

«Утверждаю»

Директор

Федерального государственного
бюджетного научного учреждения

«Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной физики Российской
академии наук» (ИПФ РАН),

член – корр. РАН
Г.Г. Денисов



«20» апреля 2020 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу ЕМЕЛЕВА Ивана Сергеевича
«Генератор плазмы с инверсным магнитным полем для тандемного ис-
точника отрицательных ионов и других применений»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Диссертация Емелева И.С. посвящена экспериментальному исследованию генераторов плазмы для источников отрицательных ионов и плазменной мишени для нейтрализации мощных пучков отрицательных ионов.

Актуальность исследования генераторов плазмы для источников отрицательных ионов определяется их широким применением в ускорительной технике и в термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы. В ускорительной технике пучки отрицательных ионов используются в тандемных ускорителях, при перезарядной инжекции в накопители, при ускорении в циклотронах. В установках с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы отрицательные ионы водорода используются для получения пучков нейтральных атомов водорода высокой энергии.

В ИЯФ СО РАН разрабатывается ускоритель-тандем для реализации бор-нейтронозахватной терапии рака. Там же был предложен источник отрицательных ионов водорода для ускорителя БНЗТ, названный «тандемный поверхностью-плазменный источник отрицательных ионов водорода». Используемое в конструкции разделение функций генерации плазмы и генерации отрицательных ионов на поверхности электрода позволяет оптимизировать параметры плазмы в зоне вытягивания пучка, а, следовательно, и качество

формируемого пучка. Для генерации плазмы в tandemном источнике ионов предложено использовать генератор плазмы с инверсным магнитным полем. Одной из задач данной диссертационной работы было исследование генерации плазмы в таком источнике.

В современных термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы мощные атомарные пучки получили широкое применение для нагрева плазмы и ввода в плазму вещества. В таких приложениях требуются атомарные пучки с энергией ~ 1 МэВ, мощностью $10 - 100$ МВт. Для создания пучков атомов водорода с энергиями > 100 кэВ необходимо ускоренные пучки отрицательных ионов водорода пропускать через нейтрализующую мишень. В настоящее время в мощных инжекторах на основе отрицательных ионов в качестве нейтрализатора используют газовые мишени. При использовании в газовой мишени в качестве рабочего газа водорода коэффициент нейтрализации $\sim 60\%$. Коэффициент нейтрализации может быть увеличен до $\sim 85\%$ при использовании плазменной нейтрализующей мишени. В ИЯФ СО РАН был создан прототип такого устройства. Одной из задач данной диссертационной работы было исследование генерации плазмы в плазменной мишени.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 101 страницу, включая 52 рисунка. Список литературы содержит 66 наименований.

В **Введении** обсуждается актуальность работы, сформулирована цель и предмет исследования, а также описана структура диссертации.

В **Главе 1** описан tandemный поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов и две версии генератора плазмы этого источника, на которых проводились дальнейшие экспериментальные исследования.

Глава 2 посвящена экспериментальному исследованию генератора плазмы для tandemного источника отрицательных ионов. Приводится описание стенда, на котором проводилось исследование, применяемых диагностик, системы питания разряда и результатов экспериментов.

В **Главе 3** сформулированы требования к плазменной мишени для нейтрализации пучков отрицательных ионов высокой энергии, а также приводиться описание прототипа плазменной нейтрализующей мишени, разработанной и изготовленной в ИЯФ СО РАН.

Глава 4 посвящена экспериментальному исследованию прототипа плазменной перезарядной мишени. Приводится описание стенда, на котором проводилось исследование, применяемых диагностик, используемой системы питания разряда и результатов экспериментов.

В заключении изложены основные результаты, полученные в диссертации

Стоит отметить следующие **научные результаты**, полученные в диссертации:

1. **Впервые** предложен и исследован генератор плазмы с инверсным магнитным полем для использования в тандемном поверхностно-плазменном источнике отрицательных ионов водорода

2. **Впервые** предложена и исследована стационарная плазменная мишень с инверсными магнитными пробками для нейтрализации пучков отрицательных ионов высокой энергии.

3. Предложена схема измерения параметров плазмы в плазменной мишени с помощью инжекции диагностического атомарного пучка.

4. Создан прототип стационарной плазменной мишени с инверсными магнитными пробками для нейтрализации пучков отрицательных ионов высокой энергии с плотностью плазмы более 10^{13} см⁻³, степенью ионизации 50%.

Полученные автором результаты имеют большую **практическую значимость**. Показана возможность регулирования энергии положительных ионов, бомбардирующих поверхность электрода, на котором происходит образование отрицательных ионов водорода, в тандемном-поверхностно-плазменном источнике отрицательных ионов водорода. Впервые измерена эффективность подавления потока плазмы магнитной пробкой с инверсным магнитным полем. Предложена схема измерения параметров плазмы в плазменной мишени с помощью инжекции диагностического атомарного пучка.

Обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается корректным анализом и систематизацией экспериментальных данных, а также их соответствием результатам численного моделирования изучаемых процессов в плазме.

Все разделы диссертации освещались на нескольких международных конференциях и были опубликованы в рецензируемых журналах.

По представленной диссертационной работе есть ряд **замечаний**:

1. Было бы удобнее, если бы работы, по материалам которых осуществляется защита, были представлены в тексте диссертации, в том числе, отдельным списком, как, например, в автореферате, (а не растворены в общем списке литературы) с разбивкой по результатам диссертации.

2. В списке литературы указана неверная ссылка на одну из работ автора. Так в ссылке под номером 36 вместо 2018 года указан 2017. В ссылке 37 не указаны том (2052) и номер публикации (070005).

3. В тексте диссертации положения почему-то указаны вперемешку с результатами, причем сформулированы так, что не понятно, где результат, а где положение. Иногда создается впечатление, что представлены только результаты. В автореферате это исправлено. Стоит отметить, что по части формулировок положений, результатов и новизны этих результатов автореферат существенно выигрывает по сравнению с текстом самой диссертации. Возможно, это связано с тем, что опубликован он существенно позже текста диссертации. Тем не менее, даже в автореферате положения сформулированы таким образом, что они выглядят просто как результаты без четкой формулировки, что привело к данным результатам. Например, в положении номер 3 из текста автореферата - «*Существенное подавление потока плазмы из мультипольной магнитной ловушки в отверстие относительно большого диаметра магнитным полем обратного, по отношению к направлению в ловушке, направления.*» - указано, что обеспечило существенное подавление потока плазмы, но, как кажется, если бы сначала шли слова «Магнитное поле обратного, по отношению к направлению в ловушке, направления обеспечило существенное подавление потока плазмы» было бы яснее. В иных случаях, как в положении 2, неясно, что же обеспечило данный результат. В то время как в самом тексте диссертации это указано.

4. Во второй главе при описании экспериментов с первой версией генератора указано, что из-за перегрева размагниилась часть перманентных магнитов. Однако, не до конца ясно, было ли это счастливой случайностью или нет? Дело в том, что вторая версия генератора, с более сильным полем, в том числе в инверсной части, продемонстрировала существенное подавление потока плазмы в конвертор. Не было бы в случае с первым генератором того же самого эффекта, если бы поле не просело в два раза из-за размагничивания? В тексте нет указания, где именно (в какой части камеры) произошел перегрев, поэтому не ясно, просело ли поле в инверсной части.

5. Результаты экспериментов со второй версией генератора выглядят как-то чересчур пессимистично, так как подаются как отрицательный результат с точки зрения источника отрицательных ионов. Может быть, имело бы смысл сразу подавать эти результаты как исследование источника плазмы для миши?

Тем не менее, указанные замечания ни в коей мере не снижают качество данной работы.

Диссертация Емелева Ивана Сергеевича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной

работой, обладающей научной новизной и содержащей результаты, имеющие существенное значение для физики источников отрицательных ионов и инжекторов нейтральных атомов.

Работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы»

Отзыв составил:

Заместитель директора по научной работе
ФИЦ ИПФ РАН, доктор физ.-мат. наук. по
специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Рабочий почтовый адрес: 603950, г. Нижний
Новгород. БОКС - 120, ул. Ульянова, 46. Ра-
бочий телефон: 8(831) 436-60-86.

e-mail: skalyga@ipfran.ru



Скалыга

Вадим

Александрович