



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИСЭ СО РАН,

Академик РАН

Н. А. Ратахин Н. А. Ратахин

« *12* » сентября 2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Изотова Ивана Владимировича “Развитие разряда в магнитной ловушке ионного источника в условиях электронно-циклотронного резонанса”, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 — физика плазмы.

Актуальность темы диссертации

Источники ионов различных типов широко применяются в настоящее время как в современных технологических процессах, так и в научных исследованиях. Отметим, что успехи современной ядерной физики неразрывно связаны с совершенствованием различного вида ускорителей тяжелых частиц, работа которых в свою очередь во многом определяется развитием систем инжекции ионов в ускорители. Требования к современным инжекторам постоянно возрастают, необходимы все более интенсивные ионные пучки всех химических элементов (от водорода до урана), со все более высоким качеством, работающие как в импульсном так и в непрерывном режиме.

Одно из интересных направлений современной ядерной физики связано с использованием сильноточных короткоимпульсных ускорительных систем. Так, в современных ускорителях протонов требуются пучки с током на уровне сотен мА с эмиттансом не хуже $0.2 \text{ п}^* \text{мм}^* \text{мрад}$ (Европейский нейтронный генератор «ESS»), в проекте «Beta-Beam» требуется сильноточный пучок многозарядных ионов короткоживущих радиоактивных элементов ${}^6\text{He}$ и ${}^{18}\text{Ne}$, в этом случае на первый план выходит эффективность использования дорогостоящих изотопов. Требования, предъявляемые к источникам ионов в этих проектах, оказываются достаточно специфическими, и ни один из современных источников полностью им не удовлетворяет. В этой связи разработка источников новых типов представляется весьма важной и актуальной задачей, решению которой и посвящена представленная диссертация. В работе исследуются физические особенности короткоимпульсных ЭЦР источников ионов, в которых для создания и поддержания плазмы в простых магнитных ловушках используется мощное миллиметровое излучение современных гиротронов, что позволило предложить ряд путей увеличения производительности и эффективности ионных источников.

Основные научные результаты

К наиболее значимым научным результатам диссертационной работы могут быть отнесены следующие:

1) Построена численная модель, позволяющая рассчитывать динамику разряда на начальной стадии его развития, исследовать особенности формирования распределения ионов по кратностям ионизации и процессы выхода на стационарный режим работы источника. Модель учитывает особенности формирования функции распределения электронов по энергиям на начальной стадии разряда в условиях, когда плотность плазмы недостаточна для поглощения всей энергии СВЧ излучения, и позволяет описывать плазму в широком диапазоне параметров.

2) Экспериментально исследована динамика процесса генерации ионов на начальной стадии развития разряда, обнаружен кратковременный всплеск ионного тока, по сути, обнаружен новый режим генерации ионного тока, который предложено использовать для разработки короткоимпульсных ионных источников. Экспериментально исследованы зависимости количественных характеристик этого эффекта от параметров ионного источника. Наличие эффекта убедительно продемонстрировано на трёх различных установках в существенно различающихся условиях. Этот всплеск тока в начале импульса был назван эффектом «Preglow» по аналогии с эффектом «Afterglow», заключающемся во всплеске тока после окончания импульса накачки.

3) Показано, что наблюдаемый всплеск тока на начальной стадии развития разряда связан с формированием на этой стадии за счет ЭЦР нагрева при низкой плотности электронов специфической функции распределения электронов по энергиям с квазилинейным плато. При этом средняя энергия существенно превышает стационарный уровень, Эта энергия тратится на ионизацию в том числе и многократную, и образуется короткий всплеск ионного тока. Эксперименты по изучению качественных характеристик функции распределения электронов по энергиям на начальной стадии ЭЦР разряда проведены по тормозному го рентгеновскому излучению плазмы ЭЦР разряда и прямому измерению энергии электронов, вылетающих из магнитной ловушки. Показано, что при некоторых условиях на начальной стадии ЭЦР разряда формируется ФРЭЭ с квазилинейным плато с высокой средней энергией.

4) На основе проведённых исследований предложен новый тип короткоимпульсного ЭЦР источника ионов на основе эффекта «Preglow», позволяющего создавать импульсные пучки ионов с плотностью тока свыше 1 А/см^2 . Прототип короткоимпульсного ионного источника, разработанный на основе выполненных исследований и запущенный в лаборатории LPSC в рамках совместного с ИПФ РАН проекта, продемонстрировал импульсные ионные пучки с плотностью тока до 1.2 А/см^2 , параметры плазмы и ионного пучка хорошо согласуются с предсказанными численной моделью.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка основных публикаций автора по теме работы и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 104 страницы, включая 49 рисунков. Список публикаций автора по теме диссертации содержит 34 наименования, из них 16 статей в рецензируемых журналах, включенных в списки ВАК, список литературы содержит 68 наименований.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследований, сформулированы цель и основные задачи работы, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, кратко изложено содержание каждой главы, приведены положения, выносимые на защиту.

В главе 1 описана численная модель развития ЭЦР разряда в открытой магнитной ловушке с учётом особенностей формирования ФРЭЭ на начальной стадии. Описаны особенности удержания плазмы ЭЦР разряда в открытых магнитных ловушках в двух режимах: в режиме с пустым конусом потерь и квазигазодинамическом, приведены основные временные характеристики, соотношение между которыми определяет реализующийся режим удержания плазмы. Обсуждается начальный этап развития ЭЦР

разряда в магнитной ловушке, во время которого под действием интенсивного СВЧ-поля формируется функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) с квазилинейным плато. Кроме того, приведены оценки предела применимости использованной теории, введены балансные уравнения на концентрации частиц, описан момент, в который численный код переключается с использования для вычисления констант ионизации ФРЭЭ с фиксированной характерной энергией, определяемой параметрами ионного источника, на решение уравнения баланса энергосодержания плазмы. Приведены способы расчёта времён жизни частиц как в классическом, так и в квазигазодинамическом режиме удержания. В заключении раздела приведена полная система уравнений, использованная для моделирования развития ЭЦР разряда в магнитной ловушке. Применимость построенной численной модели продемонстрирована на примере моделирования результатов экспериментов по исследованию временных характеристик и эффективности образования ионов при высокой плотности плазмы в рамках поиска пути создания короткоимпульсного источника МЗИ для проекта «Beta Beam», получено хорошее количественное согласие численно полученных результатов с экспериментальными данными.

В главе 2 представлены экспериментальные исследования начальной стадии ЭЦР разряда в магнитных ловушках, проведённые на трёх установках.

В разделе 2.1 описаны эксперименты на установке «PHOENIX-V2», на которой был открыт эффект «Preglow» - всплеск ионного тока, возникающий в самом начале пробоя газа СВЧ излучением с частотой 18 и 28 ГГц. После пика «Preglow» параметры плазмы релаксируют к стационарному состоянию. Эффект «Preglow» продемонстрирован в гелии и аргоне. Изучены зависимости характеристик «Preglow» от параметров магнитного удержания, мощности микроволнового излучения и давления рабочего газа. Сделан вывод, что эффект обусловлен особенностями формирования ФРЭЭ на начальной стадии пробоя - поглощённая энергия запасается в горячих электронах, а затем тратится на интенсивную ионизацию газа, обеспечивая всплеск ионного тока.

Приведены результаты моделирования экспериментальных пиков «Preglow» с помощью описанной в главе 1 модели. Получено качественное согласие между численным моделированием и экспериментальными данными. Обсуждаются причины расхождения для некоторых случаев.

В разделе 2.2 описаны эксперименты на установке «JYFL ECRIS». Продемонстрирован эффект «Preglow» в гелии и аргоне при меньшей частоте СВЧ излучения (14 ГГц). Изучено влияние затравочной плазмы на его параметры, смоделированы как осциллограммы пика «Preglow» для обоих ионов гелия, так и его основные параметры (интенсивность, длительность и т.п.). Расчёты показали качественное совпадение с результатами эксперимента. Подробно исследована характерная энергия электронов на начальной стадии разряда. Проведено изучение спектра тормозного излучения аргонной плазмы, возникающего в результате столкновений энергичных электронов с тяжёлыми частицами, в диапазоне энергий от 1.5 до 400 кэВ, что покрывает область энергии электронов, наиболее подходящей для процессов ионизации. Временное разрешение измерений составило 100 микросекунд, что позволило подробно исследовать динамику характерной энергии от времени в зависимости от следующих параметров источника ионов: СВЧ излучение (мощность, длительность, частота следования импульсов), давление нейтрального газа и магнитное поле. Продемонстрировано, что в начале греющего импульса наблюдается слабое поглощение СВЧ излучения, а средняя энергия квантов быстро достигает максимума и слабо зависит от мощности греющего излучения. Спустя некоторое время средняя энергия резко падает, а коэффициент поглощения - возрастает. Получено, что длительность начальной стадии с высокой средней энергией уменьшается при увеличении давления нейтрального газа, а конфигурация магнитного поля практически не влияет ни на среднюю энергию фотонов во время переходного процесса, ни на его длительность. В экспериментах по изучению влияния затравочной плазмы на среднюю энергию квантов тормозного излучения получено, что длительность стадии с высокой средней энергией

уменьшается с ростом начальной плотности плазмы, а при плотности электронов в плазменной камере выше некоторого значения эта стадия вообще не наблюдается, и параметры плазмы сразу выходят на стационарный уровень.

В разделе 2.3 описаны эксперименты по исследованию начальной стадии ЭЦР разряда на установке «SMIS-37» - квази-газодинамическом импульсном ЭЦР источнике ионов с осесимметричной конфигурацией магнитного поля. Для пробоя и поддержания плазмы на этой установке используется СВЧ излучение с частотой 37.5 ГГц и мощностью 100 кВт. Эксперименты проводились с целью исследования эффекта «Preglow» в условиях, когда на стационарной стадии ЭЦР разряда реализуется квазигазодинамический режим удержания плазмы. Показано, что эффект устойчиво воспроизводится в узком диапазоне давления нейтрального газа и практически не зависит от напряжённости магнитного поля в ловушке. В условиях квазигазодинамического режима удержания плазмы длительность импульса «Preglow» составила ~ 20 мкс, что значительно короче импульсов, полученных на классических источниках. Экспериментально найден оптимум по давлению с точки зрения амплитуды пика «Preglow», при этом меньшее давление приводит к плавному нарастанию ионного тока от времени без выраженного пика, тогда как при слишком большом давлении ионный ток практически сразу выходит на стационарный уровень.

Проведены прямые измерения энергии электронов, вылетевших из плазмы вдоль оси ловушки на начальной стадии разряда, с помощью магнитостатического анализатора. Измеренный спектр электронов медленно уменьшается с ростом энергии вплоть до 300 кэВ и резко падает при больших значениях. Средняя по спектру энергия при этом составила величину порядка 150 кэВ. Отмечено, что полученный энергетический спектр качественно совпадает с используемым в численных расчётах динамики разряда.

Глава 3 диссертационной работы посвящена подробному обсуждению физики возникновения эффекта «Preglow», оценке зависимости его количественных параметров от условий эксперимента, разработке на основе эффекта короткоимпульсного источника нового типа и описанию первых экспериментов на прототипе такого источника «SEISM».

Проведённое в разделе 3.1 численное моделирование даёт представление о природе эффекта «Preglow». Моделирование проводилось с использованием модели и программы, описанных в главе 1. В расчётах переменными параметрами являлись частота греющего СВЧ излучения f , плотность мощности СВЧ-излучения P , начальная плотность нейтралов N_{a0} и плазмы N_{e0} . Частота излучения f варьировалась в диапазоне 28-60 ГГц, соответствующем частотам существующих и находящихся в разработке на сегодняшний день ЭЦР ионных источников МЗИ. Плотность мощности P варьировалась в диапазоне, доступном для современных источников СВЧ излучения (0.1-400 Вт/см³). Рабочим газом в расчётах был гелий.

Показано, что для каждой начальной плотности нейтралов существует оптимум по плотности мощности СВЧ излучения, соответствующий максимальной интенсивности пика «Preglow». Получено, что зависимости количественных характеристик пика «Preglow» являются, в основном, функциями безразмерного параметра, равного отношению газодинамического времени жизни электронов к классическому и характеризующего режим удержания плазмы в магнитной ловушке. Показано, что (в численных расчётах) возможна генерация интенсивного пика «Preglow» ионов гелия с длительностью не более нескольких десятков микросекунд, что согласуется с результатами экспериментов на стенде «SMIS-37», описанными в разделе 2.3.

Проведённые численные эксперименты показали, что необходимым условием для реализации эффекта «Preglow» является интенсивный нагрев электронов СВЧ-излучением на начальной стадии ЭЦР разряда в магнитной ловушке источника ионов, который должен быть достаточным для образования и поддержания в течение некоторого времени функции распределения электронов по энергиям с высокой средней энергией. Сделан вывод о механизме формирования пика «Preglow», обусловленном запасанием энергии в горячих электронах на начальной стадии ЭЦР разряда.

На основе проведённых экспериментальных исследований и результатов численного моделирования предложен новый тип ЭЦР источника ионов с частотой греющего излучения на уровне 30-60 ГГц и мощностью на уровне сотен киловатт, позволяющий создавать плазму с плотностью выше 10^{13} см⁻³ и температурой в диапазоне несколько сот эВ - несколько кэВ и экстрагировать из неё импульсные пучки ионов с плотностью тока свыше 1 А/см². Такой источник в режиме «Preglow» будет способен производить импульсные ионные пучки с высокой ионизационной эффективностью, короткой длительностью и высоким уровнем ионного тока — с характеристиками, достаточными для его применения в крупных европейских ускорительных проектах.

В разделе 3.2 приведено описание прототипа короткоимпульсного ионного источника, разработанного на основе представленных в диссертационной работе исследований. Прототип «SEISM» был успешно запущен в лаборатории LPSC (г. Гренобль, Франция) в рамках совместного с ИПФ РАН проекта. Данный ЭЦР источник ионов использует для нагрева плазмы СВЧ излучение импульсного гиротрона с частотой 60 ГГц и мощностью до 300 кВт. В ходе первых экспериментов на источнике «SEISM» было продемонстрировано получение ионных токов с плотностью до 1.2 А/см², что хорошо согласуется с предсказанными численной моделью параметрами.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Защищаемые положения и выводы, представленные в диссертационной работе Изотова И.В., хорошо аргументированы, достоверность полученных результатов обоснована и подтверждается использованием различных дублирующих друг друга методик. Представленные в работе экспериментальные результаты не противоречат данным, описанным в работах других исследователей, и допускают непротиворечивую теоретическую интерпретацию. Материалы диссертации достаточно подробно опубликованы в открытой печати и апробированы на Международных и Всероссийских конференциях.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 34 работах, включая 16 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 18 статей в сборниках трудов международных конференций. Значительное количество статей опубликовано в ведущих международных физических журналах с высоким импакт фактором.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты могут быть использованы в исследованиях, связанных с изучением особенностей формирования функции распределения электронов по энергиям в ЭЦР разряде в магнитной ловушке с различными режимами ее удержания. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при разработке нового типа импульсных ЭЦР источников ионов. Результаты диссертации могут быть рекомендованы к использованию в Объединённом институте ядерных исследований, в Институте ядерной физики им. Будкера, в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» и других организациях.

Общие замечания по диссертации.

1. Обнаруженный кратковременный всплеск ионного тока в начале ЭЦР разряда связывается автором с запасом энергии в энергичных электронах при формировании ФРЭЭ

при низких плотностях электронов на первой стадии развития разряда, которая затем тратится на быструю дополнительную ионизацию. В пользу этого предположения свидетельствуют экспериментальные исследования ФРЭЭ, проведенные по рентгеновским измерениям, показавшим существование энергичных электронов с энергией до 500 кэВ. Однако частота ионизирующих столкновений электронов с такой энергией невелика и не может обеспечить короткий всплеск тока. По-видимому, быстрая дополнительная ионизация осуществляется менее энергичными электронами плато ФРЭЭ, в диссертации эти особенности следовало бы обсудить более подробно.

2. Большая степень детализация и конкретики выносимых на защиту научных положений позволила бы более четко выделить научную новизну и научно-практическую ценность диссертационной работы.

3. Использование англоязычного термина «Preglow» для обозначения эффекта резкого возрастания ионного тока представляется не вполне удачным, прежде всего с точки зрения интерпретации физического механизма этого эффекта.

Отмеченные недостатки носят дискуссионно – рекомендательный характер и они не снижают общей высокой оценки диссертационной работы в целом.

Заключение

В целом диссертация И.В. Изотова является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержатся экспериментальные и численные исследования начальной стадии ЭЦР разряда в магнитной ловушке ионного источника. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ. Текст автореферата полностью отражает содержание диссертации.

Работа отвечает критериям Положения о порядке присуждения учёных степеней, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а её автор Иван Владимирович Изотов заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 - физика плазмы.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и одобрен 18.09.2017 на заседании лабораторий плазменных источников Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук ИСЭ СО РАН»

Отзыв составил.

Е.М. Окс

Сведения о составителе отзыва:

Окс Ефим Михайлович, д.т.н., профессор.

Почтовый адрес: 634055, г. Томск, пр. Академический 2/3, Телефон. 3822-491776

Адрес электронной почты: oks@opee.hcei.tsc.ru.

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук ИСЭ СО РАН».

Должность: заведующий лабораторией плазменных источников.

Сведения о составителе отзыва и подпись руки Окса Е.М. удостоверяю.

Ученый секретарь ИСЭ СО РАН

Д.ф.-м.н.



И.В. Пегель