

УТВЕРЖДАЮ
Директор
НИЦ «Курчатовский институт»
Дьякова Ю.А.

4.07. 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт») по диссертации Лосева А.А.
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.18. – «Физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника»

Диссертация Лосева Антона Андреевича на тему «Разработка и исследование лазерно-плазменного генератора многозарядных ионов для тяжелоионного инжектора И-3, И-4» выполнена в подразделении Установка ионного ускорителя И-4 Ускорительного центра Курчатовского комплекса теоретической и экспериментальной физики (ККТЭФ) НИЦ «Курчатовский институт».

В период подготовки диссертации соискатель Лосев А.А. обучался на очном отделении аспирантуры ФГБУ «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», а также работал в том же Институте в должности инженера, а затем – младшего научного сотрудника. В настоящее время работает в подразделении Установка ионного ускорителя И-4 Ускорительного центра Курчатовского комплекса теоретической и экспериментальной физики (ККТЭФ) НИЦ «Курчатовский институт» в должности младшего научного сотрудника.

А.А. Лосев окончил специалитет НИЯУ МИФИ с присвоением квалификации «инженер-физик» по направлению подготовки 140301 «Физика конденсированного состояния вещества» и выдачей диплома № 107724 0154823.

А.А. Лосев прошел обучение в аспирантуре ФГБУ «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по

направлению подготовки 03.06.01. – «Физика и астрономия» с присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь» и выдачей диплома № 107724 3723800. Лосев А.А. Сдал кандидатские экзамены и получил следующие оценки: «иностранный (английский) язык», оценка – отлично; «история и философия науки», оценка – хорошо; по специальности «физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника», оценка – отлично.

Научный руководитель – Сатов Юрий Алексеевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Ускорительного центра Курчатовского комплекса теоретической и экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт».

Доклад Лосева А.А. по диссертационной работе «Разработка и исследование лазерно-плазменного генератора многозарядных ионов для тяжелоионного инжектора «И-3», «И-4» был заслушан и обсужден 20 февраля 2025 г. на заседании семинара «Экспериментальная физика высоких энергий, физика ускорителей заряженных частиц и физико-химические исследования материалов» ККТЭФ НИЦ «Курчатовский институт» (Протокол №13 от 20 февраля 2025 г.).

По итогам обсуждения диссертации принято следующее заключение

Диссертационная работа посвящена созданию лазерно-плазменного источника многозарядных ионов импульсно-периодического действия для линейного ускорителя. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Проведенная модернизация электрической схемы питания разряда и синхронизации модулей позволила выполнить оптимизацию состава смеси $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He}$, уровня электрического вклада в разряд для импульсно-периодического CO_2 -лазера в режиме свободной генерации. В результате достигнута максимальная удельная мощность, снимаемая с активной среды в 190 МВт/л, что является рекордным значением среди известных из литературы для данного типа лазеров. Низкий среднеквадратический разброс значений усредненной выходной мощности при длительной эксплуатации свидетельствует о хорошо воспроизводимых условиях накачки среды и стабильных выходных характеристиках. Реализована методика измерения плотности мощности лазерного излучения в фокальной плоскости объектива с использованием пироэлектрической камеры, обладающей большим динамическим диапазоном, что обеспечивает максимальную точность измерений.
2. Для исследования генерируемой плазмы применена запатентованная времяпролетная методика с задействованием электростатического энергоанализатора. Было разработано программное обеспечение для обработки данных, получаемых с помощью этой методики, которое

проволочек, образующих сетку. При повышении плотности потока излучения на мишени и соответственно увеличении энергии ионов и плотности потока плазмы потери в высокозарядной группе ионов будут возрастать, что необходимо принимать во внимание при разработке источников многозарядных тяжелых ионов.

6. На основе измеренных характеристик пучка было проведено численное моделирование его транспортировки и ускорения с помощью кодов Kobraz-1NP и Dynamion. Впервые на ускорителе И-4 был ускорен пучок ионов углерода, полученный из лазерно-плазменного источника.
7. Выполненные исследования позволили успешно применить лазерно-плазменный источник ионов в прикладных задачах. На установке И-3 были проведены длительные сеансы облучения образцов кремниевых диодов для имплантации ионов углерода в полупроводник, которые показали улучшение частотных и импульсных характеристик диодов за счет формирования центров рекомбинации для управления временем жизни неосновных носителей заряда.
8. Разработанная времяпролетная методика успешно применена при разработке лазерно-плазменного источника ионов для ускорительного комплекса МЦКИ. Исследована плазма ионов висмута при мощности лазерного излучения ≈ 1 ГВт и длительности его импульса на полувысоте 14 ± 2 нс. Содержание ионов в интервале длительностью 5 мкс Bi^{27+} оценивается сверху как $2.8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ за один импульс.

Актуальность темы исследования

В настоящее время проводится множество исследований и прикладных работ с использованием ускоренных пучков ионов в таких областях как:

- генерация экстремальных состояний вещества;
- моделирование радиационных повреждений в материалах для ядерных реакторов;
- тестирование электронных компонентов на радиационную стойкость;
- модификация материалов и ионная имплантация;
- применение в медицине и биологии;
- управляемый термоядерный синтез с помощью ускоренных пучков тяжелых ионов.

В связи с широким применением ускоренных ионных пучков актуальным является и создание ионных источников, являющихся неотъемлемой частью ускорителя.

В большинстве случаев принцип работы источника ионов основан на создании плазмы каким-либо способом и формировании пучка ионов из нее.

учитывает измерение полного тока пучка. Применение усовершенствованной времяпролетной методики и программное обеспечение позволило вычислить времена вылета ионов из плазменного сгустка на масштабе лазерного импульса. Измерены характеристики плазмы ионов углерода и вольфрама, создаваемой импульсами с пиковой плотностью мощности до $7 \cdot 10^{11}$ Вт/см². Были найдены условия облучения мишени, при которых генерируется наибольшая плотность тока ионов C^{4+} , необходимых для ускорения в ускорителе-инжекторе И-4. В результате был создан источник ионов углерода и вольфрама.

3. Для исследования пространственных характеристик извлеченного пучка применена методика “perreg-pot”. Разработана программа обработки изображений для вычисления эмиттанса и построения эллипса. Особенностью реализации методики “perreg-pot” является то, что для нахождения координат отверстий в маске использовано излучение плазмы. Обнаружен эффект расплывания, что приводит к некоторому завышению значений эмиттанса пучка. Корректировка данных возможна при использовании камеры с более высоким пространственным разрешением и предварительным нахождением функции рассеяния.
4. Создан и опробован в экспериментах комплекс измерительных методик и программного обеспечения обработки данных для характеристики пучка лазерно-плазменного источника ионов, что дает возможность генерировать исходные данные для программ численного моделирования пучков заряженных частиц.
5. В измерениях с времяпролетной методикой наблюдались и измерены потери многозарядных ионов вызываемые внесением сетки системы извлечения пучка. Это дало рекомендации для конструирования, а именно было показано, что при генерации многозарядных ионов из лазерной плазмы введение в конструкцию системы экстракции сетки на высоковольтном электроде может приводить к потерям головной, наиболее многозарядной и энергичной компоненты пучка. Эффект усиливается с ростом массы ионов, их заряда и энергии разлета. В указанных условиях прямые потери для легких ионов углерода практически несущественны, однако фазовый объем пучка при введении сеток с малым периодом проволок заметно увеличивается. Для ионов вольфрама высокозарядная группа ионов с наибольшей энергией в значительной степени исчезает из полного тока. Значительное снижение нежелательного влияния металлической сетки в системе экстракции может быть достигнуто при оптимизации геометрических параметров сетки, в первую очередь, за счет увеличения периода расположения

Одним из способов генерации плазмы является облучение мишеней мощными лазерными импульсами.

Цель и задачи диссертационного исследования

В ускорительном центре ККТЭФ НИЦ «Курчатовский институт» имеются линейные ускорители И-3, И-4, разработанные в качестве инжекторов ускорительного комплекса. Линейный ускоритель И-3 представляет собой импульсный резонатор с одной пролетной трубкой и двумя ускоряющими зазорами при напряжении до 2 МВ на каждом, работающий на частоте 2.504 МГц и позволяющий ускорять ионы до энергии 4 МэВ на заряд. Линейный ускоритель И-4 - ускоряющая секция ПОКФ с рабочей частотой 81.36 МГц, способная ускорять сильнооточный пучок ионов с $z/A \geq 1/3$ до энергии 1.6 МэВ/н.

Целью данной работы является разработка лазерно-плазменного источника ионов на основе импульсно-периодического лазера «Малыш» для возможности эффективной работы с ускорителями И-3, И-4 в области прикладных задач, а также разработка методики восстановления энергетического спектра разлета ионов (включая соответствующие компьютерные коды) позволяющей проводить мониторинг характеристик ионов, генерируемых источником, и задавать входные данные для программ компьютерного моделирования физики пучков заряженных частиц. После отработки методик в экспериментах с пучком планируется их применение в разработке источника ионов с более мощным импульсно-периодическим СО₂-лазером для генерации пучков многозарядных тяжелых ионов.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие задачи:

- Реализовать контроль и анализ лазерных параметров в импульсно-периодическом режиме работы лазерной установки для получения оптимальных условий по мощности и качеству излучения, воспроизводимости лазерных характеристик с максимальным ресурсом наработки.
- Усовершенствовать времяпролетную диагностику для измерения параметров ионной компоненты лазерной плазмы с высоким временным и энергетическим разрешением, в том числе в режиме оперативной обработки получаемых данных.
- Изучить энергетические и зарядовые распределения ионов углерода в лазерной плазме и найти условия облучения для достижения необходимых характеристик пучка для инъекции в ускорители И-3, И-4.
- Провести ускорение пучка ионов углерода в ускорителях И-4, И-3.

- Разработать программное обеспечение для обработки исходных экспериментальных данных и для задания входных данных для программ численного моделирования Kobra3-INP и Dynamion.

Основные положения, выносимые на защиту

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 проволок 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.

Научная новизна

- 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.

- 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 CO₂-лазера в режиме свободной генерации, с пиковой плотностью мощности на поверхности мишени $\approx 1 \cdot 10^{11}$ Вт/см².

Практическая значимость

- 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.
- Создан лазерный источник ионов вольфрама W⁷⁺ с плотностью тока $4.2 \cdot 10^{-2}$ мА/см² и углерода C⁴⁺ с плотностью тока 27.7 ± 2 мА/см² для инжекторов И-3, И-4.
- 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 и коллектора полного тока с помощью разработанного автором компьютерного кода.
- На основе экспериментальных данных получены рекомендации для конструкторской разработки системы экстракции и формирования пучка, связанные с использованием металлических сеток.
- Полученный из лазерно-плазменного источника пучок ионов углерода успешно применен в экспериментах на ускорителе И-3 для имплантации в полупроводники (кремниевые диоды).
- Выполнено «сквозное» численное моделирование динамики пучка ионов углерода C⁴⁺ от плазменной границы до выхода ускорителя-инжектора И-4, проведенное с учетом экспериментально полученного распределения ионов по зарядовым состояниям и энергиям в генерируемой лазерным импульсом плазме. Проведено ускорение пучка ионов углерода C⁴⁺ в ускорителе И-4 при настройках систем ускорителя, установленных на основании «сквозного» моделирования.
- 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.

Личный вклад автора

Личный вклад автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. При ключевом участии автора разработаны и внедрены диагностические методики, используемые при исследовании энергетического и зарядового состава плазмы с нормировкой на полный ток ионного пучка. Автором лично освоены и применены для исследований электростатический энергоанализатор, цилиндр Фарадея и измеритель эмиттанса. Автором лично получены и проанализированы экспериментальные результаты при изучении генерации плазмы в лазерно-плазменном источнике ионов. При активном участии автора оптимизирован лазерно-плазменный источник ионов углерода для ускорителя И-4 и впервые проведено ускорение ионов углерода C^{4+} в нем. При активном участии автора оптимизирован лазерно-плазменный источник ионов углерода для ускорителя И-3 и обеспечено длительное стабильное получение пучка ионов углерода для проведения исследований в области ионной имплантации. Автор лично принимал активное участие в написании отчетных материалов и публикации результатов работы. Большая часть материала докладывалась автором лично на научных конференциях.

Публикации и апробация результатов

Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 печатных изданиях, из которых 5 изданы в журналах, включенных в текущий перечень ВАК, 6 в журналах входящих в Scopus или Web of Science, а также в 6 сборниках докладов конференций.

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 [Текст] / 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 $\alpha - Ga_2O_3$ / 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 (Патент № 2649914 С1 Российская Федерация, МПК Н01J 47/00. Устройство для исследования характеристик ионного потока плазмы, создаваемой импульсным источником, в частности CO₂ лазером: № 2017122483: заявл. 27.06.2017 : опубл. 05.04.2018, Бюл. №10, патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение "Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" / Ю. А. Сатов, А.В. Шумшуров, А.А. Лосев, А.А. Васильев).

Результаты исследований обсуждались на различных конференциях:

1. Молодежные конференции по теоретической и экспериментальной физике ИТЭФ 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 (Москва);
2. X Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (Саров, 17–20 мая 2016 г.);
3. XXVI Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2018 (Протвино, 1--5 октября 2018 г.);
4. 18th International Conference on Ion Sources (Ланьчжоу, Китай, 1–6 сентября 2019 г.);
5. VI Международная конференция ЛаПлаз — 2020 (Москва, 11–14 февраля 2020 г.);
6. 19th International Conference on Ion Sources (Ванкувер, Канада, В дистанционном формате, 20–24 сентября 2021 г.);
7. IX Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2023» (Москва, 28–31 марта 2023 г.);
8. XXIV Харитоновские тематические научные чтения по проблемам ускорительной техники и физики высоких энергий (Саров, 24–28 июля 2023 г.);
9. XIV Всероссийская школа НЦФМ по лазерной физике и лазерным технологиям (Саров, 18–22 сентября 2023 г.).

Заключение

Диссертационная работа Лосева А.А. «Разработка и исследование лазерно-плазменного генератора многозарядных ионов для тяжелоионного инжектора И-3, И-4» является самостоятельным и оригинальным исследованием, выполненным по актуальной тематике. Представленная к защите работа отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук и соответствует паспорту специальности 1.3.18. – «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

Диссертация Лосева Антона Андреевича «Разработка и исследование лазерно-плазменного генератора многозарядных ионов для тяжелоионного инжектора И-3, И-4» рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. – «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

Заключение принято на заседании №6 Научно-технического совета ККТЭФ НИЦ «Курчатовский институт» после обсуждения на семинаре «Экспериментальная физика высоких энергий, физика ускорителей заряженных частиц и физико-химические исследования материалов». Присутствовало на заседании 13 членов НТС из 15 по списку Результаты голосования: «ЗА» – 13, «против» – нет, «воздержалось» – нет. Протокол № 6 от «10» июня 2025 г.

Заместитель директора по
фундаментальным исследованиям,
Председатель НТС ККТЭФ
НИЦ «Курчатовский институт»



В.Ю. Егорычев

Ученый секретарь ККТЭФ,
Учёный секретарь НТС ККТЭФ
НИЦ «Курчатовский институт»



В.В. Васильев

10 июня 2025 г.

Подписи В.Ю. Егорычева и В.В. Васильева заверяю
Заместитель директора, Главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»



О.А. Алексеева