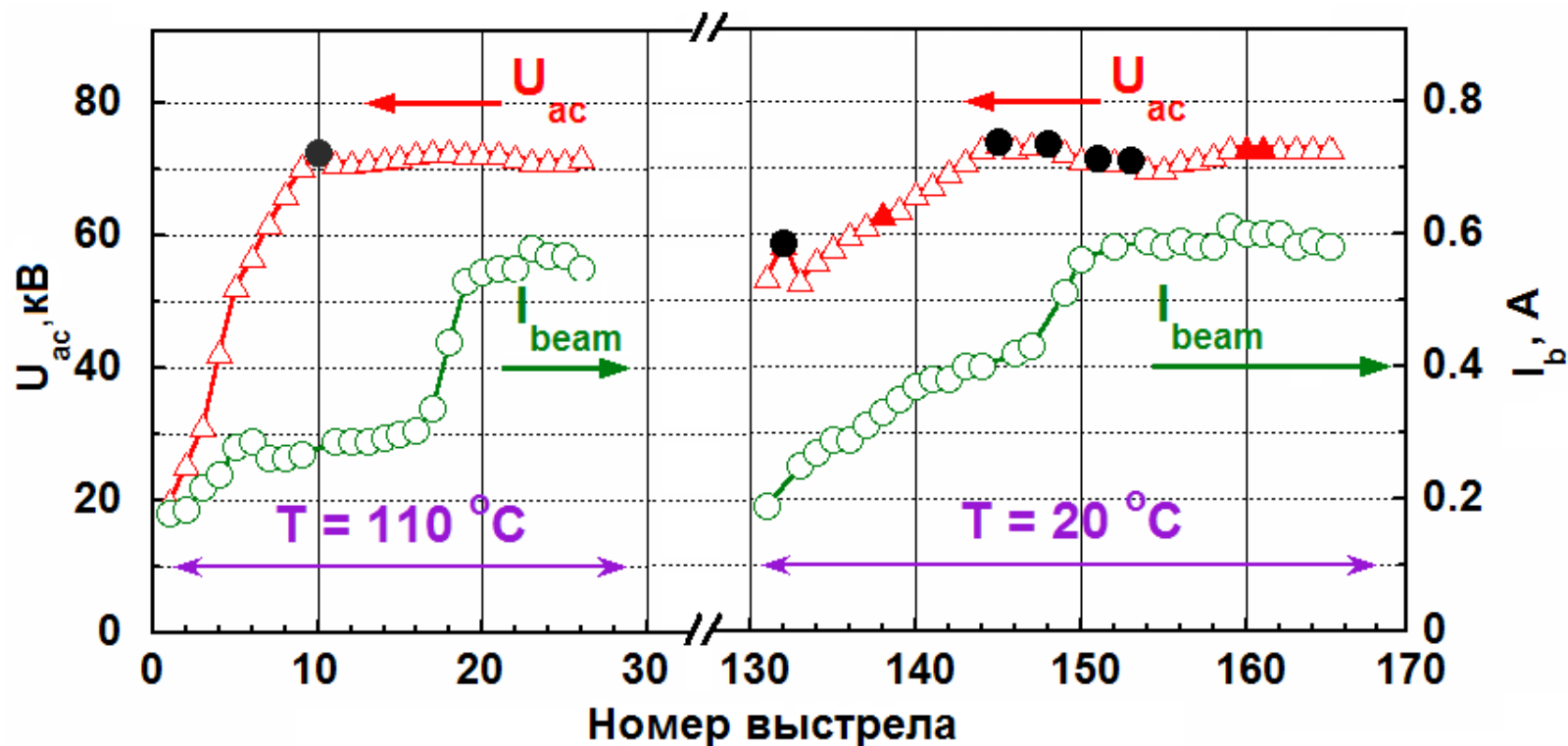
Ускорение начальной тренировки ускоряющего зазора (без пучка)



Нагрев электродов позволил быстро поднять ускоряющее напряжение с 72 кВ до 82 кВ

Нагрев электродов ИОС и его влияние на ВВ прочность источников - эксперимент

Начальная тренировка ускоряющего напряжения с 0.6 А пучком



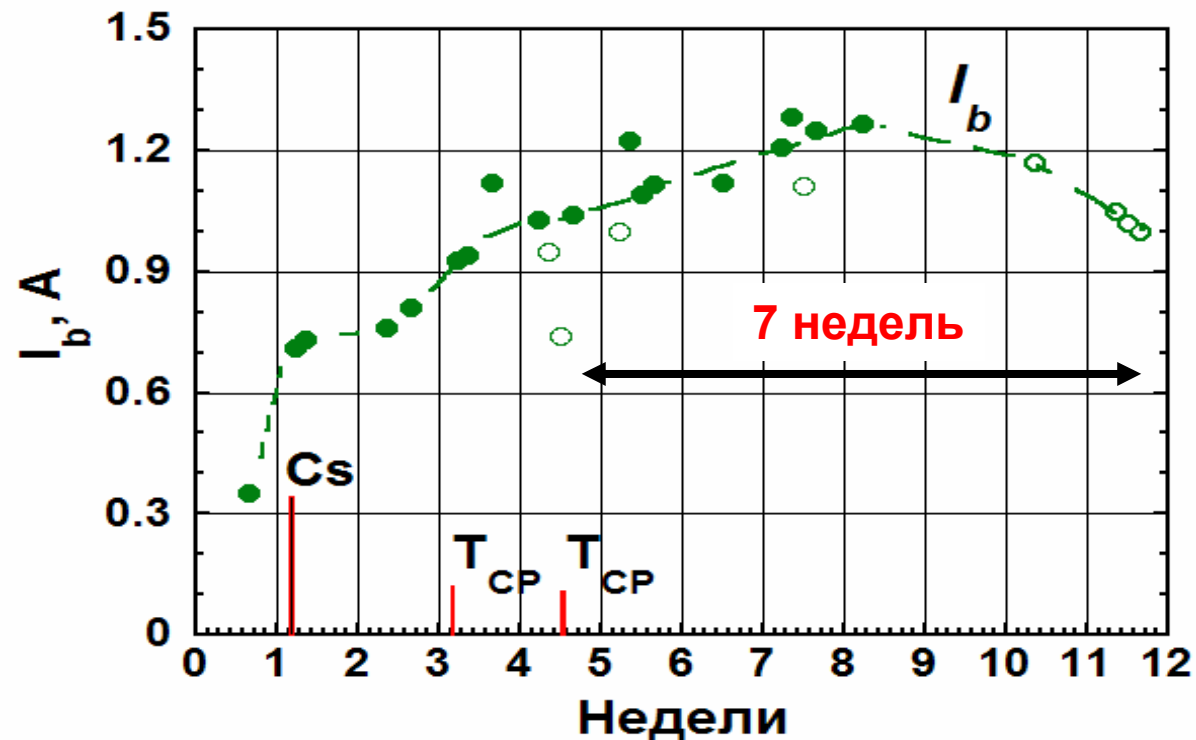
С нагревом

80 кВ пучок получен после
19 тренировочных выстрелов, один
из которых с пробоем

Без нагрева

80 кВ пучок получен после
31 тренировочных выстрелов, восемь
из которых были с пробоями

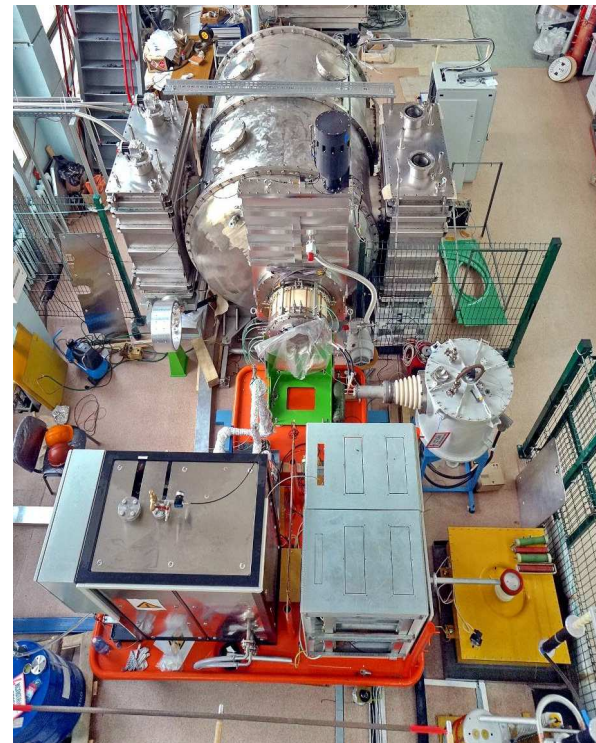
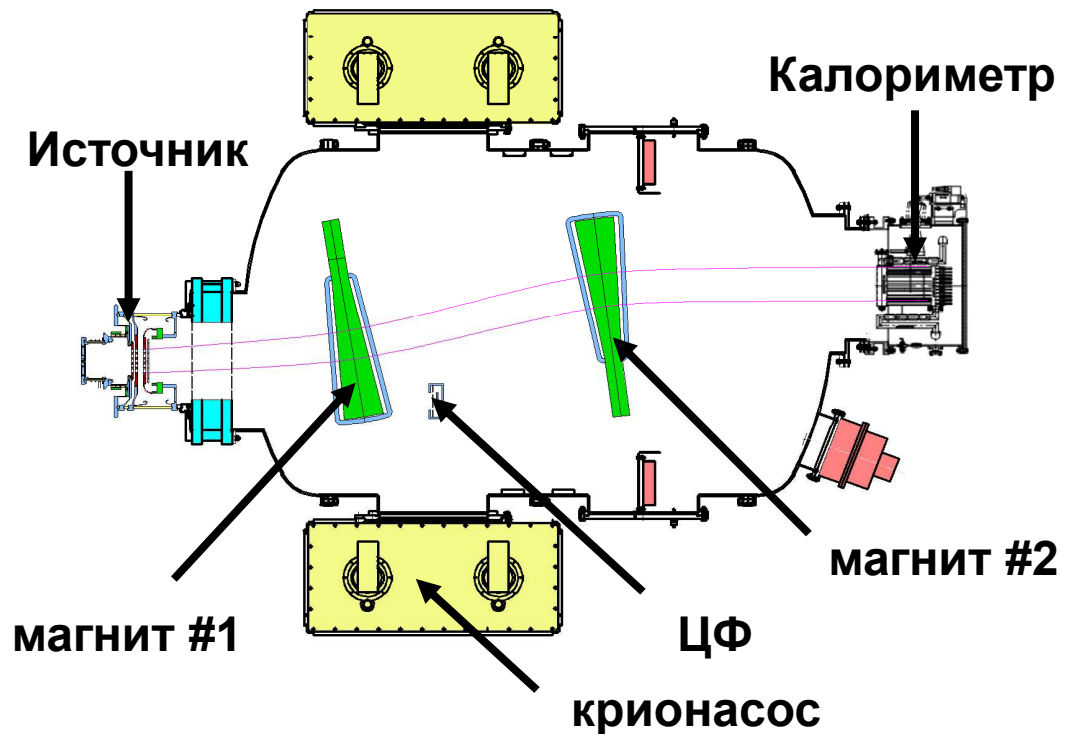
Продолжительность цезиевого эффекта после однократного вывода цезия



Эволюция тока пучка отрицательных ионов в течение 12-недельного цикла

Повышенная генерация пучка ОИ с током >1 А поддерживается в течение **7 недель** работы после подачи цезия в распределительную трубку

Транспортировка пучка 100 кВ через LEVT



Источник ионов и область транспортировки пучка откачиваются крионасосами

Поворотные магниты обеспечивают параллельное смещение и фокусировку пучка

Прямые измерения пучка с помощью цилиндра Фарадея и калориметра

Транспортировка пучка 100 кВ через LEBT



LEBT

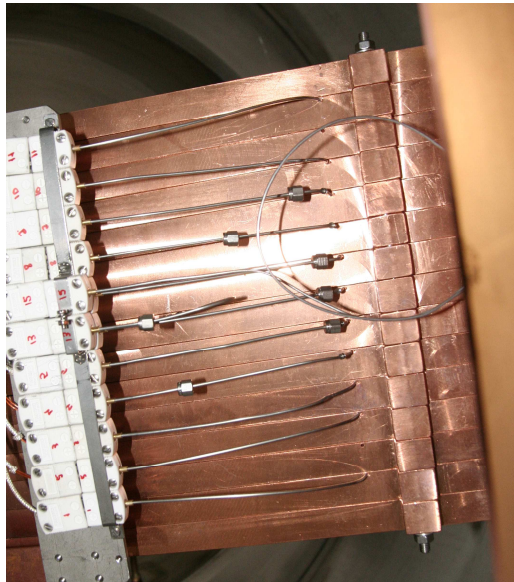
Постоянные магниты обеспечивают магнитное поле 21.5 мТ

Изменение поля с помощью магнитных катушек (15.5-27.5 мТ) позволяет корректировать траекторию пучка (смещение +-24 см)

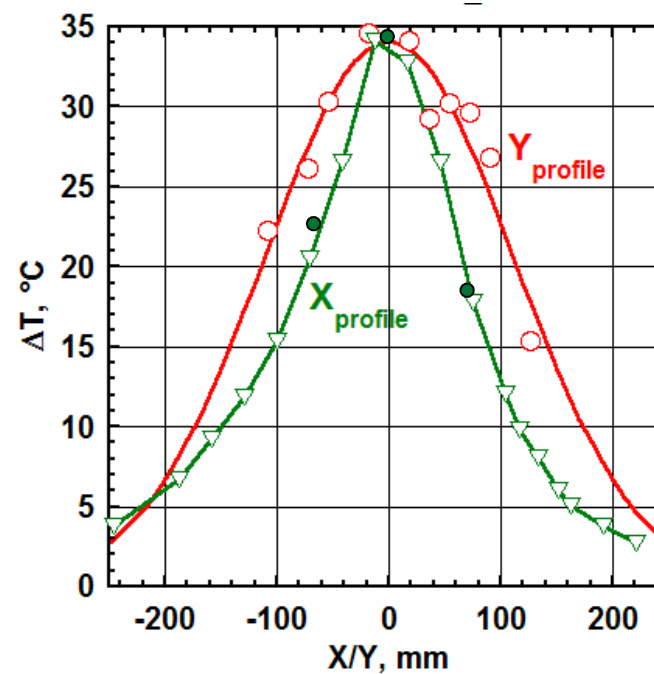
Прямые измерения пучка с помощью цилиндра Фарадея и калориметра

Транспортировка пучка 100 кВ на расстояние 3.5

М



термопары калориметра



температурный профиль пучка на калориметре

Для измерения профиля пучка на калориметре установлено 11 термопар по вертикали и 3 по горизонтали.

Более детальное измерение профиля по оси X проводилось путем сканирования пучка полем первого магнита

Разрушение пучка при транспортировке через LEBT

3 высокоэнергетичные группы в области калориметра

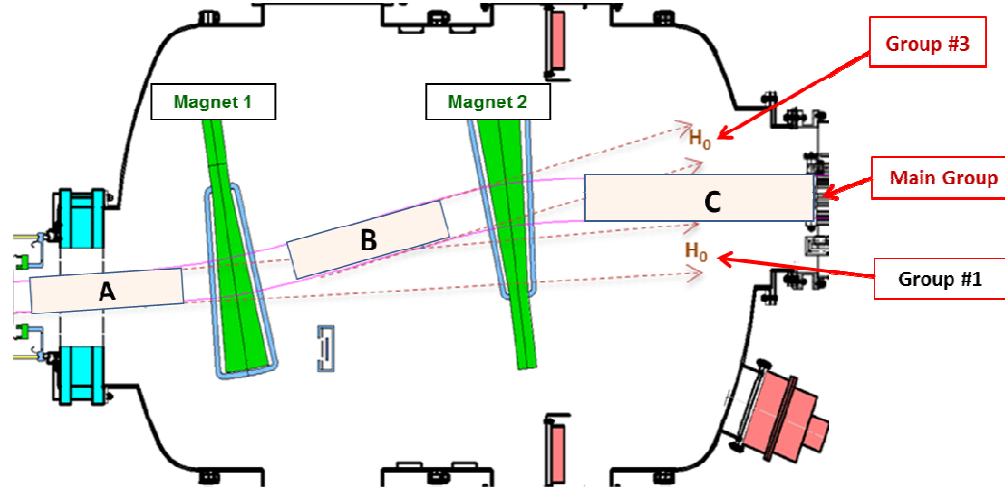
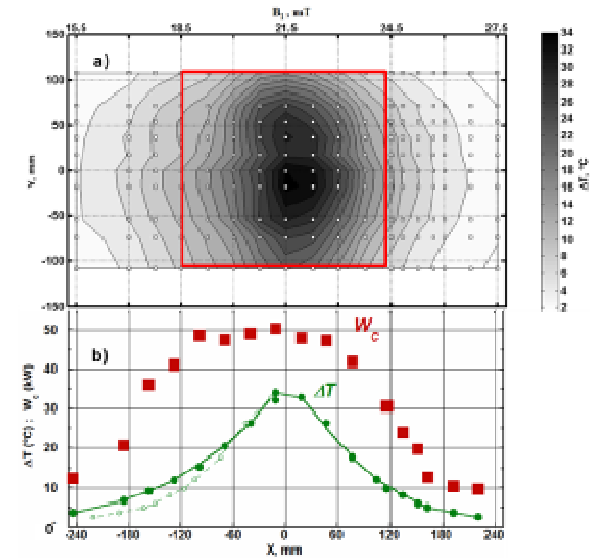


Схема транспортировки пучка через LEBT

Профиль соответствует группе 2

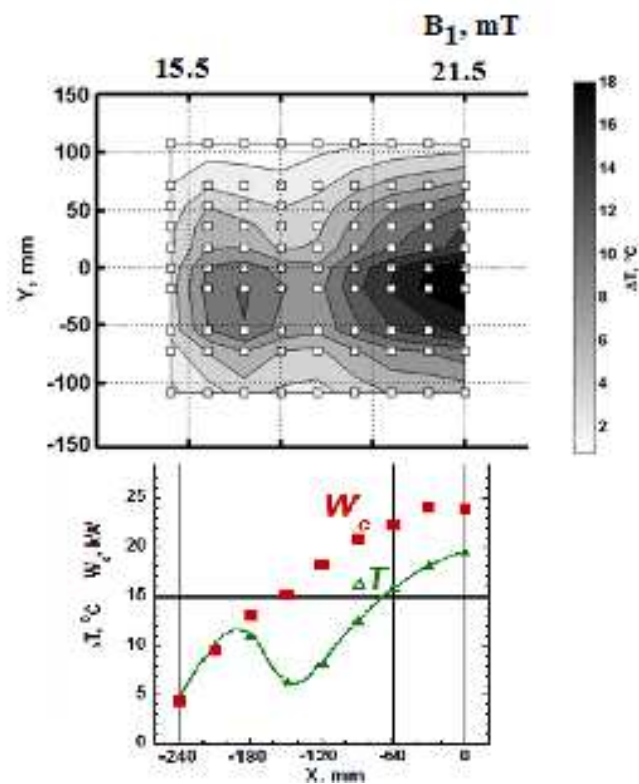


vacuum $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ Pa

Группу 3 почти не видно на фоне группы 2

Проявление группы 3 при плохом вакууме LEBT

Профиль соответствует группам 2 и 3



vacuum $\sim 7 \cdot 10^{-3}$ Pa

группа 3 составляет 15% от группы 2

Принципиальная схема 1.5 А , 1 MeV эксперимента в зале АМБАЛ

