

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Лосева Антона Андреевича

**на тему «Разработка и исследование лазерно-плазменного генератора
многозарядных ионов для тяжелоионного инжектора И-3, И4 »**

**по специальности 1.3.18 -«Физика пучков заряженных частиц и ускорительная
техника»**

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Актуальность темы исследования.

Генерация сильноточных пучков высокозарядных ионов является одним из перспективных направлений исследований, находящих широкое применение в науке и технике. Источники многозарядных ионов тяжелых элементов применяются в инжекторах ускорителей высоких энергий и коллайдеров для фундаментальных исследований свойств кварк-глюонной плазмы, для исследований радиационных повреждений в материалах для ядерных реакторов; для тестирования электронных компонентов на радиационную стойкость; модификация материалов и ионная имплантация, а также для исследований в медицине и биологии.

Разработаны высокотехнологичные методы получения интенсивных, многозарядных пучков всех элементов, включая тяжёлые ионы (вплоть до урана-238). Метод ЛПГ (Лазерного Плазменного Генератора) генерации плазмы с экстремально высокой температурой и степенью ионизации ионов в источниках под действием импульсов лазерного излучения с мощностью до 10^{14} Вт/см² является одним из наиболее востребованных, наряду с источниками на основе ЭЦР (Электронно-Циклотронного Резонанса) и электронно-лучевыми источниками -EBIS (Electron Bean Ion Source).

Способность ЛПП генерировать импульсные пучки многозарядных ионов с длительностью 1-100 мкс, с высокой яркостью и универсальность ЛПП источников-возможность переключаться на генерацию различных элементов (буквально от импульса к импульсу) и “относительная” простота этих источников открыло возможности для широкого применения ЛПП в ускорительных комплексах.

С учетом вышеуказанного, тема диссертационной работы Лосева А.А., посвященная разработке лазерно-плазменного источника ионов на основе импульсно-периодического лазера для эффективной работы на ускорителях 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 компьютерного моделирования физики пучков заряженных частиц, представляется своевременной и актуальной.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Структура и логика изложения соответствуют поставленным в диссертации задачам исследования. Представленная на защиту работа содержит результаты комплексных исследований основных научных и практических проблем, связанных с созданием источника многозарядных ионов на основе ЛПП. Для решения поставленных задач автор опирается на сочетание современных теоретических и экспериментальных методов по созданию и исследованию свойств плазмы создаваемой в ЛПП. Автором разработаны методы диагностики плазмы позволившие выполнить оптимизацию параметров лазерного излучения и ионно-оптической системы формирования пучка для получения целевых параметров источника для практического применения в тяжелоионных инжекторах И-3, И4.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Структура и логика изложения соответствуют поставленным в диссертации задачам исследования. Полный объем диссертации 97 страниц текста

с 58 рисунками и 5 таблицами. Список литературы содержит 84 наименования. Автореферат в полном объеме отражает содержание диссертации.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, кратко охарактеризована степень научной разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, определены его объект и предмет, приведены наиболее существенные результаты работы, выносимые на защиту и обладающие научной, практической значимостью и новизной, 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 ионно-оптической системой создаваемой специальной высоковольтной системой электродов.

Вторая глава содержит описание используемого оборудования и методик измерений. Реализована методика измерения характеристик лазерного импульса. В соответствии с задачами, поставленными в диссертации, CO₂-лазер был существенно модернизирован, что позволило примерно вдвое увеличить мощность вклада энергии в разряд и значительно сократить разброс срабатывания модулей лазера. Для исследования плазмы, генерируемой импульсом лазерного излучения, применена время-пролетная методика, которая позволяет получить энергетические, зарядовые распределения и парциальные токи ионов разлетающейся в вакуум плазмы.

Измерение поперечного эмиттанса извлеченного ионного пучка выполнено с помощью методики “perpex-pot”, которая позволяет измерить эмиттанс одного сгустка. Для получения изображений из ПЗС-камеры и их обработки автором создана компьютерная программа, в которой реализованы нахождение координат отверстий в маске, установление соответствия изображений микропучков и отверстий, расчет эмиттанса. Особенностью реализации методики “perpex-pot” является то, что для нахождения координат отверстий в маске использовано излучение плазмы.

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. 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 время-пролетной методики исследования ионной компоненты лазерной плазмы, восстановление моментов генерации различных групп ионов относительно импульса лазера.

На основе экспериментально полученных характеристик плазмы были сгенерированы исходные данные для программы численного моделирования и был произведен расчет извлечения ионного пучка в трех электродной ускоряюще-замедляющей системе экстракции и прохождения сеточной электростатической линзы, применяемой для фокусировки пучка на вход ускорителя И-4. Генерируемый пучок ионов углерода применен в экспериментах по облучению кремниевых полупроводников на ускорителе И-3. Получаемые на установке И-3 данные имеют ценность при разработке требований и рекомендаций при проектировании источника ионов и ускорителя для решения задач полупроводниковой промышленности.

Применение разработанных методик диагностики и программного обеспечения для разработки лазерно-плазменного источника тяжелых ионов для ускорительного комплекса для проведения исследований и испытаний электронной компонентной базы на стойкость к воздействию ионизирующих излучений в космическом пространстве было направлено 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.

В заключении приведены основные результаты работы, которые демонстрируют системный подход автора к анализу и решению проблем в создании источника

много-зарядных тяжёлых ионов на основе ЛПП, систем диагностики плазмы и ионных пучков. Законченность работы заключается в использовании пучков из источника на ускорителях И3 и И4 для исследований по радиационным эффектам облучения тяжёлыми ионами образцов кремния для полупроводниковой техники.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов.

Наиболее важными результатами исследования, характеризующими его новизну и научную значимость, являются: Оптимизация условий работы импульсно-периодического CO₂-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. Впервые получены экспериментальные данные по моментам генерации ионов в плазме углеродной мишени на масштабе импульса облучения, типичного для CO₂-лазера в режиме свободной генерации, с пиковой плотностью мощности на поверхности мишени $\approx 10^{11}$ Вт/см².

Практическую значимость для физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники представляют результаты исследований полученные в диссертации: создание импульсного лазерного генератора с мощностью излучения до 100 МВт и энергией до 10 Дж работающий с частотой повторения 0.5 Гц для широкого круга применений; создание лазерно-плазменный источника ионов вольфрама W⁷⁺ и углерода C⁴⁺ для линейных ускорителей И-3, И-4; разработка уникальной время-пролетной диагностики ионных пучков; разработка системы экстракции и формирования пучка с использованием металлических сеток; применение полученного из лазерно-плазменного источника пучка ионов углерода в экспериментах на ускорителе И-3 для имплантации в полупроводники (кремниевые диоды).

Оценка содержания диссертации, её завершенность. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

В целом диссертация А.А.Лосева является законченным самостоятельным исследованием, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку.

Результаты исследований применены в экспериментах на ускорителе И-3 для имплантации в полупроводники и для разработки задающего генератора лазерной системы «Фокус» для ускорительного комплекса для проведения исследований и испытаний электронной компонентной базы на стойкость к воздействию ионизирующих излучений в космическом пространстве.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации.

Важной составляющей и достоинством работы является доведение разработки до практических применений - получение ускоренных пучков и эксперименты по имплантации ионов углерода в полупроводники. Результаты экспериментов на ускорителях И3, И4 заслуживают описания в отдельной главе.

В то же время имеется несколько замечаний к автору диссертационной работы.

В обзоре установок для генерации тяжёлых многозарядных ионов приведены только источники на основе ЛПГ и нет сравнения с другими методами ECR и EBIS источниками.

В параграфе 2.3.2 измерение парциальных токов ионов различной зарядности в спектрометре искажается различием коэффициентом умножения ВЭУ для различных зарядностей и энергий ионов. Стоило бы рассмотреть возможность перехода к одночастичной регистрации с использованием, например, микроканальных пластин.

В параграфе 3.1.2 обсуждается стабильность долговременной работы лазерной системы, но не приведены количественные данные. Что такое многочасовые сеансы? Время непрерывной работы до необходимости технического обслуживания? Важно также указать долговременную стабильность источника в целом.

В параграфе 3.8.3 приведены результаты экспериментов по получению высокозарядных ионов висмута- Bi^{27} , Bi^{28} на установке Фокус. Получена высокая эмиссионная плотность тока $2 \cdot 10^8$ ионов $\text{Bi}^{28} / \text{см}^2$ (Рис.3.43) . Однако, не указаны ограничения на площадь эмиссионной апертуры и соответственно на полный ток.

Также возникает вопрос о возможности увеличения зарядности до Bi^{35-37} , что имеет практический интерес для применения в качестве инжектора коллайдера NICA(ОИЯИ).

Указанные замечания не снижают научную и практическую значимость полученных результатов и не влияют на положительную оценку диссертационной работы Лосева А.А., а скорее являются пожеланием по дальнейшему расширению и углублению научных направлений, представленных в работе.

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. Зарегистрирован 1 патент на изобретение (№ 2649914 С1 Устройство для исследования характеристик ионного потока плазмы, создаваемой им импульсным источником, в частности CO_2 -лазером).

Автореферат и публикации соискателя достаточно полно и адекватно отражают основное содержание диссертации. По тематике, методам исследования и предложенным научным положениям диссертация Лосева А.А. соответствует паспорту специальности 1.3.18 -«Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

В ссылках приведённых в диссертации соискатель ссылается на авторов и источник заимствования материалов и отдельных результатов. В приведённых результатах отмечен личный вклад автора.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным
Положением о порядке присуждения ученых степеней.**

Диссертационное исследование Лосева А.А. на тему «Разработка и исследование лазерно-плазменного генератора многозарядных ионов для тяжелоионного инжектора И-3, И4 » выполнено на актуальную тему, представляет собой законченную научно квалификационную работу, имеет теоретическую и практическую значимость для отрасли знаний: -«Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника». Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. -«Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

Официальный оппонент: Зеленский Анатолий Николаевич

Доктор физ.мат. наук. 01.04.16-физика атомного ядра и элементарных частиц

Должность: Главный научный сотрудник

Место работы: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

Телефон: +7977-776-4017, Электронная почта: zelenskii.an@mipt.ru

29 октября 2025г.



А.Н. Зеленский

Подпись Зеленского Анатолия Николаевича заверяю

Ученый секретарь МФТИ, кандидат физ. мат. наук, доцент

«29 » октября 2025



Е.Г. Евсеев