

ОТЗЫВ

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

Диссертация О.З. Сотникова посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию получения интенсивных высокоэнергетичных пучков отрицательных ионов водорода из источников с добавлением цезия для дальнейшего использования в виде атомарного пучка для нагрева плазмы в установках с магнитным удержанием.

Актуальность темы диссертации.

В настоящее время для нагрева плазмы, в установках с магнитным удержанием, используется инжекция высокоэнергетичных нейтралов. Для инжекторов высокоэнергетичных атомов водорода выбор вида ускоряемых ионов зависит от требуемой энергии. Инжекторы нейтралов с энергией частиц до 100 кэВ основаны на нейтрализации пучков положительных ионов, а с энергией инжекции более 100 кэВ - на нейтрализации пучков отрицательных ионов (далее - ОИ) водорода. Увеличение энергии положительных ионов в инжекторах высокоэнергетичных атомов водорода приводит к уменьшению эффективности нейтрализации и соответствующему уменьшению получаемого потока атомов, тогда как при получении пучков атомов через пучки отрицательных ионов достигается эффективность около 60% на газовой перезарядной мишени (и выше на плазменной и фотонной мишенях, которые пока находятся в начальной стадии разработки). В свою очередь, создание крупных установок с магнитным удержанием плазмы

требует повышения энергии инжектируемых частиц. Например, для строящегося токамака ИТЭР необходима инжекция с энергией частиц более 0.5 МэВ/нуклон. В инжекторе нейтралов для установки термоядерного синтеза, такой как ИТЭР, источник ОИ должен обладать высоким током 48 А ионов D^+ , плотностью тока порядка 30 мА/см², и длительностью импульса до 3600 с. Работы в этом направлении ведутся во многих лабораториях мира (NIFS, JAERI, Cadarache, IPP, Consorzio RFX, ИЯФ), но пока такие параметры в совокупности и одновременно не получены.

С целью создания инжекторов с необходимыми высокими параметрами становятся насущными разработка новых принципов и поиск новых методов получения мощных пучков ОИ в сильноточных многоапертурных источниках.

В настоящее время для генерации ОИ применяется поверхностно-плазменный метод, для повышения эффективности которого в источник подаётся цезий. Поверхностно-плазменная генерация с необходимостью требует создания устойчивого оптимального однородного цезиевого покрытия на эмиттерах ОИ с большой площадью. Для создания источника с большой площадью эмиттера требуется вести работы по увеличению плотности тока эмиссии ОИ равномерного по всей площади эмиттера, разработке методов поддержания оптимального цезиевого покрытия, по формированию пучков ОИ в многоапертурных ионно-оптических системах и ускорению этих пучков до высоких энергий.

Структура и объем диссертационной работы.

Диссертация изложена на 134 страницах, состоит из четырех глав, введения, заключения и списка литературы из 85 наименований. Работа содержит 7 таблиц, 44 рисунков.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость исследования, обсуждаются

личный вклад автора и степень достоверности полученных результатов, излагаются основные научные положения, выносимые на защиту, а также приводится информация об апробации диссертационной работы и публикациях по теме исследования.

Глава 1 посвящена обзору существующих и разрабатываемых в мире источников ОИ.

В главе 2 подробно описываются работы по созданию и исследованию сильноточного источника ОИ для инжектора нейтралов, разрабатываемого в ИЯФ. Рассмотрены методы получения интенсивных пучков ОИ и сформулированы требования к таким источникам. Также описывается конструкция и характеристики источника ОИ, созданного в ИЯФ.

Глава 3 посвящена исследованию генерации и формированию пучка ОИ в источнике и параметров работы источника. Особое внимание посвящено влиянию, параметрам, характеристикам и условиям вывода на рабочий режим, связанным с присутствием цезия в источнике.

Глава 4 посвящена исследованию транспортировки пучка через линию транспортировки сквозь два электромагнита и исследованию его характеристик на входе в калориметер пучка на расстоянии более 3 метров.

В заключении сформулированы основные результаты проведенных исследований, кратко обсуждаются возможные применения полученных в диссертации аппроксимаций и характеристик.

Степень обоснованности научных положений, выводов и результатов, представленных в диссертации.

Изложенные в диссертационной работе научные положения получены при использовании современных методов экспериментальной физики, в многочисленных и скрупулёзных экспериментах с исследованием зависимостей практически ото всех влияющих параметров работы ионного

источника. Результаты представляются вполне обоснованными. Для однозначной трактовки полученных в работе результатов, исследования проводились с использованием нескольких независимых диагностик. Достоверность приведённых в работе экспериментальных результатов подтверждается их высокой воспроизводимостью.

По теме диссертационного исследования опубликовано 12 работ общим авторским объемом 2.5 печ. л., в том числе 7 научных статей (общим авторским объемом 1.7 печ. л.) в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК при Минобрнауки России и приравненных к ним.

Результаты диссертационного исследования были представлены на международных конференциях: 4th International Symposium on Negative ions, Beams and Sources (Garching, Germany, 2014); XII, XIII Курчатовская молодежная научная школа (г. Москва, 2014, 2015); 42, 43, 44 конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (г. Звенигород, Московской обл., 2015, 2016, 2017); 16th International Conference on Ion Source (New York City, USA, 2015); 11-th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (Новосибирск, 2016); 5th International Symposium on Negative ions, Beams and Sources (Oxford, UK, 2016). Работы, составляющие материал диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах в ИЯФ СО РАН (2012-2017).

Результаты исследования были апробированы и внедрены в практику в ФГБУН Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Новизна научных положений и результатов.

К наиболее значимым новым результатам, представленным в диссертационной работе, можно отнести разработку теоретических и прикладных принципов получения, ускорения и транспортировки сильноточных пучков ОИ в многоапертурных источниках для инжекторов

высокоэнергичных нейтралов, разработку и исследования контроля цезиевого покрытия внутри источника, способ подачи паров цезия вдоль поверхности плазменного электрода. Результаты проведенных исследований имеют высокое практическое значение для улучшения характеристик источников ОИ инжекторов высокоэнергичных атомов водорода, методов тренировки источников ОИ после кратковременных и долговременных выключений, а также для повышения эффективности получения и транспортировки пучка ОИ в подобных инжекторах. Полученные результаты позволяют сформировать систему прикладных рекомендаций по увеличению тока, энергии и длительности пучка. Предложенные и исследованные методы повышения высоковольтной прочности ионно-оптических систем источников ОИ и новые методы распределенной подачи цезия на поверхность эмиттеров большой площади могут быть использованы в разрабатываемых и действующих инжекторах высокоэнергичных атомов водорода.

Элементы научной новизны заключаются в следующем:

1. Разработан и исследован ВЧ источник ОИ с большой площадью эмиссии, использующий принципиально новые элементы, позволяющие увеличить ток, энергию и длительность импульса пучка ОИ.
2. Экспериментально проверена и доказана эффективность применения впервые предложенных для ВЧ источников с большой площадью эмиссии физических принципов, заложенных в конструкцию источника. Разработана новая методика создания устойчивого цезиевого покрытия на эмиссионной поверхности многоапертурного ВЧ источника ОИ. Разработана новая методика повышения высоковольтной прочности источника, работающего с подачей цезия. Обнаружено и исследовано влияние потенциала плазмы источника на эффективность ионной и электронной эмиссии.

3. Впервые экспериментально исследована транспортировка интенсивного пучка ОИ через широкоапертурную линию транспортировки низкой энергии, применяемую в инжекторе ИЯФ для очистки от вторичных и сопутствующих частиц. Показано, что в линии транспортировки пучок ОИ отделяется от высокоэнергетичных нейтралов, образующихся при обдирке.

Замечания к диссертационной работе

1) В работе прямо не указан путь дальнейшего применения таких пучков ОИ, а именно, способ (тип ускорителя, тип мишени) доускорения и преобразования пучка ОИ в пучок атомов.

2) Следует указать, что в анализе источников ОИ с применением напуска цезия и ускорением ОИ до нескольких сотен кэВ упущены результаты работ в лаборатории отрицательных ионов в Кадараше, Франция, в которых, в частности, исследовался метод и результаты доускорения ОИ в одноапертурном ускорителе типа SingAp (Single Aperture), который, скорее всего найдет применение и в данном случае (публикации в двухтысячных годах в различных журналах авторов R.S Hemsworth, L.Svenson и др).

3) Следует отметить также, что угловая расходимость полученных пучков ОИ (около 40 мрад) пока еще далека от требующихся, например, в ИТЭР (меньше 7 мрад).

4) Уменьшение потерь пучка при его извлечении-формировании в ИОС при столкновениях с попутно вытекающим газом, а также уменьшение обратного потока положительных ионов, могло бы быть достигнуто в более простой схеме, когда источник ОИ помещен в вакуум и эффективная откачка сопутствующего газа обеспечивается через боковые зазоры между электродами ИОС.

Представленные выше замечания носят рекомендательный характер и никак не снижают общей высокой оценки работы и квалификации ее автора.

