



ФАНО России
Федеральное государственное
бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики
Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

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

Тел (831) 432-14-77

Факс (831) 418-90-42

E-mail: dir@appl.sci.nnov.ru

http://www.ipfran.ru

ОКПО 04683326, ОГРН 1025203020193,

ИНН/ КПП 5260003387/526001001

11.05.2018

№

120/1855

На №

от

«УТВЕРЖДАЮ»

Врио директора Федерального
государственного бюджетного научного
учреждения «Федеральный
исследовательский центр Институт
прикладной физики Российской академии
наук»,
чл.-корр РАН



Денисов Г.Г.

«11» мая 2018

ОТЗЫВ

Ведущей организации Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» на диссертацию Сотникова О.З. «Исследование источника отрицательных ионов водорода для инжектора высокоэнергетичных нейтралов», представленную в качестве диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Актуальность темы исследования

Исследования по программе управляемого термоядерного синтеза (УТС) дали мощный толчок к развитию физики и техники ионных источников. Сегодня нейтральная инжекция рассматривается как один из основных методов нагрева плазмы, а ее реализация на установках масштаба ИТЭР требует создания источников отрицательных ионов с ранее недоступными параметрами. Выдающиеся успехи сотрудников Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН в этой области широко известны во всем мире. Именно исследованиям в этой актуальной области и посвящена диссертация О.З. Сотникова.

Целью работ, представленных в диссертации, являлась разработка и изучение сильноточного поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов нового типа. Оригинальными элементами, введенными в конструкцию источника ИЯФ, являются прогрев и охлаждение электродов ионно-оптической системы горячим теплоносителем, использование распределенной направленной подачи цезия на эмиттер и формирование оптимальной геометрии магнитного поля в области магнитного фильтра и вытягивания пучка.

Оценка структуры и содержания работы

Структура диссертационной работы логически выдержана, прослеживается достаточно четкая последовательность в изложении материала, выводы и рекомендации убедительны и имеют универсальный характер.

Основное содержание работы изложено на 134 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 85 источников, списка сокращений и условных обозначений. Работа содержит 7 таблиц, 44 рисунка.

Разделы диссертации имеют адекватное построение, характеризуются последовательностью изложения, корректностью суждений и логичностью выводов. Текст диссертации сбалансирован, иллюстрирован рисунками и таблицами. Рисунки информативны, лаконичны и хорошо доносят суть иллюстрируемой идеи. Таблицы наглядны, не перегружены несущественными деталями и служат полезным дополнением к текстовому материалу. Список использованной литературы оформлен в соответствии с действующим стандартом

В первой главе дан обзор источников ОИ, разработанных для инжекторов нейтралов УТС, которые в настоящее время являются одной из основных систем нагрева плазмы в экспериментальных установках с магнитным удержанием плазмы для применения в реакторах УТС.

Во второй главе приведено описание ВЧ источника ОИ, разработанного в ИЯФ для использования в инжекторе высокоэнергетичных нейтралов. В начале второй главы рассматриваются процессы и механизмы получения интенсивных пучков ОИ, вторая часть второй главы посвящена конструкции источника ОИ, разрабатываемого в ИЯФ, и описанию его отличительных характеристик.

В третьей главе приведено описание экспериментов по получению интенсивного пучка ОИ, исследованию формирования и транспортировки пучка ОИ и экспериментальному подтверждению эффективности заложенных в конструкцию ВЧ источника ИЯФ новых элементов. Были изучены эмиссионные характеристики источника, влияние цезия на характеристики источника, увеличение высоковольтной прочности источника при нагреве электродов ИОС, влияние положительного напряжения смещения на плазменном электроде на эмиссионные характеристики источника.

В четвертой главе приведены результаты исследований транспортировки пучка с энергией 100 кэВ в линии транспортировки.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и теме диссертации

Тема диссертации полностью соответствует её содержанию. Содержание диссертации соответствует области исследования «2. Получение пучков заряженных частиц (в т.ч. поляризованных), расчетно-теоретические и экспериментальные исследования параметров пучков» паспорта специальностей ВАК России 01.04.20 - Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Соответствие автореферата диссертации её содержанию

Текст автореферата правильно отражает содержание диссертации и содержание публикаций по теме диссертации, которых опубликовано 12 штук.

Личный вклад соискателя в получении результатов исследования;

Участие автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. При определяющем участии автора проведены экспериментальные исследования оптимизации параметров пучка, разработаны теоретико-методические основы получения, ускорения и транспортировки пучков ОИ, получен пучок ОИ с проектными параметрами, определены пути дальнейшей оптимизации источника. При активном личном участии автора были проведены анализ и обработка результатов исследований, а также подготовлены основные статьи и доклады по результатам работы, доложенные на научных конференциях и семинарах международного и всероссийского уровней.

Степень достоверности результатов исследования;

Достоверность результатов обоснована примененными современными методами измерений и, естественно, добросовестностью автора, не вызывающей ни малейших сомнений у коллег.

Представленные положения и выводы чётко сформулированы и хорошо обоснованы в тексте диссертации. Полученные результаты хорошо известны специалистам, так как были представлены на многочисленных авторитетных отечественных и международных конференциях.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором диссертации результатов;

Нужно отметить, что в целом полученные результаты позволяют выработать подходы к дальнейшему развитию ВЧ источников отрицательных ионов водорода и модернизации их конструкции, способствующие достижению характеристик, необходимых для успешной реализации крупных проектов по УТС.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертации могут быть использованы в работе Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, СПбПУ им. Петра Великого, НИЦ «Курчатовский институт» и др.

Новизна полученных результатов

Следует отметить следующее из наиболее ярких результатов. Получен пучок с рекордной для ВЧ источников совокупностью параметров: с током пучка ионов H^+ 0,8 А, энергией 93 кэВ и длительностью импульсов 12 нс и с током 1,2 А, энергией 84 кВ с длительностью импульсов 1,7 нс при средней плотности тока в эмиссионных отверстиях 28 мА/см².

Разработана и исследована процедура подачи цезия на эмиттер отрицательных ионов в источнике, использующая ввод цезия непосредственно на периферию нагретого плазменного электрода через распределительную трубку. Доказано, что нагрев электродов источника приводит к повышению высоковольтной прочности ионно-оптической системы источника, а также к усиленному перераспределению цезия, и способствует образованию однородного цезиевого покрытия на эмиттере отрицательных ионов.

Впервые экспериментально исследована транспортировка интенсивного пучка отрицательных ионов через линию с поворотными магнитами, обеспечивающими смещение ионного пучка перед его вводом в ускоритель и тем самым осуществляющих эффективную очистку пучка от сопутствующих паразитных частиц. Доказано, что при типичном для источников давлении водорода в газоразрядной камере 0,4 Па и достигнутом давлении в линии транспортировки пучка $3 \cdot 10^{-3}$ Па значительная часть обдирки пучка происходит в области вблизи ионно-оптической системы источника, а транспортировка через 3,5 м линию не приводит к значительному уменьшению тока пучка.

Замечания по диссертационной работе

Остановимся далее на некоторых замечаниях по поводу текста рецензируемой диссертации.

1. Описанные в работе исследования проводились при фиксированной геометрии ионно-оптической системы источника. Из текста не до конца ясно, проводилась ли оптимизация ее параметров и на каких основаниях были выбраны размеры отверстий в электродах, межэлектродные расстояния и т.д.

2. В работе не приводятся экспериментальных данных об эмиттансе формируемого пучка отрицательных ионов водорода. Учитывая необходимость

дальнейшего ускорения пучка, обсуждение данного параметра и его соответствия характеристикам предполагаемого ускорителя представляется уместным.

3. Численное моделирование процесса извлечения и формирования ионного пучка выполнено с использованием ряда приближений: расчеты проведены для осесимметричной элементарной ячейки ионно-оптической системы. При этом ускоряющий электрод, имеющий щелевую структуру, не может быть полноценно разбит на осесимметричные ячейки. В качестве рекомендации на будущее можно предложить использовать более современное открытое программное обеспечение с возможностью полноценного трехмерного моделирования, например, IB Simu.

4. С точки зрения оформления текста диссертации несколько странным выглядит полное отсутствие ссылок во введении (все необходимые ссылки приводятся в последующих разделах). Также дополнение текста введения иллюстрациями схем установок, используемых в других научных группах, упростило бы их сравнение с системой, разработке которой посвящена диссертация.

Заключение по диссертации о соответствии её требованиям

Подводя итог анализу представленной диссертации, можно заключить, что мы имеем дело с качественной работой, выполненной по актуальной проблематике современной техники. В представленной работе решены принципиальные вопросы создания современных источников отрицательных ионов водорода с предельной величиной тока. Замечания по диссертации, сделанные выше, никак не влияют на результаты исследований и их высокую оценку.

Диссертация Сотникова Олега Захаровича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для развития соответствующей отрасли знаний, а именно ;

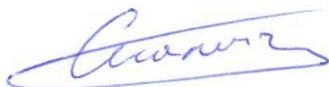
Диссертация соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (пунктам 9-11, 13, 14), утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Сотников Олег Захарович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Доклад Сотникова О.З., отражающий основные результаты диссертации, был заслушан на научном семинаре Отделения физики плазмы и электроники больших мощностей Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской

академии наук» 17 апреля 2018 г. Работа получила единогласную положительную оценку участников семинара.

Отзыв составил:

Заведующий лабораторией ионных источников
Федерального государственного бюджетного
научного учреждения «Федеральный
исследовательский центр Институт прикладной
физики Российской академии наук»
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
доктор физико-математических наук
по специальности 01.04.08 – физика плазмы



Скалыга Вадим Александрович.

тел. 8 831 4164704

e-mail: skalyga@ipfran.ru

Отзыв утвержден на семинаре Отделения физики плазмы и электроники больших мощностей Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» 17 апреля 2018 г.

Зам. председателя семинара,
д.ф.-м.н., профессор



С.В. Голубев