

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук  
**Иванова Александра Александровича**  
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  
Институте прикладной физики РАН»,  
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
по специальности 01.04.08 — физика плазмы

### **Актуальность работы:**

Актуальность диссертации связана с необходимостью разработки новых подходов к получению пучков заряженных частиц, удовлетворяющих все возрастающим требованиям различных приложений во многих отраслях науки и техники. Так для многих приложений ключевыми являются яркость ионного пучка и интенсивность. Обсуждаемая диссертационная работа Вадима Александровича Скалыги «Исследование электронно-циклотронного резонансного разряда с целью генерации интенсивных ионных пучков» есть пример решения на новом уровне такого сорта задач высокой актуальности, важных в частности для медицинских приложений.

### **Новизна подхода и основные результаты:**

Рассмотренные в диссертационной работе В.А.Скалыги задачи --- получение с помощью ионных источников на основе ЭЦР разряда, поддерживаемого мощным гиротроном, пучков с предельно малым эмиттансом и большим током --- не допускают простых решений с использованием более традиционных ионных источников. Эту работу можно рассматривать как попытку выхода за пределы традиционных применений источников на основе ЭЦР разряда, связанных в основном с получением пучков многозарядных ионов. Полученные в диссертации результаты внушают достаточно большой оптимизм по поводу перспектив предложенного подхода.

Первая новизна диссертационной работы В.А. Скалыги- это предложение использовать газодинамическое удержание плазмы в ионном ЭЦР источнике для повышения извлекаемого тока и увеличения яркости пучка. Второй очень важный новый момент диссертации связан с применением аксиально-симметричной конфигурации (каспа) для стабилизации желобковой неустойчивости плазмы. Эти вопросы рассматриваются автором во Введении и Главе 1 диссертации.

В Главе 2 автор рассматривает ЭЦР источник двузарядных ионов гелия с короткой длиной импульса. Источник предполагается использовать в проекте Beta Beam для исследования нейтринных осцилляций. Основным требованием было получение предельно короткого сильноточного импульса ионов  ${}^6\text{He}$ , который является короткоживущим изотопом. Автор успешно справился с поставленной задачей и исследованный прототип удовлетворяет условиям будущего эксперимента в ЦЕРНе. Новизна подхода при создании прототипа этого ЭЦР источника сомнений не вызывает.

В Главе 3 рассматривается применение ЭЦР источника с гиротронным разрядом для получения сильноточных пучков ионов водорода в современных ускорительных комплексах. Автор кратко останавливается на проблемах повышения тока пучка и уменьшения эмиттанса, для снижения потерь пучка при ускорении и транспортировке в крупных современных ускорителях, таких как IFMIF, LHC и европейском проекте European Spallation Source. В качестве прототипа ионного источника для использования в этих проектах использовалась прямая пробочная ловушка, из плазмы которой формировался пучок с нужными характеристиками. В целом задача получения сильноточного пучка с нужным эмиттансом для инъекции в современные ускорители стояла всегда. Для ее решения Скалыгой В.А. использован новый подход, основанный на использовании мощного гиротрона с нужной частотой для достижения требуемой плотности плазмы в ионном источнике.

Глава 4 посвящена исследованию нейтронного источника на основе сильноточного ЭЦР источника ионов дейтерия. Получен пучок ионов с нужными характеристиками и исследована генерация D-D нейтронов с использованием созданного автором набора диагностик. Рассматривается кратко приложения такого источника для целей реализации борнейтронозахватной терапии онкологических заболеваний и нейтронной томографии. Использование сильноточного ЭЦР источника для этих целей безусловно является новым.

Хочется пожелать Вадиму Александровичу продолжить работы в этом направлении с использованием материала этой главы диссертации.

Перейду к более формальной оценке диссертационной работы В.А. Скалыги.

#### **Достоверность полученных результатов:**

Достоверность результатов диссертанта убедительно продемонстрирована сравнением с расчетными характеристиками, полученным автором, и измерениями перекрестными диагностиками.

#### **Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов:**

Развитый в диссертации подход открывает путь к решению большого числа нерешенных ранее задач создания ионных пучков с уникальными свойствами.

Уже полученные диссертантом результаты могут быть использованы для создания ЭЦР источников на основе гиротронного разряда для многообразных применений.

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

Все публикации, составившие диссертационную работу В.А. Скалыги, объединены единым подходом и единой тематикой. Решения всех экспериментальных задач доведены до уровня, позволяющего перейти к созданию действующих прототипов и использованию в многообразных технологиях.

### **Критические замечания и пожелания:**

Вместе с тем, диссертация не лишена недостатков, которые связаны с использованием развиваемого автором подхода для нетрадиционных приложений ЭЦР источников без основательного сравнения с существующими подходами, с анализом присущих им ограничений. Безусловно, возможность практического приложения полученных результатов может привести к прорывам в развитии физики и техники источников ионов, однако на этом пути еще очень много предстоит сделать и совершить немало открытий, как приятных, так и не очень. Также стоит упомянуть о достаточно формальном знакомстве автора с физикой газодинамического удержания плазмы, что приводит к досадным утверждениям, часто встречающимся в тексте о том, что малое время жизни плазмы в этом режиме позволяет получить рекордные характеристики извлекаемых из нее пучков. То же можно сказать и о знакомстве автора с особенностями МГД-стабилизации плазмы в открытых ловушках.

Так во Введении автор утверждает, что «В традиционных ЭЦР источниках время кулоновского рассеяния электронов значительно больше газодинамического времени жизни плазмы в ловушке». Для рассматриваемых в диссертации ловушках при  $T_e \sim 100\text{эВ}$  это не так. Очевидно основная масса электронов имеет максвелловское распределение, утверждение относится к электронам большой энергии, которых относительно немного. При этом в ловушке типа касп в очень широком диапазоне параметров потери ионов являются газодинамическими и достаточно медленными. Так что утверждение автора на стр.8, что «Минимальное время жизни плазмы при квазигазодинамическом режиме при фиксированной концентрации автоматически означает максимально возможную плотность потока частиц из ловушки, ...» нужно скорее понимать как утверждение, что в каспе вообще можно получить МГД устойчивую плазму достаточно большой плотности и из нее извлекать большой ионный ток.

В уравнении 1.5 не определено, что такое  $\tau_i$ . Если этот параметр понимать как время жизни иона в ловушке, то утверждение, что в газодинамическом режиме можно получить ионы большей зарядности правильно только для ловушек большой длины и с большим пробочным отношением.

В Главе 1 диссертации на Рис.1.4 приведена зависимость инкремента желобковых колебаний от радиуса плазмы. Непонятно в каких предположениях вычислена эта зависимость. Обычно инкремент желобковой неустойчивости не зависит в первом приближении от радиуса плазмы и равен обратному времени пролета иона через ловушку. Дальнейшие рассуждения при сравнении экспериментально

наблюдаемого времени развития неустойчивости с оценкой из Рис.1.4 не очень стыкуются с экспериментом в частности на открытых ловушках. Дело в том, что в эксперименте нарастание неустойчивости происходит из состояния с существенным отклонением от оси и нарушениями симметрии, поэтому говорить о нарастании неустойчивости от тепловых шумов некорректно. В экспериментах наблюдается обычно резкое нарастание с временем согласующимся с обратным инкрементом и в дальнейшем развитие неустойчивости резко замедляется из-за охлаждения плазмы в результате сильного взаимодействия с лимитерами.

Далее при обсуждении модели состава плазмы с многозарядными ионами в этой главе для газодинамического времени жизни используется выражение 1.2. Однако формально в этом выражении для приосевых силовых линий  $R$  стремится к бесконечности и для оценки плотности плазмы нужно использовать более сложные модели удержания.

Несколько парадоксальным кажется утверждение о малой величине эмиттанса пучка извлекаемого из ЭЦР источника, поскольку в плазме с горячими электронами можно было бы ожидать больших перепадов амбиполярного потенциала и соответственно большого разброса поперечных скоростей извлекаемых ионов, чего не наблюдается. Чем это объясняется? Так же странным кажется это утверждение при наблюдаемой в эксперименте сильном и быстром изменении во времени плотности плазмы. Это должно приводить к изменениям формы плазменного мениска и быстрым и сильным изменениям упорядоченной расходимости, которые не могут скомпенсировать оптические элементы, формирующие пучок. Так ли это? В Главе 1 приводится описание двухэлектродной системы, используемой для формирования пучка. Из-за отсутствия запирающего потока обратных электронов электрода непонятна точность, с которой измеряется ток пучка. По опыту работы с дуговыми и ВЧ источника ионов этот ток может составлять существенную долю от тока пучка.

Использованный автором метод измерения эмиттанса пучка обладает недостаточной точностью, особенно, если идет речь о предельно малых значениях эмиттанса. В частности, можно ли дать оценку на основании проведенных измерений, существует ли гало пучка? Поскольку доля частиц в эксперименте, которая осаждается непосредственно на пуллер велика, то доля частиц, проходящих в непосредственной близости от него также велика, что должно приводить к сильным абберациям и появлению гало.

Как определить из Рис.1.27 эмиттанс пучка, если он показывает только точки соединенные ломанной прямой?

Взаимодействие сильноточного пучка с цилиндром Фарадея приводит, как показывает эксперимент, к образованию вторичной плазмы и соответствующим ошибкам в измерении тока пучка. Учитывался ли этот эффект в данной работе? Особенно это сильно должно проявляться в экспериментах, описываемых на стр. 61 для тока пучка 650мА.

Что означает утверждение на стр.70, что «всплеск ионного тока обусловлен» повышением эффективности экстракции»? Почему в начале импульса этого выброса нет? На приводимых далее осциллограммах тока этого всплеска практически не наблюдается при изменении напряжения вытягивания пучка?

В Главе 1 приводятся характеристики плазмы в источнике на основе простой пробочной ловушки, которые указывают на развитие в плазме МГД неустойчивости, приводящей к невозможности получения нужного тока пучка. С чем в этом случае связаны сильные колебания плотности плазмы даже в случае источника типа касп? Почему в источнике, описанном автором в Главе 3 такой проблемы нет, хотя он использует простую пробочную конфигурацию поля? На стр.115 и далее: результаты на каспе и простой пробочной ловушке одинаковы и даже на простой ловушке несколько лучше? Далее на Рис. 2.14 и 2.16 особых колебаний тока нет даже в случае простой пробочной ловушки малых размеров, в противоположность утверждениям автора во Введении. Хотя далее в проекте для Beta Beam почему-то предполагается использовать дальше именно вариант со встречными полями (стр.122). Скорее всего, при уменьшении размеров ловушки падает сильно инкремент неустойчивости из-за близости проводящих стенок и эффекта «charge uncovering». Так ли это?

Странным кажется утверждение на стр.108 Глава 2 о том, цитирую, «что в большинстве классических источниках МЗИ средний заряд ионов оказывается выше, чем в реализованных на сегодняшний день квазигазодинамических источниках», что находится в противоречии с утверждениями автора о преимуществах данного типа источников.

В Главе 3 на стр.130 утверждается, что «В наиболее крупных проектах, таких как “The International Fusion Materials Irradiation Facility” (IFMIF), “Large Hadron Collider” (LHC), “European Spallation Source” (ESS) [51-54], требуются пучки ионов водорода и дейтерия с током на уровне 100-400 мА при нормализованном эмиттансе не более  $0.2 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ . Низкое значение эмиттанса должно ограничивать потери ионов на стенки в высокоэнергичных секциях уровнем  $1 \text{ Вт/м}$ , типичным для большинства современных ускорителей. Таким требованиям не удовлетворяет ни один из существующих ионных источников”. Это утверждение ошибочно, с использованием дугового генератора плазмы указанные характеристики пучка уже достигнуты. В частности в работе В.И.Давыденко, Г.И.Димова, Г.В.Рослякова. Получение прецизионных ионных и атомных пучков высокой интенсивности. ДАН, 1983, т.271, №6, с.1380-1383 получен пучок с нормализованным эмиттансом  $0.4 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ ,  $1.6 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ , при токе пучка  $\sim 2.5 \text{ А}$ . При уменьшении количества отверстий в ионно-оптической системе получается требуемый эмиттанс.

В работе В.И.Давыденко и Н.Г.Хавина. Получение интенсивных пучков протонов и атомов водорода с энергией  $\sim 1 \text{ кэВ}$ . Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез, вып.3, 1990, с.58-59. получен нормализованный эмиттанс

протонного пучка 0.4 п мм мрад, 0.5 п мм мрад по двум координатам, ток пучка ~3.0 А. Для тока 100мА это дает значение эмиттанса меньше 0.1 мм мрад.

В работе A. Kolmogorov, G. Atoian, V. Davydenko, A. Ivanov, J. Ritter, N. Stupishin, and A. Zelenski. Production, formation and transport of high-brightness atomic hydrogen beam studies for the relativistic heavy ion collider polarized source upgrade. Rev. Sci. Instrum., v.85, N2, 2014, 02A734. doi: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/rsi/85/2/10.1063/1.4857195>, 10.1063/1.4857195

получен нормализованный эмиттанс протонного пучка 1.0 п мм мрад, 1.0 п мм мрад, ток пучка ~3.6 А. В пересчете на ток пучка 100мА эмиттанс будет составлять 0.17 п мм мрад по обоим координатам.

В Главе 4 содержатся предложения по применению пучков СВЧ источника на основе гиротрона для генерации нейтронов для БНЗТ и радиографии. Оба приложения кажутся не очень обоснованными. Непонятны преимущества в сравнении с существующими методами генерации плазмы в ионных источниках (дуговые с холодным и горячим катодом, ВЧ, геликонный разряд, диоплазматрон. Слишком большая экстраполяция от параметров экспериментов.

Вряд ли можно делать выводы о перспективности создания нейтронных источников для БНЗТ и томографии (радиографии) на основе экспериментов с длительностью пучка 1мс и энергией 40 кэВ. При создании реального генератора на предложенном принципе появляются вопросы эффективности поддержания плазмы в источнике, выбора оптимальной энергии пучка, снятия мощности, выделяемой пучком в мишени и времени ее замены и т.д.

2. Нейтронный генератор с требуемым выходом Д-Д нейтронов можно сделать на основе традиционного подхода. Утверждение о компактности предлагаемой схемы генератора довольно спорно, т.к. не учитывает размеров самого стационарного источника ионов, пучкового тракта, мишени и формирователя нейтронного потока. Как указывает сам автор, ВЧ нейтронные источники с потоком более  $10^{10}$  н/сек выпускаются фирмой Adelphi Technology Inc. (NEUTRON GENERATORS FOR ANALYTICAL PURPOSES, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA, 2012). Очевидно, что интенсивность потока нейтронов при необходимости может быть существенно увеличена.

3. Предложения о использовании ВЧ (2.45 Гц) источников для генерации Д-Д нейтронов появились очень давно (например, Петров Интенсивный генератор нейтронов с энергиями 14 и 2.5 МэВ, Атомная энергия Том.10, в.6, 1961).

4. Генератор Д-Д- нейтронов для БНЗТ не подходит из-за слишком большой энергии генерируемых нейтронов, что приводит к повреждению здоровых тканей из-за появления большого числа ядер отдачи. В генераторах на основе реакции p-Li эта проблема не так остра.

5. В предлагаемом источнике для радиографии плотность мощности ожидается на уровне (ток 0.5А и напряжение 140кВ)  $70\text{кВт}/10^{-4}\text{см}^2 = 7 \cdot 10^8 \text{ватт}/\text{см}^2$ , что будет с мишенью?

В тексте имеется некоторое количество опечаток:

1. На стр.58 содержится несколько орфографических ошибок.
2. Ссылка на стр. 58 (Глава 1) на Рис.1.20 некорректна, по-видимому правильно ссылаться на Рис. 1.21.
3. Ссылка на стр.61 на Рис. 1.21 неправильна, правильно ссылаться на Рис.1.25.
4. Не Рис. 1.24 ток на цилиндр Фарадея меняется в примерно 6 раз, а в тоже время ток ионов  $\text{N}^{+3}$  меняется всего в 3 раза, хотя автор утверждает, что эти зависимости повторяют друг друга?
5. Что означает утверждение на стр.99 о получении «многозарядных ионов  ${}^6\text{He}^{+3}$ »?
6. На стр. 201 «потки» вместо «потoki»

Эти замечания и пожелания никак не умаляют научных достоинств диссертационной работы В.А. Скалыги.

#### **Оценка автореферата диссертации:**

Автореферат диссертации адекватно отображает её содержание и полученные в диссертации результаты.

#### **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 содержится решение на новом уровне задачи о получении ионных пучков с предельно малым эмиттансом при достаточно большой величине тока для многих приложений. Часть результатов В.А. Скалыги могут быть уже сейчас использованы при создании следующего поколения ЭЦР источников с уникальными характеристиками.

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,

Иванов Александр Александрович

Доктор физико-математических наук,

Специальность 01.04.08 –Физика и химия плазмы

проспект Академика Лаврентьева, д. 11, г. Новосибирск, 630090, тел. : (+7 383) 329-41-28

ivanov@inp.nsk.su

Заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН.



----- А.А.Иванов

Подпись А.А. Иванова заверить  
Ученый секретарь ИЯФ им. Г.И.Будкера СО РАН  
к.ф.-м.н.

----- Я.В.Ракшун