

На правах рукописи

ИЗОТОВ Иван Владимирович

**РАЗВИТИЕ РАЗРЯДА В МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ ИОННОГО
ИСТОЧНИКА В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО
РЕЗОНАНСА**

01.04.08 — физика плазмы

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород).

Научный руководитель:

Голубев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, руководитель научного направления "Физика плазмы", Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород).

Официальные оппоненты:

Соломахин Александр Леонидович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института ядерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск).

Косый Игорь Антонович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (г. Москва).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук» (634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3).

Защита состоится «09» октября 2017 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 в Институте прикладной физики РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ РАН.
Автореферат разослан « » _____ 2017 г.

И. о. учёного секретаря
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

А. И. Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования

В настоящее время плазменные источники одно- и многозарядных ионов (МЗИ) на основе разряда, поддерживаемого в магнитных ловушках мощным электромагнитным излучением в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), получили широкое распространение как в фундаментальных, так и прикладных задачах. Подобные источники применяются, в частности, в медицине, микроэлектронике, ядерной физике и многих других областях. ЭЦР источники ионов применяются на большинстве современных ускорителей тяжёлых частиц, причём используются пучки ионов различных химических элементов — от водорода до урана, включая короткоживущие радиоактивные изотопы. Большинство ЭЦР источников построено на основе зеркальных магнитных ловушек, обеспечивающих магнитогидродинамическую (МГД) стабильность плазмы — это открытие магнитные ловушки с конфигурацией магнитного поля типа «минимум-В», которая создаётся комбинацией поля простого пробкотрона и поля многополюсной (обычно шестиполюсной) магнитной системы [1]. Подобная система обеспечивает эффективное удержание плазмы, причём основные потери плазмы связаны с её выносом через магнитные пробки ловушки, что позволяет с помощью традиционных систем экстракции формировать качественные и интенсивные ионные пучки. Нагрев плазмы мощным СВЧ излучением в условиях электронно-циклотронного резонанса позволяет поддерживать температуру электронов на уровне, необходимом для многократной ионизации. Характерные частоты СВЧ излучения, используемые в классических ЭЦР источниках, в настоящее время составляют от 14 до 28 ГГц, мощность — до 10 кВт [2]. В таких условиях возможно создание плазмы с концентрацией электронов от 10^{11} до $5 \cdot 10^{12} \text{см}^{-3}$ и характерной энергией до нескольких кэВ, что позволяет получать пучки ионов с уникальными характеристиками: ${}^4\text{He}^{2+}$ - 11 мА; ${}^{40}\text{Ar}^{11+}$ - 860 мА; ${}^{40}\text{Ca}^{12+}$ - 400 мкА; ${}^{238}\text{U}^{50+}$ - 13 мкА [3]. В подобных системах реализуется классический режим удержания плазмы [4] (что и даёт название такому типу источников), характеризующийся большим временем жизни плазмы в магнитной ловушке, за счёт чего обеспечивается высокая кратность ионизации газа. Требования к ионным инжекторам постоянно возрастают вместе с производительностью современных ускорителей: необходимо повышать как заряд ионов, так и интенсивность ионных пучков при сохранении высокого качества пучка, причём необходимы как импульсные, так и непрерывные источники ионов.

Основным способом увеличения производительности ЭЦР источников ионов, включая и многозарядные, является повышение частоты и мощности

СВЧ излучения. Это стало явным после экспериментальной демонстрации значительного увеличения выхода многозарядных ионов из ЭЦР источника при повышении частоты греющего СВЧ излучения с 10 до 18 ГГц: экстрагированный ионный ток увеличился пропорционально квадрату частоты излучения [5]. Однако строительство ловушек с конфигурацией магнитного поля «минимум-В», рассчитанных на частоты накачки свыше 30 ГГц, является трудоёмкой и ресурсозатратной задачей из-за необходимости создания сильных полей сложной топологии. Условие гирорезонанса при частотах накачки выше 30 ГГц требует величины магнитного поля более 1 Тл, при этом экспериментально установлено, что время жизни плазмы достигает достаточных для образования многозарядных ионов величин только в случае, когда максимальная напряжённость магнитного поля в ловушке превышает резонансную величину не менее, чем в 4 раза [6]. Несмотря на описанные сложности, в настоящее время ведётся разработка классических непрерывных ЭЦР ионных источников с частотой накачки вплоть до 56 ГГц [7].

Заметное место среди источников ионов занимают импульсные системы, обеспечивающие инжекцию сильноточных пучков ионов в современные ускорители. Одним из таких проектов является Европейский испарительный источник нейтронов («ESS»), целью которого является создание альтернативы ядерным реакторам в области генерации мощного потока нейтронов для исследований в медицине, науках о жизни, материаловедении и т.п. В рамках этого проекта необходимо создание ЭЦР источника, генерирующего импульсы ионов H^+ и D^+ с током не менее 90 мА, длительностью не более 3 мс и частотой повторения 14 Гц [8].

Другим примером является Европейский проект по исследованиям осцилляций нейтрино «Beta Beam» [9]. Для его реализации необходимо достичь быстрой и эффективной многократной ионизации короткоживущих изотопов ${}^6\text{He}$ и ${}^{18}\text{Ne}$, время полураспада которых не превышает 1 с. Ионный источник в составе ускорительного комплекса должен обеспечить импульсную генерацию мощных пучков многозарядных ионов радиоактивных изотопов, которые могут производиться в ограниченных количествах при облучении специальных мишеней интенсивным протонным пучком. Данная технологическая цепочка может работать только в непрерывном режиме, однако особенности ускорения частиц диктуют необходимость подачи короткоимпульсного (длительность импульса от 20 до 100 мкс) пучка многозарядных ионов на вход ускорителя. Причём поскольку возможность для производства изотопов очень ограничена, источник должен обладать высокой эффективностью использования материала. Требования, предъявляемые к источнику ионов, оказываются достаточно специфическими, и ни один из современных источников им не удовлетворяет.

Установка «HIF» («Heavy Ion Facility») в ЦЕРНе, на которой производится ускорение пучков многозарядных ионов свинца до энергий 160 ГэВ, также использует в работе источник многозарядных ионов, производящий импульсы тока ионов Pb^{27+} длительностью несколько мс и частотой следования импульсов до 10 Гц [10]. ЭЦР источник, используемый на этой установке, работает в режиме послесвечения («Afterglow») [11]. Данный режим работы позволяет получить импульсы ионного тока с длительностью, сравнимой с характерным временем жизни плазмы в классических источниках МЗИ, при этом амплитуда импульса может существенно превышать стационарные значения. Однако подобный режим работы всё равно требует предварительной «подготовки» источника: ЭЦР разряд должен достичь стационарных параметров перед началом формирования импульса послесвечения, что может составлять недопустимо большие времена для некоторых приложений (десятки и сотни мс).

Таким образом поиск возможностей увеличения производительности и эффективности импульсных источников ионов является актуальной задачей. На первый взгляд, применение классического ЭЦР источника ионов в приложениях, требующих использование коротких и интенсивных импульсов ионного тока, оказывается неэффективно из-за невозможности генерации достаточно коротких импульсов ионных пучков даже в режиме послесвечения. Время пробоя газа и выхода плотности плазмы на стационарный уровень обычно превышает миллисекунду, что существенно выше необходимой длительности импульса, тогда как уровень тока в стационарном состоянии оказывается недостаточным. Решение проблемы может быть связано с так называемым эффектом «Preglow», обнаруженным сравнительно недавно [3А, 5А]. Суть эффекта заключается в том, что при некоторых условиях на первой стадии развития разряда возникает короткий мощный всплеск тока ионов, после которого происходит его релаксация до стационарного значения. Исследованию этого эффекта и посвящена, в основном, данная работа.

Цели и задачи

Основной целью диссертационной работы являлось экспериментальное исследование начальной стадии ЭЦР разряда в магнитной ловушке, в частности, исследование особенностей функции распределения электронов по энергиям, её влияния на развитие разряда, и условий реализации эффекта «Preglow» с целью предложения нового типа короткоимпульсного ЭЦР источника ионов.

Объект исследования

Объектом исследований, изложенных в диссертационной работе, является плазма ЭЦР разряда в открытых магнитных ловушках различных

конфигураций с классическим и квазигазодинамическим режимами удержания, поддерживаемая мощным СВЧ излучением с частотами 14, 18, 28, 37.5 и 60 ГГц.

Научная новизна

1. Экспериментально обнаружен эффект «Preglow», исследование которого на различных установках позволило предложить новый тип короткоимпульсного ЭЦР источника ионов с улучшенными по сравнению с существующими источниками характеристиками.
2. Впервые проведены эксперименты по измерению тормозного излучения ЭЦР плазмы с временным и энергетическим разрешением, позволяющим восстановить эволюцию спектра тормозного излучения в диапазоне 1.5-400 кэВ с точностью до 100 пикосекунд.
3. Впервые проведены прямые измерения энергии горячих электронов, покидающих магнитную ловушку вдоль её оси на начальной стадии разряда.

Научная и практическая значимость

Достижения в современной ядерной физике во многом обусловлены применением ЭЦР источников ионов в качестве инжекторов в циклотронные и линейные ускорители. Исследования способов усовершенствования таких источников являются актуальными для лабораторий, использующих ускорители тяжёлых ионов. Исследования, проведённые в диссертационной работе, позволили предложить новый тип короткоимпульсного источника многозарядных ионов, основанного на эффекте «Preglow», с характеристиками, существенно превосходящими аналоги. В частности, длительность импульса ионного тока может быть уменьшена в несколько десятков раз, что позволяет существенно увеличить эффективность использования короткоживущих изотопов.

Результаты, полученные в диссертации, используются в работах лаборатории ионных источников и лаборатории прикладной физики плазмы ИПФ РАН, Лаборатории субатомной физики и космологии (LPSC, г. Гренобль, Франция), Института тяжёлых ионов (GSI, г. Дармштадт, Германия), Института физики плазмы (г. Милан, Италия) и Университета г. Ювяскюля (Финляндия).

На основе результатов, представленных в диссертации, в LPSC (г. Гренобль, Франция) в рамках совместного с ИПФ РАН проекта был разработан и успешно запущен новый тип короткоимпульсного ЭЦР источника многозарядных ионов с нагревом плазмы СВЧ излучением с частотой 60 ГГц, способный удовлетворить требования проекта «Beta Beam».

Публикации, апробация работы

Результаты выполненных исследований обсуждались на научных семинарах в Институте прикладной физики РАН, Лаборатории субатомной физики и космологии (LPSC, Гренобль, Франция), Институте физики плазмы (IFP, Милан, Италия), Университете г. Ювясколя (Финляндия). Они докладывались на Международных и Всероссийских конференциях, в том числе на 16-ом, 17-ом, 18-ом, 19-ом, 20-ом, 21-ым и 22-ым международных совещаниях по ЭЦР источникам ионов (International Workshop on ECR Ion Sources Китай, 2006, США, 2008, Франция, 2010, Япония, 2012, Россия, 2014, Южная Корея, 2016), на 12-ой, 13-ой, 14-ой, 15-ой и 16-ой международных конференциях по ионным источникам (International Conference on Ion Sources Корея, 2007, США, 2009, Италия, 2011, Япония, 2013, США, 2015), на 6-ом, 7-м и 8-м международных совещаниях “Strong microwaves in plasmas” (2005, 2008, 2011 Russia), на 5-ой Международной конференции по ускорителям частиц (International conference on particle accelerators, Германия, 2014.)

Материалы диссертационной работы изложены в научных статьях в ведущих российских и зарубежных журналах: Журнал технической физики, Physical Review, Physics of Plasmas, Plasma Physics and Controlled Fusion, IEEE transactions on plasma science, Review of scientific instruments. Всего по теме диссертации опубликовано 16 статей в реферируемых журналах и 18 статей в сборниках трудов международных конференций.

Проведённые исследования поддержаны 2-мя персональными стипендиями Президента РФ для молодых учёных. Автор работы был награждён международной премией им. Р. Желлера за «Экспериментальное и теоретическое исследование импульсных ЭЦР разрядов, в частности высокочастотных разрядов и эффекта «Preglow».

Положения, выносимые на защиту

1) ЭЦР нагрев электронов на начальной стадии развития разряда в магнитной ловушке обеспечивает формирование неравновесной функции распределения электронов по энергиям с квазилинейным плато и резким обрывом при больших энергиях.

2) Запасённая во время лавинообразного роста концентрации электронов энергия обеспечивает эффективную (в том числе, многократную) ионизацию нейтрального газа, характеризующуюся всплеском ионного тока – этот процесс назван эффектом «Preglow».

3) Численная модель развития разряда, основанная на уравнениях баланса ионизации и энергии и учитывающая особенности функции распределения электронов по энергиям на начальной стадии разряда, хорошо согласуется с экспериментальными данными и описывает обнаруженный эффект.

4) Использование в ЭЦР источнике ионов мощного миллиметрового

излучения обеспечивает в режиме «Preglow» высокую эффективность ионизации и формирование ионных пучков с плотностью тока более 1 A/cm^2 и длительностью импульса менее 100 мкс.

Личный вклад автора

Автор принимал активное участие в постановке задач и определении направлений исследований. Все оригинальные результаты исследований, описанных в диссертационной работе, получены лично автором либо при его определяющем участии. Содержание диссертационной работы и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка основных публикаций автора по теме работы и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 104 страницы, включая 49 рисунков. Список публикаций автора по теме диссертации содержит 16 наименований, список литературы содержит 66 наименований.

Краткое изложение материала диссертации

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

В **главе I** введены основные понятия, описаны особенности удержания плазмы ЭЦР разряда в открытых магнитных ловушках. Обсуждены особенности функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) на начальной стадии разряда. Предложена численная модель, описывающая развитие ЭЦР разряда в открытой магнитной ловушке с учётом особенностей ФРЭЭ на начальной стадии.

В **разделе 1.1** приведена постановка задачи и указаны основные упрощения, принятые в ходе построения численной модели. Задача о моделировании динамики ЭЦР разряда в магнитной ловушке рассмотрена в рамках 0-мерной нестационарной модели в т. н. приближении «квадратной ямы», в рамках которого все параметры плазмы рассчитываются на единицу плазменного объёма и считаются однородными как вдоль, так и поперёк магнитной ловушки, магнитное поле которой плавно меняется вблизи пробок, а между ними остаётся практически неизменным, причём размер области однородного поля сравним с расстоянием между пробками.

В **разделе 1.2** описана система уравнений, позволяющая рассчитать динамику ЭЦР разряда, описан процесс удержания плазмы ЭЦР разряда в

магнитной ловушке в двух режимах - классическом и квазигазодинамическом. Приведены основные временные характеристики, такие, как время кулоновского рассеяния электронов в конус потерь $\tau_c = \ln R/v_{ei}$ и газодинамическое время жизни плазмы $\tau_g = LR/V_s$, соотношение между которыми определяет реализующийся режим удержания плазмы. Здесь R – пробочное отношение (отношение максимальной напряжённости магнитного поля к минимальному), L – длина ловушки, v_{ei} – частота электрон-ионных столкновений, $V_s = \sqrt{\langle z \rangle T_e/M}$ – ионно-звуковая скорость, T_i и T_e – характерные энергии ионов и электронов соответственно, M – атомная масса иона. При выполнении условия $\tau_c > \tau_g$ реализуется так называемый классический режим удержания, для которого характерны низкие концентрации и высокие энергии электронов, при этом потери электронов из ловушки, в основном, определяются электрон-ионными столкновениями. С ростом концентрации плазмы растёт скорость рассеяния электронов в конус потерь. Начиная с некоторого момента, происходит смена основного процесса, определяющего тип удержания, реализуется так называемый квазигазодинамический режим удержания. Его характерной особенностью является то, что скорость заполнения электронами конуса потерь в пространстве скоростей оказывается выше, чем максимально возможная скорость выноса плазмы из ловушки, т. е. $\tau_c < \tau_g$, конус потерь оказывается заполненным, а время жизни плазмы определяется ионно-звуковой скоростью и не зависит от плотности плазмы.

Для описания начальной стадии пробоя, когда концентрация плазмы достаточно мала, используется теория СВЧ пробоя разреженного газа в прямых магнитных ловушках в условиях циклотронного резонанса, построенная в работе [12]. При взаимодействии электрона с монохроматической электромагнитной волной в области ЭЦР происходит его стохастический нагрев (режим ускорения Ферми), при этом ансамбль электронов диффундирует по энергии с коэффициентом квазилинейной диффузии [13]. При достижении поперечной энергией электрона некоторой величины ϵ_{st} возмущение набега фазы циклотронного взаимодействия, возникающее вследствие неадиабатического характера движения в зоне ЭЦР, оказывается малым. Это приводит к разрушению режима ускорения Ферми, и энергия частицы начинает осциллировать около среднего значения ϵ_{st} , движение электрона становится суперадиабатическим. В таких условиях ФРЭЭ образует «квазилинейное плато» в резонансной области пространства импульсов, и может быть аппроксимирована следующим выражением [12]:
$$F(\epsilon) = \frac{N_0}{2} (\epsilon - \epsilon_{st})^{-1/2} \cdot 1(\epsilon_{st} - \epsilon) \exp(t/\tau^*)$$
, где ϵ – энергия электрона, N_0 – число электронов, $1(x)$ – единичная функция Хевисайда, τ^* – характерное время нарастания концентрации электронов, ϵ_{st} – граничное значение энергии,

определяемое переходом в суперадиабатический режим. При этом электроны не могут набрать энергию, превышающую величину ϵ_{st} , поэтому на данной стадии разряда плазма не может поглотить энергию больше некоторой величины. Указанное выражение для ФРЭЭ справедливо при условии, что характерное время нарастания концентрации электронов τ^* много больше времени диффузии электронов в пространстве скоростей τ_D , определяющего время формирования ФРЭЭ. Для условий экспериментов и соответствующих численных расчётов, описанных в данной работе, значение времени диффузии τ_D находится в диапазоне 10-100 наносекунд, тогда как τ^* – в диапазоне 1-100 микросекунд, таким образом условие применимости $\tau_D/\tau^* \ll 1$ оказывается выполненным. Аналогичный вид ФРЭЭ был численно получен в работе [14], где моделирование производилось методом Фоккера-Планка, и в работе [15], где проводилось прямое интегрирование уравнений движения электрона в заданном поле волны. В работах [13, 16], где, в частности, предполагалось определяющее влияние эффекта Доплера на механизм ЭЦР нагрева, был также получен схожий вид ФРЭЭ с квазилинейным плато, подтверждённый результатами экспериментов.

На экспоненциальной стадии роста концентрации электронов, в зависимости от параметров, может наступить ситуация, когда энергии СВЧ излучения перестанет хватать для поддержания ФРЭЭ с квазилинейным плато. Это время, в дальнейшем называемое моментом «переклочения», можно приближённо оценить, как время, за которое поглощённая энергия СВЧ излучения сравнивается с суммой вынесенной плазмой из ловушки и затраченной на ионизацию энергий. Начиная с этого этапа в численной модели ФРЭЭ считается «равновесной» с некоторой характерной энергией $\langle E_e \rangle$, которую можно рассчитать, введя уравнение баланса энергосодержания плазмы в следующем виде:

$$\frac{d(N_e \langle E_e \rangle)}{dt} = P_{ECR} - P_L - P_{ion}, \quad (1)$$

где P_{ECR} – плотность мощности СВЧ накачки (внешний параметр модели), P_L – мощность, выносимая плазмой из ловушки:

$$P_L = \frac{N_e \langle E_e \rangle}{\tau_e} \quad (2)$$

а P_{ion} – мощность, затрачиваемая на ионизацию:

$$P_{ion} = \sum_{i=0}^{n-1} k_{i,i+1} N_e N_i I_i \quad (3)$$

где N_i – концентрация ионов заряда i . Для расчёта формирования ионов по зарядовым состояниям используются уравнения баланса ионизации для концентрации ионов N_i :

$$\frac{dN_i}{dt} = (k_{i-1,i} N_{i-1} - k_{i,i+1} N_i) N_e - \frac{N_i}{\tau_i}, \quad (4)$$

концентрации электронов N_e :

$$\frac{dN_e}{dt} = N_e \cdot \sum_{i=0}^{n-1} k_{i,i+1} N_i - \frac{N_e}{\tau_e}, \quad (5)$$

и для концентрации нейтрального газа N_0 :

$$\frac{dN_0}{dt} = I(t) - k_{0,1} N_0 N_e \quad (6)$$

где τ_i - время жизни ионов, τ_e - время жизни электронов, $I(t)$ - скорость напуска нейтрального газа в ловушку, $k_{i,i+1}$ - константы ионизации, вычисляемые с использованием сечений ионизации по формуле Лотца и предполагаемого вида ФРЭЭ. Времена жизни заряженных частиц вычисляются с использованием характерных времён кулоновского рассеяния и газодинамического времени жизни и условия квазинейтральности плазмы. В заключение раздела приведена полная система уравнений, использованная для моделирования развития ЭЦР разряда в магнитной ловушке.

В разделе 1.3 описан созданный численный код, решающий построенную систему уравнений методом Рунге-Кутты 4-го порядка с контролем погрешности на каждом шаге. 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.

Материалы, изложенные в первой главе, опубликованы в работах [1A, 2A, 4A, 6A, 7A, 8A, 16A].

В главе 2 описаны экспериментальные исследования начальной стадии ЭЦР разряда в магнитных ловушках. Эксперименты были проведены на трёх установках.

В разделе 2.1 описаны эксперименты на установке «PHOENIX-V2» - классическом ЭЦР источнике МЗИ с частотой накачки 18 ГГц (клистрон) и/или 28 ГГц (гиротрон) и магнитным полем конфигурации «минимум-В», расположенной в Лаборатории субатомной физики и космологии (LPSC, г. Гренобль, Франция), на которой был открыт эффект «Preglow». Впервые новый режим - всплеск ионного тока, возникающий в самом начале пробоя газа - был обнаружен при проведении экспериментов по созданию и нагреву гелиевой плазмы и экстракции из неё ионного пучка в случае использования импульсного СВЧ нагрева на частотах как 18 ГГц, так и 28 ГГц с высокой

частотой следования импульсов (> 1 Гц). Этот режим был назван «Preglow» («Предсвечение») по аналогии с режимом «Afterglow» («Послесвечение») [11]. После пика «Preglow» параметры плазмы релаксируют к стационарному состоянию. Эффект «Preglow» наблюдался в различных газах - были исследованы гелий, аргон, ксенон, кислород и криптон. В тяжёлых газах (аргоне, ксеноне, криптоне) «Preglow» наблюдается для ионов с низкой и средней кратностью ионизации с временным масштабом < 1 мс. Было обнаружено, что характеристики «Preglow» зависят от параметров магнитного удержания, равно как мощности микроволнового излучения и давления рабочего газа. На рис. 1 приведены результаты моделирования экспериментальных пиков «Preglow» с помощью описанной в главе 1 модели. Временная эволюция ионных токов была одновременно рассчитана для всех зарядов состояний с заданным набором свободных параметров. Хорошее согласие между численным моделированием и экспериментальными данными получено для всех осциллограмм тока ионов гелия, для зарядов аргона 4+ и ниже форма пика «Preglow» также хорошо воспроизводится. Однако интенсивности ионного тока оказываются завышенными для более высоких зарядов аргона. Приводится одно из возможных объяснений причины расхождения, связанное с десорбцией газа со стенок вакуумной камеры под воздействием ионной бомбардировки и последующим ростом плотности нейтралов в разряде.

На основе моделирования сделан вывод о причине проявления эффекта «Preglow». Предположено, что на начальной стадии разряда ФРЭЭ является неравновесной с квазилинейным плато, а средняя энергия электронов находится на высоком уровне. В некоторый момент плотность плазмы превышает уровень, при котором энергии СВЧ волны перестает хватать для поддержания вышеописанной ФРЭЭ, средняя энергия электронов уменьшается до уровня, оптимального для эффективной ионизации. При этом из-за возросшей частоты столкновений уменьшается продолжное время жизни плазмы, что обеспечивает быстрый вынос частиц из ловушки, формирующий пик «Preglow».

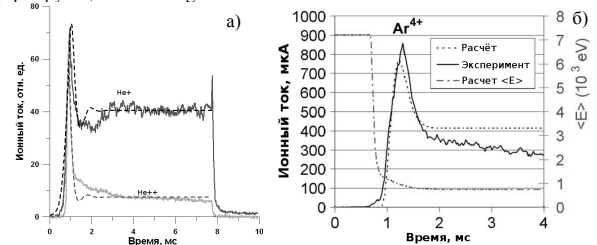


Рис. 1. Экспериментальные и расчётные осциллограммы тока ионов: (а) He^+ и He^{++} , (б) Ar^{+2}

В разделе 2.2 описаны эксперименты на установке «JYFL ECRIS» (г. Ювяскюля, Финляндия), классическом ЭЦР источнике многозарядных ионов с частотой СВЧ излучения 14 ГГц (клистрон) и магнитной ловушкой с конфигурацией «минимум-В». Эксперименты, описанные в этом разделе, направлены на подтверждение возможности воспроизводства эффекта «Preglow» в классическом ЭЦР источнике многозарядных ионов, но при другой частоте СВЧ излучения (14 ГГц). Как уже отмечалось выше, эффект «Preglow» можно связать с формированием неравновесной функции распределения электронов по энергиям и их высокой средней энергией на начальной стадии разряда, релаксирующей в дальнейшем к более низкому стационарному значению. Для экспериментального подтверждения этой гипотезы было проведено изучение спектра тормозного излучения аргоновой плазмы в диапазоне энергий от 1.5 до 400 кэВ.

Приведено подробное описание схемы эксперимента по детектированию тормозного излучения, обладающей энергетическим разрешением не более 1.5 кэВ (ширина по полувысоте) и способной наблюдать фотоны, начиная с энергии 1.5 кэВ, что позволяет изучать кванты, создаваемые электронами с энергиями из области, наиболее подходящей для процессов ионизации. Эксперименты проводились в условиях, обеспечивающих детектирование только тех квантов рентгеновского излучения, которые приходили непосредственно из плазмы, и отсеяв кванты, родившиеся в результате столкновения электронов со стенками камеры. Временное разрешение системы было не хуже 100 мкс. Измерения спектра тормозного излучения плазмы ЭЦР разряда с подобным временным разрешением и энергетическим диапазоном ранее не проводились.

Основной задачей экспериментов являлось изучение влияния параметров источника ионов, таких как СВЧ излучение (мощность, длительность, частота следования импульсов), давление нейтрального газа и магнитное поле, на ФРЭЭ. В ходе первого этапа экспериментов был воспроизведён эффект «Preglow» на стенде «JYFL ECRIS» в гелии при мощности СВЧ излучения $W_{\text{СВЧ}}=300$ Вт. Длительность импульса греющего СВЧ излучения была 10 и 50 мс, пауза между импульсами - 20, 50 и 1000 мс для изучения влияния остаточной плазмы на параметры эффекта «Preglow». Были получены и успешно 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. На рис. 2а приведены характерные осциллограммы токов ионов гелия при различных паузах между греющими импульсами, а, следовательно, при различной плотности «затравочной» плазмы. На рис. 2б приведены расчётная и экспериментальная зависимости пикового тока ионов от степени начальной ионизации газа.

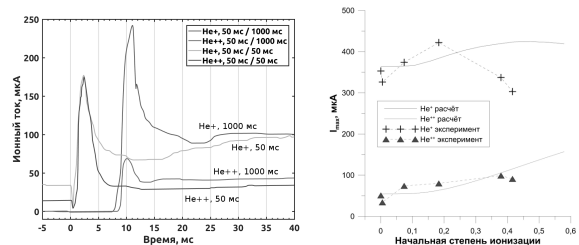


Рис. 2. Осциллограммы тока ионов гелия при разных паузах между греющими импульсами (а); зависимость пикового тока ионов гелия от начальной степени ионизации (б)

Следующим этапом исследований являлось изучение влияния параметров ионного источника на временную эволюцию тормозного излучения на начальной стадии разряда. Хорошее временное разрешение метода и доступный для анализа энергетический диапазон квантов позволили исследовать процесс пробоя и изменения параметров тормозного излучения на начальной стадии и сделать выводы о скорости и эффективности передачи СВЧ энергии электронам плазмы. Продемонстрировано, что средняя энергия квантов быстро достигает максимума до появления ионного тока, и спустя некоторое время, в течение которого наблюдается сильное отражение СВЧ излучения от плазмы, резко падает вместе с увеличением плотности плазмы и падением коэффициента отражения. В начале пробоя, когда плотность плазмы мала, поглощение СВЧ излучения гораздо меньше, чем на стационарной стадии, так как значительная часть электронов, по-видимому, достигает предела нагрева и перестает поглощать энергию СВЧ излучения. По мере увеличения плотности с некоторого момента поглощение возрастает. Экспериментальные результаты свидетельствуют, что на начальной стадии ЭЦР пробоя газа в магнитной ловушке ЭЦР источника ионов средняя энергия электронов существенно превышает стационарный уровень и слабо зависит от мощности греющего излучения. Зависимости средней энергии квантов, отношения отражённой мощности к падающей и тока иона Ar^{+2} приведены на рис. 3.

При уменьшении давления нейтрального газа в экспериментах наблюдается рост длительности переходного процесса. Можно предположить, что тенденция связана с пропорциональностью между частотой столкновений и плотностью нейтралов (или ионов). Поэтому при более низких давлениях нейтрального газа требуется больше времени для достижения плотностью плазмы величины, при которой СВЧ мощности становится недостаточно для нагрева большей части электронов до предельного уровня. Также обнаружено, что конфигурация магнитного поля

практически не влияет ни на среднюю энергию фотонов во время переходного процесса, ни на его длительность.

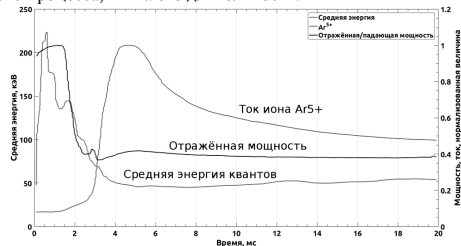


Рис 3. Средняя энергия фотонов, ток иона Ar^{5+} и отношение мощности отраженного и падающего СВЧ излучения

В последней серии экспериментов было изучено влияние плотности «затравочной» плазмы на характеристики тормозного излучения. Согласно описанной модели следует ожидать, что с ростом плотности «затравочной» плазмы в магнитной ловушке длительность переходного процесса будет снижаться по сравнению с пробоем нейтрального газа из-за более эффективного поглощения энергии греющей волны. Простым способом создания затравочной плазмы является сокращение времени между последовательными греющими импульсами так, что плазма не успевает полностью распасться к моменту начала следующего. В экспериментах получено, что длительность переходного процесса, которому соответствует высокая средняя энергия фотонов, уменьшается с ростом начальной плотности плазмы, а при плотности электронов в плазменной камере выше некоторого значения переходный процесс 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, расположенном в ИПФ РАН. Уникальность этой установки заключается в высокой частоте (37.5 ГГц) и мощности используемого для пробоя и поддержания плазмы СВЧ излучения (до 100 кВт) и квази-газодинамическом (столкновительном) режиме удержания плазмы. Эксперименты, представленные в данном разделе, проводились для проверки существования эффекта «Preglow» в условиях, когда на стационарной стадии ЭЦР разряда реализуется квази-газодинамический режим удержания плазмы. Конфигурация магнитного поля, в отличие от классических ЭЦР ионных источников, в данном случае представляет собой аксиально-симметричную зеркальную ловушку. Первый этап исследований был направлен на изучение области параметров, в которой реализуется эффект «Preglow». Оказалось, 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. По-видимому, это также, как и в разделе 2.2, связано с соотношением между временем релаксации запасённой на начальной стадии пробоя энергии, которая определяется частотой ионизирующих столкновений и линейно зависит от плотности нейтралов и временем жизни плазмы. В случае, когда скорость релаксации высокая (высокая частота столкновений), разряд быстро выходит на стационарный уровень без образования пика ионного тока так же, как и при слишком низкой скорости релаксации, когда плотность плазмы медленно приближается к стационарному значению. Характерная осциллограмма ионного тока при оптимальном давлении приведена на рис. 4а.

Проведены прямые измерения энергии электронов, вылетевших из плазмы вдоль оси ловушки, с помощью магнитостатического анализатора. Электроны детектировались цилиндром Фарадея, расположенной прямо за поворотным магнитом, оснащённой специально разработанной электронной системой усиления на основе быстродействующих операционных усилителей. Сигнал с цилиндра Фарадея, расположенного за отклоняющим магнитом масс-спектрометра, накапливался и усреднялся в течение многих импульсов СВЧ излучения, после чего строилась его зависимость от тока в отклоняющем магните, который может быть однозначно сопоставлен с энергией частиц. Получено, что количество электронов медленно уменьшается с энергией вплоть до 300 кэВ и резко падает при большей энергии. Средняя величина энергии при этом составляет величину порядка 150 кэВ. Полученный энергетический спектр приведён на рис. 4б.

Материалы, изложенные в главе 2, опубликованы в [3А, 5А, 9А, 11А].

Исследование эффекта «Preglow» представляется актуальным для разработки импульсных ЭЦР источников многозарядных ионов, в частности, его использование в ряде случаев может быть альтернативой дорогостоящей модернизации, связанной с увеличением частоты и мощности СВЧ накачки с целью повышения производительности источников. Глава 3 диссертационной работы посвящена подробному обсуждению физики возникновения эффекта «Preglow», оценке зависимости его количественных параметров от условий эксперимента, разработке предложения короткоимпульсного источника нового типа, востребованного в ряде

приложений, и описанию первых экспериментов на прототипе такого источника.

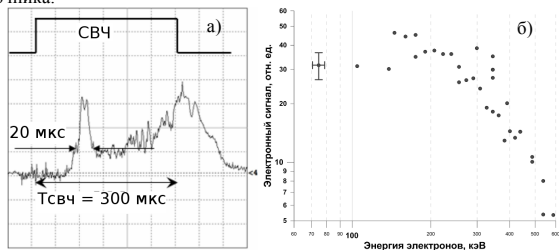


Рис. 4. Импульс полного ионного тока, демонстрирующий эффект «Preglow» (а); энергетический спектр электронов, покинувших ловушку в начале разряда (б)

Проведенное в разделе 3.1 численное моделирование даёт полное представление о природе эффекта «Preglow». Показано, что предложенная модель может быть использована для расчёта параметров эффекта «Preglow» для широкого класса доступных и будущих экспериментальных установок. Численное моделирование проводилось с использованием модели и программы, описанных в главе 1. В расчётах переменными параметрами являлись частота и плотность мощности греющего СВЧ излучения и начальная плотность нейтралов. 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» (отношение амплитуды пика ионного тока к стационарной величине). Предложен безразмерный параметр режима удержания $RP = \tau_g \tau_c$. Этот параметр характеризует режим удержания плазмы, который реализуется в данный момент времени. При $RP \gg 1$ реализуется квази-газодинамическое удержание плазмы, тогда как при $RP \ll 1$ - классическое. Начальные условия ЭЦР пробоя однозначно определяют режим удержания на стационарной стадии разряда и, следовательно, стационарную величину параметра RP . Получено, что зависимости интенсивности пика «Preglow» как функции RP лежат в области $0.1 \ll RP \ll 10$, вне которой эффект не наблюдается. При $RP \gg 1$, что соответствует полностью заполненному конусу потерь и сильно столкновительной плазме, пик «Preglow» не формируется из-за малого времени жизни частиц - энергия в «горячих» электронах не накапливается. В противоположном случае при $RP \ll 1$ энергия тоже не запасается, т.к. в этом режиме рост концентрации электронов происходит слишком медленно из-за небольшого числа ионизирующих столкновений. Показано, что возможна генерация интенсивного пика тока ионов гелия с длительностью в

несколько десятков микросекунд. Длительности импульса «Preglow» такого масштаба были получены в ходе экспериментов на стенде «SMIS-37», описанных в разделе 2.3. На рис. 5а представлены расчётные зависимости интенсивности пика ионного тока от параметра RP для разных плотностей мощности СВЧ излучения, на рис. 5б — зависимости длительности пика ионного тока.

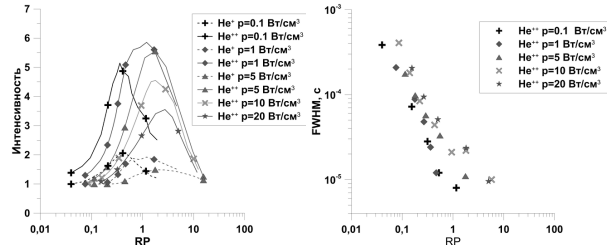


Рис. 5. Расчётные зависимости интенсивности пика ионного тока (а) и длительности пика ионного тока (б) от параметра RP для разных плотностей мощности СВЧ излучения

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. Вид ФРЭЭ, принятый в модели, (квазилинейное плато с резким обрывом по достижении предельной энергии) был косвенно подтверждён экспериментальными исследованиями, описанными в главе 2. Подобная форма ФРЭЭ обеспечивает эффективную ионизацию нейтрального газа из-за наличия электронов в области энергий, соответствующих максимальным сечениям ионизации, с одной стороны, и позволяет запастись энергией в «горячих» электронах, время жизни которых в ловушке велико по сравнению с характерным временем развития разряда. При определённом сочетании начальной плотности частиц и характеристик СВЧ излучения, нагревающего плазму, может возникнуть ситуация, когда энергия, накопленная на начальной стадии пробоя, оказывается выше, чем её значение на стационарной стадии разряда. Быстрый сброс избыточной энергии в виде интенсивного потока заряженных частиц из ловушки приводит к возникновению пика «Preglow». Иными словами, на этапе лавинообразного роста плотности плазмы, когда её величина достигает достаточно высокого уровня, энергия, запасённая в горячих электронах, а также энергия микроволнового излучения расходуется на интенсивную ионизацию газа.

Этот резерв энергии позволяет на непродолжительное время создать плазму с плотностью и средней энергией, превышающей величины, которые достигаются на стационарной стадии разряда. Описанный процесс проиллюстрирован на рис. 6.

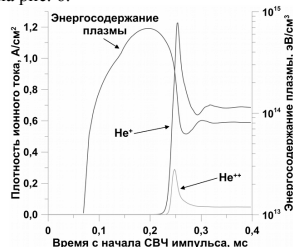


Рис. 6. Плотности тока первого и второго ионов гелия и энергосодержание плазмы в режиме, соответствующем наибольшей интенсивности пика «Preglow» второго иона

Из расчётов следует, что источник с нагревом плазмы на частоте в диапазоне 30-60 ГГц является наиболее эффективным с точки зрения комбинации плотности ионного тока, интенсивности «Preglow» и среднего заряда ионов. Такой источник сможет генерировать импульсные пучки многозарядных ионов с плотностью тока на уровне несколько А/см² и выше и длительностью менее 50 мкс.

На основе проведённых исследований предложен новый тип ЭЦР источника ионов, позволяющий создавать плазму с плотностью выше 10^{13} см⁻³ характерной энергией электронов 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 таких проектах, как «Beta Beam» и «ESS».

Проведённые исследования и построенная модель легли в основу разработки прототипа короткоимпульсного источника МЗИ «SEISM», который был запущен в лаборатории LPSC (г. Гренобль, Франция) в рамках совместного проекта с ИПФ РАН. Описание прототипа и результаты первых экспериментов по экстракции ионного пучка приведены в разделе 3.2. Для нагрева плазмы использовалось СВЧ излучение импульсного гиротрона с частотой 60 ГГц и мощностью до 300 кВт, плазма удерживалась в осесимметричной магнитной ловушке со встречными полями («касп»), обеспечивающей МГД-стабильность плазмы (конфигурация поля с минимальной напряжённостью в центре) и замкнутую ЭЦР-поверхность. В ходе первых экспериментов было продемонстрировано получение ионных

токов с плотностью до 1,2 А/см² [15А], что хорошо согласуется с предсказанными численной моделью параметрами.

Материалы, изложенные в главе 3, опубликованы в [10А, 12А, 13А, 14А, 15А].

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Построена численная модель, позволяющая рассчитывать развитие пробоя газа, формирование распределения ионов по кратностям ионизации и нестационарные процессы в плазме ЭЦР разряда, удерживаемой в магнитной ловушке. Модель учитывает особенности функции распределения электронов по энергиям на начальной стадии разряда в условиях мощного ЭЦР нагрева и позволяет описывать плазму в широком диапазоне параметров. Численные расчёты хорошо согласуются с результатами экспериментов, проведённых на различных установках.

2. Экспериментально обнаружен эффект «Preglow», заключающийся в том, что в начале импульса тока ионов присутствует короткий мощный всплеск, после которого происходит релаксация уровня токов до стационарного значения. Помимо новизны, обнаружение эффекта имеет практическую ценность в исследованиях по созданию короткоимпульсных источников МЗИ, которые оказываются необходимыми в ряде экспериментов в области физики элементарных частиц. Экспериментально исследованы зависимости количественных характеристик эффекта «Preglow» от параметров ионного источника. Наличие эффекта убедительно продемонстрировано на трёх различных установках с существенно отличающимися характеристиками.

3. В рамках исследования эффекта «Preglow» проведены эксперименты по изучению качественных характеристик функции распределения электронов по энергиям на начальной стадии ЭЦР разряда. В серии уникальных экспериментов по изучению временной эволюции тормозного рентгеновского излучения плазмы ЭЦР разряда и напрямую измерению энергии электронов, вылетающих из магнитной ловушки получено, что при некоторых условиях на начальной стадии ЭЦР разряда формируется ФРЭЭ с квазилинейным плато, при этом средняя энергия электронов находится на уровне, значительно превышающем стационарный, что качественно согласуется с построенной теоретической моделью.

4. На основе теоретической модели и подтверждающих её экспериментов сделан вывод о природе эффекта «Preglow», проведено численное моделирование зависимости его количественных параметров от основных настроек ЭЦР ионного источника. Показано, что с использованием эффекта «Preglow» можно реализовать импульсный ЭЦР источник МЗИ, обладающий

уникальными характеристиками (соотношением длительности импульса и величины ионного тока) при использовании достаточно высокочастотного и мощного источника СВЧ излучения.

5. 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/см². 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/см², параметры плазмы и ионного пучка хорошо согласуются с предсказанными численной моделью.

Список литературы

- [1]. Geller R. Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasmas. / Geller R. - Bristol: Institute of Physics, 1996.
- [2]. D. Leitner, C. M. Lyneis, S. R. Abbott, R. D. Dwinell, D. Collins, and M. Leitner. First Results of the Superconducting ECR Ion Source VENUS with 28 GHz. // Proc. 16th Intern. Workshop on ECR Ion Sources. 2004.
- [3]. C. M. Lyneis, M. A. Leitner, D. Wutte, C. E. Taylor, and S. R. Abbott. VENUS: The next generation ECR ion source. // AIP Conference Proceedings. 2001.
- [4]. V. P. Pastukhov. Collisional losses of electrons from an adiabatic trap in a plasma with a positive potential. // Nucl. Fusion. 1974. V. 14, N. 3.
- [5]. Geller R., Jacquot B., Sortais P. The upgrading of the multiply charged heavy-ion source Minimafios. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1986. V. 243, I. 2-3.
- [6]. S. Gammino, G. Ciavola, M. Castro, L. Celona, F. Chines, S. Marletta. Installation of ECR2 at LNS and Preliminary tests. // Proceedings of the 14th International Workshop on ECR Sources. 1999.
- [7]. C. M. Lyneis, S. Caspi, P. Ferracin, D. Leitner, S. Prestemon, G. L. Sabbi, D. S. Todd, F. Trillaud. Conceptual Design of a 56 GHz ECR Ion Source Magnet Structure. // Proceedings of the 18th International Workshop on ECR Sources. 2008.
- [8]. <https://europeanspallationsource.se/>
- [9]. <http://beta-beam.web.cern.ch/beta-beam/task/index.asp>
- [10]. C. Hill and K. Langbein. Pulsed ECR source in afterglow operation at CERN. // Rev. Sci. Instrum. 1996. V. 67, N. 3.
- [11]. P. Briand, R. Geller and G. Melin. A newly designed ECR source for the lead injectors of CERN. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip. 1990. V. 294, N. 3.

[12]. E. V. Suvorov and M. D. Tokman. Theory of microwave breakdown of low-density gas at electron cyclotron resonance in magnetic mirror systems. // Sov. J. Plasma Phys. 1989. V. 15.

[13]. Жильцов В.А., Скворода А.А., Тимофеев А.В., Харитонов К.Ю., Щербаков А.Г. Образование горячих электронов в открытых ловушках при ЭЦР нагреве с продольным вводом СВЧ мощности. // Физика плазмы. 1991. Т. 17, Вып. 7.

[14]. Edgell D.H., Kim J.S., Bogatu I.N., Pardo R.C., Vondrasek R.C.. Modeling of electron cyclotron resonance ion source plasmas. // Proceedings of Particle Accelerator Conference. 2001. V. 3.

[15]. V. Eruhimov and V. Semenov. Two-dimensional numerical model of electron cyclotron resonance discharge with pointwise mappings. // Rev. Sci. Instrum. 2006. V. 77.

[16]. В.А. Жильцов, А. Ю. Куянов, А.А. Скворода, А.В. Тимофеев. Особенности удержания горячих электронов в открытой ловушке Огра-4 при ЭЦР с продольным вводом СВЧ мощности. // Физика плазмы. 1994. Т. 20, Вып. 3.

Список публикаций по теме диссертации

- [1A] V. A. Skalyga, V. G. Zorin, I. V. Izotov, A. V. Sidorov, T. Lamy, P. Sortais, and T. Thuillier. Gas breakdown in electron cyclotron resonance ion sources. // Review of Scientific Instruments, 2006. V. 77, P. 03A325.
- [2A] A. Sidorov, A. Bokhanov, I. Izotov, S. Razin, V. Skalyga, V. Zorin, A. Balabaev, S. Kondrashev, R. Geller, T. Lamy, P. Sortais, T. Thuillier, P. Spädtker. Ion beam formation in a gas-dynamic electron cyclotron resonance ion source. // Review of Scientific Instruments, 2006. V. 77, P. 03A341.
- [3A] T. Thuillier, T. Lamy, L. Latrasse, I. V. Izotov, A. V. Sidorov, V. A. Skalyga, V. G. Zorin, M. Marie-Jeanne. Study of pulsed ECRIS plasma near breakdown: the Preglow. // Review of Scientific Instruments, 2008. V. 79, P. 02A314.
- [4A] S. Golubev, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, V. Skalyga, A. Vodopyanov, V. Zorin, A. Bokhanov. High current ECR source of multicharged ion beams. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2007. V. 256, I. 1, P. 537.
- [5A] Ivan V. Izotov, Alexander V. Sidorov, Vadim A. Skalyga, Vladimir G. Zorin, Thierry Lamy, Louis Latrasse, and Thomas Thuillier. Experimental and Theoretical Investigation of the Preglow in ECRIS. // IEEE Transactions on plasma science, 2008. V. 36, I. 4, P. 1494.
- [6A] V. G. Zorin, V. A. Skalyga, I. V. Izotov, S. V. Razin, A. V. Sidorov, T. Lamy, T. Thuillier. ECR breakdown of heavy gases in open mirror trap. // Fusion Science and Technology, 2010. V. 59, N. 1T, P. 140.
- [7A] A. V. Sidorov, V. G. Zorin, I. V. Izotov, S. V. Razin, V. A. Skalyga. Generation of a high-current beam of multiply charged ions from a dense plasma

produced by high-power millimeter-wave gyrotron radiation under ECR conditions. // *Technical Physics*, 2010. V. 55, I. 10, P. 1540.

[8A] V.A. Skalyga, V. G. Zorin, I.V. Izotov, A.V. Vodopyanov., S. V. Golubev, D.A. Mansfeld, S. V. Razin, A.V. Sidorov. Short-pulse ECR: A source of multiply charged ions. // *Technical Physics*, 2010. V. 55, I. 12, P. 1797.

[9A] T Ropponen, O Tarvainen, I Izotov, J Noland, V Toivanen, G Machicoane, D Leitner, H Koivisto, T Kalvas, P Peura, P Jones, V Skalyga and V Zorin. Studies of plasma breakdown and electron heating on a 14 GHz ECR ion source through measurement of plasma bremsstrahlung. // *Plasma Sources Science and Technology*, 2011. V. 20, N. 5, P. 055007.

[10A] V. Skalyga, I. Izotov, V. Zorin, and A. Sidorov. Physical principles of the preglow effect and scaling of its basic parameters for electron cyclotron resonance sources of multicharged ions. // *Physics of Plasmas*, 2012. V. 19, P. 023509.

[11A] S. V. Golubev, I. V. Izotov, D. A. Mansfeld, and V. E. Semenov. Experimental electron energy distribution function investigation at initial stage of electron cyclotron resonance discharge. // *Rev. Sci. Instrum.*, 2012. V. 83, I. 2, P. 02B504.

[12A] I. V. Izotov, V. A. Skalyga, and V. G. Zorin. Optimization of gas utilization efficiency for short-pulsed electron cyclotron resonance ion source. // *Review of Scientific Instruments*, 2012. V. 83, I. 2, P. 02A342.

[13A] T. R. Edgecock et al. High intensity neutrino oscillation facilities in Europe. // *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 2013, V. 16, P. 021002.

[14A] E. Wildner et al. Design of a neutrino source based on beta beams. // *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 2014. V. 17, P. 071002.

[15A] T. Lamy, J. Jacob, J. Angot, P. Sole, T. Thuillier, M. Bakulin, A.G. Eremeev, I. Izotov, B. Movshevich, V. Skalyga, F. Debray, J. Dumas, C. Grandclement, P. Sala, C. Trophime. 60 GHz ECR ion sources. // *Proceedings of HIAT2015*, 2015. P. THM2101.

[16A] В.А. Скалыга, В.Г. Зорин, И.В. Изотов, А.В. Водопьянов, С.В. Голубев, Д.А. Мансфельд, С.В. Разин, А.В. Сидоров. Короткоимпульсный электронный циклотронный резонансный источник многозарядных ионов // *Журнал технической физики*, 2010. Т. 10, В. 12, С. 90.

ИЗОТОВ Иван Владимирович

**РАЗВИТИЕ РАЗРЯДА В МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ ИОННОГО
ИСТОЧНИКА В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО
РЕЗОНАНСА**

А в т о р е ф е р а т

Ответственный за выпуск
И. В. Изотов

Подписано к печати __. __. 2017 г.
Формат 60 × 90 1/16. Бумага офсетная №1.
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ № __ (2017).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН
603950, г. Новгород, ул. Ульянова 46