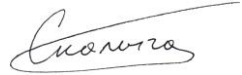


На правах рукописи



СКАЛЫГА Вадим Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО
РЕЗОНАНСНОГО РАЗРЯДА С ЦЕЛЮ ГЕНЕРАЦИИ
ИНТЕНСИВНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ**

01.04.08 – физика плазмы

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Нижний Новгород - 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород).

Официальные оппоненты:

Иванов Александр Александрович, доктор физико-математических наук (Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск)

Лебедев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург)

Шарков Борис Юрьевич, доктор физико-математических наук, академик (Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна)

Ведущая организация:

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва.

Защита состоится «20» ноября 2017 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 в Институте прикладной физики РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ РАН.

Автореферат разослан «01» октября 2017 г.

И. о. учёного секретаря
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор А. И. Смирнов



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Значительная часть современных плазменных технологий основана на использовании уникальных свойств различных видов газового разряда - применяется плазма с различным уровнем энерговклада, с равновесным и неравновесным характером ионизации, поддерживаемую при высоких и низких давлениях давления газа, и т.д. Источники плазмы нашли широкое применение в фундаментальных и прикладных исследованиях, в промышленности, медицине и т.д. Сегодня существует большое число способов создания плазмы, отличающихся методами ее нагрева и удержания, обеспечивающих широкий диапазон ее параметров, плотности и температуры. Одним из традиционных направлений применения плазмы является разработка источников ионов, для чего используют различные типы разряда при пониженных давлениях. Особое место среди прочих методов создания плазмы занимает СВЧ разряд в магнитном поле в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР). Для ЭЦР разряда характерны низкие рабочие давления (менее 10^{-4} Торр), высокая степень ионизации и сильная неравновесность плазмы (температура электронов существенно выше температуры ионов). Первоначально изучение ЭЦР разряда было связано, главным образом, с экспериментами в легких газах, проводимыми в рамках исследований по управляемому термоядерному синтезу (см., например, [1-8]). В дальнейшем ЭЦР разряд в открытых магнитных ловушках стал использоваться также в других областях науки и техники.

Широкое применение плазма ЭЦР разряда получила в фундаментальных исследованиях в области ядерной физики, где используются ионные источники на ее основе, позволяющие формировать качественные интенсивные пучки для инъекции в ускорители. Особенно хорошо ЭЦР разряд зарекомендовал себя в качестве источника многозарядных ионов (МЗИ) тяжелых элементов [9-12]. Требования к этим источникам постоянно возрастают: необходимо повышать как заряд ионов q (поскольку, например, энергия разогнанных заряженных частиц в циклотронном ускорителе пропорциональна q^2 [13]), так и интенсивность ионных пучков для увеличения вероятности наблюдения реакции. Именно источники МЗИ на основе ЭЦР разряда в открытой магнитной ловушке считаются в настоящее время наиболее перспективными в этом плане [9,10]. Такие устройства позволяют одновременно поддерживать электронную температуру на высоком уровне, необходимом для многократной ионизации газа, и достаточно долго удерживать плазму для обеспечения глубокой обдирки ионов. Основные потери плазмы связаны с ее выносом через магнитные пробки ловушки, что позволяет с помощью традиционных систем экстракции формировать качественные интенсивные ионные пучки.

Кроме систем на основе плазмы ЭЦР разряда широко распространены и другие типы источников МЗИ. Часто для генерации пучков МЗИ используются ионные источники с электронным пучком [14, 15]. Такие системы позволяют получать более высокозарядные ионы при низком уровне примесей, однако существенно проигрывают по величине тока пучка.

Еще одним видом эффективных источников МЗИ являются лазерные источники [16-18], основанные на применении мощного лазерного излучения для облучения мишеней и ионизации их материала. Такие системы имеют целый ряд преимуществ, однако по сравнению с ЭЦР ионными источниками имеют высокую температуру ионов, что затрудняет формирование пучков с низким эмиттансом.

В настоящее время развитие источников МЗИ во многом определяет развитие экспериментальной ядерной физики; для современных исследований требуются ионные источники со все более высокими характеристиками.

Один из путей совершенствования ЭЦР источников МЗИ связан с повышением частоты и мощности СВЧ нагрева плазмы. Это стало очевидным после того, как в работах [19, 20] экспериментально было продемонстрировано значительное увеличение выхода многозарядных ионов из ЭЦР источника при изменении частоты греющего СВЧ излучения с 10 до 18 ГГц – ток ионов со средним по распределению зарядом увеличился пропорционально квадрату частоты излучения. Это связано с тем, что в ЭЦР разряде предельно достижимая плотность плазмы ограничивается критическим значением концентрации для используемой частоты СВЧ излучения, при приближении к которому резко усиливается рефракция излучения вводимого в плазму, оно не доходит до резонансной поверхности, и эффективность нагрева резко падает. Критическое значение плотности растет пропорционально квадрату частоты. Повышение концентрации позволяет повышать ток ионного пучка на выходе источника, а при достаточной мощности также повышать эффективность ионизации, в том числе многократной, если рассматривается разряд в тяжелых газах. В связи с этим основным направлением развития ЭЦР ионных источников на протяжении последних десятилетий является повышение частоты и мощности СВЧ излучения, используемого для нагрева плазмы. Поддержание плазмы с большей плотностью требует повышения энергозатрат. В последнее время все чаще для нагрева плазмы в ЭЦР источниках МЗИ применяются гиротроны.

В традиционных ЭЦР источниках МЗИ для удержания плазмы используются открытые магнитные ловушки с конфигурацией магнитного поля «минимум-В» [10], которая формируется комбинацией поля простого пробкотрона (простая зеркальная ловушка) и поля многополюсной магнитной системы (обычно шестиполюсной), являющейся аналогом «палок Иоффе». Данная конфигурация магнитного поля обеспечивает эффективную стабилизацию МГД возмущений плазмы в ловушке. Такие системы позволяют

создавать плазму с концентрацией электронов до $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ при их средней энергии до нескольких кэВ. Основным преимуществом описываемых источников является большое время жизни плазмы в магнитной ловушке, за счет которого обеспечивается глубокая обдирка ионов. Максимальная частота СВЧ нагрева, используемая в традиционных ЭЦР источниках МЗИ, в настоящее время составляет 28 ГГц [21, 22]. Разрабатываемые ЭЦР источники многозарядных ионов с нагревом плазмы излучением свыше 30 ГГц принято относить к так называемому четвертому поколению [23]. Основные трудности на пути их создания связаны с необходимостью изготовления магнитных систем, обеспечивающих конфигурацию «минимум-В» при величине поля в пробках ловушки до 5-6 Тл. Проведенные исследования в этом направлении [24,25] демонстрируют крайне высокую стоимость таких систем и высокий риск их выхода из строя. К сегодняшнему дню ни один из таких проектов не реализован. Альтернативным подходом к созданию ЭЦР источников ионов с мощной высокочастотной накачкой (выше 30 ГГц) является использование для удержания плазмы более простых осесимметричных магнитных ловушек.

Такие исследования были начаты в ИПФ РАН с использованием мощного СВЧ излучения гиротрона на частоте 37,5 ГГц и простой зеркальной ловушки [26]. Первые же результаты подтвердили возможность поддержания плазмы с плотностью до $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ при температуре электронов до 300 эВ. Причем в ходе этих исследований экспериментально наблюдался другой характер удержания плазмы в ловушке, отличный от реализующегося в традиционных ЭЦР источниках. Было продемонстрировано, что при достаточно высокой плотности плазмы может реализовываться так называемый квазигазодинамический режим удержания [27].

Для описания особенностей такого режима следует качественно рассмотреть механизм удержания плазмы в ловушке ЭЦР ионного источника. Основным механизмом, ограничивающим время жизни замагниченных электронов в магнитной ловушке, являются столкновения, за счёт которых обеспечивается их рассеяние в конус потерь в пространстве скоростей. В случае ЭЦР нагрева взаимодействие электронов с излучением может также приводить к диффузии в пространстве скоростей [28]. Ионы в ловушке ЭЦР источника с квазигазодинамическим удержанием зачастую не замагничены (длина свободного пробега много меньше ларморовского радиуса частицы) и поэтому магнитное поле ловушки напрямую не может их эффективно удерживать. Удержание ионов определяется распределением амбиполярного потенциала в ловушке, обеспечивающего равенство потерь ионов и электронов, то есть квазинейтральность плазмы. Структура формирующихся электрических полей качественно описана в [29].

При увеличении плотности время жизни падает, пока не достигает предельного значения, определяемого выносом плазмы через пробки ловушки с ионнозвуковой скоростью. В работе [30] показано, что скорость плазмен-

ного потока в пробке не может превысить это значение. При дальнейшем повышении плотности удержание определяется газодинамическим выносом ионов, время жизни плазмы перестает зависеть от концентрации, в течение него электроны могут испытывать большое число столкновений, однако при этом по-прежнему имеют длину свободного пробега много больше размеров системы. Столкновения приводят к заполнению конуса потерь и изотропизации функции распределения электронов. Такой режим удержания неравновесной плазмы с холодными ионами и горячими электронами с заполненным конусом потерь и был назван квазигазодинамическим, а возможность его реализации была продемонстрирована в работе [31].

Физические основы удержания плазмы в открытых магнитных ловушках были разработаны в ходе исследований по термоядерному синтезу. В некотором смысле переход к квазигазодинамическому режиму удержания плазмы в ловушке ЭЦР источника аналогичен переходу от классического пробкотрона [32] к газодинамической ловушке [33]. Существенным отличием плазмы ЭЦР ионного источника является обратное по сравнению с термоядерными ловушками соотношение температур электронной и ионной компонент, для многократной ионизации необходима высокая температура электронов, а для низкого значения эмиттанса извлекаемого пучка ионов - малая температура ионов.

Отметим, что в последнее время ЭЦР нагрев стал применяться и в ГДЛ для создания плазмы [34, 35] и повышения температуры электронов [36-38]. Были разработаны соответствующие модели ЭЦР пробоя и нагрева [39-42], продемонстрировано существенное улучшение характеристик системы, наиболее перспективным приложением которой является создание мощного нейтронного источника [43, 44].

Таким образом, можно выделить два характерных параметра, соотношение которых определяет режим удержания плазмы в ловушке. Это, во-первых, время кулоновского рассеяния электронов в конус потерь

$$\tau_c = \frac{\ln R}{V_e}, \quad (1.1)$$

и, во-вторых, квазигазодинамическое время жизни плазмы, которое для случая прямой зеркальной ловушки может быть записано следующим образом [30]:

$$\tau_g = LR/2V_s. \quad (1.2)$$

Здесь R – пробочное отношение, L – длина ловушки, V_e – частота кулоновского рассеяния электронов, $V_T = \sqrt{T_i/M}$ – тепловая скорость ионов, $V_s = \sqrt{\langle z \rangle \cdot T_e/M}$ – ионно-звуковая скорость, T_e – температура электронов, M – масса иона, $\langle z \rangle$ – средний заряд ионов.

В традиционных ЭЦР источниках время кулоновского рассеяния электронов значительно больше газодинамического времени жизни плазмы в ловушке, т.е.

$$\tau_c > \tau_g . \quad (1.3)$$

При выполнении этого условия будет реализовываться классический режим удержания. Переход от классического к квазигазодинамическому режиму удержания плазмы в ловушке происходит при таких значениях плотности и температуры электронов, когда их скорость заполнения конуса потерь в пространстве скоростей оказывается выше, чем скорость выноса плазмы из ловушки. Т.е. выполняется условие

$$\tau_c < \tau_g . \quad (1.4)$$

Минимальное время жизни плазмы при квазигазодинамическом режиме при фиксированной концентрации автоматически означает максимально возможную плотность потока частиц из ловушки, так как потери пропорциональны отношению концентрации и времени жизни плазмы. В этом случае плотность потока плазмы из ловушки через ее пробки оказывается на несколько порядков выше, чем в традиционных ЭЦР источниках, что делает возможным получение ионных пучков с рекордно высоким током.

Однако большие потери частиц означают большие потери энергии из системы, и поддержание высокой температуры электронов, достаточной для многократной ионизации, требует существенно большего энергозатрата. Именно поэтому квазигазодинамический режим удержания неравновесной плазмы ЭЦР разряда ранее подробно не исследовался, так как в традиционных ЭЦР источниках МЗИ мощности греющего излучения было недостаточно для обеспечения генерации МЗИ в случае его реализации. Разработки современных мощных высокочастотных гиротронов открывают уникальные возможности для исследования сильноточных ЭЦР ионных источников с квазигазодинамическим режимом удержания плазмы.

Кроме повышения тока ионного пучка за счет высокой плотности плазмы и малого времени жизни, реализация квазигазодинамического режима удержания позволяет с ростом плотности увеличивать средний заряд ионов в плазме. Средний заряд ионов в основном определяется параметром ее удержания [9, 10]: произведением плотности плазмы и времени жизни:

$$p_c = N_e \cdot \tau_i . \quad (1.5)$$

При классическом режиме удержания этот параметр не зависит от плотности плазмы и длины ловушки, следовательно, средний заряд ионов не меняется с их увеличением. Основным способом его повышения является повышение температуры электронов. В квазигазодинамическом режиме время жизни плазмы явно не зависит от N_e , и в то же время пропорционально длине ловушки, и, следовательно, p_c растет линейно по

обоим рассматриваемым параметрам. Соответственно, средний заряд ионов должен возрастать с их увеличением. Учитывая тот факт, что плотность плазмы в ЭЦР источниках ионов ограничена критическим значением для используемой частоты СВЧ накачки, которое пропорционально квадрату частоты, для газодинамических ЭЦР источников можно ввести следующие законы подобия для параметра удержания. В случае фиксированной температуры (т.е. мощность накачки для каждого значения частоты должна быть подобрана), зависимость параметра удержания от частоты СВЧ накачки может быть записана следующим образом:

$$p_c \propto \omega^2, \quad (1.6)$$

а в случае фиксированной частоты и мощности СВЧ излучения, зависимость от длины принимает вид:

$$p_c \propto L. \quad (1.7)$$

Видно, что данный режим при использовании высокой частоты представляется весьма перспективным для создания сильноточных ЭЦР источников ионов.

Как уже отмечалось ранее, основной проблемой при использовании высокой частоты нагрева является создание магнитной ловушки с сильным полем. Традиционные ловушки с конфигурацией «минимум-В», рассчитанные на частоты свыше 30 ГГц, становятся слишком сложны конструктивно. В упомянутых исследованиях, проведенных в ИПФ РАН с применением излучения с частотой 37, 5 ГГц и простой зеркальной магнитной ловушки, достижению оптимальных условий для генерации пучков МЗИ препятствовало развитие МГД неустойчивости. Решением проблемы может быть использование для удержания плазмы ловушки со встречными полями, или как ее еще называют – каспа. Поле такой ловушки создается парой соленоидов с противоположным направлением тока и имеет МГД устойчивую конфигурацию. Описание исследований этой возможности приведено в первой главе.

В экспериментах с такой ловушкой за счет использования мощного излучения гиротронов удалось реализовать квазигазодинамический режим удержания и создать плазму с уникальными параметрами: концентрацией электронов до 10^{14} см^{-3} и температурой от нескольких десятков до сотен эВ при низкой температуре ионов. При этом величина параметра удержания составляла не менее $10^8 \text{ с} \cdot \text{см}^{-3}$, что обеспечило возможность генерации МЗИ даже при малом времени жизни (10^{-5} с). Основным преимуществом такого источника является потенциальная возможность получения ионных пучков с низким эмиттансом и током порядка 1 А, которые необходимы в настоящее время для современных ускорителей тяжелых частиц, например, в таких исследовательских центрах, как GSI (Дармштадт, Германия), Институт современной физики Китайской академии наук (Ляньчжоу, Китай), CERN (Швейцария).

Другим примером, где преимущества использования квазигазодинамического режима удержания плазмы проявляются особенно явно, может быть короткоимпульсный ЭЦР источник радиоактивных ионов. Малое время жизни при квазигазодинамическом режиме удержания позволяет реализовать быстрое развитие ЭЦР разряда и, следовательно, короткое время выхода параметров плазмы на стационарные значения, что открывает путь к созданию короткоимпульсных ЭЦР источников ионов МЗИ. Такие источники с высокой ионизационной эффективностью требуются для создания короткоимпульсных пучков МЗИ короткоживущих изотопов, широко применяющихся в современных исследованиях, например, в рамках проекта «Beta Beam», направленного на исследование осцилляций нейтрино [45]. В рамках диссертационной работы предложена схема требуемого источника, продемонстрирована возможность формирования импульсных пучков МЗИ с длительностью на уровне 50 мкс, показано, что в рамках предложенной схемы источника возможно достижение эффективности использования короткоживущих радиоактивных частиц на уровне 60 -90 % в зависимости от заряда ионов.

Не менее ярким примером эффективного использования ЭЦР разряда с квазигазодинамическим режимом удержания является разработка сильноточных источников легких ионов водорода, дейтерия, гелия. Дело в том, что в ЭЦР разряде с квазигазодинамическим режимом удержания в открытой магнитной ловушке может быть создана плазма с параметрами близкими к оптимальным для ионизации легких элементов, что может обеспечить формирование ионных пучков с ранее недоступными параметрами. В диссертации описаны исследования ЭЦР разряда с квазигазодинамическим режимом удержания в водороде в открытой магнитной ловушке, поддерживаемого мощным излучением гиротрона миллиметрового диапазона длин волн, определены оптимальные конфигурации экстрагирующих систем для формирования сильноточных протонных пучков. Экспериментально были получены протонные пучки с током до 500 мА при нормализованном эмиттансе $0,07 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$, что соответствует нормализованной яркости $100 \text{ A}/(\pi \text{ мм} \cdot \text{мрад})^2$. Пучки ионов водорода с такими характеристиками сейчас необходимы для крупных международных проектов: European Spallation Source (ESS) [46, 47] International Fusion Material Irradiation Facility (IFMIF) [48,49].

Еще одной важной задачей является формирование пучков ионов дейтерия с высокой плотностью тока для создания компактных мощных D-D нейтронных генераторов. В настоящее время потребность в таких системах, которые могли бы в ряде приложений заменить ядерные реакторы и крупные ускорители, достаточно велика. В рамках проведенных исследований показано, что в нейтронном генераторе на основе сильноточного газодинамического ЭЦР ионного источника может быть достигнута плотность нейтронного выхода с мишени до $5 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$. Полученные результаты

позволяют надеяться на перспективность применения такого нейтронного генератора для бор-нейтронозахватной терапии онкологических заболеваний и для нейтронной томографии.

Таким образом, исследование неравновесной плотной плазмы ЭЦР разряда в простых осесимметричных магнитных ловушках с квазигазодинамическим режимом удержания плазмы представляется новым и весьма актуальным, как с общезначимой точки зрения, поскольку обладает целым рядом физических особенностей, так и с прикладной, поскольку открывает широкие возможности совершенствования ионных источников на ее основе.

Цели и задачи исследования

Целями диссертационной работы являлись изучение физических особенностей квазигазодинамического режима удержания неравновесной плазмы в открытых осесимметричных магнитных ловушках различного типа в условиях мощного ЭЦР нагрева излучением миллиметрового диапазона длин волн, поиск методов формирования и определение предельных параметров ионных пучков, которые могут быть получены из такого разряда, исследование возможных перспективных направлений использования полученных пучков ионов, таких, как инжекторы в ускорители, нейтронные генераторы для медицины и нейтронографии.

Основные задачи исследования заключались в следующем.

1. Исследование параметров плазмы ЭЦР разряда в магнитной ловушке со встречными полями, поддерживаемого излучением гиротронов миллиметрового диапазона длин волн; демонстрация возможности реализации квазигазодинамического режима удержания плазмы в такой системе; исследование возможности генерации многозарядных ионов, определение методов повышения их среднего заряда; демонстрация возможности извлечения пучков многозарядных ионов с большим током и малым эмиттансом из такой плазмы.

2. Исследование динамики ЭЦР разряда, поддерживаемого излучением гиротронов миллиметрового диапазона длин волн; определение минимально возможного времени формирования многозарядных ионов в плазме; проведение анализа возможности применения такого разряда для формирования короткоимпульсных пучков многозарядных ионов; разработка схемы короткоимпульсного ЭЦР источника МЗИ короткоживущих изотопов с высокой эффективностью их использования.

3. Исследование ЭЦР разряда, поддерживаемого мощным миллиметровым излучением гиротронов в водороде; определение возможности достижения оптимальных условий для ионизации водорода в разряде; разработка системы формирования ярких протонных пучков для современных ускорителей.

4. Исследование ЭЦР разряда в дейтерии; определение предельных параметров пучков ионов дейтерия, которые могут быть получены из такого разряда; определение перспектив применения таких пучков для генерации нейтронов и создания мощного D-D нейтронного генератора для различных приложений, в том числе бор-нейтронозахватной терапии онкологических заболеваний и нейтронографии.

Объект исследования

Основным объектом исследований, описанных в диссертационной работе, являлась плотная неравновесная плазма ЭЦР разряда, поддерживаемая в открытых осесимметричных магнитных ловушках мощным излучением миллиметрового диапазона длин волн. Для удержания плазмы использовались ловушка со встречными полями и простая зеркальная магнитная ловушка. Эксперименты проводились с использованием электромагнитного излучения миллиметрового диапазона с частотами 37,5, 60 и 75 ГГц, при этом плотность потока энергии в СВЧ пучке достигала 100 кВт/см^2 .

Научная ценность и новизна результатов

Работы, описанные в диссертации, посвящены исследованию малоизученного объекта физики плазмы – ЭЦР разряда с высокой плотностью плазмы, поддерживаемого мощным излучением гиротронов с частотами 37,5, 60 и 75 ГГц. Впервые был изучен квазигазодинамический режим удержания плазмы ЭЦР разряда в ловушке со встречными полями. Показана возможность получения пучков МЗИ с высоким средним зарядом, током и яркостью. Продемонстрирована перспективность повышения частоты СВЧ нагрева для увеличения тока и среднего заряда ионов в экстрагируемом пучке.

Реализация квазигазодинамического режима удержания плазмы в ловушке источника МЗИ позволила достичь рекордно малых для ЭЦР источников времен выхода параметров плазмы разряда на стационар - менее 15 мкс, тогда как в традиционных ЭЦР источниках это время составляет более 100 мкс. Полученные результаты открывают возможность создания короткоимпульсных ЭЦР источников МЗИ короткоживущих изотопов с высокой эффективностью, необходимых для ряда крупных проектов в области ядерной физики [50-53].

Впервые была продемонстрирована возможность формирования плазмы ЭЦР разряда с квазигазодинамическим режимом удержания, поддерживаемого мощным излучением гиротронов миллиметрового диапазона длин волн, с параметрами оптимальными для формирования протонных пучков с высокой яркостью. Получены протонные пучки с током до 500 мА при нормализованном эмиттансе $0,07 \text{ п·мм·мрад}$, что в несколько раз превосходит лучшие существующие аналоги. Такие пучки востребованы во многих

ускорительных комплексах и исследовательских центрах, например, в ESS, IFMIF, CERN, FAIR и др.

В диссертационной работе показано, что применение разработанных сильноточных ЭЦР источников ярких пучков ионов дейтерия в компактных D-D генераторах нейтронов открывает возможность получения нейтронного выхода с мишени с плотностью до $5 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$, что важно для таких приложений, как бор-нейтронозахватная терапия и нейтронография.

Все полученные в диссертационной работе результаты обладают научной ценностью и новизной, что подтверждается публикациями в высокорейтинговых международных научных журналах и выступлениями на профильных международных конференциях.

Достоверность предложенных методов и решений

Все полученные результаты обладают высокой степенью достоверности и являются обоснованными. Достоверность получаемых результатов обеспечивается применением взаимодополняющих как стандартных методов измерения, так и оригинальных методик. Для повышения достоверности получаемых результатов измерения, как правило, проводились несколькими способами. Имеется хорошее качественное и количественное совпадение теоретических результатов с экспериментально полученными данными. Результаты диссертации опубликованы в рецензируемых российских и зарубежных научных журналах, докладывались на международных и всероссийских конференциях, обсуждались на семинарах ИПФ РАН, Лаборатории субатомной физики и космологии (Гренобль, Франция), Лаборатории сильных магнитных полей (Гренобль, Франция), Института современной физики Китайской академии наук (Ланьчжоу, Китай), Института физики плазмы (Милан, Италия).

Практическое значение работы

Как уже говорилось выше, успехи последних лет в ядерной физике во многом обусловлены широким применением ЭЦР источников для инъекции ионов в циклотронные и линейные ускорители. Развитие ускорителей требует как повышение тока и качества пучка ионов, так и разработки специфических источников ионов для решения новых задач. Исследования таких источников представляются актуальными для институтов, эксплуатирующих ускорители как легких, так и тяжелых многозарядных ионов. Исследования продемонстрировали перспективность использования газодинамического ЭЦР источника МЗИ для генерации короткоимпульсных пучков ионов (20-100 мкс), производство которых требуется в рамках проекта «Beta Beam» по исследованию осцилляций нейтрино (CERN). Результаты по генерации пучков ионов водорода открывают новые возможности для исследований на современных сильноточных линейных ускорителях. Сильноточные источники ионов дейтерия имеют значительные перспективы для

создания мощных компактных нейтронных генераторов, которые могут обеспечить развитие и внедрение новых медицинских методик лечения онкологических заболеваний, а также сделать более доступными современные методы структурного анализа с помощью нейтронных пучков. Результаты диссертации использовались в работе Лаборатории субатомной физики и космологии (Гренобль, Франция), Лаборатории сильных магнитных полей (Гренобль, Франция), GSI (Дармштадт, Германия), Института современной физики Китайской академии наук (Ланьчжоу, Китая), Института физики плазмы (Милан, Италия).

Среди наиболее важных примеров практического использования результатов диссертации следует отметить: создание ионного источника радиоактивных короткоживущих изотопов для проекта “Beta Beam” (CERN) на основе ловушки со встречными полями, разработку ионного источника для проекта HIAF (High Intensity heavy ion Accelerator Facility) [54] с нагревом плазмы излучением гиротрона с частотой 45 ГГц, применение полученных дейтронных пучков с высокой плотностью тока для разработки нейтронных генераторов нового поколения.

Личный вклад

Все изложенные в диссертационной работе оригинальные результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии. При получении результатов, описанных в главе 1, автор участвовал в постановке задач, проведении экспериментальных исследований, интерпретации полученных результатов и написании научных статей. Вклад автора в исследование плазмы ЭЦР разряда, поддерживаемого излучением гиротронов в ловушке со встречными полями в квазигазодинамическом режиме - определяющий, им предложена основная идея, проведены экспериментальные исследования и численное моделирование. В разработке ионного источника, описанного в разделе 1.4, существенную роль сыграли сотрудники Лаборатории субатомной физики и космологии (Гренобль, Франция), а конструкция уникальной мощной магнитной ловушки со встречными полями была разработана сотрудниками Лаборатории сильных магнитных полей (Гренобль, Франция). В работах, описанных в главе 2, автором было предложено решение поставленной задачи разработки методов создания короткоимпульсных источников МЗИ, проведены необходимые численные расчеты и экспериментальные исследования. Исследования, представленные в главах 3 и 4, были инициированы автором, автор организовывал и проводил эксперименты, проводил обработку экспериментальных данных. Автор участвовал в интерпретации результатов и написании научных статей. Абсолютные измерения нейтронного выхода с мишени были проведены совместно с А.В. Стрелковым (ИОЯИ, г. Дубна).

Апробация

Результаты выполненных исследований обсуждались на научных семинарах в Институте прикладной физики РАН, Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова, Институте ядерной физики СО РАН, Объединенном институте ядерных исследований (Дубна), Лаборатории субатомной физики и космологии (Гренобль, Франция), Лаборатории сильных магнитных полей (Гренобль, Франция), GSI (Дармштадт, Германия), Институте современной физики Китайской академии наук (Ланьчжоу, Китай), Институте физики плазмы (Милан, Италия) и в других научных организациях. Они докладывались на Международных и Всероссийских конференциях, в том числе на Международных совещаниях по ЭЦР источникам ионов (International Workshop on ECR Ion Sources в 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016 гг.), на Международных конференциях по ионным источникам (International Conference on Ion Sources в 2001, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015 гг.), на Международных конференциях по открытым магнитным системам для удержания плазмы (International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement в 2004, 2010, 2016 гг.), на Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметрового и субмиллиметрового диапазона (2005, 2007, 2016 гг.), на Международных совещаниях “Strong microwaves in plasmas” (2005, 2008, 2011, 2014), на 22-ой международной конференции “International Conference on Atomic Collisions in Solids” (2006, Германия), на 6-ом международном совещании по микроволновым разрядам (International Workshop “Microwave discharges: Fundamentals and Applications”, 2006, Звенигород), на Международной конференции по ускорителям частиц (International Particle Accelerator Conference IPAC’14, 2014), на Международном конгрессе по нейтронозахватной терапии (International Congress for Neutron Capture Therapy, 2014) и др.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 224 страницы, включая 136 рисунков, 2 таблицы. Список литературы содержит 160 наименований.

Положения выносимые на защиту

1. В плазме, поддерживаемой мощным электромагнитным излучением миллиметрового диапазона длин волн в магнитной ловушке со встречными полями с замкнутой поверхностью электронно-циклотронного резонанса, эффективно генерируются многозарядные ионы, причем ток и средний заряд ионов повышается с ростом частоты и мощности греющего излучения. При мощности излучения 150 кВт и частоте 60 ГГц средний заряд ионов азота достигает +4 при плотности тока ионного пучка до 750 мА/см².

2. Использование мощного излучения миллиметрового диапазона длин волн для пробоя газа в открытой магнитной ловушке в условиях ЭЦР поз-

воляет за время порядка 10 мкс формировать плазму с высокой концентрацией многозарядных ионов. Быстрое формирование многозарядных ионов в плазме обеспечено реализацией квазигазодинамического режима удержания, характеризующегося малым временем жизни, что позволяет получить импульсы тока ионного пучка с длительностью менее 100 мкс при высокой эффективности использования радиоактивных короткоживущих изотопов.

3. Применение мощного излучения миллиметрового диапазона длин волн для поддержания ЭЦР разряда в водороде в открытой магнитной ловушке позволяет формировать плазму с высокой, близкой к критической, плотностью и оптимальной для диссоциации и ионизации температурой основной электронной компоненты (на уровне 100 эВ). Из плазмы такого разряда могут быть сформированы интенсивные протонные пучки с током на уровне сотен мА при нормализованном эмиттансе менее $0,1 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, что обеспечивает рекордную нормализованную яркость на уровне $100 \text{ A}/(\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад})^2$. Протонные пучки с такими параметрами с запасом удовлетворяют требованиям всех существующих и разрабатываемых сильноточных протонных ускорителей.

4. Реализация квазигазодинамического режима удержания плазмы ЭЦР разряда в дейтерии обеспечивает возможность формирования пучков дейтронов с энергией порядка 100 кэВ и рекордной плотностью тока на уровне $1 \text{ A}/\text{см}^2$. Применение таких ионных пучков в D-D нейтронных генераторах позволяет повысить плотность нейтронного выхода с мишени, насыщенной дейтерием, порядка $10^{10} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, что делает такие устройства перспективными для применения в медицинских и материаловедческих приложениях.

КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ МАТЕРИАЛА ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цели и задачи, перечислены основные положения, выносимые на защиту, обосновывается научная новизна и практическая ценность работы. Кратко излагается содержание работы.

Основное внимание уделяется описанию квазигазодинамического режима удержания плазмы в открытых магнитных ловушках, обсуждаются особенности такого режима, обуславливающие перспективы его применения в ЭЦР источниках для получения ионных пучков с высокой интенсивностью. Показано, что преимущества квазигазодинамического удержания наиболее явно проявляются в случае нагрева плазмы СВЧ излучением с высокой частотой и мощностью (частота свыше 30 ГГц, мощность 10-100 кВт).

Первая глава диссертации посвящена исследованиям плазмы ЭЦР разряда, удерживаемой в ловушке со встречными полями в квазигазодинамическом режиме в условиях мощного нагрева излучением гиротронов миллиметрового диапазона длин волн. Рассматривается задача повышения эффективности генерации многозарядных ионов в такой плазме и их извле-

чения в виде пучков с высокой яркостью. Описываются результаты разработки сильноточного ЭЦР источника многозарядных ионов на основе ловушки касп с нагревом плазмы излучением гиротрона с частотой 60 ГГц.

В **разделе 1.1** обосновывается необходимость стабилизации МГД неустойчивостей в плазме ЭЦР разряда, используемой для формирования пучков МЗИ. Для высоких частот свыше 30 ГГц предлагается использовать для этого ловушку со встречными полями (касп).

В **разделе 1.2** описана теоретическая модель, используемая для численного анализа процессов многократной ионизации в плазме ЭЦР разряда в магнитной ловушке. Данная модель является нульмерной и основана на решении нестационарной системы дифференциальных уравнений ионизационного баланса. Разработанная модель позволяет не только исследовать эффективность генерации МЗИ в плазме разряда на стационарной его стадии, но и описывать динамику развития ЭЦР пробоя в ловушке источника. Оценки, выполненные на основе нее, используются во всех разделах диссертации для анализа экспериментальных данных.

В **разделе 1.3** описываются результаты экспериментального исследования ЭЦР разряда в ловушке со встречными полями, поддерживаемого излучением гиротрона с частотой 37,5 ГГц, рассматриваются особенности формирования многозарядных ионов тяжелых газов в плазме такого разряда, и приводятся результаты работ по формированию ионных пучков.

В **разделе 1.3.1** описывается экспериментальный стенд (рис. 1), на котором проводились исследования с ловушкой со встречными полями и СВЧ накачкой на частоте 37,5 ГГц, мощность до 100 кВт при длительности импульса до 1,5 мс, раскрываются особенности функционирования основных систем, представлена применяемая в работе диагностическая аппаратура. В экспериментальном стенде реализована квазиоптическая схема ввода СВЧ излучения в магнитную ловушку вдоль магнитного поля системы. Описаны особенности вакуумной системы стенда и система напуска нейтрального газа в ловушку.

Для формирования пучка ионов в проведенных экспериментах использовалась традиционная двухэлектродная система экстракции, состоящая из плазменного электрода и пуллера. Применялись как одноапертурные, так и многоапертурные системы (рис. 2).

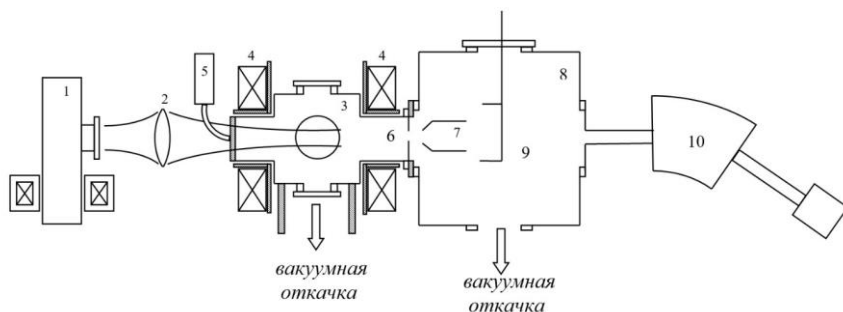


Рис. 1. Схема экспериментов. 1 – гиротрон, 2 – фокусирующая диэлектрическая линза, 3 – разрядная вакуумная камера, 4 – соленоиды магнитной ловушки, 5 – клапан импульсного напуска газа, 6 – плазменный электрод, 7 – пуллер, 8 – диагностическая вакуумная камера, 9 – подвижный цилиндр Фарадея, 10 – анализатор ионов.

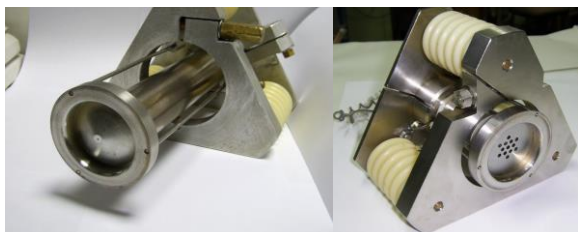


Рис. 2. Фотографии одноапертурной и многоапертурных систем экстракции.

Максимальное напряжение между электродами системы формирования ионного пучка составляло 55 кВ. Для измерения тока экстрагируемого ионного пучка на оси магнитной ловушки устанавливался цилиндр Фарадея с большим входным отверстием (35 мм), перехватывающим весь ионный пучок, прошедший через пуллер. Для спектрального анализа экстрагируемого пучка положительных ионов в эксперименте использовался магнитостатический анализатор, работа которого основана на разделении ионов по отношению масса/заряд. Для определения эмиттанса формируемых пучков был использован “*rerreg-pot*” метод. Описана система синхронизации исполнительных устройств стенда.

В разделе 1.3.2 представлены результаты экспериментальных исследований и теоретических оценок, сделанных на основе численного моделирования, демонстрирующих перспективы создания сильноточных источников МЗИ на основе ЭЦР разряда в магнитной ловушке со встречными полями с квазигазодинамическим режимом удержания плазмы. Основные экспериментальные исследования были направлены на поиск оптимальных условий экстракции ионов из плазмы ЭЦР разряда в ловушке со встречными полями. Продемонстрировано, что при использовании системы экстракции с диаметром апертуры плазменного электрода 1 мм возможно получение пучков многозарядных ионов с током до 5 мА, плотностью тока 650 мА/см^2

и нормализованным эмиттансом $0,01 \pi \text{ мм}^2 \text{ мрад}$, что соответствует нормализованной яркости $50 \text{ A}/(\pi \text{ мм}^2 \text{ мрад})^2$. В ходе исследований продемонстрирована возможность применения многоапертурных систем экстракции для формирования ионных пучков с большим током. Установлено, что поток плазмы, вытекающий через магнитную пробку ловушки, однороден на масштабе нескольких сантиметров, что позволило применить систему экстракции с 13 отверстиями диаметром 3 мм. С помощью такой системы были получены пучки многозарядных ионов с током до 150 мА при нормализованном эмиттансе $0,9 \pi \text{ мм}^2 \text{ мрад}$. Экспериментально исследован состав сильноточных ионных пучков, извлекаемых из плазмы ЭЦР разряда в различных газах. Продемонстрирована возможность генерации многозарядных ионов в плазме, удерживаемой в ловушке со встречными полями: в случае разряда в азоте - с зарядом до +4, в аргоне и ксеноне - до +6. При этом средний заряд ионов азота составлял +2, аргона - +3, а ксенона - +4. Спектр ионного состава пучка при разряде в ксеноне представлен на рис.3.

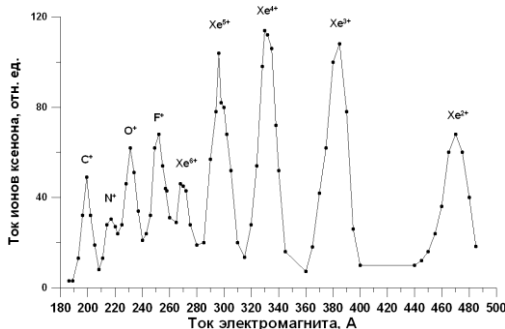


Рис. 3. Распределение ионов в пучке по кратностям ионизации при разряде в ксеноне.

На основе полученных экспериментальных данных и численного моделирования в разделе обсуждаются перспективы дальнейшего повышения частоты и мощности греющего излучения для увеличения тока и среднего заряда ионов ионных пучков, извлекаемых из плазмы ЭЦР разряда в ловушке со встречными полями.

В разделе 1.4 приводится описание экспериментальных исследований ЭЦР разряда в ловушке со встречными полями, поддерживаемого излучением гиротрона с частотой 60 ГГц.

В разделе 1.4.1 приводится описание экспериментальной установки “SEISM Prototype”, использованной для проведения данных исследований. Данный экспериментальный стенд был создан в рамках международного сотрудничества трех институтов: Института прикладной физики РАН, Лаборатории субатомной физики и космологии (Франция) и Лаборатории сверхсильных магнитных полей (Франция). Эти работы были проведены в рамках проекта EURO Nu (Beta Beams) для высокоэффективной ионизации и формирования импульсных ионных пучков радиоактивных изотопов с характеристиками, удовлетворяющими требованиям ускорительного ком-

плекса CERN. Среди существующих на сегодняшний день ионных источников “SEISM Prototype” имеет самый высокочастотный и самый мощный СВЧ нагрев плазмы. Источником СВЧ излучения является гиротрон с частотой излучения 60 ГГц. Мощность излучения в импульсном режиме работы с частотой следования импульсов до 3 Гц при их длительности от 50 до 1000 мкс может достигать 300 кВт. Для удержания используется ловушка касп с уникальными параметрами. Магнитная система “SEISM Prototype” была разработана в Лаборатории сверхсильных магнитных полей. При максимальном токе в катушках распределение магнитного поля имеет замкнутую ЭЦР поверхность для излучения с частотой 60 ГГц внутри разрядной камеры, максимальное поле на оси системы в пробке со стороны инъекции СВЧ излучения составляет 7 Тл, в пробке со стороны экстракции ионного пучка - 3,5 Тл, а в радиальной пробке каспа - 4,6 Тл. Для формирования ионного пучка была использована двухэлектродная система экстракции. Апертура отверстия в плазменном электроде имела диаметр 1 мм, в пуллере – 3 мм.

В разделе 1.4.2 приводятся результаты исследований характеристик ионных пучков, формируемых на данной экспериментальной установке. Получены ионные пучки из разряда в азоте при напряжении экстракции на уровне 20 кВ с током до 6 мА, что соответствует плотности тока в отверстии плазменного электрода более 750 мА/см². Продемонстрировано существенно повышение среднего заряда ионов в пучке за счет повышения частоты и мощности нагрева по сравнению с исследованиями с частотой 37,5 ГГц. Экспериментально установлено, что средний заряд ионов азота может достигать +4 (рис. 4).

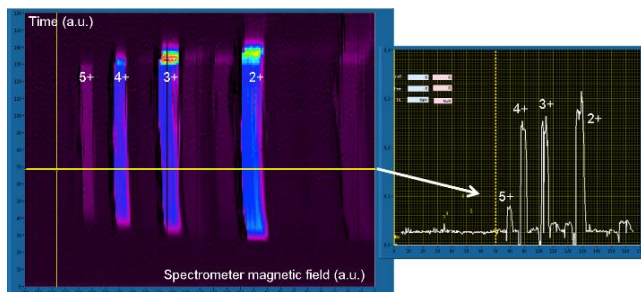


Рис. 4. Спектр ионного пучка азота в разные моменты времени импульса.

В разделе 1.5 подводятся итоги первой главы.

Материалы, изложенные в первой главе, опубликованы в работах [1А-9А, 11А, 12А, 14А-16А, 19А, 26А, 27А].

Вторая глава посвящена исследованиям проблемы быстрого пробоя газа в ловушке ЭЦР источника и динамики формирования МЗИ, а также повышения эффективности извлечения напущенных в ловушку частиц в виде ионов. Целью данных исследований являлась разработка короткоим-

пульсного (длительность импульса менее 100 мкс) ЭЦР источника МЗИ для проекта «Beta Beam» [50] (в рамках проекта EURISOL), направленного на изучение осцилляций нейтрино. Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния частоты СВЧ накачки на скорость развития разряда, а также эффективности использования рабочего газа.

В разделе 2.1 описывается постановка задачи. Короткоимпульсный ЭЦР источник многозарядных ионов должен обеспечивать создание интенсивных короткоимпульсных (от 10 до 100 мкс) пучков многозарядных ионов радиоактивных изотопов гелия ${}^6\text{He}$. В связи с высокой стоимостью рассматриваемого изотопа гелия и ограниченной возможностью его производства источник таких ионных пучков должен обеспечивать высокую эффективность использования радиоактивных частиц. Применение современных классических ЭЦР источников ионов в данном случае оказывается нецелесообразно ввиду их низкой эффективности из-за большого времени пробоя газа и выхода плотности плазмы на стационарный уровень (более миллисекунды) по сравнению с необходимой длительностью импульса.

В разделе 2.2 проводится теоретическое исследование влияния параметров СВЧ накачки на время развития пробоя газа в ловушке ЭЦР источника МЗИ. Приводятся результаты расчетов динамики ЭЦР пробоя для различных параметров накачки. Продемонстрировано существенное сокращение времени развития разряда при использовании более высоких частот и мощностей. Результаты расчетов наглядно демонстрируют перспективность использования квазигазодинамического ЭЦР источника для генерации короткоимпульсных пучков многозарядных ионов.

В разделе 2.3 описаны результаты экспериментов по достижению минимального времени развития разряда в гелии в ловушке со встречными полями в условиях ЭЦР нагрева излучением гиротронов с частотами 37,5 и 75 ГГц. Представлены типичные осциллограммы токов пучка и распределения ионов гелия по кратностям ионизации в нем. Продемонстрирована возможность выхода параметров плазмы на стационарный уровень в ловушке со встречными полями в условиях мощного ЭЦР нагрева излучением гиротронов за 15 мкс. Продемонстрировано существенное увеличение среднего заряда ионов гелия за счет увеличения частоты накачки при сохранении времени выхода параметров плазмы на стационар. Также продемонстрирована возможность формирования короткоимпульсных пучков многозарядных ионов более тяжелых газов (азота и аргона). Получены импульсные пучки ионов аргона с зарядом до +5 и азота с зарядом до +3 с длительностью менее 100 мкс. Экспериментально с помощью многоапертурной системы экстракции получены короткоимпульсные пучки многозарядных ионов с током до 100 мА.

В разделе 2.4 предложена схема короткоимпульсного ЭЦР источника МЗИ для проекта «Beta Beam». Ввод СВЧ излучения предполагается осу-

шествовать квазиоптическим способом. В рамках данной схемы СВЧ нагрев плазмы предполагается осуществлять на частоте 60 ГГц с помощью используемого на стенде SEISM Prototype гиротрона, что позволит создавать в ловушке плазму с плотностью на уровне $5-8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Удерживаться плазма будет в ловушке со встречными полями с эффективной длиной порядка 10 см, что необходимо для подавления МГД неустойчивостей плазмы, а также обеспечит время выхода разряда на стационарную стадию менее 10 мкс. Мощность СВЧ накачки свыше 200 кВт будет достаточна для поддержания температуры электронов на уровне, достаточном для эффективной многократной ионизации гелия. В ходе численного моделирования показано, что эффективность извлечения инжектированных в источник короткоживущих радиоактивных частиц гелия в виде ионов в предлагаемом концепте может достигать 60% в двукратно ионизованных ионах, и 90% - если достаточно получение однократно заряженных частиц.

В разделе 2.5 подводятся итоги второй главы.

Материалы, изложенные во второй главе, опубликованы в работах [5А, 10А, 13А, 16А, 18А, 21А, 23А, 27А].

Третья глава посвящена исследованиям, направленным на разработку физических основ источников сильноточных пучков ионов водорода для современных ускорителей с нагревом плазмы излучением гиротронов в условиях ЭЦР.

В разделе 3.1 описываются актуальные требования к инжекторам ионов водорода в наиболее мощные современные ускорители, представлены сведения о современном состоянии исследований по данной проблеме. Делается акцент на то, что ряд современных проектов, таких как ESS и IFMIF, требует создания источников пучков ионов водорода с током на уровне сотен миллиампер при нормализованном эмиттансе менее $0,2 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$.

В разделе 3.2 описывается экспериментальный стенд, использованный для проведения данных исследований. В разделе приведены схема и фотография модернизированного стенда. Источником СВЧ излучения являлись гиротроны с частотой 37.5 либо 75 ГГц, мощностью от 10 до 200 кВт, длительность импульса до 1,5 мс. Для удержания плазмы использовалась прямая осесимметричная ловушка простой пробочной конфигурации. Магнитное поле ловушки создавалось с помощью импульсных соленоидов. Ввод СВЧ излучения осуществлялся квазиоптическим способом через кварцевое окно. За окном в разрядной камере располагалась специальная система согласования микроволнового излучения с плазмой, которая позволяла избежать попадания плазмы на входное окно. Напуск водорода в ловушку осуществлялся по оси через систему импульсного напуска газа, совмещенную с электродинамической системой согласования миллиметрового излучения с плазмой. Экстракция ионов и формирование ионного пучка осуществлялись с помощью одноапертурных или многоапертурных

двухэлектродных систем. Система экстракции могла располагаться на разном расстоянии от магнитной пробки ловушки, тем самым регулировалась плотность потока плазмы на плазменный электрод. Максимальное значение напряжения экстракции составляло 50 кВ. В эксперименте использовались одноапертурные плазменные электроды с диаметрами отверстий для извлечения пучка 1, 5 и 10 мм. Диаметры отверстий пуллера составляли 3, 10, 15 и 22 мм. Расстояние между электродами в эксперименте варьировалось в диапазоне 5 – 15 мм в зависимости от используемой геометрии электродов. В качестве многоапертурной системы использовалась система, описанная в главе 1. На рис. 5 представлена фотография экспериментальной установки.

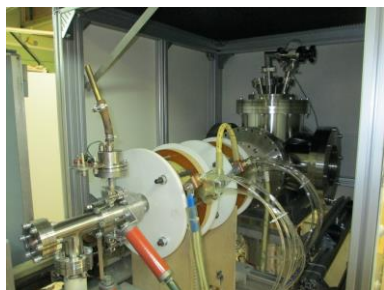


Рис. 5. Фотография экспериментальной установки (гиротрон не показан).

В разделе 3.3 приводятся результаты экспериментальных исследований параметров плазмы ЭЦР разряда в водороде и формируемых ионных пучков в случае, когда источником СВЧ излучения являлся гиротрон с частотой излучения 37.5 ГГц и мощностью до 100 кВт. Основной задачей исследований было определить оптимальные параметры плазмы разряда в водороде. Измерения продемонстрировали, что температура электронов в разряде может достигать 60 эВ, что близко к оптимуму сечений основных ионизационных и диссоциативных процессов в водороде. В ходе работ были оптимизированы конфигурации систем формирования ионного пучка для достижения наибольшего извлекаемого тока ионов. В результате исследований были получены ионные пучки с током до 500 мА, нормализованным эмиттансом $0,07 \text{ п}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$, нормализованной яркостью $100 \text{ A}/(\text{п}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад})^2$ при доле протонов 94% (рис. 6). Протонные пучки с такими параметрами с запасом удовлетворяют всем существующим и разрабатываемым сильноточным протонным ускорителям, включая ускорительные комплексы проектов ESS и IFMIF. Также продемонстрировано, что в рассматриваемой схеме ионного источника возможно эффективное использование многоапертурных экстракторов и получение пучков с плотностью тока, близкой к реализуемой в одноапертурных системах.

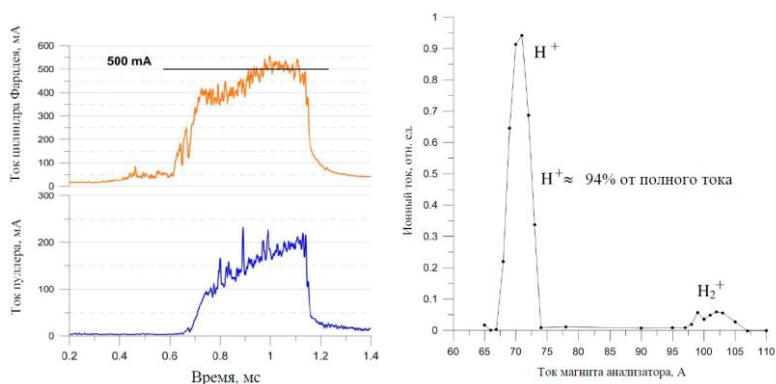


Рис. 6. Слева - осциллограммы тока ионного пучка, попавшего в цилиндр Фарадея, и тока пуллера. Справа – спектр ионного пучка при разряде в водороде.

В разделе 3.4 представлены исследования по формированию пучков ионов водорода при нагреве плазмы излучением с частотой 75 ГГц. Использование более высокой частоты излучения привело к существенному повышению плотности плазмы, что позволило успешно применить методику ее измерения по уширению спектральных линий атомов водорода серии Бальмера за счет эффекта Штарка. Продемонстрировано, что плотность плазмы в разряде может достигать 10^{14} см⁻³. При использовании одноапертурных систем экстракции были исследованы параметры формируемых пучков, определены их ток, эмиттанс, пространственное распределение. Основным же результатом является существенное повышение плотности потока плазмы из ловушки при росте частоты излучения. Это может быть эффективно использовано в случае применения многоапертурных систем экстракции, так как для заданной плотности потока в месте расположения плазменного электрода могут быть сформированы потоки плазмы с большим поперечным размером. Это позволит достигать более высоких значений полного ионного тока за счет использования большего числа отверстий, размещенных на большей площади. В разделе 3.5 подводятся итоги третьей главы.

Материалы, изложенные в третьей главе, опубликованы в работах [17А, 20А, 27А-30А].

Четвертая глава посвящена описанию исследований возможности разработки мощных компактных генераторов нейтронов на основе высокопоточного ЭЦР источника ионов с нагревом плазмы миллиметровым излучением гиротронов. Предлагается использовать формируемые пучки ионов дейтерия с высокой плотностью тока для бомбардировки нейтронообразующей мишени - мишени насыщенной дейтерием. Т.е. рассматривается возможность существенного повышения нейтронного выхода в схеме D-D нейтронного генератора.

В разделе 4.1 описывается устройство нейтронных генераторов, и подчеркиваются их преимущества перед другими типами нейтронных источников. В таких системах нейтроны испускаются в результате ядерной реакции между ядрами дейтерия, протекающей при бомбардировке мишени ускоренным пучком ионов. D-D нейтронный генератор состоит из следующих основных частей: источника плазмы, системы формирования и ускорения пучка ионов дейтерия и нейтронообразующей мишени. Обсуждаются возможности их совершенствования.

В разделе 4.2 для определения перспектив применения сильноточного ЭЦР ионного источника с квазигазодинамическим удержанием плазмы в схеме D-D нейтронного генератора были проведены эксперименты по генерации нейтронов в импульсном режиме на тестовых мишенях при их бомбардировке пучками ионов дейтерия с энергией на уровне 50 кэВ. Эксперименты проводились на установке, подробно описанной в главе 3. Было продемонстрировано, что при разряде в дейтерии возможно достижение тех же параметров ионного пучка, что были получены в водороде. В экспериментах использовалось два типа нейтронообразующих мишеней: из тяжелого льда D_2O и дейтрида титана TiD_2 . Мишени помещались в диагностическую вакуумную камеру на ось системы. Мишени имели электрические контакты, выведенные из вакуумного объема, для измерения тока пучка, попадающего на них. Для измерения нейтронного выхода с мишени использовалась «абсолютно» калиброванная система на основе двух заполненных 3He пропорциональных счетчиков с различными амплитудными характеристиками. Такой метод измерений позволяет оценить соотношение уровней полезного нейтронного сигнала и шумовых отсчетов счетчиков. Калибровка проводилась в ОИЯИ с помощью изотопного источника из калифорния 252, имеющего близкий к D-D реакции энергетический спектр испускаемых нейтронов. Для повышения чувствительности измерительной схемы нейтронные счетчики были помещены между двумя емкостями, заполненными водой. Окружающая счетчики вода играла роль термолизатора нейтронного потока. В экспериментах удалось продемонстрировать эффективность использования сильноточных пучков ионов дейтерия, полученных с использованием ЭЦР источников с накачкой мощным миллиметровым излучением гиротронов, для генерации нейтронов, причем максимальная достигнутая в экспериментах плотность нейтронного выхода с мишени достигала $10^9 \text{ с}^{-1}\text{см}^{-2}$.

В разделе 4.3 обсуждаются перспективы применения предложенных нейтронных генераторов на основе сильноточных ЭЦР ионных источников для БНЗТ онкологических заболеваний. В разделе описывается принцип БНЗТ, суть которого заключается в следующем. Стабильный изотоп бора ^{10}B вводится в организм больного с помощью специального лекарства, которое накапливается в опухоли. Затем пациент облучается потоком эпитепловых нейтронов (с энергией в диапазоне $0,5\text{eV} < E_n < 30\text{keV}$). В резуль-

тате захвата нейтрона стабильным изотопом ^{10}B (сечение этой реакции более чем в 3000 раз превосходит сечение захвата нейтрона ядрами ^{12}C , ^{14}N , ^{16}O , H , составляющими основу животных тканей) происходит ядерная реакция и образуются энергичная α -частица, ион ^7Li и в 94 % случаев γ -квант. Образующиеся α -частица и ион ^7Li быстро тормозятся и выделяют энергию 2,3 МэВ на длине порядка 10 микрон, т.е. на длине размера клетки. Такое быстрое торможение сопровождается сильной ионизацией, приводящей к двунитевым разрывам ДНК, в результате которых клетки теряют возможность к делению и погибают. Т.о., если обеспечить более высокую концентрацию ^{10}B в раковой опухоли по сравнению со здоровой тканью, бор-нейтронозахватная терапия позволит полностью решить проблему устойчивости злокачественных новообразований к воздействию ионизирующего излучения (радиорезистентности). Для эффективного применения БНЗТ требуется создание нейтронных потоков с указанным энергетическим спектром с плотностью не ниже $10^9 \text{ c}^{-1}\text{cm}^{-2}$. В разделе приводятся оценки ожидаемых характеристик предлагаемого нейтронного генератора. Показано, что при использовании современных мишеней из дейтрида титана и полученных в ходе исследований дейтронных пучков может быть достигнута плотность нейтронного выхода с мишени $5 \cdot 10^{10} \text{ c}^{-1}\text{cm}^{-2}$. Делается вывод о перспективах предложенного подхода в случае разработки соответствующего модератора нейтронного энергетического спектра, который обеспечит снижение энергии нейтронов от 2,5 МэВ до подходящей для БНЗТ.

В разделе 4.4 обсуждаются перспективы создания квазиточечного нейтронного источника для томографии на основе сильноточного газодинамического ЭЦР источника ионов. Нейтронная томография открывает широкие возможности микроскопических исследований разнообразных не только физических, но и химических, и биологических объектов. Для ее реализации требуются либо параллельные пучки нейтронов, либо потоки нейтронов от источников с малым размером излучающей области. Параллельные пучки обычно получают с помощью ядерных реакторов, что сильно ограничивает возможности применения нейтронной томографии. Квазиточечные источники нейтронов могут быть получены, например, при взаимодействии мощных фемтосекундных лазерных импульсов с различными мишенями. В диссертационной работе предлагается использовать возможность получения сильноточных пучков тонов ионов водорода и его изотопов с предельно малым эмиттансом (среднеквадратичном нормализованном эмиттансе менее $0,1 \text{ п}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$ и током до 500 мА), при этом яркость пучка более чем на порядок превосходит все существующие источники ионов. Представляется весьма перспективным использовать такие пучки для получения нейтронов, так как за счет низкого эмиттанса они могут быть эффективно сфокусированы на содержащую дейтерий мишень, а ток на уровне 500 мА при ускоряющем напряжении 100 кВ обеспечит вы-

ход нейтронов в импульсе на уровне $5 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$. В рамках компьютерного моделирования было показано, что при фокусировке полученных ионных пучков можно ожидать создания нейтронного источника с масштабами излучающей области на уровне 100 мкм (рис. 7), что сравнимо с результатами в случае использования лазерных систем, которые в то же время не могут обеспечить столь же высокого уровня нейтронного выхода.

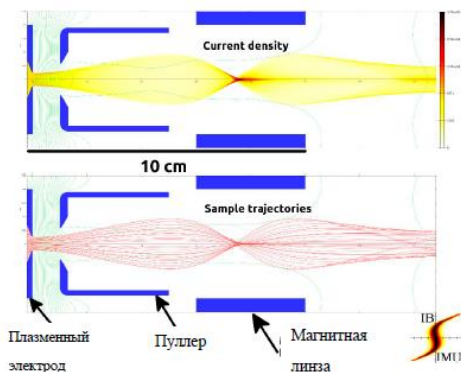


Рис. 7. Результат компьютерного моделирования распределения плотности тока при извлечении и фокусировке ионного пучка, траектории ионов в пучке.

В разделе 4.5 подводятся итоги четвертой главы

Материалы, изложенные в четвертой главе, опубликованы в работах [22А, 24А, 25А, 27-29А].

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Полученные в диссертационной работе основные научные результаты заключаются в следующем.

1. Впервые продемонстрирована возможность эффективного использования магнитной ловушки со встречными полями для удержания плазмы в ЭЦР источнике МЗИ в условиях ее нагрева излучением гиротрона миллиметрового диапазона длин волн. В случае применения излучения с частотой 37,5 ГГц и мощностью 100 кВт в для нагрева плазмы в магнитной ловушке со встречными полями получены сильноточные пучки многозарядных ионов азота с яркостью до $50 \text{ A}/(\pi \text{ мм мрад})^2$ при плотности тока до $650 \text{ mA}/\text{см}^2$. В случае использования многоапертурных систем экстракции получены пучки многозарядных ионов с током до 150 мА.

2. Экспериментально показано, что средний заряд ионов в плазме, удерживаемой в магнитной ловушке со встречными полями в квазигазодинамическом режиме, растет при увеличении геометрических размеров ловушки, повышении частоты и мощности излучения, используемого для ЭЦР нагрева.

3. При использовании для нагрева плазмы излучения гиротрона с частотой 60 ГГц и мощностью 150 кВт в ловушке со встречными полями,

имеющей замкнутую ЭЦР поверхность внутри разрядной камеры, продемонстрирована возможность формирования плазмы с квазигазодинамическим режимом удержания и эффективной генерации многозарядных ионов. Из такой плазмы извлечены пучки ионов азота с током до 6 мА при плотности тока 750 мА/см^2 и средним зарядом до +4.

4. Экспериментально продемонстрирована возможность создания импульсных пучков многозарядных ионов гелия с длительностью фронта порядка 10 мкс. Показано, что реализация квазигазодинамического режима удержания плотной плазмы ЭЦР разряда, поддерживаемого излучением гиротрона, позволяет обеспечить быстрое формирование плазмы с высокой концентрацией многозарядных ионов.

5. Экспериментально была продемонстрирована возможность формирования из плотной сильнонеравновесной плазмы ЭЦР разряда, поддерживаемого мощным излучением гиротрона миллиметрового диапазона длин волн, короткоимпульсных пучков многозарядных ионов азота и аргона с высоким током (длительность 50-100 мкс, ток около 100 мА).

6. Предложена схема короткоимпульсного ЭЦР источника многозарядных ионов короткоживущих радиоактивных изотопов с нагревом плазмы излучением гиротрона с частотой 60 ГГц в ловушке со встречными полями малого размера. Расчеты показали, что эффективность извлечения ионов ${}^6\text{He}$ может достигать 60-90% (в зависимости от их заряда) от общего числа инжектированных в ловушку частиц.

7. Продемонстрировано, что в ЭЦР разряде в водороде или дейтерии возможно получение плазмы с плотностью до 10^{14} см^{-3} при температуре основной электронной компоненты 50-100 эВ, что соответствует оптимуму энергии для ионизационных процессов в водороде. Из плазмы такого разряда получены ионные пучки с током до 500 мА, нормализованным эмиттансом $0,07 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, нормализованной яркостью $100 \text{ А}/(\text{п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад})^2$ при доле атомарных ионов (протонов или дейтронов) 94%. Ионные пучки с такими параметрами с запасом удовлетворяют всем существующим и разрабатываемым сильноточным протонным ускорителям, включая ускорительные комплексы проектов ESS и IFMIF.

8. Предложено использовать полученные интенсивные пучки ионов дейтерия для создания мощного компактного нейтронного генератора нового поколения на основе D-D реакции. Экспериментально продемонстрировано, что при бомбардировке мишени из тяжелого льда пучком ионов дейтерия с током 500 мА и энергией 45 кэВ возможно получение нейтронного выхода с плотностью на уровне $1 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$.

Список цитируемой литературы

[1] Dandl R.A., England A.C., Ard W.B. et. al. Properties of a high-beta plasma produced by electron-cyclotron heating. // Nuclear Fusion. 1964. V. 4. P. 344-353.

- [2] Ikegami H., Ikezi H., Hosokawa M. et. al. Shell structure of a hot-electron plasma. // *Physical Review Letters*. 1967. V. 19. N. 14. P. 778-781.
- [3] Будников В.Н., Виноградов Н.И., Голант В.Е. и др. Исследование плазмы, созданной СВЧ полем в режиме циклотронного резонанса. // *Журнал технической физики*. 1967. Т. 37. № 5. С. 851-856.
- [4] Аликаев В.В., Бобровский Г.А., Позняк В.И. и др. Нагрев плазмы в токамаке ТМ-3 на электронно-циклотронном резонансе при магнитных полях до 25 кЭ. // *Физика плазмы*. 1976. Т. 2. Вып. 3. С. 390-395.
- [5] Димов Г.И., Закайдаков В.В., Кишиневский М.Е. Термоядерная ловушка с двойными пробками. // *Физика плазмы*. 1976. Т. 2. Вып. 4. С. 597-610.
- [6] Аликаев В.В. ВЧ и СВЧ методы нагрева плазмы. // *Итоги науки и техники. Сер. Физика плазмы*. 1981. Т. 1. Ч. 2. С. 80-99.
- [7] Аликаев В.В., Литвак А.Г., Суворов Е.В., Фрайман А.А. Электронно-циклотронный нагрев плазмы в тороидальных системах. // В кн. : *Высокочастотный нагрев плазмы*. Горький : ИПФ АН СССР. 1983. С. 6-70.
- [8] Бочаров В.Н., Завадский Н.А., Киселёв А.В. и др. Генерирование плазмы в открытой ловушке на ЭЦР при осевом распространении волны. // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез*. 1985. Вып. 3. С. 64-70.
- [9] Голованивский К.С., Дугар-Жабон В.Д. Ионные источники на основе электронного циклотронного резонанса (обзор). // *Приборы и техника эксперимента*. 1991. № 4. С. 8-18.
- [10] Geller R. Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasmas. // *Institute of Physics. Bristol*. 1996.
- [11] Geller R. ECRIS – closing remarks. // *Journal de Physique*. 1989. Colloque C1. Suppl. N 1. V. 50. P. 887-892.
- [12] Кутнер В.Б., Ефремов А.А., Бехтерев В.В., Бири Ш., Ковальчук И.М., Колесов И.В., Лебедев А.Н., Оганесян Ю.Ц., Пиварч Ю., Чугреев В. А. Источники многозарядных ионов DECRIS-14 для циклотронов ЛЯР ОИЯИ. // *Тезисы докладов XII Всесоюзного Совещания по Ускорителям заряженных частиц, 3-5 октября 1990 г., ИТЭФ, Москва, с. 1С6*.
- [13] Лебедев А.Н., Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей. // М.: Энергоатомиздат. 1991. 528 С.
- [14] Donets E. D., Pyushenko V. I., Alpert V. A. // *Intern. Conf. on Ion Sources, Saclay, 1969*. P. 635.
- [15] E.D. Donets // *Phys. Elementary Particles At. Nucleus*. 1982. V.13. P. 941.
- [16] G.F. Tonon // *IEEE Trans. Nucl. Sci*. 1972. NS-19. P. 172.
- [17] L.Z. Barabash, D.G. Koshkarev, Yu.I. Lapitskii, S.V. Latyshev, A.V. Shumshurov, Yu.A. Bykovskii, A.A. Golubev, Ya.P. Kosyrev, K.I. Krechet, R.T. Haydarov, B.Yu. Sharkov // *Laser and Particle Beams*. 1984. V. 2. P. 49.
- [18] O.B. Anan'in, Yu.A. Bykovskii, V.P. Gusev, Yu.P. Koznev, I.V. Kolesov, A.S. Pasyuk, V.D. Peklenkov // *Sov. Phys. Tech. Phys*. 1986. V. 28. P. 54.

- [19] Geller R. ECRIS – closing remarks. // Journal de Physique. 1989. Colloque C1. Suppl. N 1. V. 50. P. 887-892.
- [20] Geller R., Jacquot B., Sortais P. The upgrading of the multiply charged heavy-ion source Minimafios. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1986. V. A243. P. 244-254.
- [21] Leitner D., Lyneis C.M. Abbot S.R. et al. // Proc. 16th Intern. Workshop on ECR Ion Sources, Berkeley, California, USA. 2004. P. 3.
- [22] Bouly et al. // Rev. Sci. Instrum. 2002. V. 73, № 2. P. 528.
- [23] Lyneis, C. M., Leitner, D., Todd, D. S., Sabbi, G., Prestemon, S., Caspi, S., & Ferracin, P. Fourth generation electron cyclotron resonance ion sources // The Review of Scientific Instruments. 2008. V. 79(2 Pt 2). P. 02A321.
- [24] C. Lyneis et al., “Concept for a fourth generation electron cyclotron resonance ion source” // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. P. 02A301.
- [25] D.Z. Xie et al., “Development Status of a Next Generation ECRIS: MARS-D at LBNL” // Proceedings of the 16th International Conference on ion sources, August 23-28, New York City, USA. 2015.
- [26] Golubev S.V., Zorin V.G., Zorina T.N., Razin S.V.. // Proc. Int. Workshop on Strong Microwaves in Plasmas. N.Novgorod. 1991. V.1, p. 485-489.
- [27] Golubev S.V., Zorin V.G., Razin S.V.. // Proc. Int. Workshop on Strong Microwaves in Plasmas, N.Novgorod, 1996. V. 1. P. 363.
- [28] Тимофеев А.В. // Физика плазмы. 1975. Т. 1. С. 88.
- [29] Semenov V.E., Turlapov A.V. // Physical Review E. V. 57, n. 5. P. 5937-5944.
- [30] Мирнов В.В., Рютов Д.Д. // Письма в ЖТФ. 1979. Т.5.С. 678.
- [31] Golubev S.V., Razin S.V., Semenov V.E., Smirnov A. N., Vodopyanov A.V., Zorin V.G. // Rev. Sci. Instrum. 2000. V. 71, n. 2, pt. 2. P. 669 – 671.
- [32] Post R.F. // Nuclear Fusion. 1987. V.27. P.1579.
- [33] Мирнов В.В., Рютов Д.Д. // В сб. Вопросы атомной науки и техники, сер. Термоядерный синтез, М.:ЦНИИАТОМИНФОРМ.1980. Т.1. С.57.
- [34] D. V. Yakovlev, P. A. Bagryansky, E. D. Gospodchikov, A. G. Shalashov, and A. L. Solomakhin, Electron cyclotron resonance discharge for plasma startup in the gas dynamic trap // AIP Conference Proceedings. 2016. V. 1771. P. 030007.
- [35] D.V. Yakovlev, A.G. Shalashov, E.D. Gospodchikov, A.L. Solomakhin, V.Ya. Savkin and P.A. Bagryansky, Electron cyclotron plasma startup in the GDT experiment // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. P. 016033.
- [36] P.A. Bagryansky, E.D. Gospodchikov, Yu.V. Kovalenko, A.A. Lizunov, V.V. Maximov, S.V. Murakhtin, E.I. Pinzhenin, V.V. Prikhodko, V.Ya. Savkin, A.G. Shalashov, E.I. Soldatkina, A.L. Solomakhin, D.V. Yakovlev. Electron Cyclotron Resonance Heating Experiment in the GDT Magnetic Mirror: Recent Experiments and Future Plans // Fusion Science and Technology. 2015. V. 68, Issue 1. P. 87-91.

- [37] P.A. Bagryansky, A.V. Anikeev, G.G. Denisov, E.D. Gospodchikov, A.A. Ivanov, A.A. Lizunov, Yu.V. Kovalenko, V.I. Malygin, V.V. Maximov, O.A. Korobeinikova, S.V. Murakhtin, E.I. Pinzhenin, V.V. Prikhodko, V.Ya. Savkin, A.G. Shalashov, O.B. Smolyakova, E.I. Soldatkina, A.L. Solomakhin, D.V. Yakovlev, K.V. Zaytsev, Overview of ECR plasma heating experiment in the GDT magnetic mirror // Nucl. Fusion. 2015. V. 55.
- [38] P.A. Bagryansky, A.V. Anikeev, M.A. Anikeev, A. Dunaevsky, E.D. Gospodchikov, A.A. Ivanov, A.A. Lizunov, O.A. Korobeynikova, M.S. Korzhavina, Yu.V. Kovalenko, V.V. Maximov, S.V. Murakhtin, E.I. Pinzhenin, V.V. Prikhodko, V.Ya. Savkin, A.G. Shalashov, E.I. Soldatkina, A.L. Solomakhin, D.V. Yakovlev, P. Yushmanov, and K.V. Zaytsev Recent progress of plasma confinement and heating studies in the gas dynamic trap // AIP Conf. Proc. 2016. V.1771. P. 020003.
- [39] D.V. Yurov, V.V. Prikhodko and Yu.A. Tsidulko Nonstationary Model of an Axisymmetric Mirror Trap with Nonequilibrium Plasma // Plasma Physics Reports. 2016. V. 42, n. 3. Pp. 210–225.
- [40] A. G. Shalashov, A. A. Balakin, T. A. Khusainov, E. D. Gospodchikov, A. L. Solomakhin. Quasi-optical simulation of the electron cyclotron plasma heating in a mirror magnetic trap // J. Exp. Theor. Phys. 2017. V. 124 (2). P. 325-340.
- [41] E. D. Gospodchikov, A. G. Kutlin, A. G. Shalashov. Plasma heating and coupling of electromagnetic waves near the upper-hybrid resonance in high- β devices // Plasma Phys. Control. Fusion. 2017. V. 59 (6). P. 065003.
- [42] A. G. Shalashov, P. A. Bagryansky, E. D. Gospodchikov, A. L. Solomakhin and D. V. Yakovlev. Theory of electron cyclotron resonance startup in the gas dynamic trap // AIP Conference Proceedings. 2016. V. 1771. P. 030008.
- [43] Ivanov A.A., Ryutov D.D. // Nucl. Sci. and Eng. 1990. V.106. P.235.
- [44] A.V. Anikeev, P.A. Bagryansky, A.D. Beklemishev, A.A. Ivanov, E.V. Kolesnikov, M.S. Korzhavina, O.A. Korobeinikova, A.A. Lizunov, V.V. Maximov, S.V. Murakhtin, E.I. Pinzhenin, V.V. Prikhodko, E.I. Soldatkina, A.L. Solomakhin, Yu.A. Tsidulko, D.V. Yakovlev, D.V. Yurov. Progress in Mirror Based Fusion Neutron Source Development // Materials. 2015. V. 8. P. 8452–8459.
- [45] <http://beta-beam.web.cern.ch/beta-beam/>.
- [46] <https://europeanspallationsource.se/>.
- [47] S. Gammino, L. Celona, R. Miracoli, D. Mascali, G. Castro, G. Ciavola, F. Maimone, R. Gobin, O. Delferrière, G. Adroit, F. Senée // Proc. Linear Accelerator Conference LINAC2010, Tsukuba, Japan, THP116, available online at jascow.org.
- [48] <http://www.ifmf.org/>.
- [49] R. Gobin, G. Adroit, D. Bogard, G. Bourdelle, N. Chauvin, O. Delferrière, Y. Gauthier, P. Girardot, P. Guiho, F. Harrault, J. L. Jannin, D. Loiseau, P. Mattei, A. Roger, Y. Sauce, F. Senée, and T. Vacher // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. P. 02A345.

- [50] H. L. Ravn and B. W. Allardyce, in *Treatise on Heavy Ion Science* // Ed. D. A. Bromley (Plenum, New York, 1989). V. 8. P. 363.
- [51] P. Van Duppen, et. al. // *Rev. Sci. Instrum.* 1992. V. 63. P. 2381.
- [52] A.C. Mueller, “An overview of radioactive beam facilities” EPAC 2000, Vienna.
- [53] K. Riisager, “Radioactive beam research notches up 50 years” // *CERN Courier.* 2002. V. 42, n. 4. P. 26.
- [54] J.C. Yang, J.W. Xia, G.Q. Xiao, H.S. Xu, H.W. Zhao, X.H. Zhou, et al. *High Intensity heavy ion Accelerator Facility (HIAF) in China* // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* 2013. V. 317 (B). P. 263–265.

Список публикаций по теме диссертации

- [1A] V.E. Semenov, V.A. Skalyga, V.G. Zorin, “Scaling for ECR Sources of Multicharged Ions with Pumping at Frequencies from 10 to 100 GHz”, *Review of Scientific Instruments.* 2002. V. 73, n2, part II. P. 635 – 637.
- [2A] А.В.Водопьянов, С.В. Голубев, В.Г. Зорин, С.В. Разин, А.В. Сидоров, В.А. Скалыга, А.Г. Шалашов. Динамика СВЧ разряда в магнитном поле в условиях сильной предварительной ионизации газа. *Радиофизика.* 2003. Т. 46, № 8-9. С. 822-829.
- [3A] S.V Golubev, S.V. Razin, A.V. Sidorov, V.A. Skalyga, A.V. Vodopyanov, V.G. Zorin, “ High Current Density Ion Beam Formation from Plasma of ECR Discharge ”, *Review of Scientific Instruments.* 2004. V.75, n5. P. 1675-1677.
- [4A] S.V. Golubev, I.V. Izotov, S.V. Razin, V.A. Skalyga, A.V. Vodopyanov, V.G. Zorin. Multicharged Ion Generation in Plasma Created by Millimeter Waves and Confined in a CUSP Magnetic Trap. *Transactions of Fusion Science and Technology.* 2005. V. 47, n. 1T , fuste8. P. 345-347.
- [5A] V. Skalyga, V. Zorin, V. Izotov, A. Sidorov, T. Lamy, P. Sortais, T. Thuillier. Gas Breakdown in ECR ion Source. *Review of Scientific Instruments.* 2006. V.77, n3. P. 03A325-1 – 03A325-3.
- [6A] A. Sidorov, I. Izotov, S. Razin, V.Skalyga, V. Zorin, A. Balabaev, S. Kondrashev, A Bokhanov. Beam Formation from Dense Plasma of ECR Discharge. *Review of Scientific Instruments.* 2006. V.77, n3. P. 03A341-1 – 03A341-4.
- [7A] V. Skalyga, V. Zorin, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, A. Bohanov. Gasdynamic ECR Source of Multicharged Ions Based on a Cusp Magnetic Trap. *Plasma Sources Science and Technology.* 2006. V. 15. P. 727-734.
- [8A] S. Golubev, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, V. Skalyga, A. Vodopyanov, V. Zorin, A. Bokhanov. High Current ECR Source of Multicharged Ion Beams. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B.* 2007. V. 256. P. 537 – 542.
- [9A] А.Ф. Боханов, В.Г. Зорин, И.В. Изотов, С.В. Разин, А.В. Сидоров, В. А. Скалыга. Создание плотных потоков многозарядных ионов из ЭЦР ис-

- точника на базе ловушки со встречными полями с квазигазодинамическим режимом удержания плазмы. *Физика плазмы*. 2007. Т. 33, № 5. С. 385-394.
- [10A] A.V. Vodopyanov, S.V. Golubev, I.V. Izotov, V.I. Khizhnyak, D.A. Mansfeld, V.A. Skalyga and V.G. Zorin. ECR Plasma With 75 GHz Pumping. *High Energy Physics and Nuclear Physics*. 2007. V. 31(S1). P. 152—155.
- [11A] A. Sidorov, M. Dorf, V. Zorin, A. Bokhanov, I. Izotov, V. Skalyga, A. Vodopyanov, Noise Suppression And Stabilization Of An Ion Beam Extracted From Dense Plasma, *Journal of Applied Physics*. 2007. V.102, n.5. P. 054504.
- [12A] A. Sidorov, M. Dorf, A. Bokhanov, I. Izotov, S. Razin, V. Skalyga, V. Zorin, A. Balabaev, P Spädtke, J. Roßbach. Multi-aperture ion beam extraction from gas-dynamic electron cyclotron resonance source of multicharged ions. *Review of Scientific Instruments*. 2008. V. 79. P. 02A317.
- [13A] В.А. Скалыга, В.Г. Зорин, И.В. Изотов, А.В. Водопьянов, С.В. Голубев, Д.А. Мансфельд, С.В. Разин, А.В. Сидоров. Короткоимпульсный ЭЦР источник многозарядных ионов. *ЖТФ*. 2010. Т. 80. Вып. 12. С. 90-94.
- [14A] Сидоров А.В., Зорин В.Г., Изотов И.В., Разин С.В., Скалыга В.А. Формирование сильноточного пучка многозарядных ионов из плотной плазмы, создаваемой мощным миллиметровым излучением гиротрона в условиях электронного циклотронного резонанса. *ЖТФ*. 2010. Т. 80, вып. 10. С. 152.
- [15A] V.A. Skalyga, V.G. Zorin, I.V. Izotov, S.V. Razin, A.V. Sidorov, T.Lamy, T. Thuillier. ECR Breakdown of heavy gases in open mirror trap. *Fusion Science and Technology*. 2011. V. 59, n. 1t. P. 140.
- [16A] I. V. Izotov, V. A. Skalyga, V. G. Zorin. Optimization of gas utilization efficiency for short-pulsed electron cyclotron resonance ion source. *Rev. Sci. Instrum*. 2012. V. 83. P. 02A342.
- [17A] V. Skalyga, I. Izotov, A. Sidorov, S. Razin, V. Zorin, O. Tarvainen, H. Koivisto, T. Kalvas. High current proton source based on ECR discharge sustained by 37.5 GHz gyrotron radiation. *JINST*. 2012. V.7. P10010.
- [18A] T. R. Edgecock et al. High intensity neutrino oscillation facilities in Europe. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*. 2013. V. 16. Issue 2. P. 021002.
- [19A] M.A. Dorf, V.G. Zorin, A.V. Sidorov, A.F. Bokhanov, I.V. Izotov, S.V. Razin, V.A. Skalyga. Generation of Multi-Charged High Current Ion Beams using the SMIS 37 Gas-dynamic Electron Cyclotron Resonance (ECR) Ion Source. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment)* 2014. V. 733. P. 107-111.
- [20A] V. Skalyga, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, S. Golubev, T. Kalvas, H. Koivisto, and O. Tarvainen. “High current proton beams production at Simple Mirror Ion Source 37”. // *Review of Scientific Instruments*. 2014. V. 85, no. 2. P. 02A702-1 – 02A702-3.

- [21A] S. Razin, V. Zorin, I. Izotov, A. Sidorov, and V. Skalyga. Emittance of short-pulsed high-current ion beams formed from the plasma of the ECR discharge sustained by high-power millimeter-wave gyrotron radiation. // Review of Scientific Instruments 2014. V. 85, Issue 2. P. 023307-1 – 023307-4.
- [22A] V. Skalyga, I. Izotov, S. Golubev, S. Razin, A. Sidorov, A. Maslennikova, A. Volovecky, T. Kalvas, H. Koivisto, O. Tarvainen. Gyrotron-driven High Current ECR Ion Source for Boron-neutron Capture Therapy Neutron Generator. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2014. V. 768. P. 146–150.
- [23A] Wildner E. et al. “Design of a neutrino source based on beta beams”. Physical Review Special Topics-Accelerators And Beams. 2014. V. 17, Issue: 7, Article Number: 071002.
- [24A] V. Skalyga, I. Izotov, S. Golubev, S. Razin, A. Sidorov, A. Maslennikova, A. Volovecky, T. Kalvas, H. Koivisto, O. Tarvainen. Neutron generator for BNCT based on high current ECR ion source with gyrotron plasma heating. Applied Radiation and Isotopes. 2015. V. 106. P. 29-33.
- [25A] V. Skalyga, I. Izotov, S. Golubev, A. Sidorov, S. Razin, A. Strelkov, O. Tarvainen, H. Koivisto, T. Kalvas. High yield neutron generator based on a high-current gasdynamic electron cyclotron resonance ion source. Journal of Applied Physics. 2015. V. 118. P. 093301.
- [26A] V. Skalyga, I. Izotov, S. Golubev, A. Vodopyanov, O. Tarvainen. First Experiments with Gasdynamic Ion Source in CW Mode. Review of Scientific Instruments. 2016. V. 87. P. 02A715.
- [27A] V. Skalyga, I. Izotov, S. Golubev, A. Sidorov, S. Razin, A. Vodopyanov, O. Tarvainen, H. Koivisto, T. Kalvas. New progress of high current gasdynamic ion source. Review of Scientific Instruments. 2016. V. 87. P. 02A716.
- [28A] С.В. Голубев, И.В. Изотов, С.В. Разин, А.В. Сидоров, В.А. Скальга. Компактный источник нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии. Известия ВУЗов. Радиофизика. 2016. Т. LIX. № 8-9. С. 720.
- [29A] S. Golubev, V. Skalyga, I. Izotov, A. Sidorov. “New method of a “point-like” neutron source creation based on sharp focusing of high-current deuteron beam onto deuterium-saturated target for neutron tomography”. Journal of Instrumentation. 2017. V. 12. P. 2017_JINST_12_T02003.
- [30A] V. A. Skalyga, I. V. Izotov, A. V. Sidorov, S. V. Golubev, and S. V. Razin. Study of hydrogen ECR plasma in a simple mirror magnetic trap heated by 75 GHz pulsed gyrotron radiation. Review of Scientific Instruments. 2017. V. 88. P. 033503.

СКАЛЫГА Вадим Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСНОГО РАЗРЯДА С
ЦЕЛЮ ГЕНЕРАЦИИ ИНТЕНСИВНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ**

Автореферат

Подписано к печати 18.08.2017 г.
Формат 60 × 90 1/16. Бумага офсетная №1.
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ № 73(2017).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН
603950, г. н. Новгород, ул. Ульянова 46