



Минобрнауки России
Федеральное государственное
бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

Ульянова ул., 46, Бокс-120, Нижний Новгород, 603950

Тел. (831) 436-62-02

Факс (831) 416-06-16

E-mail: dir@ipfran.ru

<http://www.ipfran.ru>

ОКПО 04683326, ОГРН 1025203020193,
ИНН/ КПП 5260003387/526001001

29.10.2025 № 100/2843

На № _____ от _____



УТВЕРЖДАЮ

Директор
Федерального
государственного бюджетного
научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук»
+7 (831) 436-62-02, dir@ipfran.ru
академик РАН

доктор физико-математических наук

Г.Г. Денисов

«29» октября 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук»

на диссертацию Лосева Антона Андреевича

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

Диссертационная работа Лосева Антона Андреевича посвящена исследованию плазмы, образованной импульсами лазерного излучения, с целью извлечения из него ионного пучка для линейных ускорителей. Актуальность работы определяется широкими возможностями применения ускоренных пучков ионов в различных областях.

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав и заключения. Объем диссертации составляет 99 страниц, включает 58 рисунков и 5 таблиц. Список литературы составляет 87 наименований.

Во введении дано краткое описание принципа работы лазерно-плазменного источника ионов, сформулирована цель работы и поставлены задачи для её достижения, обоснована актуальность работы, показаны научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения выносимые на защиту, приведён список опубликованных работ по диссертации и сведения о её апробации.

В первой главе автор перечисляет основные процессы, происходящие при работе лазерно-плазменного источника ионов. Далее приведены характеристики некоторых установок, созданных в России и за рубежом.

Вторая глава посвящена применяемому оборудованию и методикам измерений. Источником лазерного излучения являлся импульсно-периодический CO_2 -лазер на основе самостоятельного разряда атмосферного давления, работающий в режиме свободной генерации. Приведены описания приборов и методик, с помощью которых производится исследование характеристик лазерного излучения, генерируемой плазмы и извлечённого ионного пучка.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных и расчётных исследований для оптимизации работы лазерно-плазменного источника ионов.

Оптимизация состава газовой лазерной смеси позволила получить импульс с длительностью первого пика менее 30 нс, что является весомым достижением. Вместе с модификацией схемы запуска разрядных модулей это позволило добиться долговременной работы лазерной установки с неизменными характеристиками импульса, что, несомненно, важно для достоверности результатов дальнейших исследований лазерной плазмы.

Дано описание способа, которым можно установить времена вылета ионов из плазмы на масштабе греющего лазерного импульса, и приведены результаты этих измерений для ионов углерода. Эти данные позволили уточнить спектр разлета ионов, а также способны заинтересовать исследователей, занимающихся расчётами в области лазерной плазмы для проверки численных моделей.

С помощью электростатического энергоанализатора оценено влияние металлических сеток, используемых в системах извлечения и транспортировки пучка низкой энергии, на зарядовый состав ионного пучка. Данные получены для легких и тяжелых ионов, даны количественные оценки потерь наиболее многозарядной их части, делается вывод о желательной конфигурации сеток для минимизации потерь.

Приведены результаты расчётов процессов извлечения и ускорения пучка ионов углерода в линейном ускорителе И-4 и их сравнение с экспериментом. Неплохое согласие расчётных данных с экспериментом по транспортировке и ускорению пучка подтверждает правильность использования экспериментальных данных в качестве исходных при разработке системы извлечения пучка и системы транспортировки пучка низкой энергии.

Дано описание практического применения методик диагностики плазмы в разработке ионного источника на основе более мощного CO_2 -лазера и для получения пучка ионов углерода с необходимыми характеристиками для имплантации в полупроводники. Успешное выполнение этих задач говорит о востребованности результатов проведённых в диссертационной работе исследований.

В заключении сформулированы результаты, полученные в ходе работы.

Научная новизна заключается: в достижении рекордно высокой удельной пиковой мощности первого пика генерации ТЕА CO_2 -лазера в режиме свободной генерации; получении экспериментальных данных по моментам вылета ионов из плазмы на масштабе импульса облучения; в обнаружении эффекта влияния металлических сеток, устанавливаемых в высоковольтном электроде системы экстракции, на характеристики формируемого ионного пучка, который усиливается с возрастанием массы ионов и уменьшением периода сетки, при этом слабо зависит от её прозрачности; в оригинальном сквозном расчёте, выполненном исходя из измеренных характеристик лазерной плазмы от процесса извлечения пучка до ускорения в ускорителе И-4, и сравнении его с экспериментом.

Практическая значимость работы состоит в применении разработанных методик в настройке существующих и разработке будущих лазерно-плазменных источников многозарядных ионов, что было продемонстрировано использованием пучка ионов углерода для ионной имплантации, а также численном моделировании, выполненном на основе экспериментальных данных о сгенерированной плазме. Автором проделана большая работа по созданию программных кодов для обработки экспериментальных данных, получаемых в измерениях характеристик лазерного излучения, с помощью электростатического энергоанализатора и измерителя эмиттанса, а обеспечение стабильной работы лазерной установки обеспечивает достоверность полученных результатов. Получился лазерно-плазменный источник ионов с высокой воспроизводимостью характеристик ионного пучка, который удалось успешно применить для задач ионной имплантации.

Актуальность работы вызвана относительной универсальностью этого типа источника, который единственный способен за минуты изменять сорт ионов в генерируемом пучке. Эта его особенность может оказаться решающей для некоторых применений, например для исследований радиационной стойкости. В настоящее время в России ведутся работы по созданию тяжелоионных ускорителей в составе ускорительных комплексов для различных применений, где могут быть использованы результаты диссертационной работы, в числе которых проект СКИ в РФЯЦ-ВНИИЭФ и проект NICA в ОИЯИ, а также проекты в дружественных странах, например, NIAF в Институте современной физики Академии наук КНР.

Можно отметить следующие замечания к работе:

1. Автором проведено исследование зависимости характеристик лазерного импульса от состава газовой смеси CO_2 -лазера и получены уникальные результаты его генерации, но не сформулировано, за счёт чего был достигнут короткий импульс лазера в режиме свободной генерации.

2. Работа могла быть более полной, если бы автор привел дополнительные оценки параметров плазмы, генерируемой на мишени, в частности температуры электронов, скоростей вторичных ионов, вылетающих с сеток системы формирования ионного пучка при их бомбардировки первичным пучком. Данная информация могла быть использована для более достоверной трактовки наблюдаемых процессов.

3. В системе формирования ионного пучка лазерного источника, очевидно, еще много возможностей для улучшения фокусировки перед входом в ускоритель. Работа в этом направлении могла бы существенно повысить полное число захватываемых ускорителем частиц.

4. Описание способа измерения времён вылета и их визуализация несколько сложна для восприятия, что, впрочем, не умаляет новизны и оригинальности полученного результата.

5. Для большей очевидности, что пучок был ускорен в ускорителе И-4 не хватает измерений за поворотным анализирующим магнитом.

6. Некоторые графики, на которых изображены парциальные токи ионов и распределения по энергии слишком перегружены. Возможно, стоило оставить на них только те зарядовые состояния ионов, которые пригодны для дальнейшего ускорения.

Данные замечания не являются критическими, не снижают ценность полученных результатов и не влияют на общую оценку.

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой и выполнена на высоком уровне. Основные результаты опубликованы в 6 печатных работах, из которых 5 в изданиях, включённых в текущий перечень ВАК, 6 индексируемых в Web of Science и Scopus, зарегистрирован 1 патент на изобретение. Опубликованные работы и автореферат в полной мере отражают содержание работы. Язык и стиль изложения обеспечивают адекватное восприятие материала.

Заключение

Доклад Лосева А.А. был заслушан и обсуждался на семинаре Отделения физики плазмы и электроники больших мощностей Института прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, состоявшемся 28 октября 2025 года.

Диссертационная работа Лосева Антона Андреевича «Разработка и исследование лазерно-плазменного генератора многозарядных ионов для тяжелоионного инжектора И-3, И-4» соответствует критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, установленным в «Положении о порядке присуждения учёных степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842, а её автор Лосев Антон Андреевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18 - Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Отзыв составил:

Изотов Иван Владимирович

Заведующий лабораторией ионных источников ИПФ РАН

Кандидат физико-математических наук

Специальность 01.04.08 «Физика плазмы»,

адрес: 603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

тел: +7 (915) 949-27-11

эл. почта: skalyga@ipfran.ru

«29» октября 2025 г.

Подпись И.В. Изотова заверяю
Ученый секретарь ИПФ РАН



И.В. Изотов

И.В. Корюкин

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

Тел.: +7 (831) 436-62-02, e-mail: dir@ipfran.ru