

На правах рукописи



ЕМЕЛЕВ Иван Сергеевич

**ГЕНЕРАТОР ПЛАЗМЫ С ИНВЕРСНЫМ МАГНИТНЫМ
ПОЛЕМ ДЛЯ ТАНДЕМНОГО ИСТОЧНИКА
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ И ДРУГИХ ПРИМЕНЕНИЙ**

01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ИВАНОВ – доктор физико-математических наук,
Александр Александрович Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

МИНАЕВ – кандидат физико-математических наук,
Владимир Борисович Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, ведущий научный сотрудник.

КРАСИЛЬНИКОВ – доктор физико-математических наук,
Анатолий Витальевич Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, директор Частного учреждения «ИТЭР-Центр».

ВЕДУЩАЯ – Федеральное государственное бюджетное
ОРГАНИЗАЦИЯ научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород.

Защита диссертации состоится « 21 » _____ мая _____ 2020 г. в « 10:00 » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН.

(<http://www.inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#д-003-016-03>)

Автореферат разослан « 19 » _____ марта _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

П.А. Багрянский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Пучки отрицательных ионов нашли широкое применение 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 инжекторах установок с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы отрицательные ионы водорода используются для получения пучков атомов водорода высокой энергии.

В ИЯФ СО РАН разрабатывается ускоритель-тандем для реализации бор-нейтронозахватной терапии рака. В работе [1] предложен источник отрицательных ионов водорода для ускорителя БНЗТ, названный «тандемный поверхностно-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 тандемном источнике ионов предложено использовать генератор плазмы с инверсным магнитным полем. Одной из задач данной диссертационной работы было исследование генерации плазмы в таком генераторе плазмы. В процессе исследования было обнаружено, что поток плазмы может быть эффективно ограничен инверсным магнитным полем. Плотность плазмы, наблюдаемая в генераторе, достигала $n_i \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Эти обстоятельства позволили рассматривать такой генератор плазмы как базу для создания плазменной перезарядной мишени для нейтрализации мощных пучков отрицательных ионов водорода высокой энергии, необходимых для целей управляемого термоядерного синтеза (УТС).

В современных термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы мощные атомарные пучки получили широкое применение для нагрева плазмы и ввода в плазму вещества. Требуются атомарные пучки с энергией $\sim 1 \text{ МэВ}$ мощностью $10 - 100 \text{ МВт}$. Для создания пучков атомов водорода с энергиями $> 100 \text{ кэВ}$ 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 плазменной нейтрализующей мишени. Прототип плазменной мишени представляет собой мультипольную

магнитную ловушку длиной 1.2 м. Апертура для прохождения нейтрализуемого пучка составляет 0.1 м. Одной из задач данной диссертационной работы было исследование генерации плазмы в плазменной мишени.

Цель диссертационной работы

Цель работы состоит в исследовании генерации плазмы в тандемном источнике отрицательных ионов и прототипе плазменной нейтрализующей мишени. Для успешной реализации тандемного источника отрицательных ионов необходимо разработать генератор плазмы. Генератор плазмы должен позволять инжектировать поток плазмы с током ~ 1 А в область генерации отрицательных ионов (конвертор отрицательных ионов) в стационарном режиме. Кроме того, для получения максимального выхода отрицательных ионов с поверхности конвертора необходимо регулировать энергию положительных ионов, бомбардирующих поверхность конвертора. Для изучения возможности изменения энергии положительных ионов, бомбардирующих поверхность конвертора необходимо провести измерения потенциала плазмы в области генерации отрицательных ионов.

Для получения максимального коэффициента нейтрализации пучка отрицательных ионов высокой энергии плазменная нейтрализующая мишень должна удовлетворять определенным требованиям. При энергии нейтрализуемого пучка 1 МэВ линейная толщина водородной плазменной мишени должна быть $n_i \cdot l \approx 3.7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. При технически достижимой длине мишени 1 – 3 м плотность плазмы в мишени должна быть $n_i \approx 1 \div 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Кроме того, плазма в мишени должна иметь высокую степень ионизации. При степени ионизации вещества мишени 50% коэффициент нейтрализации пучка отрицательных ионов уменьшается на 3%. Целью данной диссертационной работы было изучение генерации плазмы в прототипе плазменной нейтрализующей мишени: измерение параметров плазмы, изучение их зависимости от параметров разряда, изучение пространственной структуры плазмы, измерение степени ионизации плазмы.

Личный вклад автора

Все основные результаты по теме исследования получены автором лично. Автор принимал участие в разработке, создании и исследовании генератора плазмы для тандемного источника отрицательных ионов водорода и прототипа плазменной нейтрализующей мишени. Автором разработана схема измерения степени ионизации плазмы в плазменной нейтрализующей мишени при инжекции в мишень диагностического атомарного пучка. Автор принимал участие в планировании, подготовке и проведении экспериментов, обработке и анализе экспериментальных данных, проведении расчётов, подготовке публикаций.

Научная новизна

1. Впервые предложен и исследован генератор плазмы с инверсным магнитным полем для использования в тандемном поверхностно-плазменном источнике отрицательных ионов водорода
2. Обнаружено формирование потенциальных барьеров в инверсных магнитных пробках.
3. Впервые измерена эффективность подавления потока плазмы магнитной пробкой с инверсным магнитным полем.
4. Впервые предложена и исследована стационарная плазменная мишень с инверсными магнитными пробками для нейтрализации пучков отрицательных ионов высокой энергии.
5. Применена схема измерения параметров плазмы в плазменной мишени с помощью инъекции диагностического атомарного пучка.

Научная и практическая ценность

Разработан генератор плазмы для тандемного источника отрицательных ионов водорода. Реализация тандемного источника отрицательных ионов позволит получать пучки отрицательных ионов водорода с интенсивностью ≥ 10 мА с малым эмиттансом. Источник отрицательных ионов с такими параметрами необходим для реализуемого в настоящее время ускорителя БНЗТ и может найти применение в других ускорителях.

На основе разработанного генератора плазмы создан прототип плазменной перезарядной мишени для нейтрализации мощных пучков отрицательных ионов водорода. Использование плазменной перезарядной мишени в инжекторе мощного пучка отрицательных ионов водорода позволит значительно увеличить его эффективность.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Создание генератора плазмы для тандемного поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов водорода с высокой плотностью плазмы.
2. Возможность регулирования энергии положительных ионов, бомбардирующих поверхность электрода, на котором происходит образование отрицательных ионов водорода, в тандемном-поверхностно-плазменном источнике отрицательных ионов водорода.
3. Существенное подавление потока плазмы из мультипольной магнитной ловушке в отверстие относительно большого диаметра магнитным полем обратного, по отношению к направлению в ловушке, направления.
4. Создание прототипа плазменной мишени для нейтрализации пучков отрицательных ионов высокой энергии для целей УТС.
5. Измерение степени ионизации низкотемпературной плазмы при инъекции быстрых атомов водорода.
6. Получение плазмы в нейтрализующей мишени с плотностью $n_i > 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и степенью ионизации плазмы 50%.

Апробация диссертации

Материалы, на которых основана диссертация, докладывались на Международной конференции по физике плазмы и УТС (2011, г. Звенигород), Международных конференциях по открытым системам для удержания плазмы (OS-2010, г. Новосибирск; OS-2016, г. Новосибирск), Международной конференции по пучкам и источникам отрицательных ионов (NIBS'18, 2018 г. Новосибирск), опубликованы в ведущих рецензируемых российских и зарубежных научных журналах.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложена на 101 странице, включая 52 иллюстрации, и содержит 66 наименований библиографии.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность работы, сформулирована цель и предмет исследования, а также описана структура диссертации.

В первой главе описан тандемный поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов и две версии генератора плазмы этого источника.

Схема тандемного поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов водорода приведена на рисунке 1. Этот источник проектировался как одноапертурный стационарный источник отрицательных ионов водорода с плотностью тока ~ 100 мА/см² с высокой яркостью. Отрицательные ионы в таком источнике образуются при поверхностно-плазменном механизме на поверхности конвертора при его бомбардировке положительными ионами и атомами водорода. Функции генерации плазмы, генерации отрицательных ионов, вытягивания и формирования пучка в таком источнике разнесены в три конструктивно независимые ступени.

Первая ступень – это генератор плазмы. Для генерации плазмы используется генератор низкотемпературной плазмы с мультипольной магнитной стенкой, который инжектирует плазменный поток во вторую ступень. Разрабатываемый генератор плазмы должен обеспечивать поток плазмы в выходное отверстие на уровне несколько ампер, небольшую потребляемую мощность (небольшую «цену» иона), стационарную работу. Для ограничения выхода высокоэнергичных электронов, стартующих с катода в конвертор отрицательных ионов в области выходного отверстия формируется инверсное магнитное поле (магнитное поле, направленное противоположно к магнитному полю в области генератора плазмы).

Вторая ступень тандемного источника отрицательных ионов состоит из корпуса из нержавеющей стали, в котором располагается цилиндрический конвертор диаметром 6 см и высотой 3 см. Конвертор изготавливается из молибдена и может поддерживаться под независимым потенциалом. К

конвертору крепится устройство для ввода паров цезия внутрь конвертора – цезиевая печь. Температура конвертора и печи контролировались термомпарами.

Для выхода генерируемых в конверторе отрицательных ионов H⁻ служит эмиссионное отверстие диаметром 11 мм. Для ограничения выхода в ИОС сопутствующих электронов вокруг эмиссионного отверстия на внутренней поверхности корпуса под конвертором устанавливается магнитный фильтр.

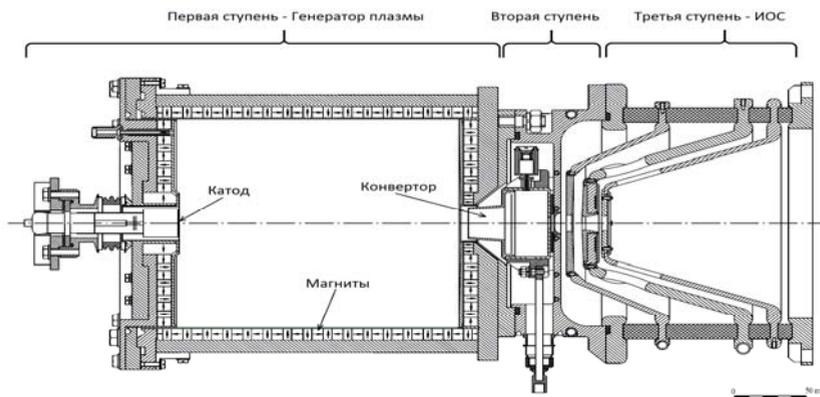


Рисунок 1. Тандемный поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов водорода

Вероятность образования отрицательного иона зависит от энергии бомбардирующих поверхность положительных ионов. Эта вероятность достигает максимального значения при энергии бомбардирующих частиц ~ 20 эВ на нуклон. Потенциал плазмы в конверторе может отличаться от потенциала плазмы в генераторе плазмы и может зависеть от потенциала поверхности конвертора. Изучение зависимости потенциала плазмы в конверторе от параметров разряда и потенциала конвертора являлась одной из задач диссертационной работы.

Третья ступень — это четырехэлектродная ионно-оптическая система для вытягивания и формирования пучка отрицательных ионов.

Одной из особенностей предложенного источника отрицательных ионов является геометрия и расположение конвертора. Конвертор располагается снаружи плазменного генератора и образует почти замкнутую полость. Такая схема источника ионов позволяет формировать популяцию отрицательных ионов в нем с относительно небольшой температурой ~1 эВ. Уменьшение температуры вытягиваемых отрицательных ионов позволило бы сформировать пучок с небольшим эмиттансом.

В работе описаны эксперименты, проведенные на первых двух ступенях tandemного источника отрицательных ионов водорода. Было проведено экспериментальное исследование генерации плазмы в таком источнике ионов с использованием двух различных версий генератора плазмы с инверсным магнитным полем. Изучение формирования пучка не входило в задачи работы.

Обе версии генератора плазмы имеют схожую конструкцию и отличаются объёмом плазмы, величиной магнитного поля на поверхности вакуумной камеры и в области отверстия для выхода плазменной струи. Генератор плазмы представляет собой цилиндрическую вакуумную камеру с пристеночным мультиполярным магнитным полем. Магнитное поле формируется постоянными магнитами. Магниты с одним направлением намагниченности собираются в кольцевые сборки, таким образом магнитное поле осесимметрично. В одном торце цилиндра расположено отверстие для выхода плазменной струи. В противоположном торце устанавливается нагревной LaV₆ катод. Генерация плазмы происходит посредством ионизации рабочего газа электронами, эмитируемыми с катода.

При проектировании генератора плазмы был проведен расчёт магнитных полей в генераторе, а также расчет траектории электронов. Для ограничения выхода энергичных электронов в выходное отверстие в нем формируется инверсное магнитное поле. Электроны отражаются от области с инверсным магнитным полем из-за сохранения обобщённого момента импульса.

Вторая глава 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.

Исследование генератора плазмы проводилось на созданном для этого стенде. Для измерений параметров плазмы в генераторе применялись подвижные Ленгмюровские зонды, а также многосеточные зонды. Для получения пространственных распределений параметров плазмы зонды могли вводиться в выходное отверстие генератора плазмы. Регистрация диагностических сигналов осуществляется многоканальной цифровой системой сбора данных на основе крейта КАМАК. Питание разряда осуществляется блоком питания при постоянном токе разряда. Эксперименты проводились в режиме импульсов длительностью 1 с. Напуск газа и нагрев катода осуществляется стационарно.

В экспериментах с первой версией генератора плазмы измерены параметры плазмы. Плотность плазмы в генераторе составляет $n_{pl} \approx 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, электронная температура $\sim 3 \text{ эВ}$. Получен ток в конвертор $\sim 1 \text{ А}$. При измерениях потенциала плазмы в конверторе показано что потенциал плазмы в конверторе слабо зависит от потенциала конвертора. Это обстоятельство позволяет регулировать энергию положительных ионов, бомбардирующих поверхность конвертора.

Были проведены измерения параметров плазмы в генераторе плазмы второй версии. Плотность плазмы достигает $n_{pl} \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Измерены зависимости плотности плазмы и электронной температуры от мощности разряда и количества напускаемого газа. Плотность плазмы увеличивается при увеличении мощности разряда и ограничена имеющейся системой питания разряда.

Получено распределение параметров плазмы вдоль оси генератора. Показано падение плотности плазмы в области инверсного магнитного поля, формирования в этой области потенциальных барьеров величиной $\sim 1 - 2 \text{ В}$. Потенциальные барьеры формируются вследствие отражения электронов от области инверсного магнитного поля. Были проведены измерения электронной температуры в области выходного отверстия двумя типами зондов. Зонды отличались ориентацией собирающей поверхности в магнитном поле – плоский зонд собирал частицы преимущественно вдоль магнитного поля, цилиндрический зонд собирает частицы преимущественно поперек магнитного поля. В экспериментах регистрируются локальные максимумы электронной температуры в области максимумов магнитного поля. Это свидетельствует об увеличении поперечной энергии частиц в области инверсного магнитного поля.

Измерено распределение плотности потока плазмы в выходном отверстии. Профиль вытекающей струи имеет характерный размер значительно меньший диаметра выходного отверстия – плазма вытекает в приосевой области. Получен ток в конвертор $\sim 0.2 \text{ А}$. Значительное уменьшение тока в конвертор при использовании генератора второй версии в сравнении с генератором первой версии связано с увеличением инверсного магнитного поля в выходном отверстии генератора.

В заключении второй главы приводится обсуждение полученных результатов. Показано что инверсное магнитное поле в выходном отверстии эффективно снижает поток плазмы из генератора. Это можно интерпретировать как уменьшение эффективной площади отверстия для истечения плазмы. Во второй версии генератора эффективная площадь отверстия уменьшена в 80 раз.

В третьей главе сформулированы требования к плазменной мишени для нейтрализации пучков отрицательных ионов высокой энергии, а также приводится описание прототипа плазменной нейтрализующей мишени, разработанной и изготовленной в ИЯФ СО РАН.

Максимальный коэффициент нейтрализации пучка отрицательных ионов достигается в плазменной мишени при использовании в качестве рабочего вещества полностью ионизованной водородной плазмы. Для достижения максимального коэффициента нейтрализации пучка отрицательных ионов плазменная мишень должна иметь линейную толщину $n_{pl} \cdot l \approx 3.7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при энергии нейтрализуемого пучка 1 МэВ. При разумной длине мишени $l = 1 \div 2 \text{ м}$ плотность плазмы в мишени должна быть $n_{pl} \approx (1 \div 4) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Коэффициент нейтрализации пучка снижается если вещество мишени не полностью ионизовано. Коэффициент нейтрализации пучка уменьшается на 3% в случае если степень ионизации вещества мишени 50%. Существует требование на однородность толщины мишени по сечению пучка. Неоднородность толщины мишени 20% приводит к снижению коэффициента нейтрализации на 1%. Существенным обстоятельством является необходимость ограничить поток плазмы в отверстия для прохождения нейтрализуемого пучка. В отсутствие такого ограничения поток плазмы из мишени будет создавать неприемлемо большие нагрузки на систему вакуумной откачки инжектора.

Схема прототипа плазменной нейтрализующей мишени, разработанного в ИЯФ СО РАН приведена на рисунке 2. Прототип плазменного нейтрализатора представляет собой мультипольную магнитную ловушку для удержания мишени плазмы. Ловушка представляет собой цилиндрическую вакуумную камеру длиной 120 см и диаметром 20 см. В торцах цилиндра имеются отверстия диаметром 10 см для прохождения нейтрализуемого пучка. Ловушка состоит из двух одинаковых половин, зеркально симметричных относительно центрального сечения. В центральном сечении устанавливается катодный блок – фланец на котором установлены катоды, в этом месте происходит подача рабочего газа. Плазма генерируется ионизацией газа электронами из катодов, распложенных в катодном блоке. В центральном сечении ловушки устанавливаются 6 нагревных катодов в виде таблеток из LaB_6 . Они располагаются равномерно на окружности на некотором расстоянии от области прохождения нейтрализуемого пучка.

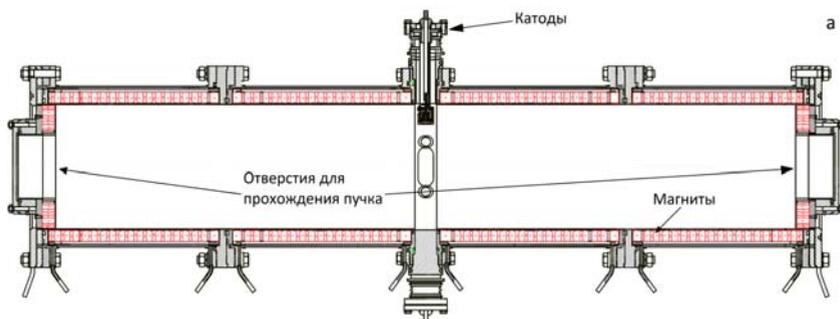


Рисунок 2. Схема прототипа плазменной нейтрализующей мишени

Магнитное поле формируется в ловушке постоянными магнитами, устанавливаемыми вплотную на тонкостенную вакуумную камеру. Магниты одного направления намагниченности имеют форму колец. Кольца из магнитов устанавливаются на цилиндрическую вакуумную камеру таким образом, что направления намагничения колец последовательно чередуются. Таким образом, внутри вакуумной камеры вблизи стенки формируется

сильное мультипольное осесимметричное магнитное поле. Величина магнитного поля на стенке вакуумной камеры имеет величину ~ 7 кГс. Такая геометрия магнитного поля обеспечивает МГД устойчивость плазмы в ловушке.

В центральной области каждой из половин ловушки формируется продольное магнитное поле величиной ~ 100 Гс. В отверстиях в торцах ловушки формируется магнитное поле, направленное противоположно по отношению к магнитному полю в центральной части соответствующей половины ловушки. Величина инверсного магнитного поля, ограничивающего истечение плазмы в отверстие, на оси ~ 200 Гс.

Для повышения энергоэффективности генерации плазмы необходимо удержание первичных электронов, эмитируемых с катода. Электроны, эмитируемые с катода должны удерживаться в области ловушки в течение времени, достаточного чтобы передать свою энергию электронам плазмы. Проведены оценки времени потери энергии первичными электронами, определяемого столкновениями с электронами плазмы и потерями энергии на ионизацию молекул газа. Показано что за время потери энергии первичный электрон имеет траекторию длиной ~ 30 м. Проведено моделирование движения первичных электронов и плазменных электронов. Показано, что обе популяции электронов удерживаются в области ловушки при длине траектории >10 м.

Был проведен расчёт влияния магнитного поля ловушки на траектории частиц нейтрализуемого пучка отрицательных ионов водорода с энергией 1 МэВ. Ловушка действует на пучок как слабая фокусирующая линза. Влияние магнитного поля на нейтрализуемый пучок пренебрежимо мало.

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

Исследование прототипа плазменной перезарядной мишени проводилось на созданном для этого стенде. Схема стенда показана на рисунке 3. С каждой стороны плазменная мишени стыкуется с вакуумными объёмами, через которые происходит откачка газа. Параметры плазмы измеряются при помощи набора подвижных зондов. На стенде имеется продольный и два поперечных зонда. Параметры плазмы определялись также при зондировании плазмы диагностическим атомарным пучком. Диагностический пучок получается при помощи инжектора ДИНА-4. Предусмотрено две постановки эксперимента: инжекция вдоль оси ловушки и инжекция поперек оси ловушки. На рисунке 3 показана схема подсоединения инжектора для обеих постановок эксперимента. Прошедший пучок регистрируется анализатором пучка, который представляет собой вакуумный объём с внешним электромагнитом. Прошедший пучок разделяется магнитным полем на фракции. Заряженные фракции

регистрируются цилиндрами Фарадея, атомарная фракция регистрируется вторично-эмиссионным датчиком. Для получения параметров плазмы из измеряемых в эксперименте фракций диагностического пучка разработана программа, позволяющая рассчитывать состав пучка при взаимодействии с не полностью ионизованной плазмой в мишени. В один из вакуумных объёмов установлен измеритель потока плазмы, который позволяет измерять полный ток плазмы в отверстии, не изменяя газовых условий в разряде.

Были проведены эксперименты с использованием двух систем питания разряда. Первая система питания представляет собой набор источников питания стабилизированного напряжения величиной 300 В. Она позволяет вводить в разряд мощность 55 кВт в режиме импульсов длительностью 1 с. Вторая система питания представляет собой формирующую линию. Она позволяет вводить в разряд мощность до 220 кВт в режиме импульсов длительностью 1 мс.

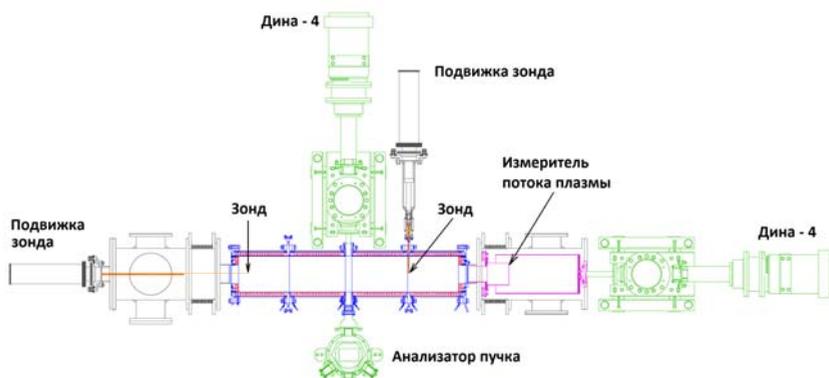


Рисунок 3. Схема стэнда для исследования плазменной мишени

В экспериментах с использованием длинно-импульсной системы питания получены зависимости параметров плазмы от мощности разряда, а также пространственные распределения параметров плазмы в ловушке. Плотность плазмы линейно зависит от мощности разряда и достигает величины $n_{pl} \approx 8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ при мощности разряда 50 кВт. В области прохождения нейтрализованного пучка плотность плазмы постоянна по радиусу с точностью $\pm 10\%$. Продольным зондом измерено распределения плотности плазмы вдоль оси в области отверстия. Плотность плазмы однородна во внутренней области ловушки и снижается на порядок в области инверсного магнитного поля. Плотность плазмы, измеренная в разных половинах ловушки, совпадает с точностью 10%.

В экспериментах с использованием импульсной системы питания получены зависимости параметров плазмы от мощности разряда, а также

пространственные распределения параметров плазмы в ловушке. Плотность плазмы линейно зависит от мощности разряда и достигает величины $n_{pl} \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Измерено время жизни плазмы при быстром отключении питания разряда. Время жизни плазмы в ловушке составляет $\tau \sim 45$ мкс.

Были поставлены эксперименты по инъекции атомарного пучка вдоль оси ловушки. Мощность разряда при этом не превышала 180 кВт. Сигналы, полученные при инъекции атомарного пучка вдоль оси ловушки показаны на рисунке 4. При давлении газа ~ 1 мТор ток протонов достигает максимума. При этом давлении достигает максимума отношение токов отрицательных ионов для случаев инъекции в газ и инъекции в плазму. Из расчета следует что при этом степень ионизации достигает максимального значения. Сравнение измеренных отношений токов протонов и отрицательных ионов с получаемыми в расчётах значениями позволяет определить степени ионизации плазмы, усреднённую по длине ловушки. Степень ионизации, определенная из отношения токов протонов, равна $t = 13 \pm 3\%$. Степень ионизации, определенная из отношения токов отрицательных ионов, равна $t = 16 \pm 3\%$.

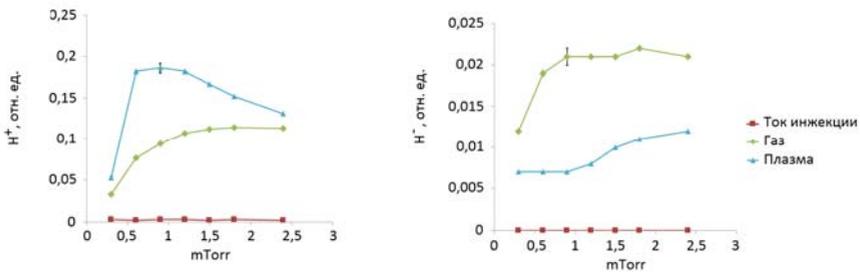


Рисунок 4. Сигналы протонов (справа) и отрицательных ионов (слева) полученные при инъекции атомарного пучка вдоль оси ловушки

Были поставлены эксперименты по инъекции атомарного пучка поперек оси ловушки. Мощность разряда при этом была повышена до 220 кВт. Степень ионизации плазмы в центральном сечении, усреднённая по диаметру ловушки, равна $50_{-5}^{+30} \%$.

Измеренный ток плазмы в отверстие диаметром 10 см составляет ~ 8 А, при плотности плазмы в ловушке $n_{pl} \approx 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Относительно небольшую величину тока плазмы в отверстие можно интерпретировать как уменьшение эффективной площади отверстия для истечения плазмы. В данном случае эффективная площадь уменьшается в 30 раз и равна 2.5 см^2 .

Оценена эффективность удержания плазмы в ловушке. Плазма теряется из ловушки по трем каналам: потери на поверхность вакуумной камеры, потери на катоды, потери в отверстия для прохождения нейтрализованного пучка. Потери в каждый из каналов характеризуются площадью потерь.

Время удержания плазмы в ловушке определяется суммарной площадью потерь из формулы 1

$$\tau = \frac{V}{v_s \cdot S_{\text{пот}}} . \quad (1)$$

Плазма вытекает на поверхность вакуумной камеры через мультипольное магнитное поле. Площадь потерь на катоды равна суммарной площади катодов. Площадь потерь в отверстия для прохождения пучка определена из эксперимента и равна 5 см². Время удержания плазмы в ловушке определенное по формуле (1) равно 35 мкс и близко к определенному в эксперименте 45 мкс.

В заключении изложены основные результаты, полученные в диссертации:

1. Разработан генератор плазмы с инверсным магнитным полем для тандемного поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов водорода.
2. Показана возможность регулирования энергии положительных ионов, бомбардирующих поверхность электрода, на котором происходит образование отрицательных ионов водорода, в тандемном-поверхностно-плазменном источнике отрицательных ионов водорода.
3. Определена эффективность подавления потока плазмы магнитной пробкой с инверсным магнитным полем.
4. Впервые предложена и исследована стационарная плазменная мишень с инверсными магнитными пробками для нейтрализации пучков отрицательных ионов высокой энергии.
5. Предложена схема измерения параметров плазмы в плазменной мишени с помощью инжекции диагностического атомарного пучка.
6. Создан прототип стационарной плазменной мишени с инверсными магнитными пробками для нейтрализации пучков отрицательных ионов высокой энергии с плотностью плазмы $n_i > 10^{13} \text{ см}^{-3}$, степенью ионизации 50%.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Димов Г.И., Емелёв И.С., *Письма в ЖТФ*, том 36, вып.6, стр. 15-21 (2010).
2. Dimov G.I., Emelev I.S., et.al., Multicusp trap with circular geometry for confinement of low-temperature plasma., *Transactions of fusion science and technology V.59, N. 1T FUSTE8 (2) 1-324 (2011)*.
3. Димов Г.И., Емелев И.С., *ЖТФ*, том 84, вып. 2, стр. 27-34 (2014).

4. G.I. Dimov, I.S. Emelev, A.A. Ivanov, Plasma Target for Neutralization of the Negative Ion Beam., *AIP Conf. Proc.* 1771, 070015 (2016).
5. Ю.И.Бельченко, В.И.Давыденко, П.П.Дейчули, И.С.Емелев, А.А.Иванов, В.В.Колмогоров, С.Г.Константинов, А.А.Краснов, С.С.Попов, А.Л.Санин, А.В.Сорокин, Н.В.Ступишин, И.В.Шиховцев, А.В.Колмогоров, М.Г.Атлуханов, Г.Ф.Абдрашитов, А.Н.Драничников, В.А.Капитонов, А.А.Кондаков, Исследования по физике и технике ионных и атомарных пучков в ИЯФ СО РАН (1960-2017) // УФН т.188, №6 (2017), с. 595.
6. I.S. Emelev, A.A. Ivanov, A Plasma Target for Neutralization of the Negative Ion Beam // *AIP Conference Proceedings* 2052, 070005 (2018).

Список литературы

1. Dimov G.I. Tandem surface-plasma source: A new concept for a dc negative ion source // *Review of Scientific Instruments*, 2002. V. 73, N. 2, p. 970.

ЕМЕЛЕВ Иван Сергеевич

**Генератор плазмы с инверсным магнитным
полем для тандемного источника
отрицательных ионов и других применений**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 17.02.2020 г.

Подписано в печать 18.02.2020 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.0 усл. печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 1

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринте ИЯФ СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11