

ОТЗЫВ официального оппонента  
о диссертации СКАЛЫГИ Вадима Александровича  
«ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСНОГО РАЗРЯДА  
С ЦЕЛЬЮ ГЕНЕРАЦИИ ИНТЕНСИВНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ»,  
представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
по специальности 01.04.08 – физика плазмы

**Актуальность исследования**

Представленная к защите диссертация посвящена исследованию генерации интенсивных ионных пучков с помощью газового разряда низкого давления, поддерживаемого сверхвысокочастотной мощностью на частоте электронного циклотронного резонанса (ЭЦР). Актуальность разработки методов генерации интенсивных ионных пучков связана с их высокой востребованностью в различных областях применения. В числе таких применений следует отметить источники многозарядных ионов для ускорителей, используемых для фундаментальных исследований в области ядерной физики; источники ионов для задач разделения изотопов; источники легких ионов для термоядерных исследований и, в частности, для применения в нейтронных генераторах, необходимых для испытаний конструкционных материалов реактора; источники ионов для использования в компактных нейтронных генераторах для медицинских и материаловедческих применений. Важным достоинством газовых разрядов, создаваемых под действием ЭЦР излучения, является возможность достижения высоких электронных температур плазмы, необходимых для обеспечения интенсивной, в том числе многократной, ионизации атомов при сохранении низкой ионной температуры, позволяющей формирование пучков с низким эмиттансом. Сочетание этих свойств с длительным удержанием плазмы в магнитной ловушке дает возможность достижения высоких степеней ионизации генерируемого ионного пучка.

Перспективность применения ЭЦР разрядов для получения интенсивных ионных пучков, а, следовательно, и актуальность данной работы дополнительно выросли в связи с повышением частоты и мощности греющего СВЧ излучения и переходом к более высоким плотностям плазмы, позволившим осуществить квазигазодинамический режим удержания плазмы, при котором скорость заполнения конуса потерь превышает скорость ухода плазмы из ловушки. В таком режиме удастся получить значительно б'ольшие ионные токи по сравнению с классическими источниками. Кроме того, в квазигазодинамическом режиме удастся реализовать малое время формирования пучка и, следовательно, получить рекордно

короткие импульсы ионного тока, весьма актуальные для генерации пучков редких радиоактивных изотопов с малым периодом полураспада.

### **Новизна и достоверность научных положений, сформулированных в диссертации**

Представленные в диссертации исследования генерации интенсивных ионных пучков в ЭЦР разрядах высокой плотности занимают лидирующее положение в отечественной и мировой науке. В связи с этим большинство полученных в работе результатов и сформулированных на их базе положений и выводов обладают несомненной новизной. В частности, впервые был получен и всесторонне исследован квазигазодинамический режим удержания плазмы, создаваемой ЭЦР разрядом в ловушке со встречными полями. На основании выполненных экспериментов продемонстрирована возможность получения качественных пучков многозарядных ионов (МЗИ) с высоким зарядом, током и яркостью; подтверждена перспективность повышения частоты греющего СВЧ излучения для увеличения тока и среднего заряда ионов.

Экспериментально доказана возможность быстрого, за время менее 15 мкс формирования стационарного режима ЭЦР разряда, в то время как в классических источниках МЗИ это время составляет не менее 100 мкс. Таким образом, обоснован вывод о возможности создания короткоимпульсных источников МЗИ, востребованных в проектах физики высоких энергий.

Также впервые обнаружена и исследована возможность формирования в ЭЦР разряде протонных пучков с высокой яркостью, до 500 мА при эмиттансе  $0,07 \cdot \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ . Показано, что интенсивные пучки дейтерия позволяют получить нейтронный поток с твердой насыщенной дейтерием мишени компактного генератора DD нейтронов до  $5 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ , что достаточно для задач бор-нейтронозахватной терапии онкологических заболеваний и нейтронографии материалов.

Достоверность сформулированных научных положений подтверждена выполненными на современном уровне экспериментами и сопоставлением их результатов с расчетами и теоретическими оценками. Результаты опубликованы в рецензируемых журналах и прошли апробацию на научных семинарах, а также на отечественных и международных конференциях. Они известны в научном сообществе.

### **Степень обоснованности научных положений и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Сформулированные положения и рекомендации по использованию полученных результатов основаны на достаточном экспериментальном материале и хорошем теоретическом понимании физики процессов, происходящих в разрядах, поддерживаемых СВЧ излучением миллиметрового диапазона длин волн. Выводы по результатам работы, а также положения, выносимые на защиту, обоснованы проведенными экспериментами и сравнением их результатов с результатами, полученными в других лабораториях. В частности, положение о росте тока МЗИ и их среднего заряда с увеличением частоты греющего излучения подтверждено экспериментами с использованием генераторов ЭЦР с частотами от 30 до 60 ГГц. Рекомендации по практическому использованию полученных результатов даны на основе понимания потребностей современной науки и техники в источниках МЗИ и сопоставления возможностей источников на основе ЭЦР разрядов с другими типами источников. Обоснованность научных положений не вызывает сомнений.

#### **Личный вклад соискателя**

По материалам диссертационной работы соискателем опубликовано 30 статей в рецензируемых журналах, из которых почти в половине он является первым автором, что позволяет сделать вывод о решающем вкладе соискателя в рассматриваемую работу. Оппонент присутствовал на семинаре по материалам подготовленной диссертации в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе, где соискатель подробно излагал содержание работы. Проявленные в ходе семинара владение экспериментальным материалом и понимание физики наблюдаемых явлений не оставляют сомнений в определяющем личном вкладе соискателя в представленную к защите работу.

#### **Замечания по диссертационной работе**

1. В представленной в разделе 1.2 модели ионизационного равновесия МЗИ в ЭЦР разряде автор ограничился 0-мерным приближением без обсуждения правомерности такого рассмотрения. В условиях существенно неоднородного магнитного поля в ловушке, влияющего на пространственное распределение вкладываемой мощности, значимых потоков со стенок разрядной камеры, а также влияния перезарядки на баланс тепла предпринятое упрощение представляется спорным. Кроме того, пояснения в тексте не позволяют понять каким образом учитывались потери энергии на возбуждение линейчатого излучения плазмы, как правило, доминирующего в диапазоне электронных температур 10-100 эВ.
2. В разделе 4.3 при обсуждении перспектив применения для бор-нейтронозахватной терапии нейтронных генераторов на основе ЭЦР разряда оценка потока нейтронов для

коммерчески доступной мишени –  $5 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$  выполнена в предположении тока пучка дейтерия 500 мА. Вместе с тем, судя по спектру, представленному на рисунке 4.3, до половины тока пучка в ЭЦР разряде может быть обусловлена не дейтерием, а другими ионами, которые не дадут вклада в интенсивность термоядерной реакции, и следовательно поток нейтронов окажется заметно ниже. Представляется, что оценку перспективности использования ЭЦР разрядов в компактном генераторе нейтронов следует сделать с использованием реальных данных о потоках термоядерных нейтронов.

3. К сожалению, в тексте диссертации встречается большое количество опечаток (пропущенные знаки в показателях степеней, ошибочные ссылки на номера формул, пропущенные или неверные окончания слов), что, несколько портит впечатление от содержательной интересной работы и, по-видимому, свидетельствует о спешке при подготовке рукописи.

Сделанные замечания не препятствуют положительной оценке диссертационной работы в целом. **Диссертация является законченным научным исследованием, посвященным разработке и применению ЭЦР разрядов в качестве генераторов интенсивных ионных пучков. Рассматриваемую работу можно квалифицировать как новое крупное научное достижение и признать соответствующей требованиям, предъявляемым «Положением о порядке присуждения ученых степеней» к диссертациям, представляемым на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автора, СКАЛЫГУ Вадима Александровича, заслуживающим искомой степени.**

Материалы и результаты диссертационной работы опубликованы в научной печати и представлялись на семинарах в ведущих Российских центрах по физике плазменных разрядов, на международных конференциях по ЭЦР источникам ионов. Эти результаты известны в среде специалистов по физике микроволновых разрядов.

Выполненные в диссертации разработки СВЧ разрядов в качестве генераторов интенсивных ионных пучков могут быть рекомендованы для использования при проектировании и создании ионных ускорителей, компактных генераторов нейтронов широкого профиля применений. В частности, эти разработки могут найти применение в устройствах, создаваемых в НИЦ «Курчатовский институт», ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», ТРИНИТИ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ИОФ РАН.

Содержание автореферата диссертации Скалыги В.А. соответствует основным положениям диссертации и требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней».

Отзыв составлен Лебедевым Сергеем Владимировичем, ученое звание – старший научный сотрудник, ученая степень – доктор физико-математических наук, работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук в должности заместителя директора по научной работе, адрес: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая д.26, тел.: (812)-297-79-28, e-mail: sergei.lebedev@mail.ioffe.ru

Зам. директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе,  
докт. физ.-мат. наук



С.В. Лебедев  
« 02 » ноября 2017 г.

Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе,  
докт. физ.-мат. наук

А.П. Шергин