На правах рукописи

Лосев Антон Андреевич

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

Специальность 1.3.18 —
«Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт».

Научный руководитель: д-р физ.-мат. наук
Сатов Юрий Алексеевич

Официальные оппоненты: **Зеленский Анатолий Николаевич,**
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»,
главный научный сотрудник

Донец Евгений Евгеньевич,
кандидат физико-математических наук,
Объединенный институт ядерных исследований, ЛФВЭ,
начальник сектора

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Защита состоится 20.11.2025 г. в __ часов на заседании диссертационного совета 75.2.005.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждениии «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по адресу: 142281, Московская область, г. Протвино, площадь Науки, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ и на сайте www.ihep.su.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 142281, Московская область, г. Протвино, площадь Науки, д. 1, ученому секретарю диссертационного совета 75.2.005.01.

Автореферат разослан __.____.2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
75.2.005.01,
д-р. физ.-мат. наук Мочалов Василий Вадимович

Общая характеристика работы

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

- генерация экстремальных состояний вещества [1—4];
- моделирование радиационных повреждений в материалах для ядерных реакторов [5—8];
- тестирование электронных компонентов на радиационную стойкость [9; 10];
- модификация материалов и ионная имплантация [11];
- применение в медицине и биологии [12; 13];
- управляемый термоядерный синтез с помощью ускоренных пучков тяжелых ионов [14—17].

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.

Одним из способов генерации плазмы является облучение мишеней мощными лазерными импульсами. Лазерно-плазменный источник ионов состоит из лазерной системы, излучение которой фокусируется с помощью объектива (зеркального или линзового) на поверхность мишени, помещенной в вакуумную камеру. Плазменный факел выбрасывается перпендикулярно поверхности мишени и попадает в систему извлечения пучка, где происходит разделение зарядов. Среди разнообразных источников заряженных частиц генераторы ионов на основе лазеров имеют определенные преимущества:

- возможность оперативно менять мишень и условия ее облучения, что обеспечивает универсальность источника;
- возможность широкого выбора материала мишени, включая различные химические элементы и агрегатные состояния;
- высокая плотность расширяющейся плазмы, образованной мощным лазерным импульсом, позволяет извлекать сильноточный пучок предельно короткой длительности;
- из-за способности лазерного устройства генерировать импульсы излучения высокой мощности и энергии, в том числе в импульсно-периодическом режиме, они способны производить большое количество частиц высокой степени ионизации.

Применение в схеме лазеров с различными длинами волн не является принципиальным, исключая специальные приложения, хотя существенная зависимость критической плотности плазмы от длины волны излучения накладывает свои особенности на процессы, связанные с генерацией ионов

при разных длинах волн греющего излучения. Так, например, очевидно, что использование длинноволнового лазера при равных поглощенных потоках облучения может позволить достичь более высоких температур плазмы, ввиду меньшей ее критической плотности, в то же время схема с коротковолновым лазером позволяет по той же причине получать большее количество заряженных частиц. Выбор того или иного типа лазеров, по-видимому, будет определяться конкретными задачами и техническими особенностями лазерных источников, таких как стоимость оборудования и капитальных затрат на строительство, ресурсом работы и т.д.

Наиболее распространенным типом CO_2-лазера в области исследования плазмы является импульсный генератор, основанный на самостоятельном разряде в смеси $CO_2/N_2/He$ атмосферного давления с поперечным возбуждением (в англоязычной литературе используется сокращение TEA – transversely excited atmospheric). В этом типе лазеров активная среда образуется в импульсном высоковольтном разряде между двумя электродами, перпендикулярном оптической оси резонатора.

CO_2-лазеры, работающие на основе самостоятельного разряда в импульсно-периодическом режиме, имеют технические преимущества, которые обеспечивают их широкое применение в различных приложениях, где требуется получение высоких плотностей энергии и потока излучения, в частности, для нагрева плазмы и реализации источника многозарядных ионов и ядер атомов различных элементов, а именно:

- Практически идеально однородная активная газовая среда CO_2-лазера позволяет формировать пучки излучения с качеством пространственных характеристик близких к дифракционному пределу для длины волны 10.6 мкм, что обеспечивает получение высоких плотностей потока излучения на облучаемой мишени и, соответственно, высокое зарядовое состояние плазмы.
- Длинноволновый характер излучения CO_2-лазера обеспечивает достижение более высоких электронных температур в нагреваемой плазме в сравнении с коротковолновыми лазерами с аналогичными параметрами из-за меньшей критической плотности плазмы.
- Газовые лазеры ввиду возможности использования большого активного объема способны генерировать импульсы большой энергии, что обеспечивает получение большого числа ионов. При этом простота конструкции CO_2-лазера, особенно в режиме свободной генерации, обеспечивает невысокую стоимость устройства даже для частотной работы установки.
- Инфракрасная длина волны CO_2-лазера значительно снижает не только требования к точности изготовления применяемой оптики, но и к состоянию лабораторных и промышленных помещений в части их чистоты, уровня запыленности, температурной стабилизации, что критически влияет на потери излучения при

его распространении и фокусировке. Часто это обстоятельство носит принципиальный характер при определении стоимости и возможности проведения исследований и прикладных работ с использованием лазера.

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. Позволяет ускорять ионы до энергии 4 МэВ на заряд. Линейный ускоритель И-4 – ускоряющая секция ПОКФ (пространственно однородная квадрупольная фокусировка, в англоязычной литературе используется сокращение RFQ – radio frequency quadrupole) с рабочей частотой 81.36 МГц, способная ускорять сильноточный 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 CO_2-лазером для генерации пучков многозарядных тяжелых ионов.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие **задачи**:

1. 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.
2. Разработать времяпролетную диагностику для измерения параметров ионной компоненты лазерной плазмы с высоким временным и энергетическим разрешением, в том числе в режиме оперативной обработки получаемых данных.
3. Изучить энергетические и зарядовые распределения ионов углерода в лазерной плазме и найти условия облучения углеродной мишени для достижения необходимых характеристик пучка для инжекции в ускорители И-3, И-4.
4. Провести ускорение пучка ионов углерода в ускорителях И-3, И-4.

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

Научная новизна:

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. 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/см^2 .

Практическая значимость

1. Создан импульсный 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 лазерно-плазменный источник ионов вольфрама W^{7+} с плотностью тока $4.2 \cdot 10^{-2}$ мА/см^2 и углерода C^{4+} с плотностью тока 27.7 ± 2 мА/см^2 для линейных ускорителей 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/см^2 , уникальная 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. Выполнено «сквозное» численное моделирования динамики пучка ионов углерода C^{4+} 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 C^{4+} в ускорителе И-4 при настройках систем ускорителя, установленных на основании «сквозного» моделирования.

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.

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 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.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- 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.);
– XVII Курчатовская молодежная научная школа (Москва, 27-30 мая 2025 г.).

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. Бóльшая часть материала докладывалась автором лично на научных конференциях.

Публикации. 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 [Текст] / 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 [Текст] / 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 [Текст] / 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 $\alpha - Ga_2O_3$ [Текст] / A. Y. Polyakov, V. I. Nikolaev, I. N. Meshkov, K. Siemek, P. B. Lagov, E. B. Yakimov, A. I. Pechnikov, O. S. Orlov, A. A. Sidorin, S. I. Stepanov, I. V. Shchemerov, A. A. Vasilev, A. V. Chernykh, A. A. Losev, A. D. Miliachenko, I. A. Khrisanov, Y. S. Pavlov, U. A. Kobets, S. J. Pearton // 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 [Текст] / 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 C1 Устройство для исследования характеристик ионного потока плазмы, создаваемой импульсным источником, в частности CO_2-лазером).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации 99 страниц текста с 58 рисунками и 5 таблицами. Список литературы содержит 86 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, ставятся цели и задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, формулируются защищаемые положения, приводится список работ по теме диссертации, а также сведения об апробации работы.

Первая глава посвящена описанию принципа работы лазерно-плазменного источника ионов, а также обзор и современное состояние лазерно-плазменных источников ионов, разработка и применение которых осуществлялось на действующих ускорителях в России и за рубежом.

Принцип работы заключается в образовании плазмы мощным импульсом лазерного излучения, сфокусированного на поверхность мишени, и извлечении ионного пучка при попадании разлетающейся на значительное расстояние плазмы в электрическом поле, создаваемым специальной высоковольтной системой электродов. Лишь небольшая часть лазерного импульса затрачивается на плавление и испарение вещества, в основном взаимодействие идет с облаком пара и плазмой. Обратный тормозной эффект является основным механизмом передачи энергии электромагнитного поля лазерного импульса в плазму при плотности мощности излучения, которую развивает используемая лазерная установка. Резонансное поглощение несущественно.

Вторая глава содержит описание используемого модернизированного оборудования и методик измерений.

Источником лазерного излучения в проведенных экспериментах являлся двухмодульный, импульсно-периодический CO_2-лазер атмосферного давления на самостоятельном разряде, работающий в режиме свободной генерации на основной поперечной моде. Типичный импульс CO_2-лазера в режиме свободной генерации имеет достаточно сложную форму, образованную цугом пичков, возникающих в результате интерференции продольных мод, а амплитуды этих пичков хаотически меняются от импульса к импульсу (рисунок 1 (б)).

Реализована методика измерения характеристик лазерного импульса. Полная энергия измеряется с помощью термопарного калориметра ПИП-100МК. Временная форма лазерного импульса регистрируется фотоприемником на основе «photon-drag» эффекта в кристалле германия, сигнал которого записывался с широкополосным осциллографом. Сигналы детекторов, регистрируемые на цифровым осциллографом с помощью разработанных автором компьютерных программ на языке C++, считывались и накапливались для оперативной обработки. Для получения абсолютной калибровки по мощности значение полной энергии сравнивалось с интегралом по временной форме импульса. Временное разрешение методики было не хуже 0.5 нс. Для анализа характеристик лазерного импульса проводилось усреднение его временной формы в цифровом виде путем применения фильтра низких частот, в результате чего получалась хорошо воспроизводимая сглаженная форма: первый пик излучения и относительно длинный низкоинтенсивный «хвост» (рисунок 1 (а)). При обработке данных извлекались пиковая мощность сглаженного импульса P_{max}, доля энергии в первом пике ε_{peak} и его длительность на полувысоте τ_{FWHM}, поскольку

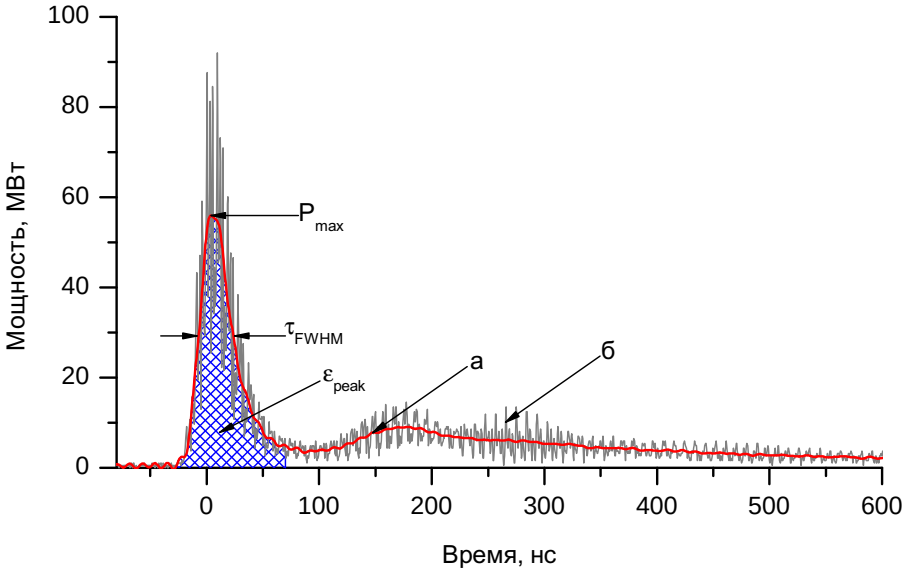


Рис. 1 — Временная форма импульса излучения CO_2-лазера. (а) - усредненная по пичковой структуре форма, (б) - оцифрованная осциллограмма.

именно эта часть импульса излучения ответственна за генерацию высокозарядной группы ионов (это, в частности, показано и в этой работе в главе 3).

Были разработаны средства диагностики электрических характеристик, включающие высоковольтные делители для измерения импульсов напряжения на разрядном промежутке в двух модулях, которые позволили измерить разброс времени между их срабатываниями.

В соответствии с задачами, поставленными в диссертации, CO_2-лазер был существенно модернизирован путем замены схемы питания разряда на разработанные двухступенчатые генераторы Аркадьева-Маркса и высоковольтную схему их синхронного запуска. Указанная модернизация позволила примерно вдвое увеличить мощность вклада энергии в разряд и значительно сократить разброс срабатывания модулей лазера, что ключевым образом влияет на воспроизводимость характеристик лазерного импульса.

Для исследования плазмы, генерируемой импульсом лазерного излучения, применена времяпролетная методика. Она заключается в совместной обработке данных, полученных электростатическим энергоанализатором и цилиндром Фарадея и позволяет получить энергетические, зарядовые распределения и парциальные токи ионов разлетающейся в вакуум плазмы. На рисунке 2 изображена схема установки для исследования

плазмы с помощью электростатического энергоанализатора. Электростатический дефлектор [18; 19] представляет собой сектор цилиндрического конденсатора с углом поворота 90°. В качестве детектора частиц используется вторичноэлектронный умножитель (ВЭУ) с динодами из CuBe.

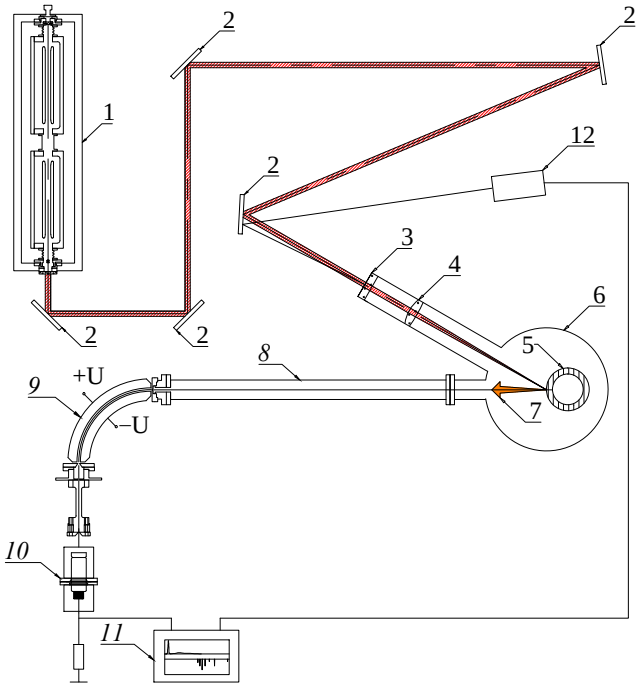


Рис. 2 — Схема установки для исследования плазмы с помощью электростатического энергоанализатора. 1 - импульсный двухмодульный CO_2-лазер, 2 - плоские зеркала, 3 - входное окно, 4 - сферическая линза, 5 - мишень, 6 - вакуумная камера, 7 - расширяющаяся плазма, 8 - дрейфовая труба, 9 - цилиндрический дефлектор, 10 - ВЭУ, 11 - двухканальный осциллограф, 12 - детектор лазерного излучения.

Как показано в [19], можно аналитически решить уравнение движения заряженной частицы в поле создаваемом дефлектором. Основной характеристикой является энергия настройки анализатора, которая равна

$$E = \frac{zeU}{\ln \frac{r_1}{r_2}}, \tag{1}$$

где z – заряд иона, e – элементарный заряд, U – напряжение настройки, r_1, r_2 – радиусы цилиндрических пластин. Эта величина определяет отношение энергии к заряду ионов, которые будут пропущены через анализатор

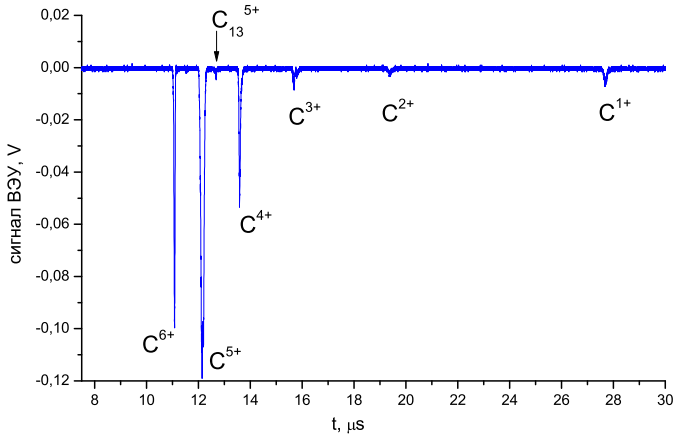


Рис. 3 — Идентификация пиков масс спектра.

и достигнут детектора, и зависит только от геометрических параметров дефлектора и потенциалов на пластинах. Если l_{tof} – длина дрейфа от мишени до анализатора, то время прилета иона с зарядом z равно

$$t = \sqrt{\frac{m l_{tof}^2 \ln \frac{r_1}{r_2}}{2zeU}}. \qquad (2)$$

Это соотношение позволяет осуществить идентификацию ионов (рисунок 3). Амплитуда сигнала пропорциональна количеству ионов данного зарядового состояния.

Алгоритм построения распределений по энергии и по зарядам, парциальных токов ионов, их нормировка на измеренный полный ток, для получения значений в абсолютных единицах заключается в нахождении коэффициента нормировки таким образом, чтобы значение суммы парциальных токов из измерений анализатором в каждый момент времени было равно полному току извлеченного пучка, измеренного с помощью цилиндра Фарадея. Далее производится пересчет парциальных токов в распределения по энергии и зарядам. Для обработки экспериментальных данных, нормировки на измеренный полный ток, а также для управления регистрирующим оборудованием автором был разработан комплект компьютерных программ на языке C++. Возможности времяпролетной методики были расширены, и она позволила установить моменты генерации различных групп ионов относительно греющего импульса лазерного излучения, что описано в главе 3.

Измерение поперечного эмиттанса извлеченного ионного пучка выполнено с помощью методики “pepper-pot”, которая позволяет измерить

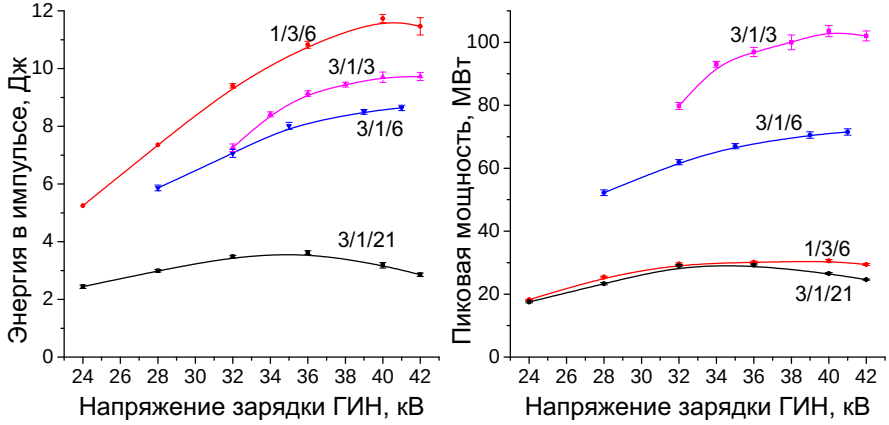
эмиттанс одного сгустка, получать фазовый портрет пучка в двух плоскостях $x-x'$ и $y-y'$ одновременно. В работе применен измеритель эмиттанса со следующими параметрами:

- Период отверстий 5 мм
- Диаметр отверстий ≈180 мкм
- Расстояние между маской и экраном 29.4 мм
- Сцинтиллятор CsI
- ПЗС-камера SDU-415

Для получения изображений из ПЗС-камеры и их обработки автором создана компьютерная программа на языке программирования C++, в которой реализованы нахождение координат отверстий в маске, установление соответствия изображений микропучков и отверстий, расчет эмиттанса. Особенностью реализации методики "pepper-pot" является то, что для нахождения координат отверстий в маске использовано излучение плазмы. Этот источник имеет размер ≈ 1 мм и находится на расстоянии более 2 м от маски и экрана. Принимая во внимание величину расстояния между маской и экраном, намного меньшую, чем от источника до маски, можно считать, что лучи от отверстий параллельны, а их изображения на экране дают координаты отверстий. Чтобы получить изображение отверстий маски в лучах плазмы нужно производить экспозицию перед прилетом частиц пучка, который запаздывает относительно света. Достаточно засветить хотя бы два отверстия, чтобы восстановить координаты остальных.

Третья глава содержит результаты экспериментальных и расчетных исследований для оптимизации работы лазерно-плазменного источника ионов, а также результаты практических применений разработанных методик диагностики лазерной плазмы.

Модернизация электрической схемы питания разрядных модулей лазера позволила расширить диапазон рабочих параметров, при которых удается формировать устойчивый однородный самостоятельный разряд и тем самым создать активную среду. Основными параметрами являются уровень накачки среды, который можно характеризовать напряжением зарядки генератора импульсного напряжения, процентное содержание молекулярных газов CO_2 + N_2 и соотношение их парциальных давлений p_{CO_2}/p_{N_2}. Пиковая мощность импульса растет с ростом давления молекулярных газов и максимальное значение 105 МВт достигается для смеси $CO_2/N_2/He = 3/1/3$ и соответствует удельной величине 190 МВт с 1 л активной среды, заполненной основной модой резонатора, что при полученной длительности импульса менее 30 нс на полувысоте является рекордным для данного типа лазеров. Среднеквадратический разброс значений усредненной мощности не превышает 2.5%, что указывает на хорошо воспроизводимые условия накачки среды и стабильные выходные характеристики генератора. Выход максимальной энергии более 11 Дж



а) Полная энергия в импульсе газов б) Пиковая мощность импульса

Рис. 4 — Зависимости полной энергии и мощности лазерного импульса от напряжения зарядки ГИН питания разряда для различных смесей газов $CO_2/N_2/He$

реализуется при большом содержании азота, $CO_2/N_2 = 1/3$. Все полученные зависимости хорошо согласуются с многочисленными литературными данными по исследованиям CO_2-лазеров с самостоятельным разрядом. Достигнутые рабочие характеристики лазера, такие как мощность импульса излучения, и их долговременная воспроизводимость являются определяющими для успешного выполнения поставленных в диссертации задач по разработке лазерно-плазменного источника ионов.

Благодаря высокому энергетическому разрешению анализатора и временному разрешению регистрирующей аппаратуры были расширены возможности времяпролетной методики исследования ионной компоненты лазерной плазмы, а именно восстановление, кроме энергетических и зарядовых распределений и парциальных токов ионов, моментов генерации различных групп ионов относительно греющего импульса. Такое возможно, если временное разрешение достаточно мало по сравнению с характерной длительностью лазерного импульса, что выполняется для применяемого CO_2-лазера в режиме свободной генерации. Зависимость $v = f(U, z, m)$ можно получить из формулы (1) для анализатора, где v – скорость регистрируемого иона, U – напряжение настройки анализатора, z – заряд иона, m – масса иона. Если изменяющие скорость разлета эффекты на длине дрейфа отсутствуют, то разность непосредственно измеренных времен пролета t и рассчитанных по формуле $t_0 = l_{tof}/v$ (l_{tof} – длина дрейфа) дает времена вылета соответствующих ионов, синхронизованные с импульсом греющего излучения. Длину дрейфа l_{tof} невозможно опреде-

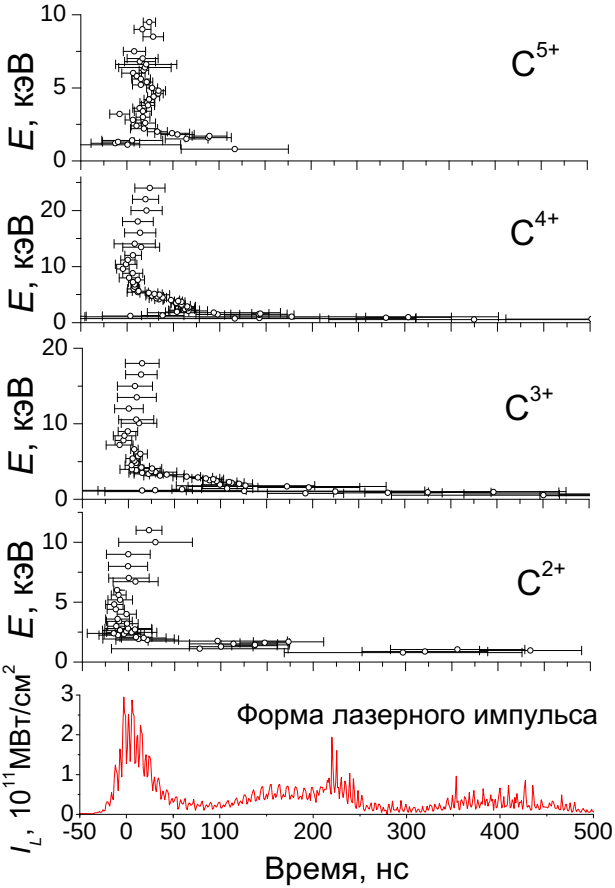


Рис. 5 — Восстановленные зависимости энергии генерируемых ионов углерода от времени, совмещенные с длительностью лазерного импульса

лить с достаточной точностью прямым измерением. Точность прямого с помощью доступных приборов составляет ±10 мм. Для получения точного значения в дрейфовую трубу вносится вставка заранее известной длины $l_{\text{вст}}$ и проводится регистрация времяпролетного спектра при некотором фиксированном напряжении настройки со вставкой и без нее. Измерение разницы времени прилета для выбранного иона дает возможность вычислить длину дрейфа l_{tof} используя формулу (2). На рисунке 5 изображены разности непосредственно измеренных и рассчитанных времен пролета для ионов углерода различных зарядовых состояний на масштабе лазерного импульса. Учет этих данных дает возможность скорректировать энергии ионов и принципиально улучшить метод измерения разлетного спектра ионов, на что получен патент на изобретение.

Эти данные дополняют информацию о процессах генерации ионов и указывают на то, что высокоэнергетические ионы возникают преимущественно во время пика облучения, тогда как низкоэнергетическая группа ионов генерируется на всей протяженности облучения в течение 500 нс. Разброс времен вылета минимален для высокоэнергетических ионов, в то время как для ионов низкой энергии (в особенности с низким зарядовым номером) интервал вылета значительно больше.

При извлечении пучка из нестационарного потока плазменный мениск будет отслеживать временные вариации параметров налетающей плазмы или изменения напряженности электрического поля. Использование сеток в конструкции электродов позволяет стабилизировать область отбора ионов из плазмы, однако создаваемая ими конфигурация поля оказывает влияние на пространственные характеристики ионного пучка [20]. Кроме того, распыление материала сетки под воздействием высокоэнергичных ионов приводит к образованию облака атомарного газа в области прохождения пучка. В качестве прибора для наблюдения этого эффекта был использован электростатический дефлектор заряженных частиц, пропускание которого с высокой чувствительностью реагирует на рассеяние ионов на различных препятствиях.

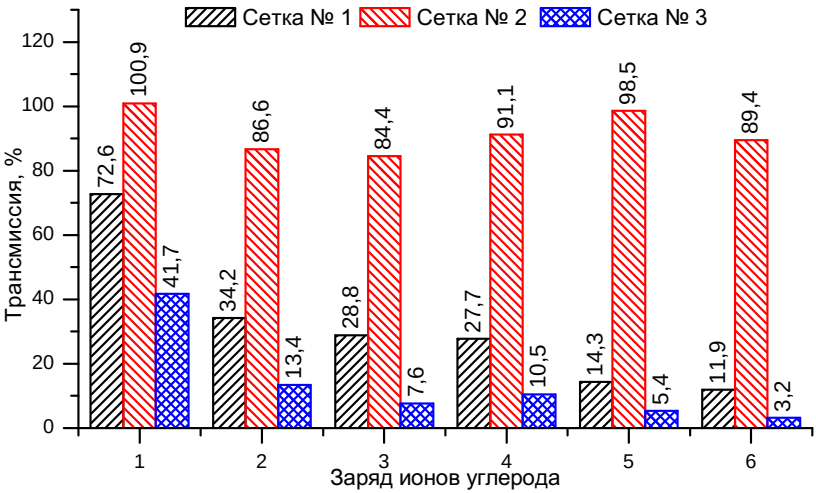
Были исследованы характеристики генерируемых ионов при введении в поток плазмы металлических сеток из тугоплавких материалов. Измерения проведены для трех сеток с различными геометрическими параметрами для ионов углерода и вольфрама.

Таблица 1 — Геометрические параметры сеток

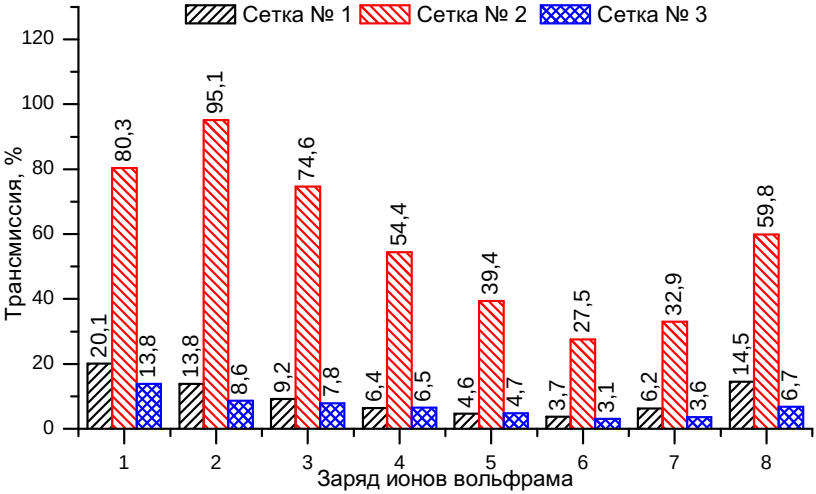
Номер сетки	Прозрачность T, %	Период d, мкм
№ 1	90	500
№ 2	96	2000
№ 3	98	83

Следует отметить существенные потери ионов при наличии сетки (рисунок 6), которые нарастают с увеличением заряда иона и с уменьшением межпроволочного расстояния (периода сетки). Геометрическая прозрачность сетки существенного влияния не оказывает. Для ионов вольфрама эффект снижения трансмиссии через анализатор еще более значительный, даже для редкой сетки.

Измерения полного тока за системой экстракции также показали наличие влияния вносимых в плазменный поток сеток. Хотя амплитудные значения полных токов и медленной части пучка оставались неизменными в пределах ошибки измерений, форма тока в лидирующей части, образованной высокозарядной компонентой, существенно меняется (рисунок 7).



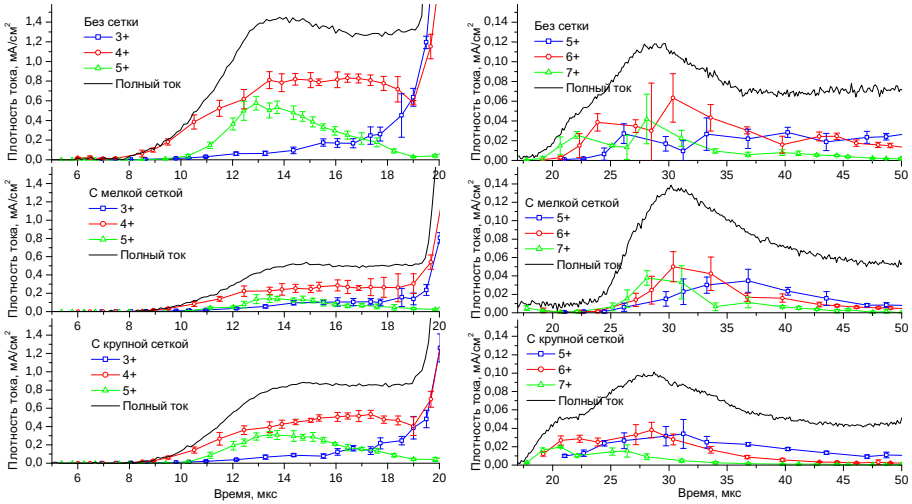
а) Углерод



б) Вольфрам

Рис. 6 — Трансмиссия ионов углерода и вольфрама с разным зарядом через анализатор для разных сеток

Эффект воздействия сетки на прохождение пучка определяется, во-первых, плотностью потока частиц и их энергией, что обуславливает эффективность распыления сетки и энергетическое распределение атомов продукта распыления и, в конечном итоге, плотность атомарного “облака”



а) Углерод б) Вольфрам

Рис. 7 — Плотность тока лидирующей части пучка ионов углерода и вольфрама

в области прохождения пучка, а во-вторых, сечениями элементарных процессов взаимодействия ионов пучка с распыленными атомами. Согласно представленным в работе данным, искажение пучка легких ионов углерода при введении экстракционных сеток значительно слабее, чем пучка тяжелых ионов вольфрама, несмотря на большую плотность потока частиц, что вполне объясняется существенно меньшими коэффициентами распыления материалов ионами углерода по сравнению с ионами вольфрама. Очевидно также, что условия наибольшего искажения пучка реализуются в начале потока, где заряд и энергия ионов максимальны и вызывают более эффективное распыление. Что касается геометрических характеристик сеток, то эффект воздействия сетки сильнее зависит от расстояния между проволочками сетки (периода) и слабее от геометрической прозрачности сетки.

На рисунке 8 дана общая схема сильноточного ионного инжектора И-4. Электростатическая линза используется для согласования пучка с ускоряющей секцией. Параметры секции ПОКФ следующие: рабочая частота 81.36 МГц, $z/A \geq 1/3$, входная энергия 0.02 МэВ/н, выходная 1.6 МэВ/н, максимальный ток инжекции 100 мА, аксептанс 270 мм·мрад. Были найдены условия облучения углеродной мишени, при которых обеспечивалась максимальная плотность тока и количество частиц ионов C^{4+} при использовании имеющейся лазерной установки. В такой конфигурации было проведено ускорение пучка лазерного источника ионов в линейном

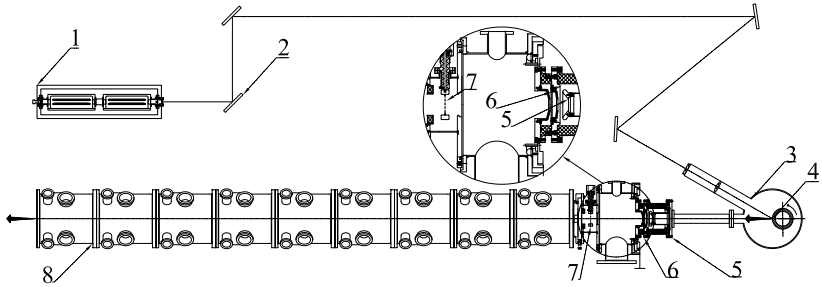


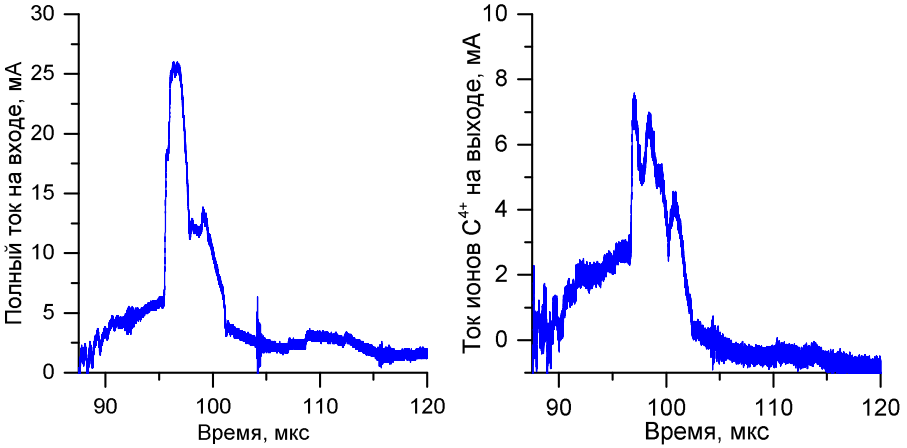
Рис. 8 — Схема установки И-4
1 – CO_2-лазер, 2 – поворотные зеркала, 3 – вакуумная камера, 4 – мишень, 5,6 – электроды системы извлечения, 7 – электростатическая сеточная линза, 8 – ускоряющая структура ПОКФ.

ускорителе И-4. Параллельно с этим было выполнено сквозное моделирование формирования пучка от плазменной границы до выхода ускорителя с помощью программ численного моделирования Kobra3-INP и Dynamion.

На основе экспериментально полученных характеристик плазмы были сгенерированы исходные данные для программы численного моделирования Kobra3-INP [21]. С ее помощью был произведен расчет извлечения ионного пучка в трехэлектродной ускоряюще-замедляющей системе экстракции и прохождения сеточной электростатической линзы, применяемой для фокусировки пучка на вход ускорителя И-4. Ускорение пучка смоделировано с помощью кода Dynamion [22] с имеющейся моделью ускорителя И-4. Результаты расчетов в Kobra3-INP были использованы в качестве начальных условий. Полный ток пучка ускоренного до энергии 1.6 МэВ/н составил 5.7 мА.

На рисунке 9 представлены токи пучка ионов на входе и выходе ускорителя, амплитудные значения составляют 25 мА и 7.8 мА соответственно. Потери вызваны превышением эмиттанса пучка источника на входе в ускоритель и процентным содержанием захватываемых ионов C^{4+} и разбросом их по энергии. Ускорение пучка ионов углерода из лазерно-плазменного источника выполнено на ускорителе И-4 впервые.

Генерируемый пучок ионов углерода применен в экспериментах по облучению кремниевых полупроводников на ускорителе И-3. С помощью времяпролетной методики лазерно-плазменный источник был настроен на условия облучения с максимальной долей ионов C^{3+} и C^{4+} по количеству частиц. Максимальная амплитуда полного тока всех зарядовых состояний вместе 120 мА, длительность $\approx$ 20мкс на полувысоте. Успешно проведены длительные сеансы облучения кремниевых пластин с флюенсом $1 - 4 \cdot 10^{12}$ см$^{-2}$ при энергии ионов углерода 8.4 – 8.7 МэВ. Длительность сеансов была от 2 до 9 часов. После облучения все образцы переданы



а) б)

Рис. 9 — Экспериментально измеренные, временные формы полного тока пучка ионов на входе (а) и тока C^{4+} выходе (б) ускорителя

заказчику для изучения. Для определения результата облучения рассматривались три параметра диодов: t_{rr} – время обратного восстановления диода (время переключения диода с заданного прямого тока на заданное обратное напряжение от момента прохождения тока через нулевое, значение до момента, когда обратный ток, уменьшаясь от максимального импульсного значения, достигает заданного значения обратного тока), I_R – постоянный обратный ток диода (ток утечки), U_F – прямое напряжение диода при протекании прямого тока $I_F = 10$ мА. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 — Параметры облученных кремниевых диодов.

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

Наилучшим считается сочетание трех указанных параметров, когда достигается наименьшее значение t_{rr} при минимальном росте I_R. При этом сопутствующее снижение U_F за счет роста рекомбинационной составляющей прямого тока также является положительным эффектом. В данном случае наилучшее сочетание параметров достигается в режиме 3. Такое

сочетание позволяет обеспечить необходимые частотные и импульсные характеристики диода. Получаемые на установке И-3 данные имеют ценность при разработке требований и рекомендаций при проектировании источника ионов и ускорителя для решения задач полупроводниковой промышленности.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ККТЭФ ведется разработка лазерно-плазменного источника тяжелых ионов для ускорительного комплекса [23—25], который создается для проведения исследований и испытаний электронной компонентной базы на стойкость к воздействию ионизирующих излучений космического пространства и сопутствующих им эффектов. Для генерации плазмы используется лазерная система «Фокус» представляющая собой глубокую модернизацию опытного образца, разработанного ранее [26] и направленную на повышение выходной пиковой мощности лазерного излучения при неизменной энергетике накачки лазера, а также на устранение конструктивных недостатков для увеличения надёжности и ресурса работы ионного источника.

Лазерная система «Фокус» работает по схеме задающий генератор – усилитель. От задающего генератора требуется получать лазерный импульс со стабильно повторяемой формой импульса, для чего требуется выделение одной продольной моды колебаний. В рамках данной работы для него была реализована система подстройки длины резонатора, которая обеспечивает одномодовый характер генерации. В ней используются фотодетектор и цифровой осциллограф, сигнал с которого передается на персональный компьютер со специально разработанной программой для анализа формы импульса и дистанционного управления пьезотранслятором, на котором установлено заднее зеркало резонатора задающего генератора. В результате работы системы подстройки удается получить

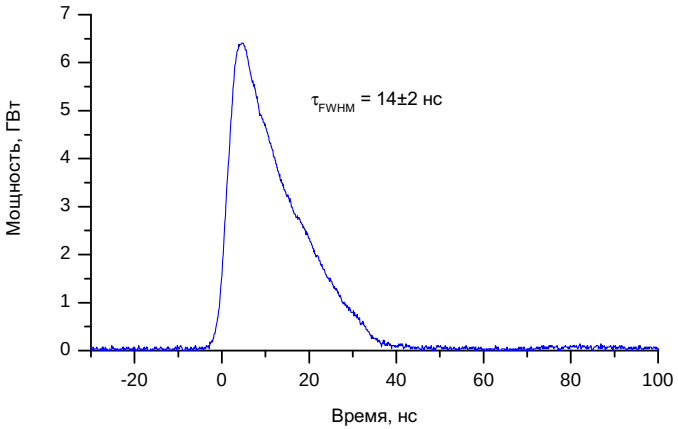


Рис. 10 — Типичная форма импульса лазерной системы «Фокус»

не менее 98% гладких импульсов на выходе усилителя. На рисунке 10 представлена типичная временная форма импульса излучения на выходе лазерной системы «Фокус».

Для исследования плазмы, генерируемой лазерной системы «Фокус» были применены разработанные методики и программное обеспечение, которое показало возможность обработки сигналов, содержащих большое количество зарядовых состояний, и благодаря разрешению анализатора позволяет идентифицировать многозарядные ионы (рисунок 11).

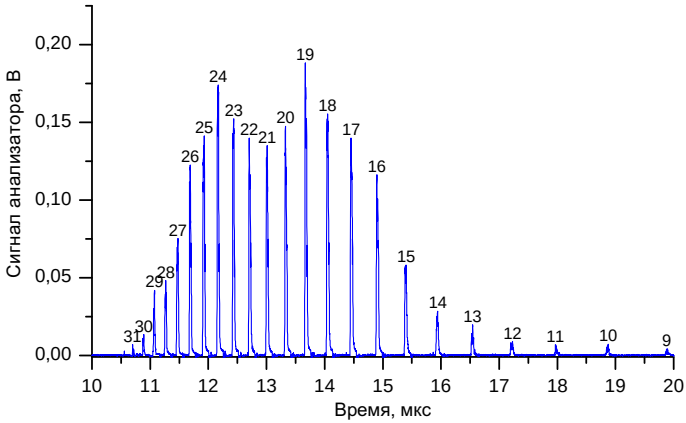


Рис. 11 — Сигнал энергоанализатора для ионов висмута с энергией настройки $E = 4.0z$ кэВ. Числа над пичками соответствуют заряду иона.

Разработанные методики и программное обеспечение позволяют восстанавливать плотности тока многозарядных ионов висмута, их содержание требуемом временном интервале и распределение по энергиям. Полученные результаты по характеристикам генерируемых ионов в лазерно-плазменном источнике на основе лазерной системы «Фокус» позволяют провести необходимые расчеты параметров согласующих систем линейного ускорителя разрабатываемого инжектора частиц.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Проведенная модернизация электрической схемы питания разряда и синхронизации модулей позволила выполнить оптимизацию состава смеси $CO_2/N_2/He$, 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 известным из литературы значением 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 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/см^2 . 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 pepper-pot. Разработана программа обработки изображений для вычисления эмиттанса и построения эллипса. Особенностью реализации методики “pepper-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 характеризации 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 проволочек 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 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 Kobra3-INP 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 $2.8 \cdot 10^8$ см$^{-2}$ за один импульс.

Список литературы

1. *Фортов, В. Е.* Интенсивные ионные пучки для генерации экстремальных состояний вещества [Текст] / В. Е. Фортов, Д. Хоффманн,

Б. Ю. Шарков // Успехи физических наук. — 2008. — Т. 178, № 2. — С. 113—138.

2. High-energy-density physics experiments with intense heavy ion beams [Текст] / D. Varentsov [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2007. — Т. 577, № 1/2. — С. 262—266.

3. The CERN Large Hadron Collider as a Tool to Study High-Energy Density Matter [Текст] / N. A. Tahir [и др.] // Physical Review Letters. — 2005. — Т. 94, № 13.

4. Laboratory planetary science studies using intense heavy ion beams at FAIR: The HEDgeHOB collaboration [Текст] / N. Tahir [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2009. — Т. 606, № 1/2. — С. 177—185.

5. *Nelson, R.* The use of ion accelerators to simulate fast neutron-induced voidage in metals [Текст] / R. Nelson, D. Mazey, J. Hudson // Journal of Nuclear Materials. — 1970. — Т. 37, № 1. — С. 1—12.

6. *Рогожкин, С.* Влияние облучения тяжелыми ионами на наноструктуру перспективных материалов ядерных энергетических установок [Текст] / С. Рогожкин [и др.] // Физика металлов и металловедение. — 2012. — Т. 113, № 2. — С. 212.

7. Simulation Experiment on Study in the Radiation Resistance of Advanced Ferrite-Martensite Steel Hardened by Disperse Inclusions [Текст] / S. V. Rogozhkin [и др.] // Atomic Energy. — 2013. — Т. 114, № 1. — С. 14—20.

8. Emulation of reactor irradiation damage using ion beams [Текст] / G. Was [и др.] // Scripta Materialia. — 2014. — Т. 88. — С. 33—36.

9. Экспериментальный метод прямого определения характеристик стойкости к одиночным радиационным эффектам с использованием ускорительного комплекса [Текст] / В. Анашин [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. — 2007. — № 3/4. — С. 131—134.

10. Single-event effects ground testing and on-orbit rate prediction methods: the past, present, and future [Текст] / R. Reed [и др.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 2003. — Т. 50, № 3. — С. 622—634.

11. *Current, M. I.* Ion implantation for fabrication of semiconductor devices and materials [Текст] / M. I. Current // Industrial Accelerators and Their Applications / под ред. R. W. Hamm, M. E. Hamm. — World Scientific Publishing, 2012. — С. 9—56.

12. *Rackwitz, T.* Clinical applications of proton and carbon ion therapy [Текст] / T. Rackwitz, J. Debus // Seminars in Oncology. — 2019. — Т. 46, № 3. — С. 226—232.

13. New Accelerator Facility for Carbon-Ion Cancer-Therapy [Текст] / K. Noda [и др.] // Journal of Radiation Research. — 2007. — Т. 48, Suppl.A. — A43—A54.

14. *Kawata, S.* Review of heavy-ion inertial fusion physics [Текст] / S. Kawata, T. Karino, A. I. Ogoyski // Matter and Radiation at Extremes. — 2016. — Т. 1, № 2. — С. 89—113.

15. High Intensity heavy ion Accelerator Facility (HIAF) in China [Текст] / J. Yang [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. — 2013. — Т. 317. — С. 263—265.

16. NDCX-II target experiments and simulations [Текст] / J. Barnard [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2014. — Т. 733. — С. 45—50.

17. Studies on heavy ion fusion and high energy density physics in Japan [Текст] / S. Kawata [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2007. — Т. 577, № 1/2. — С. 21—29.

18. *Hughes, A. L.* On the Analysis of Electronic Velocities by Electrostatic Means [Текст] / A. L. Hughes, V. Rojansky // Physical Review. — 1929. — Т. 34, № 2. — С. 284—290.

19. *Афанасьев, В. П.* Анализатор типа цилиндрического дефлектора [Текст] / В. П. Афанасьев, С. Я. Явор // Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. — М. : Наука, 1978. — Гл. 3. С. 78—96.

20. Numerical simulation of gridded electrostatic lens [Текст] / G. N. Kropachev [и др.] // Review of Scientific Instruments. — 2012. — Т. 83, № 2. — 02B907.

21. *Spädtke, P.* Kobra3-INP user manual [Текст] / P. Spädtke. — 2011.

22. Development of the versatile multi-particle code DYNAMION [Текст] / S. Yaramyshev [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2006. — Т. 558, № 1. — С. 90—94.

23. *Завьялов, Н.* Иследовательские установки РФЯЦ–ВНИИЭФ для экспериментального получения фундаментальных и прикладных знаний в области ядерной, радиационной физики и физики быстропротекающих процессоов (к 75-летию Атомной отрасли) [Текст] / Н. Завьялов // Успехи физических наук. — 2022. — Т. 192, № 05. — С. 547—563.

24. Ядерные и электрофизические установки РФЯЦ-ВНИИЭФ: настоящее и будущее [Текст] / Д. В. Будников [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. — 2021. — № 4. — С. 5—25.

25. Состояние работ по созданию тяжелоионного синхротронного комплекса для центра радиационных испытаний РФЯЦ-ВНИИЭФ [Текст] / А. В. Тельнов [и др.] // Проблемы ускорительной техники и физики высоких энергий. Труды международной конференции «XXIV Харитоновские тематические научные чтения» / под ред. Н. В. Завьялов. — Саров : ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2024. — С. 144—153.

26. High-power CO_2 laser system with repetition rate operation for high current multicharged heavy ion generations [Текст] / Y. Satov [и др.] // Journal of Russian Laser Research. — 2004. — Т. 25, № 3. — С. 205—216.

Лосев Антон Андреевич

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

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать ___.___._____. Заказ № _____
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 80 экз.
Типография _____