

Отзыв официального оппонента
Донца Евгения Евгеньевича
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 А.А. в основном посвящена исследованию свойств плазмы и пучка ионов, вытягиваемого из плазмы, получаемой в лазерно-плазменном источнике ионов на базе ТЕА СО₂-лазера. Как необходимый этап, также исследованы режимы работы собственно используемого СО₂-лазера и произведена его оптимизация.

Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Объем диссертации составляет 99 страниц, включая 5 рисунков и 5 таблиц. Список литературы состоит из 87 наименований.

Во введении кратко описаны основные принципы работы лазерно-плазменных источников ионов и оценена актуальность данной работы в свете современных требований к источникам высокозарядных ионов как инжекторов пучков ионов в различные ускорительные комплексы. На основе этого обозначены цели и задачи, поставленные и решенные в рамках данной диссертационной работы, обозначены научная новизна и практическая значимость, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе, которая является достаточно адекватным обзором, перечислены основные физические процессы, влияющие на образование многозарядных ионов в лазерной плазме и на параметры выведенного пучка ионов. В краткой исторической ретроспективе дан обзор основных направлений развития и краткий анализ достигнутых параметров соответствующих лазерно-плазменных источников ионов как в России, так и за рубежом. Также в заключении первой главы диссертации обозначены перспективы дальнейшего использования и внедрения результатов данной диссертационной работы в рамках проекта МЦКИ (Межведомственный центр комплексных испытаний) в ускорительном центре НИЦ «Курчатовский институт».

Во второй главе дано развернутое описание разработанных и внедренных соискателем приборного «инструментария»:

- собственно лазера;
- «инструментарий» анализа параметров лазерно-индуцированной плазмы и параметров ионного пучка и совершенствование соответствующих методик измерений, которые составляют базу настоящего диссертационного исследования. Здесь главным «инструментом» является электростатический энергоанализатор для определения зарядового спектра, парциальных токов различных зарядностей и распределения ионов по энергии в ионном пучке, выведенном из лазерно-индуцированной плазмы. Вместе с разработанной,

внедренной и успешно апробированной соискателем методикой компьютерной обработки сигналов, использованный энергоанализатор плазмы представляет собой мощный метод исследования плазмы в наносекундном разрешении по времени. Не сомневаюсь, что данная комплексная методика анализа параметров плазмы и вытянутого из плазмы пучка многозарядных ионов будет востребована в других ускорительных центрах для анализа плазмы и ионных пучков в других типах ионных источников.

В третьей главе представлены основные результаты исследований.

Одним из значимых результатов представляется достигнутая рекордная (для данного типа лазеров) максимальная удельная мощность в 190 Мвт/л, снимаемая с активной среды импульсно-периодического CO_2 -лазера, работающего в режиме свободной генерации. Это удалось достигнуть благодаря найденному соискателем оптимальному соотношению состава рабочей газовой смеси $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He}$ в лазере и модернизации электрической схемы питания разряда. В результате обеспечена воспроизводимость параметров лазерного импульса, необходимая для проведения длительных сеансов работы лазера.

Ключевыми, на мой взгляд, в данной диссертационной работе являются проведенные исследования характеристик лазерной плазмы с помощью электростатического энергоанализатора. Полученные спектры зарядностей в совокупности с энергетическими распределениями ионов для экстрагированных из лазерно-индуцированной плазмы ионных пучков углерода, вольфрама, и, особенно, висмута (вплоть до зарядности Bi^{30+}) являются, на мой взгляд, главным подтверждением верности всех разработанных методик анализа и оптимизации ионного источника. Стоит отметить впервые получены данные по временам вылета ионов из плазменного облака вблизи поверхности облучаемой мишени, и количественно оценён эффект от внесения сеток в конструкцию системы извлечения ионного пучка на его зарядовый состав.

Следующие разделы главы посвящены применению источника для ионной имплантации и использованию разработанных методик для создания лазерно-плазменного источника на основе более мощного импульсного CO_2 -лазера.

В заключении обобщаются полученные в ходе работы результаты.

Методы измерения характеристик лазерного излучения, изучения параметров плазмы и ионного пучка с помощью электростатического энергоанализатора и измерителя эмиттанса являются главным результатом диссертационной работы и их работоспособность и эффективность не вызывает сомнений.

В то же время имеется несколько замечаний к автору диссертационной работы, которые, скорее, имеют характер пожеланий на будущее для продолжения исследований, представляющих интерес как для других типов ионных источников, так и фундаментальных исследований в физике плазмы.

1) Сделанный на стр.57-58 диссертации вывод о более интенсивном распылении материала сеток для тяжелых (Bi) ионов (в сравнении, например, с углеродом), и соответствующем влиянии образующихся атомарных «облаков» на прохождение и параметры пучка извлекаемых из плазмы пучков высокозарядных ионов, конечно, имеет статус в качестве рабочей гипотезы. Но стоит отметить, что ситуация представляется существенно более сложной, особенно с учетом эффектов высоких зарядностей тяжелых ионов. Эти вопросы, вместе с основным вопросом о роли сеток требует дальнейших исследований.

2. Использование энергоанализатора для точного анализа спектра зарядностей висмута (рис. 3.41, стр. 81) указывает на наличие двух относительных максимумов интенсивности: в районе Bi19+ и в районе Bi24+, что не имеет объяснения в рамках устоявшихся представлений об эволюции спектра зарядностей в лазерно-индуцированной плазме. Представляется очень важным и интересным более детальное исследование зарядовых спектров тяжелых элементов (таких, как висмут и тяжелее) в различных условиях, тем более имеющийся инструментарий позволяет это сделать.

3. По имеющимся результатам пока невозможно сделать вывод о стабильности параметров пучка высокозарядных ионов, извлекаемого из использованных лазерно-плазменных ионных источников, на масштабах времени недель и месяцев непрерывной работы, что необходимо для реального планирования использования источников в ускорительных сеансах.

Данные замечания не критичны и не влияют на общее впечатление от работы.

Диссертация представляет собой достаточно законченную научно-исследовательскую работу, выполнена на высоком уровне. Соискатель показал свою высокую научную и техническую квалификацию, преодолев в данном диссертационном исследовании значительные технологические и математические трудности.

Основные результаты диссертации 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.

Автореферат достаточно полно и адекватно отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертационная работа Лосева Антона Андреевича «Разработка и исследование лазерно-плазменного генератора многозарядных ионов для тяжелоионного инжектора И-3, И-4», на мой взгляд, отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней»,

утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, 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.

Официальный оппонент

Донец Евгений Евгеньевич

кандидат физико-математических наук

Международная межправительственная научно-исследовательская организация
Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Московская область, г.
Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

Лаборатория физики высоких энергий имени В.И. Векслера и А.М. Балдина,
Ускорительное отделение, Научно-экспериментальный отдел инжектора и
кольца Нуклотрона, сектор источников высокозарядных ионов, начальник
сектора

Тел.: +7(49621)65806 , email: edonets@jinr.ru

« 31 » октября 2025 г.

Е.Е. Донец

Подпись Донца Евгения Евгеньевича удостоверяю

Учёный секретарь

Лаборатория физики высоких энергий ОИЯИ



А.П. Чеплаков