

ОТЗЫВ

официального оппонента
кандидата физико-математических наук Соломахина Александра
Леонидовича
на диссертацию **ИЗOTOVA Ивана Владимировича**
**«Развитие разряда в магнитной ловушке ионного источника в
условиях электронно-циклотронного резонанса»,**
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы»
в диссертационный совет Д 002.069.02 при Институте прикладной
физики РАН.

Актуальность избранной темы

Источники одно- и многозарядных ионов на основе разряда в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) в плазме открытой магнитной ловушки широко используются для решения различных фундаментальных и прикладных задач в медицине, микроэлектронике, ядерной физике и т.д.. Требования к ионным источникам постоянно возрастают. Необходимо повышать как заряд ионов, так интенсивность ионных пучков при сохранении высокого качества пучка, причём необходимы как импульсные, так и непрерывные источники ионов.

Основным способом увеличения производительности ЭЦР источников ионов является повышение частоты и мощности СВЧ излучения. Однако увеличения частоты требует пропорционального увеличения магнитного поля. Это является трудоёмкой и ресурсозатратной задачей для магнитной конфигурации «минимум-В», которая чаще всего применяется в подобных источниках. Использование аксиально-симметричной магнитной конфигурации может оказаться более перспективным.

В импульсных ЭЦР источниках ионов увеличение параметров может быть достигнуто с помощью использования нестационарной части разряда. В некотором диапазоне параметров наблюдается существенное увеличение параметров ионного пучка на начальной «Preglow» и конечной «Afterglow» части ЭЦР разряда. Эффект «Afterglow» уже нашёл практическое применение в ЭЦР источниках многозарядных ионов. Однако подобный режим требует предварительного выхода разряда на стационар, что не всегда приемлемо. Что касается эффекта «Preglow», то он обнаружен сравнительно недавно. Исследованию этого эффекта и посвящена, в основном, работа соискателя. Актуальность темы исследований не вызывает сомнений.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

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

Достоверность и новизна полученных результатов

Большой объем экспериментальных данных, полученный в работе, позволяет с высокой степенью уверенности говорить об обнаружении на всех рассмотренных установках эффекта «Preglow» - увеличение ионного тока на начальной стадии разряда по сравнению со стационарной стадией. Результаты численного моделирования, проведенные автором, качественно совпадают с экспериментом при большом количестве варьируемых параметров разряда. Это свидетельствует об адекватности теоретической модели эффекта «Preglow», построенной автором. Также достоверность модели подтверждают измерения эволюции спектров тормозного рентгеновского излучения плазмы и энергии высокоэнергичных электронов, покидающих ловушку.

Результаты обсуждались на научных семинарах в российских и зарубежных институтах и университетах, докладывались на большом количестве российских и международных конференциях по ионным источникам и ускорителям и были опубликованы в большом количестве ведущих российских и зарубежных рецензируемых журналах.

Исследования экспериментально обнаруженного эффекта «Preglow» на ряде установок позволило предложить новый тип короткоимпульсного ЭЦР источника ионов с характеристиками, улучшенными по сравнению с существующими источниками. Впервые измерено тормозное излучение плазмы ЭЦР источника с энергетическим и временным разрешением, позволяющим восстановить эволюцию спектра тормозного излучения в диапазоне 1.5 - 400 кэВ с точностью до 100 мкс. Впервые проведены прямые измерения энергии высокоэнергичных электронов, вылетающих вдоль оси из магнитной ловушки, на начальной стадии разряда.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов

Во многом благодаря применению ЭЦР источников ионов в качестве инжекторов в циклотронные и линейные ускорители были достигнуты последние успехи в области ядерной физики. Для проведения новых экспериментов на существующих установках и строительства новых установок требуется существенное улучшение параметров ЭЦР источников ионов. Исследования в этой области являются особенно актуальными для лабораторий, использующих ускорители тяжёлых ионов. Исследования, проведенные автором, 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 автором, 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).

Также на основе результатов, полученных автором, 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 требованиям проекта «Beta Beam».

Оценка содержания диссертации, её завершенность

В целом диссертационная работа представляет собой законченный труд, в котором получен ряд важных результатов как фундаментального, так и прикладного характера.

Достоинство и недостатки в содержании и оформлении диссертации, влияние отмеченных недостатков на качество исследования

Диссертация написана хорошим научным языком, с использованием специальной терминологии.

По работе имеются следующие замечания

1. Список литературы выполнен с нарушением ГОСТа.
2. На рисунке 14 указана неправильная размерность по горизонтальной оси.
3. В работе отсутствует упоминание о кинетических неустойчивостях, которые могут возникать при наличии существенно неравновесной функции распределения электронов. Это ставит под сомнение применимость некоторых уравнений системы (24), использованной для расчёта динамики ЭЦР разряда.
4. Энергия электронов в модели меняется от нуля до нескольких сот кэВ. Так же сильно отличается время жизни электронов в ловушке. Причём самые горячие электроны всегда удерживаются в классическом режиме, а самые холодные в газодинамическом. Непонятно как в модели с помощью одной переменной определяется время жизни электронов и режим удержания.
5. Из текста неясно, какой величины скачок амбиполярного потенциала (22), удерживающего ионы в ловушке, использовался при моделировании. Зависит ли он от параметров плазмы или использовалось постоянное значение?

6. В описании модели не определена функция напуска нейтрального газа в ловушку, которая использовалась при моделировании. В работе указывалось, что проводилось моделирование с учётом десорбции газа со стенок, но никаких подробностей не приведено.

7. На графиках 18г и 19а изображены зависимости, измеренные и промоделированные в очень похожих условиях, с отличием только в мощности СВЧ на 3%. Однако зависимости на разных графиках заметно отличаются, особенно результаты моделирования (до 200%).

8. В пояснении к рисунку 19 указано, что для высоких зарядовых состояний наблюдается завышение результатов моделирования по сравнению с результатами эксперимента, однако на графиках систематического завышения не наблюдается.

9. На стр. 62 написано, что уменьшение градиента магнитного поля приводит к уменьшению резонансной области. Кажется, что должно быть наоборот.

10. Также на стр. 62 написано, что уменьшение размера области, заключенной в резонансную поверхность, приводит к увеличению удельного энерговклада. При классическом режиме удержания должно быть наоборот, так как в этом случае большее число электронов достигает резонанса.

11. На стр. 76 написано, что падение ионного тока после пика «Preglow» вызвано уменьшением концентрации плазмы. Однако на рис. 38 наблюдается падение плотности плазмы на 10%, в то время как ток падает в два раза. А на рисунке 1 падения плотности плазмы после формирования пика «Preglow» практически отсутствует.

Указанные замечания не снижают научной значимости и общей положительной оценки диссертационной работы.

Соответствие автореферата основному содержанию диссертации

Текст автореферата соответствует содержанию диссертации

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положение о присуждении ученых степеней» по пунктам 10, 11 и 14

Диссертация Изотова Ивана Владимировича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, обладающей научной новизной и содержащей научные положения, имеющие существенное значение для физики ЭЦР разряда в магнитных ловушках открытого типа.

Работа соответствует требованиям пунктам 10, 11 и 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор

заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы»

Официальный оппонент,
Соломахин Александр Леонидович, кандидат физико-математических наук по специальности «физика плазмы» - 01.04.08,
630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.,
т.+7 (383) 329-42-24
A.L.Solomakhin@inp.nsk.su
старший научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН).

12 сентября 2017 г.
Подпись А.Л. Соломахина удостоверяю



А.Л. Соломахин

Учёный секретарь ИЯФ СО РАН

к.ф.-м.н.



Я.В. Ракшун