

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора, академика РАН

**Шаркова Бориса Юрьевича**

на диссертационную работу

**Скалыги Вадима Александровича**

**«Исследование электронно-циклотронного резонансного разряда с целью генерации интенсивных ионных пучков»,**

представленную в диссертационный совет Д 002.069.02

при «Федеральном исследовательском центре

Институт прикладной физики РАН»,

на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

по специальности 01.04.08 — физика плазмы

### *Актуальность работы:*

В настоящее время разработано и используется на практике большое количество типов источников ионов на основе разрядов различных видов, поддерживаемых электромагнитным излучением ВЧ, СВЧ и оптического диапазона, при высоких и низких давлениях газа, с равновесным и неравновесным характером ионизации.

Одним из видов таких устройств является источник на основе разряда в магнитной ловушке, в котором нагрев плазмы осуществляется мощным СВЧ излучением в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР). Широкое применение ЭЦР источники ионов (в том числе и многозарядных) получили в фундаментальных исследованиях по физике высоких энергий и в ядерной физике для инъекции пучков ионов в ускорители тяжелых частиц, в микроэлектронике для ионной имплантации, модификации поверхности и т.д.

Диссертационная работа посвящена исследованиям физических условий по совершенствованию ЭЦР источников ионов за счет использования для поддержания разряда электромагнитного излучения современных гиротронов с большей частотой и мощностью, что позволило существенно увеличить плотность плазмы в разряде, перейти к новому квазигазодинамическому режиму удержания и обеспечить существенное увеличение тока получаемых ионных пучков, в частности, удалось получить пучки ионов дейтерия с рекордной яркостью, разработать на их основе D-D генератор нейтронов нового типа, а также короткоимпульсный сильноточный источник ионов короткоживущих радиоактивных изотопов. Все это делает тему диссертационной работы В.А. Скалыги, посвященную исследованиям физических особенностей ЭЦР разряда и поиску путей его возможных применений, важной и актуальной.

### *Новизна подхода и основные результаты:*

Научная новизна и значимость полученных автором результатов состоит, прежде всего, в исследовании физических особенностей ЭЦР разряда, поддерживаемого мощным миллиметровым излучением, обеспечивающим при высоком удельном энергокладе реализацию нового квазигазодинамического режима удержания плазмы в магнитных ловушках различных типов. Использование в работе мощного миллиметрового излучения с частотами до 75 ГГц позволило получать неравновесную плазму с рекордно высокой плотностью - до  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ , что наряду с малым временем жизни в ловушке обеспечило возможность формирования сильноточных пучков ионов.

В работе впервые показано, что средний заряд ионов в плазме ЭЦР разряда в магнитной ловушке со встречными полями с газодинамическим режимом удержания может быть существенно повышен за счет использования для ЭЦР нагрева излучения с большей частотой и мощностью, а также при увеличении геометрических размеров ловушки. При использовании излучения гиротрона с частотой 37,5 ГГц и мощностью 100 кВт получены сильноточные пучки многозарядных ионов с яркостью до  $50 \text{ А}/(\pi \text{ мм мрад})^2$  при плотности тока до  $650 \text{ мА}/\text{см}^2$ . В случае использования многоапертурных систем экстракции получены пучки многозарядных ионов с током до 150 мА. При использовании излучения гиротрона с частотой 60 ГГц и мощностью 150 кВт в ловушке со встречными полями, имеющей замкнутую ЭЦР поверхность внутри разрядной камеры, получены пучки ионов азота со средним зарядом +4, с током до 6 мА при плотности тока  $750 \text{ мА}/\text{см}^2$ .

Показана возможность (за счет повышения частоты и мощности ЭЦР нагрева) создания короткоимпульсных пучков многозарядных ионов гелия, азота, аргона с длительностью на уровне 50 мкс. Предложена и реализована схема короткоимпульсного ЭЦР источника многозарядных ионов короткоживущих радиоактивных изотопов (в результате численных расчетов показано, что эффективность извлечения радиоактивных частиц  ${}^6\text{He}$  в виде полностью ионизованных ионов может достигать 50%).

Получены пучки легких ионов с рекордной яркостью, в частности, пучки ионов водорода с током до 500 мА, нормализованным эмиттансом  $0,07 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ , нормализованной яркостью  $100 \text{ А}/(\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад})^2$  при доле протонов 94%. Такие пучки с запасом удовлетворяют требованиям всех существующим и разрабатываемым сильноточным протонным ускорителям, включая ускорительные комплексы проектов ESS и IFMIF. Предложено использовать такие сильноточные пучки ионов дейтерия для создания мощного компактного нейтронного генератора нового поколения на основе D-D реакции. Экспериментально продемонстрировано получение высокого значения потока нейтронов с плотностью на уровне  $1 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$  при бомбардировке мишени из тяжелого льда пучком ионов дейтерия с током 500 мА и энергией 45 кэВ.



#### *Достоверность полученных результатов:*

Объем экспериментальных и теоретических исследований ЭЦР разряда при больших мощностях и частотах поддерживающего излучения, проведенных в рамках диссертационной работы с использованием целого ряда экспериментальных установок в различных лабораториях, в том числе и зарубежных, весьма значителен. Работы, выполненные с использованием различных (в некоторых случаях дополняющих друг друга) методов диагностики, сравнение их результатов с существующими аналогами и теоретическими расчетами, широкое обсуждение полученных данных на профильных международных конференциях, публикации в ведущих научных журналах не вызывают сомнения в обоснованности и достоверности полученных результатов и выводов. Проведенные исследования позволили предложить и разработать новые специализированные виды ионных источников с рекордными характеристиками, прототипы макеты которых уже реализованы.

Результаты диссертации докладывались на многочисленных российских и международных конференциях и представлены в 30 научных статьях в международных и российских журналах (в журналах из перечня ВАК РФ).

#### *Практическая значимость полученных автором результатов:*

Практическая значимость диссертации не вызывает сомнений. Результаты диссертационной работы могут использоваться в исследовательских научных центрах, работающих в области физики элементарных частиц, ядерной физике, физике плазмы, а также в медицинских или материаловедческих организациях где используются приборы с применения плазмы.

#### *Содержание диссертации и её завершенность:*

Работа выстроена логично, ее структура и содержание отражает цели и задачи исследования. Работа представляется законченным крупным научным трудом, отличающимся глубоким изучением физических особенностей ЭЦР разряда с квазигазодинамическим режимом удержания, оптимизацией его параметров с целью разработки специализированных источников ионов, в частности, короткоимпульсного источника короткоживущих радиоактивных изотопов, сильноточного источника ионов водорода и дейтерия для современных линейных ускорителей и D-D генераторов нейтронов. Результаты В.А. Скалыги, изложенные в диссертации, являются, несомненно, новыми и обладают большой научной значимостью, соответствуют высокому мировому уровню исследований ЭЦР разряда, поддерживаемого миллиметровым излучением и, в значительной степени, определяют этот уровень.

*Замечания и пожелания:*

Представленная диссертация не свободна от недостатков.

1. Ключевым физическими условиям для реализации квазигазодинамического режима нагрева плазмы мощным СВЧ излучения высокой частоты является большая разница электронной и ионной температур неравновесной плазмы. К сожалению, в работе не обсуждается конкретная величина ионной температуры, в то время как ее низкое значение определяет такой важный для практических применений параметр, как значение эмиттанса извлекаемых пучков. Этот факт упоминается, но не обосновывается.
2. Формирование пучков ионов и исследования их эмиттанса проводились при наличии внешнего сильного неоднородного магнитного поля, однако его влияние на параметры пучка не обсуждается, и то время как такое влияние во многих экспериментах было определяющим.
3. В работе отсутствует обоснование целесообразности выбора для конкретных экспериментальных исследований того или другого типа магнитной ловушки. Так первая часть диссертационной работы обосновывает преимущества использования ловушки со встречными полями (типа касп), а во второй части без должного обоснования используется обычный пробкотрон.
4. Использование ЭЦР источника ионов на ускорителях ионов и протонов подразумевает режим функционирования всех систем с высокой частотой повторения импульсов от единиц до десятков герц в течение продолжительного времени. Поэтому реальные режимы эксплуатации предъявляют весьма жесткие требования к ресурсу источников. Обсуждение этой проблемы в работе отсутствует, а в разделе, посвященном созданию мощного нейтронного генератора, не затрагивается техническая проблема охлаждения мишени в условиях интенсивного нагрева ионным пучком, которые неизбежно появятся при переходе к непрерывному режиму работы.
5. В работе получены рекордные параметры ионных источников на основе мощного СВЧ излучения высокой частоты, однако отсутствует сколь-нибудь детальное сопоставление полученных результатов с результатами других лабораторий России и зарубежных центров. Подобное сравнение, несомненно, украсило бы диссертацию.
6. На стр. 171 в формуле, описывающей уширение спектральной линии, допущена опечатка, в скобках должна быть записана разность квадратов измеренной и аппаратной ширины линии.

Отмеченные недостатки ни в коей мере не снижают важности и достоверности полученных в диссертации В.А. Скалыги результатов. В целом, диссертационная работа производит очень хорошее впечатление.



Оценка автореферата диссертации:

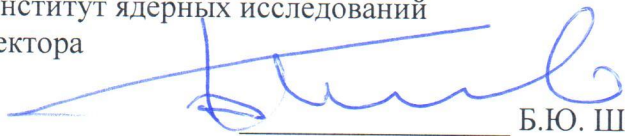
Автореферат полностью раскрывает основные положения диссертации.

**Заключение оппонента по диссертации В.А. Скалыги на соискание ученой степени доктора наук:**

Диссертация Скалыги Вадима Александровича «Исследование электронно-циклотронного резонансного разряда с целью генерации интенсивных ионных пучков» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 (физика плазмы) является научно-квалификационной работой, в которой получены результаты, совокупность которых можно квалифицировать как решение важных научных проблем, связанных с исследованием плазмы электронно-циклотронного резонансного разряда, поддерживаемого СВЧ излучением миллиметрового диапазона длин волн, и изучением перспектив его применения.


Диссертационная работа В.А. Скалыги «Исследование электронно-циклотронного резонансного разряда с целью генерации интенсивных ионных пучков» полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 –Физика плазмы.

Официальный оппонент,  
Шарков Борис Юрьевич  
Доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН  
Специальность 01.04.20 "Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника"  
ул. Жолио-Кюри, 6, г. Дубна, Московская обл., Россия  
тел : 8 916 2030030  
sharkov@jinr.ru  
Международная межправительственная организация  
Объединенный институт ядерных исследований  
Заместитель директора

  
Б.Ю. Шарков

Подпись Б.Ю. Шаркова заверяю  
Главный ученый секретарь ОИЯИ  
Д. ф.-м. н., профессор



  
А.С. Сорин