

«УТВЕРЖДАЮ»



### ОТЗЫВ

Ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук на работу Скалыги В.А. «Исследование электронно-циклотронного резонансного разряда с целью генерации интенсивных ионных пучков», представленную в качестве диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

Прошло более 50-ти лет как исследования по программе УТС дали мощный толчок к развитию физики и техники мощных микроволновых генераторов мм-диапазона длин волн — гиротронов — мазеров на циклотронном резонансе. Выдающиеся успехи Нижегородской школы физиков в этой области широко известны во всем мире. Эта, пожалуй, единственная область в современной электронике высоких мощностей, где наше отечество продолжает занимать передовые позиции. Расширение области применения гиротронов в различных областях человеческой деятельности, безусловно, представляет интерес для отечественной промышленности и коммерции. Одна из таких областей — техника создания высокоинтенсивных ионных пучков с низким эмиттансом успешно развивается в ИПФ РАН под руководством проф. С.В. Голубева. Здесь речь идет прежде всего о создании инжекторов ионов для ускорителей на высокие (1МэВ и выше) энергии. Именно исследованиям в этой актуальной области и посвящена диссертация В.А. Скалыги.

Естественно, что именно требования к техническим характеристикам инжекторов ионов со стороны ускорителей на высокие энергии определяют содержание исследований диссертанта. А такими требованиями являются: достижение предельных токов, достижение предельных степеней ионизации многозарядных ионов с минимально возможным эмиттансом, формирование короткоимпульсных ионных пучков с предельными параметрами по интенсивности и эмиттансу. Эти требования прикладного характера и определили логику исследований диссертанта.

Диссертант исповедует два основных подхода к построению открытых магнитных ловушек для ионных источников: использование режима квазигазодинамического удержания плазмы в ловушке и принцип повышения плотности плазмы за счет увеличения частоты используемого микроволнового излучения. Оба принципа требуют повышения мощности микроволнового излучения, что современная техника вполне обеспечивает. Использование двух этих подходов к построению магнитных ловушек позволяют решить две важные задачи: создание короткоимпульсных пучков ионов с

крутыми фронтами импульсов тока и использование специальных электродинамических конструкций для защиты радиопрозрачного окна для ввода микроволнового излучения.

Основные экспериментальные усилия диссертанта, как видно из текста диссертации, были направлены на разработку и создание систем экстракции и измерения характеристик ионных пучков, создаваемых в ловушках различной конструкции и предназначенных для использования в различных проектах ускорителей.

Значительная часть диссертации посвящена изучению характеристик ионных пучков, генерируемых с помощью ловушек типа антипробкотрон. Такой подход к созданию источника многозарядных ионов был предложен диссертантом и впервые была показана возможность получения высоких параметров многозарядных ионных пучков азота: при частоте микроволн 37,5 ГГц и мощности 0,1 МВт, токи достигали 0,15 А при яркости  $50 \text{ A}/(\pi \text{ мм прод})^2$ .

Продолжением этих исследований явилась программа исследований в рамках международного сотрудничества ИПФ РАН и двух французских лабораторий. В рамках этой программы на основе антипробкотрона была создана установка с гиротроном на 60 ГГц и мощностью 0,3 МВт. Переход от 37,5 ГГц на частоту 60 ГГц привел к росту среднего заряда ионов азота и росту плотности ионного тока, что продемонстрировало перспективность выбранного направления построения ионных источников с использованием ЭЦР разряда.

Дальнейшие исследования диссертанта относятся к созданию короткоимпульсных источников для программы изучения осцилляций нейтрино.

Исследования короткоимпульсных режимов создания ионных пучков были выполнены с гиротронами с частотой 37,5 ГГц и 75 ГГц. Было показано, что ЭЦР разряд позволяет формировать пучки многозарядных ионов с фронтами тока короче 15 нс и длительностью  $\sim 50$  нс. Эксперименты с использованием излучения с частотой 75 ГГц и мощностью 0,2 МВт продемонстрировали увеличение плотности ионного тока в пучке в 4 раза, что соответствует росту плотности плазмы в источнике.

Данные исследования короткоимпульсных режимов ЭЦР разряда позволили предложить конструкцию ионного источника для экспериментов по изучению осцилляций нейтрино. На следующем этапе диссертантом исследованы источники сильноточных пучков ионов водорода для современных ускорителей. Исследования были выполнены с гиротронами на 37,5 ГГц и 75 ГГц с мощностью 0,2 МВт на модернизированных стендах на открытых ловушках с конфигурацией магнитного поля пробкотрона. Существенным новшеством в данных исследованиях была оптимизация конфигурации электродов системы формирования пучка, что позволило повысить величины извлекаемых токов ионов. Существенным оказалось положение системы экстракции относительно положения магнитной пробки. Вынесение экстрактора за пробку увеличило значение извлекаемых из плазмы токов. В результате измерений были достигнуты рекордные значения токов 0,5 А и значение эмиттанса  $0,07 \pi \text{ мм м рад}$ .

Эксперименты на модернизированной установке были продолжены с использованием излучения гиротрона на 75 ГГц. В этих экспериментах были выполнены измерения плотности плазмы внутри ловушки по штарковскому уширению линии

водорода  $H_8$  и установлено, что плотность достигает критического значения  $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Кроме того зондовые измерения за пробками показали, что температура электронов в истекающей из ловушки плазме составляет  $\sim 60$  эВ, что считается оптимальным для поддержания процессов ионизации водорода. Измерения же параметров экстрагированных ионных пучков, по сути дела, дали повторение результатов измерений при частоте 37,5 ГГц.

Последний раздел диссертации посвящен исследованию возможности использования изученных в предыдущем разделе интенсивных ионных пучков для создания компактных мощных нейтронных генераторов. Диссертантом выполнены эксперименты по генерации пучков нейтронов при облучении мишеней из тяжелого льда  $D_2O$  и дейтерида титана  $TiD_2$  пучком дейтронов, создаваемых в источнике ионов при ЭЦР разряде в дейтерии. Было показано, что величина плотности нейтронного выхода достигает  $10^9 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ . Был также выполнен анализ возможности фокусировки создаваемых в ЭЦР источников дейтронов и показана возможность обеспечить выход нейтронов на уровне  $5 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$  при достигнутом на установке токе дейтронов 0,5 А и ускоряющем напряжении 100 кВ. При этом с помощью компьютерного моделирования была показана возможность создания источника нейтронов с поперечником  $\sim 100$  мкм. Таким образом, в результате была показана перспективность использования созданного ионного ЭЦР источника в медицинской практике для радиационной терапии онкологических опухолей и для нейтронной томографии в науке и технике.

Остановимся далее на некоторых замечаниях по поводу текста рецензируемой диссертации.

Концепция диссертанта о необходимости продвигаться в область больших частот вызвана конструкцией защитного устройства окна ввода излучения. В случае квазипродольного распространения излучения ограничений на плотность плазмы не возникает. Этот вопрос, по-видимому, стоило бы обсудить в тексте диссертации.

Сильноточные источники протонов и дейтронов построены на основе магнитной конфигурации прямых ловушек с магнитными пробками без каких либо элементов подавления МГД неустойчивостей. Этот вопрос никак не обсуждался в диссертации, а он, безусловно, заслуживает обсуждения.

На всех приводимых в диссертации осциллограммах ионных токов видна высокая степень модуляции сигналов. Поскольку частотные характеристики регистрирующих цепей не приведены, можно предположить, что имеет место 100% модуляция токовых сигналов. Очевидно, что регистрируемая модуляция свидетельствует о неустойчивостях в плазме. И этот вопрос требует какого-то обсуждения.

Подводя итог анализу представленной диссертации, можно заключить, что мы имеем дело с первоклассной работой, выполненной по актуальной проблематике современной техники. В представленной работе решены принципиальные вопросы создания современных источников с предельными величинами токов и эмиттанса и предложены пути расширения применения разработанных систем. Достоверность результатов обоснована примененными современными методами измерений и, естественно, добросовестностью автора, не вызывающей ни малейших сомнений у коллег

по цеху. Замечания по диссертации, сделанные выше, никак не влияют на результаты исследований и их высокую оценку.

Текст автореферата правильно отражает содержание диссертации и содержание публикаций по теме диссертации, коих за 30 и один патент.

Результаты работы были представлены на многочисленных авторитетных отечественных и международных конференциях.

Результаты диссертации могут быть использованы в работе Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ИЯФ им. Г.И. Будкера РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, СПбПУ им. Петра Великого, НИЦ «Курчатовский институт» и др.

Диссертация соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (пунктам 9-11, 13, 14), утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, является законченным научным исследованием и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор Скалыга Вадим Александрович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Доклад Скалыги В.А., отражающий основные результаты диссертации, был заслушан на научном семинаре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН 23 октября 2017 г. Работа получила единогласную положительную оценку участников семинара.

Отзыв составил:

Главный научный сотрудник  
отдела «Физика плазмы»  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Института общей физики  
им. А.М. Прохорова РАН  
доктор физико-математических наук  
по специальности 01.04.08 – физика плазмы



Г.М. Батанов

тел. 8 499 1354165

e-mail: [batanov@fpl.gpi.ru](mailto:batanov@fpl.gpi.ru)

Отзыв утвержден на Ученом совете отдела «Физика плазмы» протокол № 438 от «31» октября 2017 г.

Зам. председателя совета,  
д.ф.-м.н.  
тел. 8 499 5038337, e-mail: [shch@fpl.gpi.ru](mailto:shch@fpl.gpi.ru)



С.В. Щепетов