

## ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию Олега Захаровича Сотникова "Исследование источника отрицательных ионов водорода для инжектора высокоэнергетичных нейтралов", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника**

Диссертационная работа Олега Захаровича Сотникова посвящена разработке сильноточного источника отрицательных ионов водорода, исследованию его параметров и характеристик, изучению особенностей процессов, реализуемых при генерации сильноточных квазинепрерывных ионных пучков, для создания инжектора высокоэнергетичных нейтралов.

**Актуальность тематики исследований** диссертационной работы заключается в необходимости развития инжекторов нейтральных атомов водорода для нагрева плазмы в установках с её магнитным удержанием, обеспечивающего протекание термоядерных реакций. Поскольку метод нейтрализации пучков положительных ионов водорода эффективен в области энергий ионов менее 60 кэВ, а энергия инжектируемых нейтралов в современных установках должна кратно превышать это значение, генерация пучков нейтралов на основе нейтрализации высокоэнергичных пучков отрицательных ионов водорода является перспективным и безальтернативным направлением развития этих работ. В связи с этим, тематика диссертации, направленная на создание и совершенствование сильноточного высокочастотного поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов водорода, ключевого элемента инжектора пучков высокоэнергетичных нейтралов, является, безусловно, актуальной.

**Новизна результатов диссертации** заключается в получении новых экспериментальных и теоретических результатов по генерации, ускорению и транспортировке сильноточных пучков отрицательных ионов водорода в многоапертурном высокочастотном поверхностно-плазменном источнике. Она доказана и отражена в научных положениях, выносимых на защиту. Главным результатом работы является получение ионного пучка с высокими значениями тока, энергии и длительности импульса, открывающего перспективу создания

"многоамперного" ионного источника для построения полномасштабной версии инжектора нейтральных атомов.

**Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов** подтверждается систематическим характером исследований, в том числе с использованием независимых и дублирующих методик измерения параметров полученного ионного пучка, сравнением и хорошим совпадением экспериментальных результатов с результатами теоретических оценок и расчетов, а также сопоставлением и отсутствием противоречий полученных результатов с результатами других исследований. На всех этапах исследований приводится подробное обсуждение полученных результатов и делается мотивированный выбор конкретных решений. Научные положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации диссертационной работы представляются обоснованными и доказанными в тексте самой диссертации.

**Материалы диссертации прошли апробацию** на шести международных конференциях, были доложены на школах и семинарах, опубликованы в семи статьях в рецензируемых ведущих научных журналах из списка, определенного ВАК РФ, из которых пять статей - это статьи в авторитетном научном журнале Review of Scientific Instruments. В связи с большим количеством публикаций, выступлений на научных мероприятиях и глубоким пониманием решаемых проблем, отраженном в тексте диссертации, личное участие автора диссертации в получении результатов, составляющих её основу, не вызывает сомнений и является определяющим.

**Практическая значимость полученных автором результатов** состоит в возможности использования их для дальнейшего повышения параметров и улучшения характеристик источников отрицательных ионов. В работе разработан новый метод повышения высоковольтной прочности ускоряющего и вытягивающего промежутков источника отрицательных ионов водорода с подачей цезия, а также новый метод равномерного распределения цезия на поверхности эмиттера большой площади. Исследованы вопросы оперативной регистрации токов в цепях питания ионного источника, позволяющие определять и контролировать динамику характеристик ионного пучка в течении импульса секундной длительности. Найденные технические решения и методы, а также приобретенный опыт, будут полезны при создании источников отрицательных ионов и для других экспериментальных задач.

**Оценка содержания диссертационной работы** показала, что в ней представлен значительный объем проделанных экспериментальных и расчетных исследований, несомненно соответствующий уровню кандидатской диссертации. Диссертация охватывает весь путь от детального описания принципа работы ионного источника и исследования его ионно-эмиссионных характеристик, до экспериментов по транспортировке пучка ионов с низкими потерями в криволинейном магнитном поле поворотных магнитов на расстояние более трех метров, определяемое расположением ускорительной трубки на напряжение уровня 1 МВ. Таким образом диссертация представляется завершенной работой, имеющей хорошие перспективы дальнейшего развития, заключающиеся в создании полномасштабной многоамперной версии ионного источника для построения инжектора нейтральных атомов изотопов водорода.

**Достоинства диссертации** заключаются в том, что в ней проведен и представлен подробный анализ современного состояния дел в вопросе генерации пучков отрицательных ионов для инжекторов высокоэнергетичных нейтральных пучков, детально рассмотрены методы генерации сильноточных пучков отрицательных ионов. Получены значимые для развития физики и техники пучков отрицательных ионов и инжекторов высокоэнергетичных нейтралов результаты, заключающиеся в осуществлении генерации пучка отрицательных ионов водорода с током уровня 1 А при энергии ионов 100 кэВ и длительности около 10 секунд. Обеспечена транспортировка ионного пучка в линии с двумя поворотными магнитами, сепарирующими ионный пучок от атомарных примесей, на расстояние 3,5 м, при этом потери ионов в сечении пучка 30x30 см. кв. составили всего лишь 20 %. Было показано, что одним из основных факторов, влияющих на эмиссионные токи источника, является разность потенциалов между плазмой и плазменным электродом. Были исследованы зависимости эмиссионных токов источника от всех его основных параметров, предложен и реализован новый метод определения тока пучка ионов по токам в цепях источника, доказана корректность измерений этим методом, повышена электрическая прочность ускоряющего промежутка ионного источника. Была разработана процедура подачи цезия, основанная на измерении давления водорода в вакуумном баке. Использование этой процедуры позволяет предотвратить избыточную подачу цезия, которая приводит к пробоям в зазорах ионно-оптической системы, и обеспечивает генерацию пучка ионов с током около 1 А в течение 7 недель.

Диссертация имеет четкую структуру, обладает внутренним единством, содержит новые значимые результаты, изложена простым и понятным языком, хорошо оформлена. Все вопросы и результаты исследований, изложенные в ней, рассмотрены подробно и доказывают научные положения, выносимые на защиту. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. Автореферат диссертации правильно и полно отражает её основное содержание.

#### **Замечаний по диссертации:**

1. В работе показано, что эмиссионный ток ионного источника зависит от разности потенциалов между плазменным электродом и прилегающей к нему плазмой. Вместе с тем, результаты по прямому измерению потенциала плазмы, которые несомненно украсили бы эту работу, в тексте диссертации не представлены.

2. При численном моделировании траекторий ионов пучка автор ограничился двухмерным приближением. Такое упрощение для многоапертурной ускоряющей системы ионного источника представляется спорным. Тем более, что современные программы позволяют осуществлять трехмерное моделирование как ионной, так и электронной составляющих пучка любой конфигурации.

3. Разработанный ионный источник с номинальным током пучка 1,5 А является прототипом "многоамперного" источника с током пучка 9 А в масштабе 1:4. Однако, возможность получения таких параметров в «многоамперном» ионном источнике на основе полученных автором результатов в тексте диссертации констатируется, но детально не обсуждается.

Отмеченные замечания не снижают высокий уровень научных исследований, представленный в диссертационной работе.

#### **Заключение**

Диссертация Олега Захаровича Сотникова на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук "Исследование источника отрицательных ионов водорода для инжектора высокоэнергетичных нейтралов" является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные решения и разработки, имеющие существенное значение для развития физики и техники пучков ионов и инжекторов высокоэнергетичных нейтралов. Считаю, что диссертация полностью соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а автор диссертации

Сотников Олег Захарович безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Официальный оппонент,  
доктор технических наук

Юшков Г.Ю.

27 августа 2018 г.

Юшков Георгий Юрьевич, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук; доктор технических наук по специальности 05.27.02 - вакуумная и плазменная электроника; старший научный сотрудник по специальности 05.27.02 - вакуумная и плазменная электроника; электронная почта: GYushkov@mail.ru; тел.: (3822)491776; адрес: 634055, гор. Томск, просп. Академический 2/3.

«Подпись ведущего научного сотрудника Института сильноточной электроники СО РАН доктора технических наук Юшкова Г.Ю. удостоверяю».

Ученый секретарь Института  
сильноточной электроники СО РАН,  
доктор физико-математических наук



Пегель И.В.

