

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Разработка и исследование лазерно-плазменного генератора многозарядных ионов для тяжелоионного инжектора И-3, И-4

Выступающий: А. А. Посев

Руководитель: д.ф.-м.н. Ю. А. Сатов

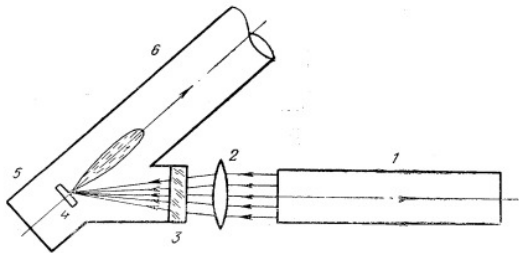
Работа выполнена в НИЦ «Курчатовский институт»

Москва, 2025

Актуальность разработки лазерно-плазменного источника ионов определяется широтой применения ускоренных ионных пучков:

- генерация экстремальных состояний вещества
- моделирование радиационных повреждений в электронных компонентах и материалах
- модификация материалов и ионная имплантация
- ионная лучевая терапия
- управляемый термоядерный синтез с помощью ускоренных пучков тяжелых ионов

Принципиальная схема лазерно-плазменного источника ионов



- ① – лазерная система
- ② – фокусирующая система
- ③ – входное окно
- ④ – мишень
- ⑤ – вакуумная камера
- ⑥ – выводной канал

(Быковский Ю.А. и др. Патент 324938, 1969)

Возможности лазерно-плазменного источника ионов:

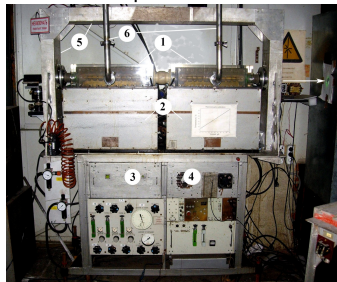
- возможность оперативно менять мишень и условия ее облучения;
- широкий выбор материала мишени (различные химические элементы и агрегатные состояния);
- высокая степень ионизации частиц;
- высокая плотность расширяющейся плазмы позволяет извлекать сильнооточный пучок короткой длительности;

- Разработка лазерно-плазменного источника ионов на основе импульсно-периодического лазера «МАЛЫШ» до возможности эффективной работы с ускорителями И-3, И-4 в области прикладных задач.
- Разработка методики восстановления энергетического спектра разлета ионов (включая соответствующие компьютерные коды) позволяющей проводить мониторинг характеристик ионов во время работы источника и задавать входные данные для программ компьютерного моделирования физики пучков ионов.

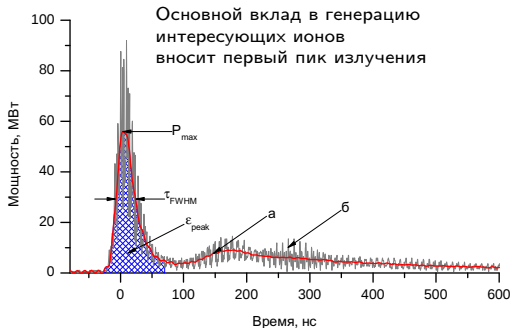
- 1 Реализовать контроль и анализ параметров лазерного импульса в импульсно-периодическом режиме работы лазерной установки для получения оптимальных условий по мощности и длительности излучения, воспроизводимости параметров с максимальным ресурсом наработки.
- 2 Изучить энергетические и зарядовые распределения ионов углерода в лазерной плазме и найти условия облучения для достижения необходимых характеристик пучка для инжекции в ускорители И-3, И-4.
- 3 Произвести ускорение пучка ионов углерода в ускорителях И-3, И-4.
- 4 Разработать программное обеспечение для обработки исходных экспериментальных данных, для задания входных данных для программ численного моделирования Kobra3-INP и Dynamion.

Импульсно-периодический CO₂-лазер

Лазер «Малыш»



- 1 – электроразрядные модули,
2 – генераторы импульсного напряжения,
3 – вакуумно-газовый блок,
4 – блок запуска и синхронизации,
5 – рама резонатора,
6 – трубопроводы контура охлаждения и регенерации газовой смеси.

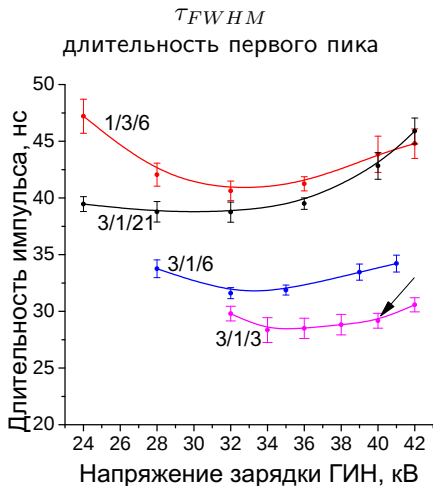
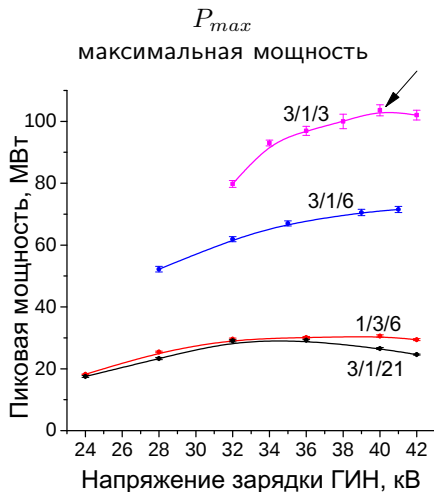


Основной вклад в генерацию интересующих ионов вносит первый пик излучения

Временная форма импульса излучения CO₂-лазера:

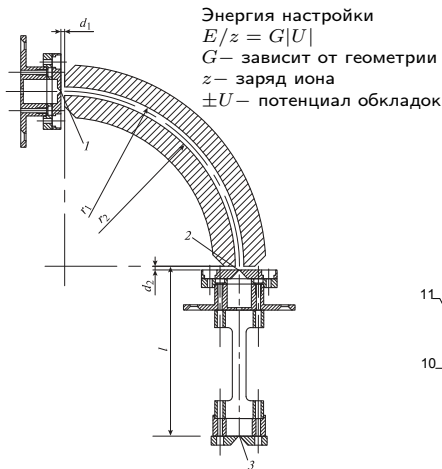
- а – усредненная по пиковой структуре,
б – оцифрованная осциллограмма,
 $E_{\text{имп}}$ – энергия в импульсе,
 τ_{FWHM} – длительность импульса на полувысоте,
 P_{max} – пиковая мощность,
 ϵ_{peak} – доля энергии в первом пике

Оптимизация состава лазерной смеси $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He}$



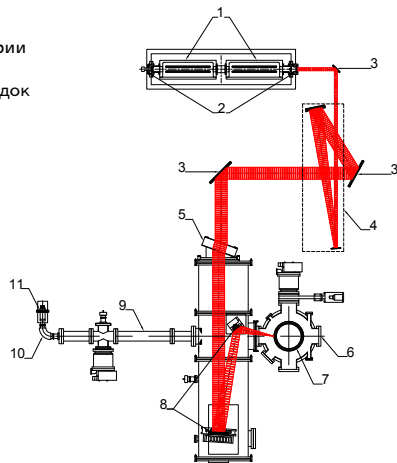
- Оптимизация условий работы импульсно-периодического CO_2 -лазера в режиме свободной генерации с помощью схемы контроля параметров излучения позволила создать генератор с удельной мощностью излучения 190 МВт с литра активного объема в импульсе с длительностью 28 нс на полувысоте, что является рекордным по литературным источникам.
- Создан лазерный генератор с мощностью излучения до 100 МВт и энергией до 10 Дж работающий с частотой повторения 0.5 Гц для широкого круга применений.
- Реализован контроль и анализ лазерных параметров в импульсно-периодическом режиме работы, обеспечена их воспроизводимость.

Времяпролетная методика исследования плазмы



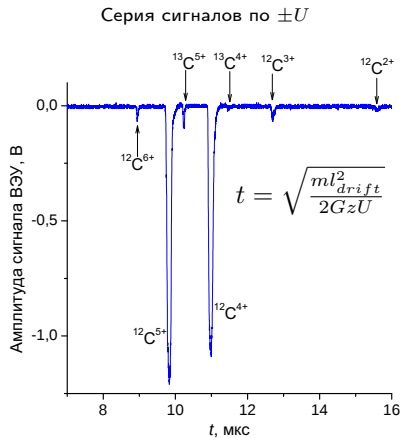
Эскиз цилиндрического дефлектора:

1 — входная щель; 2 — промежуточная щель;
3 — выходная щель; $r_1 = 102.5$ мм,
 $r_2 = 97.5$ мм — радиусы внешнего и внутренне-
го электродов; l — расстояние от выходной щели
до края электродов; d_1, d_2 — зазоры.

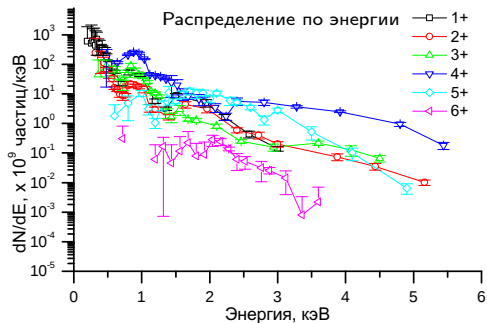
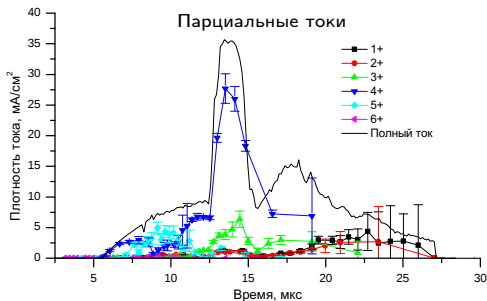


1 — разрядные модули, 2 — зеркала резонатора,
3 — поворотные зеркала, 4 — зеркальный экспан-
дер, 5 — входное окно, 6 — вакуумная камера,
7 — мишень, 8 — объектив, 9 — дрейфовая труба,
10 — электростатический дефлектор, 11 — вто-
ричноэлектронный умножитель.

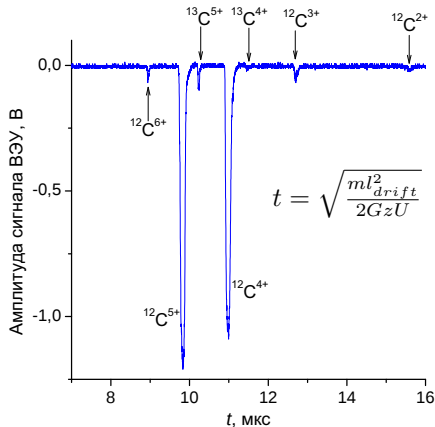
Времяпролетная методика исследования плазмы



Сигнал ВЭУ для ионов углерода.
Амплитуда, умноженная на коэффициент
вторичной эмиссии для динода ВЭУ,
пропорциональна количеству частиц.



Вычисление времени вылета ионов



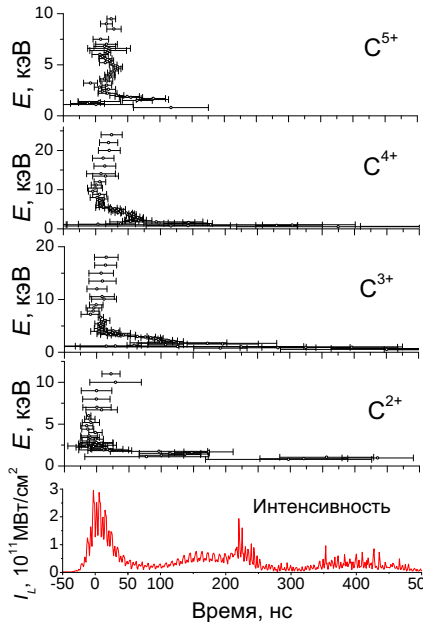
Сигнал ВЭУ для ионов углерода.
Время прилета связано с зарядовым состоянием и потенциалом электродов анализатора.

- Проводятся измерения времени пролета со вставкой $l_{вст}$ в дрейфовую трубу и без нее.
- Вычисление средней за пролет скорости данного иона v и длины дрейфа l_{drift} :

$$\begin{cases} vt_{изм} = l_{drift} \\ vt_{вст} = l_{drift} + l_{вст} \end{cases}$$

- Через соотношение $E = \frac{mv_{ан}^2}{2} = GzU$ известна скорость ионов. Расчетное время прилета $t_{расч} = \frac{l_{drift}}{v_{ан}}$.
- Разность $t_{изм} - t_{расч}$ дает время вылета соответствующих ионов, синхронизованное с импульсом лазерного излучения.

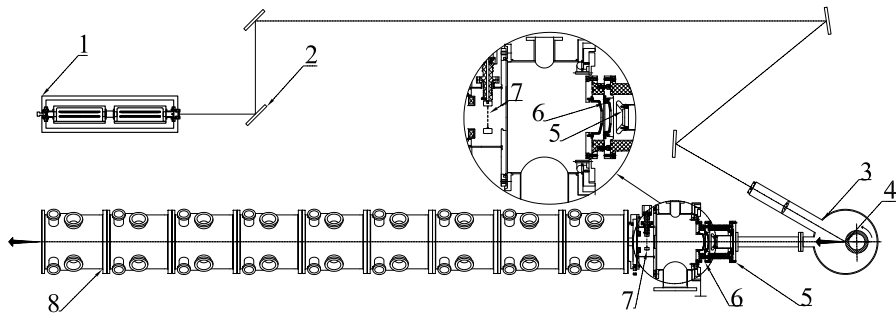
Вычисление времени вылета ионов



На графиках представлена разность $t_{\text{изм}} - t_{\text{расч}}$ для ионов $\text{C}^{2+} - \text{C}^{5+}$

- Низкоэнергетическая группа ионов генерируется на всей протяженности облучения в течение 500 нс
- Высокоэнергетические ионы возникают преимущественно во время пика облучения.
- Разброс времен вылета минимален для высокоэнергетических многозарядных ионов.
- Для ионов низкой энергии, с низким зарядовым состоянием, интервал вылета максимален.

- Метод диагностики ионной компоненты потока лазерной плазмы, основанный на одновременной регистрации сигналов времяпролетного анализатора ионов и детектора формы лазерного импульса. Он позволяет получить не только распределение частиц по зарядовым состояниям и парциальные токи для каждого заряда, но и времена вылета ионов из мишени на масштабе лазерного импульса, что дает уникальную возможность уточнить энергии генерируемых частиц каждого заряда. Применение разработанного метода позволяет получить как информацию о процессах генерации ионов в плазме, так и информацию, необходимую для формирования пучка ионов для дальнейшей инжекции в ускоритель. Метод защищен патентом Российской Федерации.

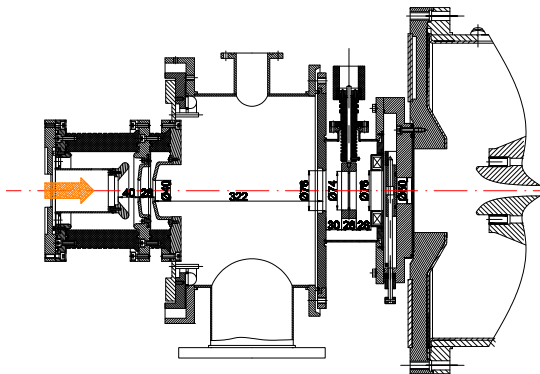


1 – лазер, 2 – поворотные зеркала, 3 – вакуумная камера, 4 – мишень,
5,6 – электроды системы извлечения, 7 – электростатическая сеточная линза,
8 – ускоряющая структура ПОКФ.

И-4 – ускоряющая секция ПОКФ с рабочей частотой 81.36 МГц, способная по расчетам при проектировании ускорять сильноточный (десятки миллиампер) пучок ионов с отношением $z/A \geq 1/3$ до энергии 1.6 МэВ/н.

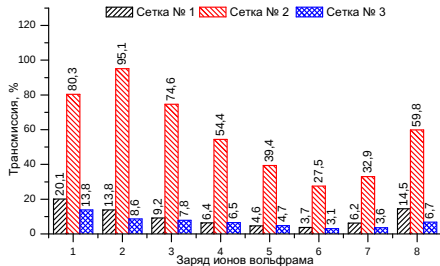
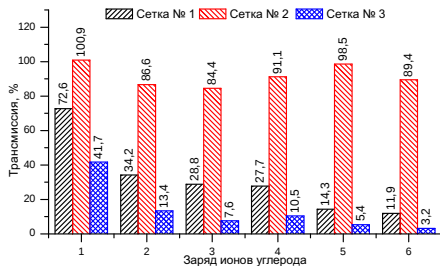


Сетка в положительном электроде системы извлечения



Трехэлектродная система извлечения пучка и электростатическая линза. Стрелкой показано направление падающей плазмы. Справа показано начало ускоряющей структуры.

Доля прошедших ионов углерода и вольфрама с разным зарядом для разных сеток



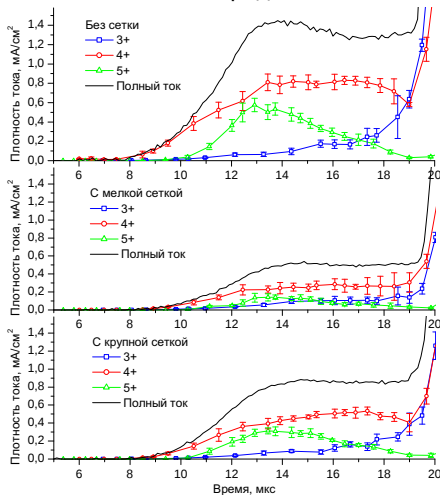
Параметры сеток

Сетка	Прозрачность %	Период мкм
№ 1 Мелкая	90	500
№ 2 Крупная	96	2000
№ 3 Самая мелкая	98	83

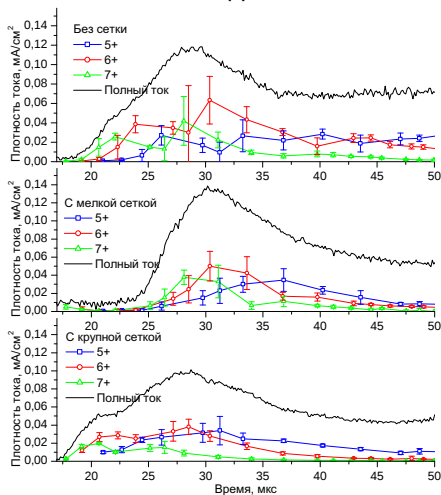
Потери увеличиваются

- с увеличением заряда иона
- с уменьшением периода сетки
- для тяжелых ионов

Углерод

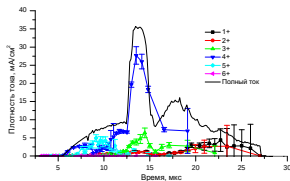


Вольфрам

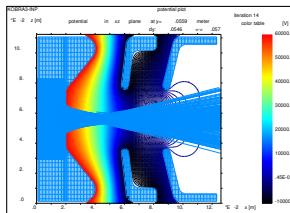


Плотность тока лидирующей части пучка ионов углерода и вольфрама при отсутствии сетки, с мелкой сеткой и с крупной сеткой

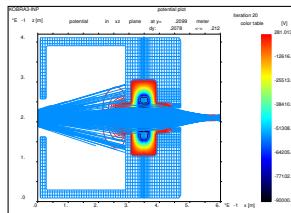
- Экспериментально обнаруженный эффект воздействия на характеристики пучка металлических сеток, устанавливаемых в высоковольтном электроде системы экстракции, связанный с распылением материала сетки и последующим рассеянием ионного пучка на образовавшемся атомарном облаке. Эффект усиливается с увеличением массового числа ионов пучка и с уменьшением периода расположения проволок в сетке, но слабо зависит от геометрической прозрачности сетки. Получены данные для разработки высоковольтной системы экстракции источника ионов.



Плотность парциальных токов ионов углерода

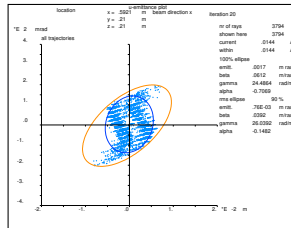


Траектории ионов углерода в системе экстракции.



Траектории ионов углерода в электростатической линзе.

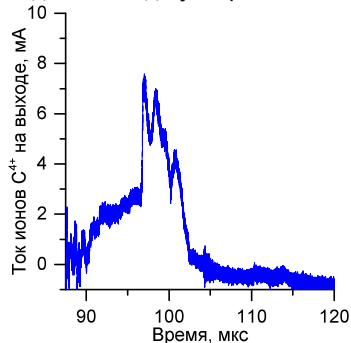
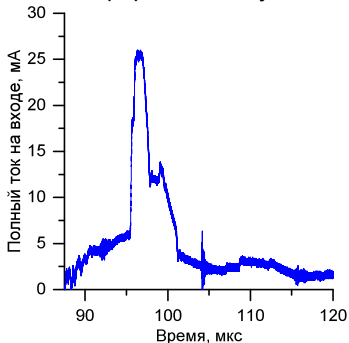
- Из измеренных в эксперименте характеристик плазмы сформированы необходимые входные данные для программы KOBRA3-INP.
- Расчет процесса извлечения пучка и прохождения электростатической линзы.
- Полученный в KOBRA3 результат использован в расчете динамики пучка с помощью программы Dynapion.



Фазовый портрет пучка после прохождения линзы на входе в ускоритель.

Ускорение пучка ионов углерода в И-4

Временная форма тока пучка ионов на входе и выходе ускорителя



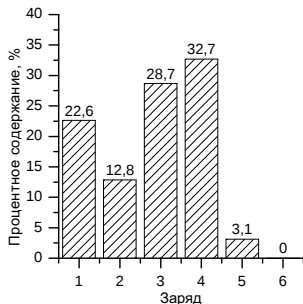
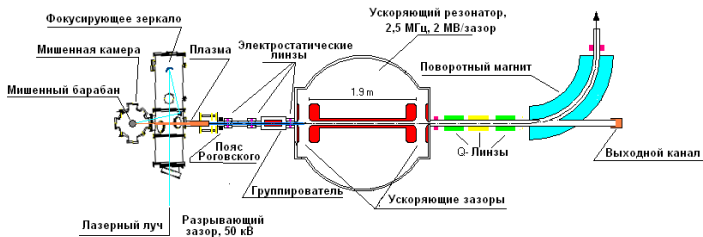
Сравнение результатов расчета с измерениями

Параметр	Расчет	Измерение
Полный ток на входе, мА	14.4	25.8 (максимальное)
ε_{4rms} на входе, мм·мрад	760	560, 520
Полный ток на выходе, мА	5.7	7.8 (максимальное)

- Результаты «сквозного» численного моделирования динамики пучка ионов углерода C^{4+} от плазменной границы до выхода ускорителя-инжектора И-4, проведенного с учетом экспериментально полученного распределения ионов по зарядовым состояниям и энергиям в генерируемой лазерным импульсом плазме.
- Результаты ускорения пучка ионов углерода C^{4+} в ускорителе И-4 при настройках систем ускорителя, установленных на основании «сквозного» моделирования, подтвердившие его правильность.

Облучение кремниевых диодов на ускорителе И-3

Схема установки И-3



- Источник настроен на получение с максимальной долей ионов C^{3+} и C^{4+} .
- Максимальная амплитуда полного тока 120 мА, длительность ≈ 20 мкс на полувысоте.
- Успешно проведены длительные сеансы облучения кремниевых пластин с флюенсом $(1 - 4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Облучение кремниевых диодов на ускорителе И-3



- Облучение для управления временем жизни носителей заряда в полупроводниках
- Уменьшение времени переключения облученных диодов

Параметры облученных кремниевых диодов

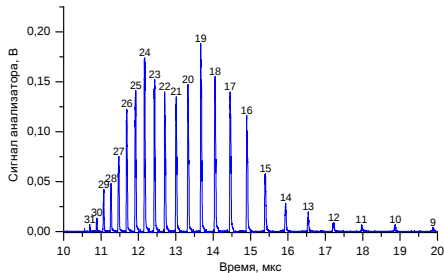
Облучение ионами C^{3+}	t_{rr} , нс	I_R , нА	U_F , В
До облучения	~ 100	< 1	0.81
8.4 МэВ, $F = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$	18 ± 2	3.3 ± 0.3	0.78
8.4 МэВ, $F = 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$	2.7 ± 0.2	4.5 ± 0.4	0.75
8.7 МэВ, $F = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$	4.9 ± 0.3	1.0 ± 0.1	0.76

t_{rr} – время обратного восстановления диода,

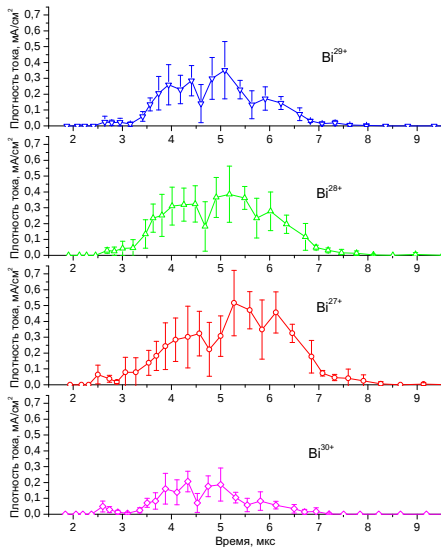
I_R – постоянный обратный ток диода (ток утечки),

U_F – прямое напряжение диода при протекании прямого тока 10 мА.

Применение диагностик для исследования плазмы Bi и других элементов



Сигнал энергоанализатора для ионов висмута с энергией настройки $E = 4.0 \text{ зКэВ}$



Парциальные токи
многозарядной части ионов висмута

- ① Характеристики импульсно-периодического CO_2 -лазера для приложений в области лазерной плазмы. / Ю. А. Сатов, А. В. Шумшуров, А. А. Васильев, А. А. Лосев, А. Н. Балабаев, И. А. Хрисанов, В. К. Рерих // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 3. С. 83—90
- ② Развитие техники времяпролетных измерений в плазме, создаваемой CO_2 -лазером. / Ю. А. Сатов, А. В. Шумшуров, А. А. Васильев, А. А. Лосев, А. Н. Балабаев, И. А. Хрисанов, К. Н. Макаров, В. К. Рерих // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 4. С. 108—114
- ③ Измерение эмиттанса методом pepper-pot на лазерно-плазменном источнике ионов для ускорителя И-4. / А. А. Лосев, Ю. А. Сатов, А. В. Шумшуров, А. Н. Балабаев, И. А. Хрисанов, А. А. Васильев // Ядерная физика и инжиниринг. 2021. Т. 12, № 2. С. 124—128
- ④ Влияние металлических сеток на характеристики ионного пучка в лазерно-плазменном источнике. / Ю. А. Сатов, А. В. Шумшуров, А. А. Лосев, А. Н. Балабаев, И. А. Хрисанов, А. А. Васильев // Приборы и техника эксперимента. 2022. № 1. С. 82—91
- ⑤ Point defect creation by proton and carbon irradiation of $\alpha - \text{Ga}_2\text{O}_3$. / A. Y. Polyakov [и др.] // Journal of Applied Physics. 2022. Т. 132, № 3. С. 035701
- ⑥ Численное моделирование системы извлечения пучка и сеточной электростатической линзы для линейного ускорителя И-4. / А. А. Лосев, Г. Н. Кропачев, Е. Р. Хабибуллина, А. В. Зиятдинова // Ядерная физика и инжиниринг. 2024. Т. 15, № 3. С. 254—258

Зарегистрирован 1 патент на изобретение (№ 2649914 С1).

- Молодежные конференции по теоретической и экспериментальной физике ИТЭФ 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 (Москва);
- X Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (Саров, 17–20 мая 2016 г.);
- XXVI Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2018 (Протвино, 1–5 октября 2018 г.);
- 18th International Conference on Ion Sources (Ланьчжоу, Китай, 1–6 сентября 2019 г.);
- VI Международная конференция ЛаПлаз — 2020 (Москва, 11–14 февраля 2020 г.);
- 19th International Conference on Ion Sources (В дистанционном формате, 20–24 сентября 2021 г.);
- IX Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2023» (Москва, 28–31 марта 2023 г.);
- XXIV Харитоновские тематические научные чтения по проблемам ускорительной техники и физики высоких энергий (Саров, 24–28 июля 2023 г.);
- XIV Всероссийская школа НЦФМ по лазерной физике и лазерным технологиям (Саров, 18–22 сентября 2023 г.);
- XVIII Курчатовская междисциплинарная молодёжная научная школа НИЦ «Курчатовский институт» (Москва, 27–30 мая 2025 г.).

- 1 Метод диагностики ионной компоненты потока лазерной плазмы, основанный на одновременной регистрации сигналов времяпролетного анализатора ионов и детектора формы лазерного импульса. Он позволяет получить не только распределение частиц по зарядовым состояниям и парциальные токи для каждого заряда, но и времена вылета ионов из мишени на масштабе лазерного импульса, что дает уникальную возможность уточнить энергии генерируемых частиц каждого заряда. Применение разработанного метода позволяет получить как информацию о процессах генерации ионов в плазме, так и информацию, необходимую для формирования пучка ионов для дальнейшей инжекции в ускоритель. Метод защищен патентом Российской Федерации.
- 2 Экспериментально обнаруженный эффект воздействия на характеристики пучка металлических сеток, устанавливаемых в высоковольтном электроде системы экстракции, связанный с распылением материала сетки и последующим рассеянием ионного пучка на образовавшемся атомарном облаке. Эффект усиливается с увеличением массового числа ионов пучка и с уменьшением периода расположения проволочек в сетке, но слабо зависит от геометрической прозрачности сетки. Получены данные для разработки высоковольтной системы экстракции источника ионов.
- 3 Результаты «сквозного» численного моделирования динамики пучка ионов углерода C^{4+} от плазменной границы до выхода ускорителя-инжектора И-4, проведенного с учетом экспериментально полученного распределения ионов по зарядовым состояниям и энергиям в генерируемой лазерным импульсом плазме.
- 4 Результаты ускорения пучка ионов углерода C^{4+} в ускорителе И-4 при настройках систем ускорителя, установленных на основании «сквозного» моделирования, подтвердившие его правильность.

- 1 Оптимизация условий работы импульсно-периодического CO_2 -лазера в режиме свободной генерации с помощью схемы контроля параметров излучения позволила создать генератор с удельной мощностью излучения 190 МВт с литра активного объема в импульсе с длительностью 28 нс на полувысоте, что является рекордным по литературным источникам.
- 2 В результате усовершенствования времяпролетной методики диагностики ионных пучков впервые получены экспериментальные данные по моментам генерации (вылета) ионов в плазме углеродной мишени на масштабе импульса облучения, типичного для CO_2 -лазера в режиме свободной генерации, с пиковой плотностью мощности на поверхности мишени $\approx 10^{11}$ Вт/см².

- 1 Создан лазерный генератор с мощностью излучения до 100 МВт и энергией до 10 Дж работающий с частотой повторения 0.5 Гц для широкого круга применений.
- 2 Создан лазерный источник ионов вольфрама W^{7+} с плотностью тока $4.2 \cdot 10^{-2}$ мА/см² и углерода C^{4+} с плотностью тока 27.7 ± 2 мА/см² для инжекторов И-3, И-4.
- 3 Разработана и проверена в большом числе экспериментов, отличающихся типом ионов и плотностями потока излучения в интервале $10^{10} - 10^{13}$ Вт/см², времяпролетная диагностика ионных пучков, основанная на оперативной обработке данных электростатического анализатора, детектора лазерного излучения и коллектора полного тока с помощью разработанного автором компьютерного кода.
- 4 На основе экспериментальных данных получены рекомендации для конструкторской разработки системы экстракции и формирования пучка, связанные с использованием металлических сеток.
- 5 Полученный из лазерно-плазменного источника пучок ионов углерода успешно применен в экспериментах на ускорителе И-3 для имплантации в полупроводники (кремниевые диоды).
- 6 Путем численного моделирования распространения пучка ионов C^{4+} с пиковым током 25.8 мА на входе в инжектор И-4 получено согласование с током на выходе 7.8 мА. Найдено место в системе транспортировки пучка низкой энергии, создающее потери при согласовании с ускорителем.
- 7 Разработан программно-аппаратный комплекс для управления длиной резонатора задающего генератора лазерной системы «Фокус», обеспечивающий работу лазера в режиме одной продольной моды для получения максимальной стабильности интенсивности излучения.