На правах рукописи



ВЫБИН Сергей Сергеевич

ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ РАЗРЯД В НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ПРОТОННЫХ ПУЧКОВ

1.3.9 – физика плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород)

Научный руководитель:
Скалыга Вадим Александрович,
доктор физико-математических наук, профессор РАН, заместитель директора по научной работе, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты:
Дейчули Петр Петрович,
кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФБГУН «Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук»
(г. Новосибирск)

Гаврилов Сергей Александрович,
доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе, ФГБУН «Институт ядерных исследований Российской академии наук»
(г. Москва, г. Троицк)

Ведущая организация:
Международная межправительственная научно-исследовательская организация «Объединенный институт ядерных исследований» (г. Дубна)

Защита состоится 15 февраля 2027 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 в ИПФ РАН (603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ИПФ РАН: ipfran.ru

Автореферат разослан 12 января 2027 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук



Э. Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы диссертации

В настоящее время источники плазмы имеют множество различных применений как прикладной, так и фундаментальной направленности. Среди них можно выделить следующие [1–4]: микроэлектроника (травление, напыление, очистка поверхностей, ионная имплантация и другие), ядерная физика (плазменные источники ионов, в том числе и многозарядных, для инжекции в ускорители заряженных частиц), нагрев плазмы в термоядерных установках (инжекторы нейтральных частиц), создание источников излучения (ультрафиолетового, мягкого и жесткого рентгеновского), лабораторное моделирование астрофизических процессов.

Одно из наиболее интересных приложений плазменных источников ионов связано с разработкой нейтронных генераторов на базе ускорителей частиц различного типа, что является экологически более чистой альтернативой ядерным реакторам. Среди нейтронных генераторов можно выделить наиболее интенсивные источники, использующие реакцию каскадно-испарительного типа [5]. Установки такого типа (LANSCE – Los Alamos Neutron Science Center, США [6], ISIS Neutron and Muon Source, Великобритания [7], SNS – Spallation Neutron Source, США [8], ESS – European Spallation Source, Швеция [9], J-PARC – Japan Proton Accelerator Research Complex, Япония [10], CSNS – China Spallation Neutron Source, Китай [11]) являются одними из крупнейших ускорителей, что накладывает определенные ограничения на доступность данных установок для исследований. Альтернативой для таких установок являются менее интенсивные и более компактные нейтронные источники на основе линейных ускорителей меньших энергий [12]. В качестве примера можно привести следующие проекты: IFMIF – International Fusion Materials Irradiation Facility, Япония [13], SARAF – Soreq Applied Research Accelerator Facility, Израиль [14], FRANZ – Frankfurt Neutron Source at the Stern-Gerlach-Zentrum, Германия [15; 16], MUNES – Multidisciplinary Neutron Source, Италия [17], DARIA – Dedicated to Academic Research and Industrial Applications, Россия [18], а также источник на основе тандемного ускорителя [19], разработанный в Институте ядерной физики СО РАН. Еще более компактный (и менее интенсивный) источник нейтронов можно получить за счет использования реакций D−D или D−T синтеза при бомбардировке мишеней, содержащих дейтерий или тритий, ускоренным пучком ионов дейтерия [20; 21].

Основной путь дальнейшего совершенствования всех подобных генераторов, то есть повышение интенсивности нейтронных потоков, связан с поиском возможностей увеличения тока, инжектированного в ускорители пучка ионов без потери качества.

Задача формирования (получения) пучков ионов со все большим током имеет долгую историю развития. Для этих целей использовалась плазма разрядов самых разных типов [22]. Ионные источники на основе электронно-циклотронного резонансного (ЭЦР) разряда [3] обладают сочетанием характеристик, обеспечивающих их широкое распространение. Плазма поддерживается в магнитной ловушке при низких давлениях газа электромагнитной волной, энергия которой поглощается электронами в условиях электронно-циклотронного резонанса. Реализуется неравновесный разряд с высокой температурой электронов и низкой температурой ионов. С помощью высокой вкладываемой мощности (на уровне 1 кВт – 100 кВт) при небольшом объеме плазмы (порядка 100 $см^3$) возможно реализовать разряд с высоким удельным энерговкладом и получить плазму с высокой степенью ионизации. Следствием большого энерговклада является высокий поток плазмы из ловушки (на уровне 1 А $см^{-2}$), что позволяет формировать сильноточные ионные пучки. Для поддержания разряда не требуются электроды, что обеспечивает большой ресурс установки. Есть возможность работы не только в импульсном, но и в непрерывном режиме горения разряда в зависимости от требований к установке. Разряд поддерживается при низком давлении напускаемого газа (10^{-6} Торр – 10^{-4} Торр), что упрощает согласование фоновых давлений в инжекторе и в ускорителе, в котором остаточное давление может достигать 10^{-6} Торр и ниже.

Есть источники, в которых плазма поддерживается путем нагрева электронов излучением радиочастотного диапазона (обычно с частотой от 0.1 МГц до 30 МГц) [23; 24] – это источники ионов на основе высокочастотного (ВЧ) разряда. Электроны колеблются в переменном электрическом поле и могут набирать энергию за счет столкновений с напускаемым газом. На основе ВЧ-разряда можно построить крупномасштабные установки. Поэтому разряд данного типа активно применяется при создании инжекторов нейтральных частиц для установок термоядерного синтеза. В индукционном ВЧ-разряде, так же как и в ЭЦР ионных источниках, отсутствуют электроды для поддержания разряда. Однако в ВЧ-источниках используется большее давление напускаемого газа, что приводит к образованию более холодной плазмы с меньшей степенью ионизации. Примером использования ВЧ-разряда для получения пучков ионов водорода с последующей их нейтрализацией для нагрева плазмы атомарными пучками служит ионный источник, разработанный в Институте ядерной физики СО РАН [25]. Был получен ВЧ-разряд с долей ионов H^+, H_2^+ и H_3^+ соответственно 70 %, 20 % и 10 %. Широкоапертурный ионный пучок имел ток более 40 А при энергии частиц 40 кэВ в квазистационарном режиме работы с длительностью импульса 1 с. Плотность потока плазмы на входе в электродную систему формирования ионного пучка составила около 300 мА $см^{-2}$.

Распространены ионные источники на основе пеннинговского разряда [26; 27]. В них разрядная камера представляет собой полый цилиндрический

анод, с торцов которого расположены катоды. Электроны внутри источника осциллируют между катодами, приобретая высокую энергию. Наличие продольного магнитного поля улучшает удержание электронов в поперечном направлении, увеличивая их время жизни, что способствует повышению эффективности ионизации. От анода к катоду течет разрядный ток, который может достигать десятков ампер. В таких режимах работы плотность тока извлекаемого из плазмы ионного пучка может достигать сотен мА $см^{-2}$ [27]. Однако в этом случае работа ионного источника принципиально импульсная из-за трудностей с охлаждением электродов. Небольшой размер ионного источника позволяет удобно применять его в составе ускорителей заряженных частиц.

Ионные источники на основе лазерной искры [28] могут также рассматриваться в качестве инжекторов ионов в ускорители. В них лазерное излучение попадает на твердотельную мишень, образуется плотная, расширяющаяся плазма, из которой можно извлекать ионы. Преимуществом ионного источника данного типа является наибольший среди рассматриваемых вариантов источников удельный энерговклад за счет малого объема плазмы и высокой интенсивности лазерного излучения. Недостатком плазменного генератора данного типа применительно к использованию в ионных источниках является сравнительно высокий разброс ионов по начальным энергиям. Ведутся исследования по инжекции потока лазерной плазмы непосредственно в линейный ускоритель без предварительного ускорения в системе извлечения ионного пучка [29]. Источники ионов на основе лазерной искры работают только в импульсных режимах с малой длительностью импульса.

Дуоплазматроны также используются в качестве плазменных генераторов для источников ионов [30–32]. Они способны формировать плотные потоки плазмы (плотность тока формируемого пучка достигает сотен мА $см^{-2}$), имеют относительно простую конструкцию и сравнительно недорогие. Однако их возможности по непрерывной работе ограничены сроком службы катода. Распыление материала катода приводит к образованию примесей в плазме. В качестве примера применения дугового разряда с холодным катодом для получения пучков ионов водорода можно привести установку, разработанную в Институте ядерной физики СО РАН. Она использовалась для инжекции широкоапертурных (с поперечными размерами порядка 10 см) атомарных пучков в амбиполярную ловушку АМБАЛ-М [33]. Плотность потока плазмы в экстракторе достигала 300 мА $см^{-2}$ при энергии частиц 30 кэВ и длительности импульса 0.1 с.

Рассмотрим подробнее группу ЭЦР ионных источников. Ионные источники на основе ЭЦР-разряда, поддерживаемого излучением на частоте 2.45 ГГц [34–37], широко применяются в качестве инжекторов легких ионов в ускорители. Это обусловлено возможностью получения сильноточных ионных пучков высокого качества при сравнительно небольших затратах. Также стоит отметить относительную простоту конструкции таких источников и

доступность отдельных компонентов установки. Характеристики некоторых передовых 2.45 ГГц ЭЦР ионных источников представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры формируемых пучков ионов, получаемых на различных 2.45 ГГц ЭЦР ионных источниках

Проект ускорителя	Ионный источник	Разработчики ионного источника	Ток пучка (вид иона)	Энергия	Эмиттанс (ср. кв. норм.)
IFMIF	SILHI	CEA Saclay (Франция)	125 мА (D^+)	100 кэВ	0.2 π мм мрад
ESS	PS-ESS	INFN (Италия)	75 мА (H^+)	75 кэВ	0.18 π мм мрад
FAIR	SILHI	CEA Saclay (Франция)	100 мА (H^+)	95 кэВ	0.25 π мм мрад
PKUNIFTY	PMECR	Peking University (Китай)	83 мА (D^+)	50 кэВ	0.18 π мм мрад
-	PMECR	Peking University (Китай)	100 мА (H^+)	50 кэВ	0.13 π мм мрад

Плотность тока ионного пучка на указанных установках достигает сотен мА $см^{-2}$. В этих случаях для получения пучков с током порядка 100 мА используют системы формирования пучка с большим размером отверстия в плазменном электроде (порядка 1 см). Это усложняет формирование ионных пучков высокого качества. В рассмотренных ионных источниках используется излучение с мощностью до 2 кВт, а уровень удельного энерговклада достигает 10 Вт $см^{-3}$, что определяется размером плазменной камеры, который не может быть значительно меньше длины волны излучения в вакууме, приблизительно равной 12 см. Характерная доля атомарных ионов в пучке составляет 80 – 90 %, что вынуждает использовать магнитную сепарацию ионов требуемого сорта. Это приводит к ухудшению качества ионного пучка на входе в ускоритель. В ранних экспериментах по формированию ионных пучков на 2.45 ГГц ЭЦР ионных источниках плотность тока пучка ограничивалась из-за сравнительно низкой концентрации плазмы, не превышающей критическое значение для случая изотропной плазмы (приблизительно равное $7 \cdot 10^{10}$ $см^{-3}$ для частоты излучения 2.45 ГГц). В настоящее время ведутся исследования по обходу этого ограничения, связанные с получением закритической плазмы. Например, группа ученых из Италии занимается исследованием возможно-

стей получения плазмы с концентрацией выше критической путем конверсии греющей электромагнитной волны в плазменную Бернштейновскую волну [38], которая не имеет отсечки по концентрации и может свободно распространяться в плазме, поглощаясь в зоне ЭЦР. Были проведены эксперименты, которые показали четырехкратное превышение концентрации плазмы над критическим значением. Другой путь повышения концентрации плазмы предложен группой китайских ученых [39]. Этот подход основан на нагреве плазмы поверхностной волной, образующейся на границе плазма-диэлектрик. Излучение поступает в разрядную камеру через диэлектрическое окно, расположенное на одном из ее торцов. Магнитная система устроена таким образом, чтобы зона ЭЦР располагалась вблизи диэлектрического окна. И хотя электромагнитная волна не распространяется внутри разрядной камеры, удается обеспечить эффективное поглощение энергии, ослабленной из-за скин-эффекта волны приповерхностной плазмой. Таким образом, возможно получение плазмы с концентрацией выше критической.

Развитие ЭЦР-источников ионов связано с применением все более высокочастотного и все более мощного микроволнового излучения [3]. И по сей день этот путь модернизации источников является основным, уже существуют и функционируют 4 поколения ЭЦР-ионных источников [40]. Для удержания плазмы применяются различные конфигурации магнитного поля (многокасповая [41], min-B в конфигурации с гексаполем [42], min-B в конфигурации бейсбол [43], простой пробкотрон [44], пробкотрон с объемной резонансной зоной [45], касп [46]). Одним из перспективных способов увеличения тока ионных пучков является использование в качестве основы разряда, поддерживаемого в открытых магнитных ловушках в условиях электронно-циклотронного резонанса мощным микроволновым излучением современных гиротронов. Такой ЭЦР-разряд позволяет получать плазму с уникальными параметрами – высокой плотностью (порядка 10^{13} см$^{-3}$–10^{14} см$^{-3}$ [47]) и температурой электронов (в диапазоне 10 эВ – 50 эВ), что обеспечивает рекордные плотности потока ионов из ловушки на уровне 10 А см$^{-2}$ [48].

Вследствие повышения рабочего давления газа и удельного энерговклада в разряд удалось реализовать квазигазодинамический режим удержания плазмы [49]. Он отличается от классического бесстолкновительного меньшим временем жизни разряда и большей плотностью потока плазмы, вытекающей из ловушки.

Квазигазодинамический режим удержания достигается в открытой магнитной ловушке в случае, когда концентрация плазмы достаточно велика и заметную роль в динамике электронов играют кулоновские столкновения. За счет них обеспечивается высокий поток электронов в конус потерь в пространстве скоростей и, следовательно, электроны часто покидают ловушку. Ионный поток, в свою очередь, ограничивается ионно-звуковой скоростью в пробке магнитной ловушки. Следовательно, в условиях, когда движение электронов вдоль силовых линий магнитного поля ничем не ограничивается, по-

тери ионов не могут компенсировать потери электронов. Поэтому плазма приобретает положительный заряд, формируется амбиполярный потенциал, тормозящий электроны и снижающий их поток до тех пор, пока он не сравняется с ионным и не обеспечится условие квазинейтральности потерь из плазмы. При этом конус потерь оказывается заполненным, а вдоль оси ловушки электроны удерживаются электрическим полем.

ЭЦР-ионные источники с квазигазодинамическим режимом удержания были предложены и реализованы в ИПФ РАН. В Институте разработаны две экспериментальные установки. Первая из них – SMIS 37 [48; 50] (Simple Mirror Ion Source), предназначенная для исследования возможности формирования импульсных интенсивных пучков ионов из плазмы разряда, поддерживаемого в простой магнитной ловушке мощным микроволновым излучением гиротрона с частотой 37.5 ГГц, мощностью до 100 кВт и длительностью импульса 1 мс. На установке SMIS 37 был получен протонный пучок с током 500 мА высокого качества [21], что существенно превосходит характеристики ЭЦР-ионных источников с нагревом на частоте 2.45 ГГц.

Вторая установка – GISMO [51] (Gasdynamic Ion Source for Multipurpose Operation) имеет возможности работы в непрерывном режиме. Магнитная ловушка последней создается постоянными магнитами [52]. Плазма поддерживается микроволновым излучением гиротрона на частоте 28 ГГц с мощностью до 10 кВт. Установка GISMO появилась сравнительно недавно. Она создавалась в рамках данной диссертационной работы. Плазма, полученная на этой установке, является предметом исследований, описанных в данной работе.

Дальнейшее совершенствование работы ЭЦР-источников с квазигазодинамическим режимом удержания связано с поиском методов повышения удельного энерговклада в плазму, что может обеспечить оптимальные условия для формирования пучков ионов лучшего качества (уменьшения эмиттанса и повышения чистоты ионного состава пучков) и увеличения тока ионных пучков.

Отдельно необходимо отметить, что формирование качественных ионных пучков из плотных потоков плазмы является сложной задачей, требующей разработок новых систем экстракции с использованием более сильных электрических полей.

Одним из факторов, влияющих на качество формируемого пучка с высокой плотностью тока, является его объемный заряд в межэлектродном пространстве. Увеличение ускоряющего электрического поля приводит к его снижению. Повышение ускоряющего электрического поля путем сближения электродов и увеличения ускоряющего напряжения имеет предел, определяемый электрическим пробоем в межэлектродном пространстве. Ионный пучок имеет высокий объемный заряд на начальном этапе ускорения в области, где ионы имеют небольшую энергию. Именно в этом месте нужно усиливать ускоряющее электрическое поле.

В ходе данной диссертационной работы была предложена новая система формирования ионного пучка, характеризующаяся неоднородным электрическим полем, усиленным вблизи плазменного электрода. При создании такого распределения поля применяется плазменный электрод специальной формы (отличной от традиционной плоской и пирсовой геометрии), имеющий вытянутую в продольном направлении часть. В такой конфигурации ионы быстрее ускоряются, что способствует уменьшению объемного заряда пучка и упрощению формирования интенсивных ионных пучков. Также в новой геометрии возможно использовать вытягивающий электрод (пуллер) с большой апертурой (в несколько раз больше апертуры плазменного электрода), что позволяет отдалить электрод от пучка и практически исключить поток ионов на него.

Цели и задачи исследования

Целями диссертационной работы являются: экспериментальное исследование характеристик неравновесного ЭЦР-разряда в водороде в непрерывном режиме горения в открытой магнитной ловушке при повышенном (по сравнению с ЭЦР-ионными источниками с нагревом на частоте 2.45 ГГц) удельном энерговкладе; поиск оптимальных параметров разряда для получения плазмы в водороде с предельно высокой степенью ионизации и диссоциации; поиск новых способов формирования сильноточных протонных пучков.

Задачи исследования заключались в следующем.

1. Поиск путей увеличения удельного энерговклада в плазму ЭЦР-разряда в непрерывном режиме.
2. Исследование параметров водородной плазмы ЭЦР-разряда, поддерживаемого в непрерывном режиме в открытой магнитной ловушке излучением гиротрона миллиметрового диапазона длин волн при высоких уровнях удельного энерговклада в зависимости от мощности микроволнового излучения, давления напускаемого газа, размеров разрядной камеры.
3. Разработка электродов системы экстракции ионного пучка, обеспечивающих эффективное извлечение ионного пучка из плазмы с плотностью тока порядка 1 А $см^{-2}$.
4. Исследование характеристик протонных пучков, извлекаемых из плазмы ЭЦР-разряда; поиск оптимальных режимов работы ионного источника с точки зрения тока, качества и чистоты протонного пучка.
5. Разработка прототипа импульсного источника протонов для проекта компактного источника нейтронов DARIA.

Научная новизна исследования

Использование для поддержания ЭЦР-разряда в магнитной ловушке с объемом плазмы около 50 $см^3$ в непрерывном режиме работы микроволнового излучения гиротрона с частотой 28 ГГц и мощностью до 10 кВт позволило получить плазму с рекордным уровнем удельного энерговклада (порядка 100 Вт $см^{-3}$). Исследований ЭЦР-источников ионов в непрерывном режиме горения разряда с таким уровнем энерговклада ранее не проводилось.

Предложена новая система формирования интенсивных ионных пучков из плазмы, характеризующаяся применением электродов специальной формы. Из-за вытянутой формы плазменного электрода, имеющего заострение на конце, создается неоднородное электрическое поле, которое благоприятно влияет на возможности системы экстракции по формированию интенсивных ионных пучков.

Практическая значимость

Естественный путь повышения эффективности работы нейтронных генераторов связан с увеличением тока пучка ионов на нейтронообразующей мишени. При этом необходимо поддерживать качество ионного пучка на выходе из инжектора на высоком уровне, чтобы обеспечить его минимальные потери при ускорении. В данной работе исследуется разряд, предназначенный для получения интенсивных протонных пучков высокого качества. Разработана новая система формирования интенсивных ионных пучков из плазмы, характеризующаяся использованием электродов, формирующих неоднородное электрическое поле, которая обеспечивает более эффективное формирование сильноточных ионных пучков при умеренном ускоряющем напряжении. С использованием новой системы экстракции удалось получить протонные пучки с током около 140 мА при энергии около 40 кэВ, что удовлетворяет требованиям современных проектов источников нейтронов. Результаты исследования являются актуальными для институтов, разрабатывающих и эксплуатирующих протонные ускорители. Конструкция ионного источника GISMO была оптимизирована для применения в качестве протонного инжектора для компактного источника нейтронов DARIA, разрабатываемого в России.

Апробация и публикация результатов исследования

Результаты выполненных исследований обсуждались на научных семинарах в Институте прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН. Они докладывались на всероссийских и международных конференциях, в том числе на 19-й научной школе «Нелинейные волны–2020» (Нижний Новгород, 2020), на 24-м международном совещании по ЭЦР-источникам ионов (International Workshop on ECR Ion Sources, 2020), на 19-й международной

конференции по ионным источникам (International Conference on Ion Sources, 2021), на международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород, 2022, 2023, 2026), на международной конференции ФизикА.СПб (Санкт-Петербург, 2023, 2024), на симпозиуме по ионным источникам, плазме и гиротронам (Symposium on Ion Sources, Plasmas and Gyrotrons, Чэнду, Китай, 2025), на Курчатовском форуме «Исследования с применением синхротронного излучения, нейтронов и электронов» (Москва, 2025).

Результаты работы были изложены в ведущих российских и зарубежных высокорейтинговых научных журналах: «Письма в журнал технической физики», «Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования», «Plasma Sources Science and Technology», «Physics of Plasmas». На основании работ, представленных в диссертации, был получен 1 патент на изобретение.

По теме диссертации опубликовано 9 статей в рецензируемых журналах [1А–5А, 7А–10А] и получен один патент на изобретение [6А].

Личный вклад автора

Основные результаты, представленные в диссертации, получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Вклад соискателя состоял в проведении экспериментов по исследованию параметров водородной плазмы ЭЦР-разряда, а также характеристик получаемых ионных пучков. При участии автора проводилась адаптация ионного источника GISMO для работы в качестве протонного инжектора в составе ускорителя компактного источника нейтронов DARIA. Автором лично была предложена новая система формирования ионного пучка, а также разработаны соответствующие системы экстракции. Автором проводились теоретические исследования динамики плазменных процессов ЭЦР-разряда. Экспериментальные исследования проводились в составе группы ученых и инженеров, обеспечивающих работу ионного источника. Обработка результатов экспериментов проводилась автором лично. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов проводилась совместно с научным руководителем и соавторами.

Положения, выносимые на защиту

1. Использование мощного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн для создания ЭЦР-разряда в водороде в открытой осесимметричной магнитной ловушке обеспечило возможность поддержания плазмы в непрерывном режиме горения с удельным энерговкладом порядка 100 Вт $см^{-3}$, превышающим аналоги более чем на порядок; плазма такого разряда обеспечивает плотность потока ионов водорода в пробке магнитной ловушки более 1 А $см^{-2}$ при предельно малой доле молекулярных ионов (99.9 % H^+ , 0.1 % H_2^+).

2. Разработанная оригинальная система формирования пучка ионов с неоднородным распределением электрического поля в межэлектродном пространстве позволяет существенно снизить влияние объемного заряда на качество экстрагируемого пучка (повышается эффективность формирования пучка) и формировать протонные пучки с рекордной плотностью тока до 1.15 А см$^{-2}$.
3. Инжектор протонов на основе ЭЦР-разряда, поддерживаемого микроволновым излучением гиротронов, обеспечивает формирование импульсных протонных пучков с током 140 мА, длительностью импульсов на уровне 100 мкс, с частотой следования 100 Гц, содержанием атомарных ионов 99 %, что полностью соответствует требованиям проекта российского компактного нейтронного источника на основе линейного ускорителя DARIA.

Содержание диссертационной работы

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, определены цели и задачи работы, указаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, определены положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание диссертационной работы.

В **первой главе** приведены результаты исследования параметров непрерывного ЭЦР-разряда с высоким удельным энерговкладом и определена степень согласованности СВЧ-излучения с плазмой. Основные результаты главы 1 опубликованы в работах [1А–3А].

В **разделе 1.1** описывается экспериментальная установка GISMO, включающая в себя гиротрон, разрядную камеру, магнитную ловушку, создаваемую постоянными магнитами, систему формирования ионного пучка и средства диагностики плазмы и пучка. Схема установки представлена на рис. 1. Плазма удерживается в магнитной ловушке типа пробкотрон и со стороны СВЧ-ввода опирается на согласователь СВЧ излучения с плазмой (выполненный в виде клина), а с противоположной стороны – на плазменный электрод. Отметим, что в такой ловушке есть касп, после которого формируется неоднородное магнитное поле, фокусирующее ионный пучок. В ходе первых экспериментов был обнаружен паразитный разряд в скрещенных полях между плазменной камерой и вытягивающим электродом при подаче высокого напряжения на экстрактор. Он был подавлен путем использования диэлектрической вставки в расширитель плазменной камеры. Для получения пучков с малым углом расходимости используется осесимметричная магнитная линза, являющаяся соленоидом. В **разделе 1.2** проводится экспериментальное исследование эффективности согласования микроволнового излучения с плазмой. Для этого определялась поглощенная плазмой мощность СВЧ-излучения калориметрическим методом путем измерения разности температур охлаждающей жидкости (воды) на входе и выходе из плазменной камеры при известном ее потоке.

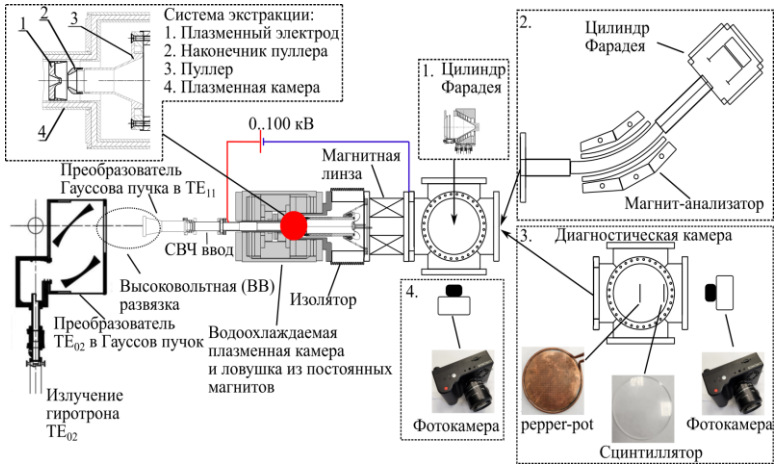


Рис. 1. Схема установки GISMO. Обозначения средств диагностики: *1* – цилиндр Фарадея для измерения тока пучка; *2* – магнитный масс-спектрометр для определения ионного состава пучка; *3* – схема измерения эмиттанса пучка методом *pepper-pot*; *4* – схема фотосъемки поперечного профиля пучка для определения степени компенсации пространственного заряда

Было установлено, что при давлении напускаемого газа более 0.16 мТорр плазма поглощает приблизительно 50 – 60 % от вкладываемой мощности вне зависимости от условий горения разряда (мощности вводимого излучения, давления напускаемого газа). Экспериментально были реализованы стабильные режимы работы с входной мощностью 10 кВт, что соответствует уровню поглощенной мощности около 6 кВт и рекордному для ЭЦР-ионных источников удельному энерговкладу 120 Вт см$^{-3}$ (с учетом объема плазмы около 50 см^3). При низких давлениях отчетливо проявляются вариации коэффициента поглощения в зависимости от длины разрядной камеры с периодом, соответствующим расстоянию между пучностями образовавшейся стоячей волны в разрядной камере. При повышении давления указанная зависимость пропадает. Предположительно, при больших давлениях реализуется плотная плазма, которая экранирует излучение, препятствуя его распространению по всему резонатору. Соответственно, основная доля мощности поглощается в ближней к клину ЭЦР-зоне.

В **разделе 1.3** приводятся результаты исследования зависимости параметров плазмы от различных условий горения разряда. Измерение электронной температуры, плотности и потенциала плазмы в ловушке производилось с помощью электрического зонда Ленгмюра. Поведение вольт-амперной характеристики зонда отличается от идеализированного случая плоского зонда тем, что истинное насыщение на электронной ветке не достигается в эксперименте. Это обусловлено тем, что при наличии магнитного поля площадь противо-

зонда сравнима с площадью зонда – ток на электронной ветке ограничивается током ионов на противозонд. Соответственно, разработан способ вычисления указанных параметров плазмы в квазигазодинамическом режиме удержания по вольт-амперной характеристике зонда (только по ионной ветви), расположенного снаружи ловушки на ее оси симметрии. При определении характеристик плазмы предполагается изотропная функция распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) в виде суммы экспонент с разной температурой. Значения параметров ФРЭЭ определяются из условия квазинейтральности плазмы в пробке ловушки и условия равенства потоков ионов и электронов при плавающем потенциале зонда. Экспериментально показано, что двухтемпературная (бимаксвелловская) функция распределения реализуется при высоких давлениях напускаемого газа (более 0.16 мТорр). При давлении напускаемого газа 0.3 мТорр температура холодной компоненты электронов составляет 10 эВ, а температура горячей фракции – около 30 эВ. Доля горячих электронов невелика – она на 2 порядка меньше доли холодной фракции. Зависимость концентрации плазмы от длины разрядной камеры наиболее сильно выражена при малых давлениях (0.16 мТорр), а при высоких (0.4 мТорр) она менее выражена. На основании зондовых измерений возможно определить, насколько эффективно поглощается микроволновое излучение в приосевой части плазмы. Экспериментально показано, что удельные энергопотери из центральной области плазмы достигают значения в 12 Вт $см^{-3}$, что заметно ниже среднего удельного энерговклада по всей ловушке. Это свидетельствует о неоднородном профиле поглощения СВЧ-излучения плазмой – на периферии удельный энерговклад больше, так как излучение в плазму вводится снаружи со стороны боковых стенок разрядной камеры. Ионный состав плазмы измерялся путем извлечения ионного пучка и его анализа с использованием масс-спектрометра на основе поворотного магнита. Было продемонстрировано отсутствие примесей в пучке, что объясняется очищением поверхности разрядной камеры потоком плазмы при высоком удельном энерговкладе в разряд. Было также показано, что доля протонов в пучке составляет более 99 % в широком диапазоне параметров разряда, что является уникальным результатом, ранее не встречающимся на других установках.

В **разделе 1.4** приводится теоретическое моделирование процессов образования частиц в ходе реакций в водородной плазме, призванное показать близкое к 100 % содержание протонов в плазме при условиях горения разряда, реализуемых в эксперименте. Модель включает в себя условия баланса энергии и частиц. Учтены наиболее значимые объемные реакции диссоциации, ионизации, диссоциативной рекомбинации с участием электронов. Описаны потери частиц и энергии в плазме в квазигазодинамическом режиме. Модель является глобальной нульмерной, предполагается однородное распределение концентрации плазмы в ловушке. В качестве варьируемых параметров в модель входят удельный энерговклад и начальная концентрация молекул водорода, которые связаны с вкладываемой мощностью СВЧ-излучения и дав-

лением напускаемого газа. Результаты расчетов согласуются с экспериментами по измерению параметров разряда (концентрации плазмы, электронной температуры и доли протонов). В диапазоне значений внешних параметров, используемых в модели, наиболее интенсивно происходят реакции превращения атомов водорода в протоны путем ионизации электронным ударом и обратный процесс рекомбинации протонов на стенках камеры с образованием нейтральных атомов. Параметры магнитной ловушки (в частности, пробочное отношение) влияют на время удержания плазмы, причем увеличение пробочного отношения приводит к повышению доли протонов в разряде. В отличие от ЭЦР-ионных источников с нагревом на частоте 2.45 ГГц (в которых используются магнитные ловушки с близким к 1 пробочным отношением), на установке GISMO пробочное отношение равно 6, что, при сравнимом удельном энерговкладе, обеспечивает кратно меньшее содержание молекулярных ионов (для 2.45 ГГц ЭЦР-ионных источников доля протонов в пучке не превышает 90 %).

Во **второй главе** обсуждаются результаты экспериментов по формированию интенсивных ионных пучков из плазмы ЭЦР-разряда с высокой плотностью. Основные результаты главы 2 опубликованы в работах [4А–6А].

В **разделе 2.1** описываются аксиально симметричные электродные системы, применяемые в ионных источниках. Они могут включать от двух до пяти электродов. Перед разработчиками систем экстракции ионного пучка для инжекции в ускоритель обычно стоит задача получения пучка с определенной энергией, заданным током, малой угловой расходимостью и как можно лучшего качества. В ходе работы была предложена новая система формирования ионного пучка, характеризующаяся использованием электродов специальной формы (плазменный электрод имеет вытянутую в продольном направлении часть), которые образуют неоднородное электрическое поле в межэлектродном пространстве, усиленное вблизи плазменного мениска (условной границы, разделяющей плазму и ионный пучок). Это приводит к снижению пространственного заряда ионного пучка и позволяет эффективно формировать сильноточные ионные пучки (см. рис. 2).

Показано, что в новой геометрии возможно значительное (в несколько раз) увеличение апертуры пуллера по сравнению с плазменным электродом без ухудшения условий формирования ионного пучка. Экстрактор с неоднородным электрическим полем формирует ионные пучки высокой интенсивности с меньшим углом расходимости по сравнению с плоской геометрией. Установлено, что при наличии продольного магнитного поля (что характерно для ЭЦР-ионных источников) в новой геометрии при использовании пуллера с широкой апертурой повышается электропрочность межэлектродного зазора из-за эффекта магнитной изоляции. По следам от пробоев на плазменном электроде было установлено, что в плоской геометрии следы покрывают всю площадь электрода, а для экстрактора новой геометрии следы видны лишь на периферии. Это говорит о том, что пробойная искра распространяется вдоль

силовых линий магнитного поля по длинному пути, а не по кратчайшему расстоянию. Удалось подать напряжение в 49 кВ при расстоянии между электродами в 3 мм, что на 40 % больше предельного пробойного напряжения в 35 кВ для плоского экстрактора с тем же межэлектродным расстоянием.

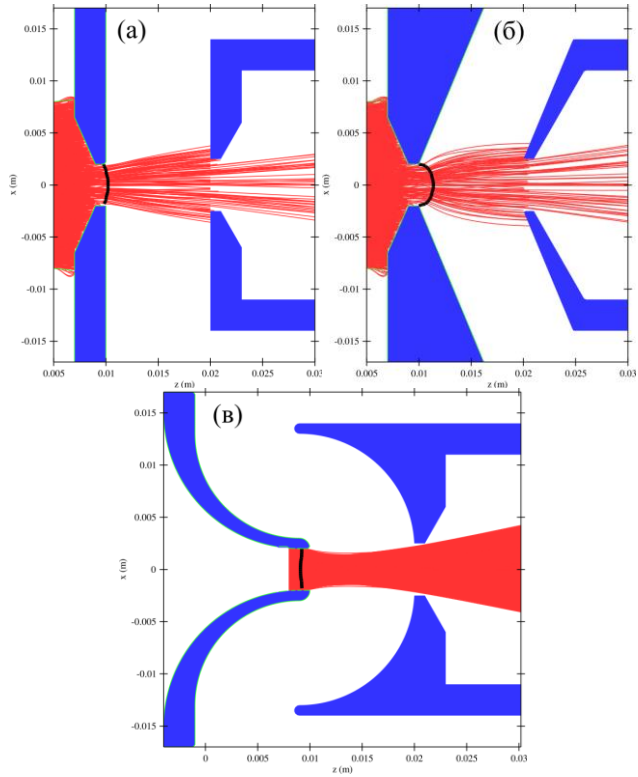


Рис. 2. Формирование ионного пучка в одинаковых условиях (ускоряющее напряжение, начальная плотность тока, геометрические параметры экстракторов) для плоской (*а*), пирсовой (*б*) геометрий и экстрактора с неоднородным полем (*в*). Синим цветом обозначены электроды, красным – траектории ионов, черной линией отмечен плазменный мениск

Также был исследован вопрос о влиянии протяженности внутреннего канала плазменного электрода в экстракторе с неоднородным полем на поток плазмы. Был проведен эксперимент по формированию ионных пучков с использованием систем экстракции с неоднородным электрическим полем, у которых варьировалась длина внутреннего канала плазменного электрода. Выяснилось, что увеличение протяженности внутреннего канала с 1 мм до 2 мм при апертуре плазменного электрода 2 мм приводит к снижению тока

насыщения на треть, поэтому при разработке плазменного электрода для экстрактора с неоднородным полем необходимо стремиться к снижению протяженности внутреннего канала электрода в месте с наименьшим диаметром.

Апробация системы формирования ионного пучка с неоднородным электрическим полем была проведена в экспериментах с импульсным режимом поддержания ЭЦР-разряда. В **разделе 2.2** описываются эксперименты по формированию ионного пучка на стенде SMIS 37 в импульсном режиме работы. Основной их целью было сравнение режимов формирования ионного пучка в плоском экстракторе и экстракторе с неоднородным электрическим полем.

В **подразделе 2.2.1** приводится краткое описание экспериментального стенда SMIS 37. Схема установки представлена на рис. 3. Плазма удерживается в магнитной ловушке типа пробкотрон (пробочное отношение равно 5, а расстояние между пробками – 250 мм), создаваемой парой соленоидов. Нагрев осуществляется излучением гиротрона на частоте 37.5 ГГц при мощности до 100 кВт в импульсном режиме с длительностью импульса до 1 мс и периодом следования около 20 с. С помощью греющего излучения создается плазма с плотностью на уровне $2 \cdot 10^{13}$ см$^{-3}$, температурой электронов порядка 50 эВ и степенью ионизации, близкой к 100 % и малым временем жизни (около 20 мкс). Такое сочетание параметров обеспечивает плотность ионного тока в пробке, превышающую 10 А см$^{-2}$. Для эффективного формирования пучка ионов плотность потока плазмы снижают примерно в 10 раз за счет выноса экстрактора в область слабого магнитного поля.

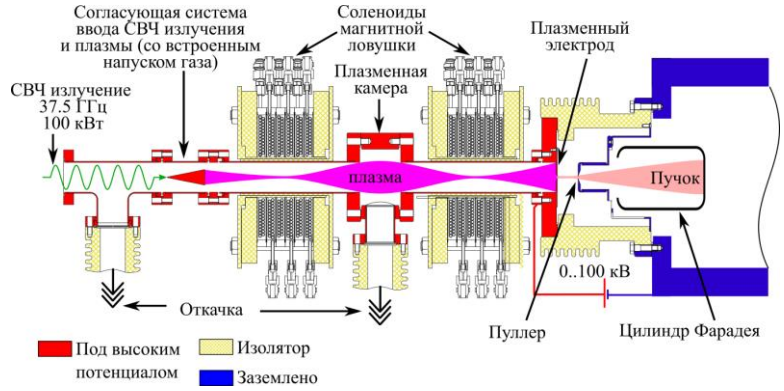


Рис. 3. Схема установки SMIS 37

В **подразделе 2.2.2** приводятся результаты экспериментов по формированию протонного пучка при помощи двухэлектродной системы экстракции в традиционной плоской геометрии и новым экстрактором с неоднородным полем. Были получены зависимости тока пучка на цилиндр Фарадея от напря-

жения экстракции. Можно выделить два характерных участка (см. рис. 4): область степенного роста тока при малых ускоряющих напряжениях (так называемый режим ограничения тока пространственным зарядом) и режим насыщения (область линейного роста тока пучка при высоком напряжении экстракции).

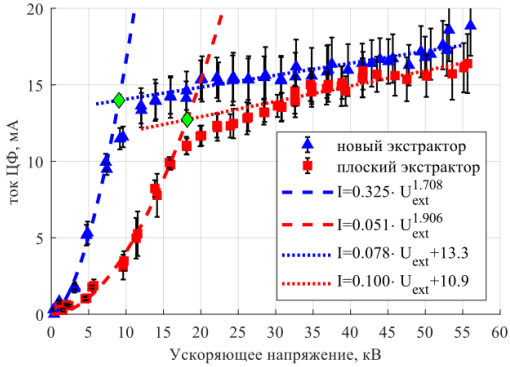


Рис. 4. Зависимость ионного тока на цилиндр Фарадея от напряжения экстракции. Синий график соответствует случаю экстрактора с неоднородным полем, а красный – плоской геометрии. Величина погрешности на графике соответствует среднеквадратичному отклонению сигнала тока на промежутке усреднения. Аппроксимационные линии отмечены пунктиром. Зеленым ромбом отмечены характеристические точки для каждого графика. Максимальная плотность тока пучка составила 250 мА см$^{-2}$

В режиме с умеренной эмиссионной способностью плазмы (около 250 мА см$^{-2}$) было показано, что оптимальное напряжение экстракции в новой геометрии в 2 раза ниже, чем в плоской геометрии при одинаковых параметрах экстракторов. Было экспериментально установлено, что зависимость тока пучка на цилиндр Фарадея от напряжения экстракции в области ограничения тока пространственным зарядом не соответствует закону Чайлда – Ленгмюра. Однако формирование пучков заряженных частиц в вакуумном диоде и ионного пучка из плазмы описывается одинаковой по виду системой уравнений Власова – Пуассона. Следовательно, для задачи извлечения ионного пучка с поверхности плазмы существует закон подобия по пространственному масштабу и по напряжению. В случае изменения только напряжения экстракции необходимо подстраивать параметры плазмы и внешнее магнитное поле для того, чтобы удовлетворить закону подобия. В условиях эксперимента такой подстройки не было реализовано, что объясняет отклонения показателя степени роста тока от 3/2. При малых напряжениях экстракции плазменный мениск является выпуклым, а ионный пучок сильно расходится и коллимируется электродами.

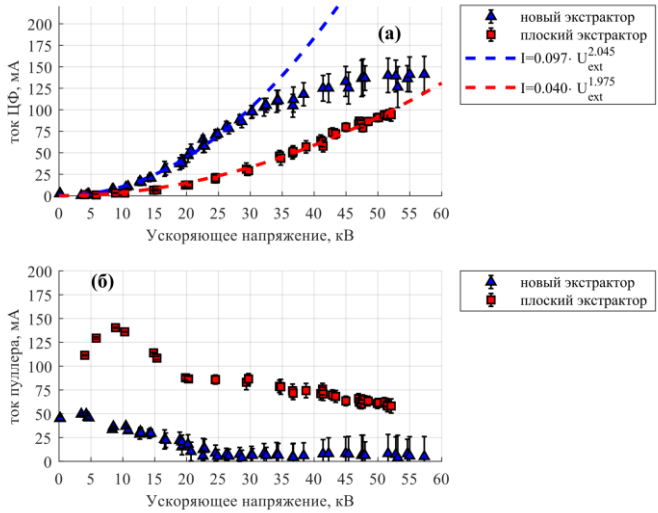


Рис. 5. Зависимость ионного тока на цилиндр Фарадея (*а*) и тока на пуллер (*б*) от напряжения экстракции. Величина погрешности на графике соответствует среднеквадратичному отклонению сигнала тока на промежутке усреднения. Плотность тока формируемого пучка составила более 700 мА см$^{-2}$

В режиме с высокой эмиссионной способностью плазмы (около 700 мА см$^{-2}$) для плоской геометрии в области доступных напряжений экстракции реализовывался лишь участок степенного роста тока, а для экстрактора с неоднородным полем наблюдался переход к области насыщения (см. рис. 5). Было показано, что новый экстрактор способен формировать ионные пучки с большим током при заданном ускоряющем напряжении, чем в плоской геометрии. При этом ток пучка на пуллер в геометрии с неоднородным полем был ниже, чем в плоском экстракторе. Отдельно была показана возможность формирования протонных пучков с рекордной для ЭЦР-ионных источников плотностью тока, которая составила 1.15 А см$^{-2}$ при ускоряющем напряжении 53 кВ.

В **разделе 2.3** описываются результаты экспериментов по формированию ионных пучков на стенде GISMO.

В **подразделе 2.3.1** исследуются параметры ионных пучков, получаемых при непрерывном режиме горения разряда. Был проведен эксперимент по формированию ионного пучка. Были записаны зависимости тока пучка на цилиндр Фарадея от напряжения экстракции, на которых можно выделить, по аналогии с установкой SMIS 37, участок со степенным ростом тока и линейный участок. Показатель степени при малых напряжениях экстракции на установке GISMO оказался выше, чем на установке SMIS 37, что связано с

большей протяженностью трассы распространения ионного пучка, а также с более сильным влиянием магнитного поля на распространение ионного пучка. При исследовании коэффициента наклона кривой тока в режиме насыщения оказалось, что он практически не зависит от условий горения разряда и определяется апертурой плазменного электрода. Медленный рост тока пучка объясняется деформацией эмитирующей поверхности – плазменный мениск становится вогнутым в сторону плазмы, увеличивая эффективную площадь сбора ионов. При сравнении экстракторов с разной апертурой плазменного электрода выяснилось, что при меньшем диаметре отверстия легче сформировать ионный пучок с той же плотностью тока (оптимальное напряжение экстракции снижается). Далее было исследовано, как длина разрядной камеры влияет на формирование ионного пучка. Напряжение экстракции было заведомо достаточным для работы в режиме ограничения тока эмиссионной способностью плазмы. Показано, что увеличение давления напускаемого газа с 0.16 мТорр до 0.4 мТорр приводит к снижению вариаций плотности потока плазмы в пробке, что говорит об уменьшении влияния длины резонатора разрядной камеры на условия горения разряда. Также была проведена оптимизация геометрических параметров системы формирования пучка и условий горения разряда с целью максимизации тока формируемого пучка на выходе из ионного источника. Наибольший ток был получен в экстракторе с неоднородным полем, он составил 105 мА. При этом диаметр отверстия плазменного электрода был равен 5 мм, и, соответственно, плотность тока ионов на срезе плазменного электрода превышала 500 мА см$^{-2}$.

В **подразделе 2.3.2** обсуждается вопрос о компенсации пространственного заряда пучка. При извлечении сильноточных ионных пучков значительное влияние на их распространение оказывает собственный объемный заряд, приводящий к разлету ионов и ухудшению качества пучка. Для нивелирования этого эффекта заряд пучка компенсируется электронами. Электроны образуются в ходе процессов ионизации остаточного газа ионным пучком.

Была проведена оценка степени компенсации пространственного заряда пучка (отношения концентрации электронов к концентрации ионов в пучке). Для этого была измерена ширина ионного пучка путем фотосъемки (см. рис. 6). Затем границы пучка восстанавливались в численных расчетах путем подбора степени компенсации, выступающей в качестве свободного параметра. В результате было установлено, что на установке GISMO реализуется высокая степень компенсации пространственного заряда на уровне 80 – 90 % при фоновом давлении в диагностической камере на уровне 10^{-6} Торр без дополнительного напуска газа.

В **подразделе 2.3.3** проводятся измерения функции распределения ионного пучка в фазовом пространстве поперечных координат и скоростей методом *pepper-pot*. На основе этих данных вычисляется среднеквадратичный нормализованный эмиттанс (формула (1) соответствует среднеквадратичному эмиттансу, а формула (2) его нормализации):

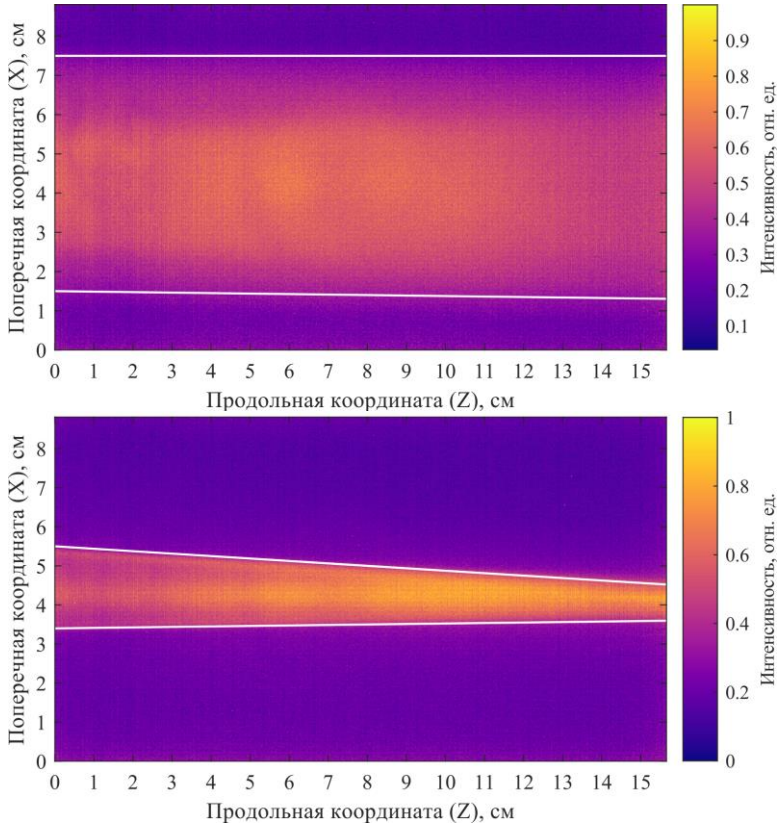


Рис. 6. Обработанные изображения свечения остаточного газа в диагностической камере при прохождении через него ионного пучка. Верхний рисунок соответствует энергии пучка 38 кэВ, а нижний – 28 кэВ. Ионный пучок распространяется слева направо. Белыми линиями показаны границы пучка

$$\varepsilon_{x-x',RMS} = \sqrt{\langle x^2\rangle\langle x'^2\rangle - \langle xx'\rangle^2} = \frac{1}{\sum\limits_i \rho_i}\sqrt{\sum_i \rho_i x_i^2 \sum_i \rho_i x_i'^2 - \left(\sum_i \rho_i x_i x_i'\right)^2}, \quad (1)$$

$$\varepsilon^{norm.}_{x-x',RMS} = \frac{p_z}{mc}\varepsilon_{x-x',RMS}, \quad (2)$$

где $\langle ... \rangle$ обозначает усреднение по ансамблю пучков (суммирование производится по всем пучкам, попавшим на сцинтиллятор), переменная x соответствует поперечной координате относительно направления распространения пучка, переменная x′ соответствует углу отклонения пучка в соответствующем направлении. Средние величины вычисляются с весовыми коэффициен-

тами ρ_i, соответствующими средней яркости пятна с номером «i» на сцинтилляторе. Предполагается, что распределение центрировано по переменным x, x′ (то есть $\langle x \rangle = 0$ и $\langle x' \rangle = 0$). Величина p_z обозначает продольный импульс частицы, m – ее массу покоя, c – скорость света в вакууме. Эмиттанс характеризует качество ионного пучка, его размер и разброс по поперечным скоростям. Измерения эмиттанса проводились при оптимальной геометрии экстрактора в режиме с максимальным током пучка. Минимальный среднеквадратичный нормализованный эмиттанс пучка составил около 0.2 π мм мрад, что сопоставимо с достижениями разработчиков передовых источников легких ионов.

В **третьей главе** обсуждается применение ЭЦР-ионного источника GISMO в качестве протонного инжектора для компактного источника нейтронов (КИН) DARIA. Схема ускорительной части источника показана на рис. 7. Основные результаты главы 3 опубликованы в работах [7А–10А].

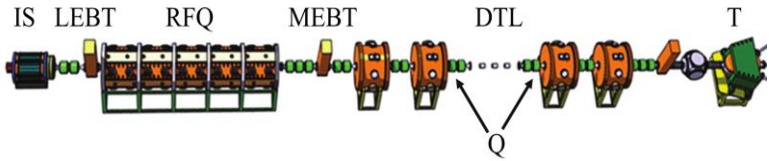


Рис. 7. Схема ускорительной части КИН DARIA. Обозначения: IS – ионный источник, LEBT – система транспортировки пучка низкой энергии, RFQ – структура с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой, MEBT – система транспортировки пучка средней энергии, DTL – секции ускорителя с трубками дрейфа, Q – квадрупольные линзы, T – мишенная сборка. Рисунок взят из работы [53]

В **разделе 3.1** описываются требования к протонному инжектору с точки зрения характеристик формируемого ионного пучка. Они определяются конструкцией ускорителя и предполагаемыми режимами работы нейтронного источника. В рамках проекта компактного источника нейтронов DARIA задаются допустимые значения энергии пучка (от 40 кэВ до 60 кэВ), его тока (более 100 мА), временной структуры импульсов (длительность около 100 мкс, период следования от 40 Гц до 100 Гц), ионного состава пучка (не менее 99 % протонов) и эмиттанса (не более 0.5 π мм мрад).

В **разделе 3.2** приводится описание модернизации непрерывного ионного источника GISMO для работы в импульсно-периодическом режиме. Среди возможных реализаций импульсного режима работы источника выбрано импульсное зажигание разряда при непрерывной подаче ускоряющего напряжения. Оно осуществлялось путем модуляции напряжения питания гиротрона. Было обнаружено существенное отличие характеристик ионного источника в импульсном режиме от непрерывной работы. Оптимальное давление напускаемого газа оказалось приблизительно в 3 раза ниже оптимума для не-

прерывного режима, а пиковый ток пучка (140 мА) на 30 % превысил максимальное полученное значение для непрерывного режима (105 мА). Это связано с другими газовыми условиями в плазменной камере – изначально в разрядной камере перед подачей СВЧ-излучения реализуется повышенное давление газа, из-за чего в первые несколько сотен микросекунд образуется плотная плазма и происходит формирование сильноточного ионного пучка. Затем избыточный газ эффективно выводится из разрядной камеры, что приводит к снижению концентрации плазмы и установлению стационарного режима работы уже с меньшим током приблизительно через 0.6 мс после зажигания разряда (рис. 8).

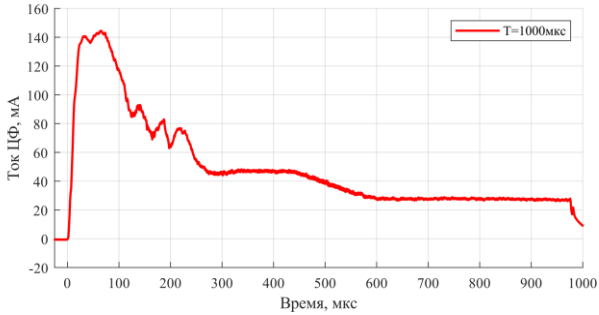


Рис. 8. Осциллограмма импульса тока на цилиндр Фарадея с длительностью 1 мс. Давление напускаемого газа составило 0.1 мТорр (в 3 раза меньше оптимального давления при непрерывном режиме горения), а мощность СВЧ-излучения равнялась 2.3 кВт

Таким образом, условия импульсного режима работы оптимальны для формирования коротких (с длительностью около 100 мкс) импульсов с высоким током.

В **разделе 3.3** проводилась оптимизация условий горения разряда и геометрических параметров системы формирования пучка. Варьировалось положение плазменного электрода, межэлектродное расстояние, апертура плазменного электрода и пуллера. В каждой конфигурации экстрактора находились оптимальные условия горения разряда. Получены протонные пучки с пиковым током до 140 мА при напряжении экстракции на уровне 44 кВ.

В **разделе 3.4** показано, что сформированный пучок в условиях с максимальным током удовлетворяет требованиям проекта по составу пучка (было достигнуто содержание протонов 99.6 %) и по эмиттансу (минимальное значение было равным 0.3 π мм мрад).

В **разделе 3.5** продемонстрирована возможность получения импульсов с частотой следования 100 Гц, что необходимо для проекта КИН DARIA.

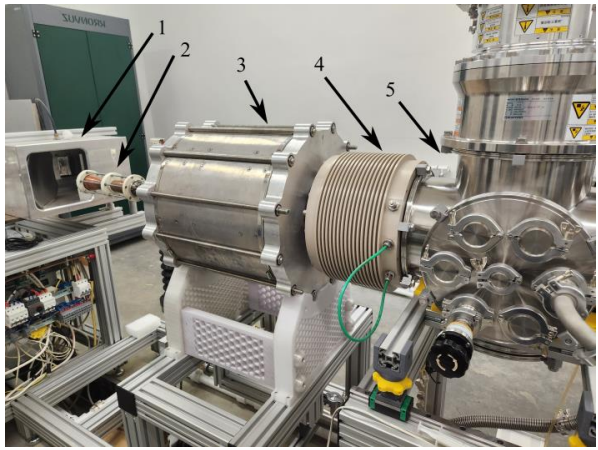


Рис. 9. Фотография новой магнитной системы, установленной на экспериментальном стенде. Обозначения: *1* – зеркальный квазиоптический преобразователь, *2* – плазменная камера, *3* – магнит, *4* – изолятор, *5* – диагностическая камера

В проекте КИН DARIA предполагается, в перспективе, повышение тока пучка на мишени. Для обеспечения возможностей по повышению тока формируемого пучка в инжекторе была разработана новая магнитная система для модернизированной установки GISMO, описанная в **разделе 3.6**. Пробка ловушки со стороны извлечения ионного пучка перенесена в расширитель плазменной камеры, что позволяет более удобно формировать пучок. Магнитная система была изготовлена и установлена на стенд (см. рис. 9). В перспективе это позволит повысить напряжение экстракции и эффективно извлекать сильноточные ионные пучки.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты работы

1. Показано, что система ввода СВЧ-излучения в плазму обеспечивает при всех используемых мощностях излучения (от 2 кВт до 10 кВт) эффективность согласования на уровне 60 % в условиях высокой плотности плазмы, близкой к критической.
2. Разработан метод определения параметров сильно неравновесной плазмы внутри магнитной ловушки ионного источника с квазигазодинамическим режимом удержания плазмы по вольт-амперной характеристике одиночного зонда, находящегося за пределами ловушки в потоке вытекающей плазмы.
3. Экспериментально и теоретически исследованы зависимости доли содержания атомарных ионов водорода в экстрагированных пучках ионов в зависимости от условий поддержания ЭЦР-разряда (мощности потока напускаемого

газа), найдены оптимальные режимы работы стенда GISMO, в которых доля атомарных ионов составляет 99.9 %.

4. Предложена и реализована новая система формирования интенсивных ионных пучков с неоднородным распределением электрического поля в зазоре между электродами экстрактора, обеспечивающая возможность, при фиксированном напряжении, формирования ионных пучков с бóльшим по сравнению с плоским экстрактором током. Показана возможность использования пуллера с большой апертурой, что обеспечивает повышение электропрочности межэлектродного зазора (вследствие эффекта магнитной изоляции) без ухудшения качества пучка. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что при формировании ионных пучков высокой интенсивности угол расходимости пучка в новой геометрии ниже, чем в плоской. С использованием новой системы формирования ионного пучка на стенде SMIS 37 был сформирован протонный пучок с рекордной для ЭЦР-ионных источников плотностью тока 1.15 А $см^{-2}$.

5. Проведена оптимизация условий горения разряда (давления напускаемого газа и мощности СВЧ-излучения) и геометрии экстрактора. В непрерывном режиме горения разряда на стенде GISMO был получен пучок с максимальным током 105 мА и среднеквадратичным нормализованным эмиттансом около 0.2 π мм мрад при энергии пучка 40 кэВ.

6. Экспериментально определена степень компенсации пространственного заряда пучков, извлекаемых при помощи двухэлектродной системы экстракции на стенде GISMO, которая оказалась на высоком уровне около 80 – 90 %.

7. Произведена модернизация ЭЦР-источника ионов GISMO для работы в импульсно-периодическом режиме в качестве протонного инжектора для российского проекта компактного источника нейтронов DARIA.

8. Экспериментально исследованы особенности импульсно-периодического режима поддержания разряда, найдены оптимальные по давлению напускаемого газа и мощности СВЧ-излучения условия его горения, обеспечивающие формирования протонных пучков с энергией 44 кэВ, в импульсе длительностью 100 мкс, среднеквадратичным нормализованным эмиттансом 0.3 π мм мрад, с долей протонов более 99 %, с рекордным, по сравнению с аналогами, уровнем тока 140 мА. Продемонстрирована возможность работы в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов 100 Гц. Предложенный протонный инжектор полностью удовлетворяет требованиям проекта российского компактного нейтронного источника на основе линейного ускорителя DARIA.

Список литературы

1. *Svarnas P.* Electron cyclotron resonance (ECR) plasmas: A topical review through representative results obtained over the last 60 years // Journal of Applied Physics. — 2025. — Vol. 137, no. 7.

2. *Lieberman M. A., Lichtenberg A. J.* Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. — Wiley, 2005. — P. 800.

3. *Geller R.* Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasmas. — Taylor & Francis, 1996. — ISBN: 9780750301077.

4. *Mascali D., Santonocito D.* The PANDORA project: A setup for in-plasma β-decay studies in nuclei of astrophysical interest // EPJ Web of Conferences. — 2023. — Vol. 275. — P. 01014.

5. *Henderson S. D.* Spallation Neutron Sources and Accelerator-Driven Systems // Reviews of Accelerator Science and Technology. — 2013. — Vol. 06. — P. 59–83.

6. *Batygin Y., Garnett R., Rybarcyk L.* Emittance Growth and Beam Losses in LANSCE Linear Accelerator // Proceedings of the 61st ICFA ABDW on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams. — 2018. — Vol. HB2018.

7. *Thomason J.W.G.* The ISIS Spallation Neutron and Muon Source—The first thirty-three years // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2019. — Vol. 917. — P. 61–67.

8. *Holtkamp N.* STATUS OF THE SNS* LINAC: AN OVERVIEW // Proceedings of LINAC2004. — 2004. — P. 837–841.

9. *Eshraqi M., Bustinduy I., Celona L. et al.* The ESS Linac // Proceedings of the 5th Int. Particle Accelerator Conf. — 2014. — Vol. IPAC2014.

10. *Friend M.* Beam Parameter Measurements for the J-PARC High-Intensity Neutrino Extraction Beamline // Proceedings of the 7th Int. Beam Instrumentation Conf. — 2019. — Vol. IBIC2018.

11. *Li H., Cao X., Chen W. et al.* The Status of CSNS Front End // Proceedings of the 29th Linear Accelerator Conf. — 2018. — Vol. LINAC2018.

12. *Kiyanagi Y.* Neutron applications developing at compact accelerator-driven neutron sources // AAPPS Bulletin. — 2021. — Vol. 31, no. 1.

13. *Knaster J., Garin P., Matsumoto H. et al.* Overview of the IFMIF/EVEDA project // Nuclear Fusion. — 2017. — Vol. 57, no. 10. — P. 102016.

14. *Mardor I., Aviv O., Avrigeanu M. et al.* The Soreq Applied Research Accelerator Facility (SARAF): Overview, research programs and future plans // The European Physical Journal A. — 2018. — Vol. 54, no. 5.

15. *Ratzinger U., Basten M., Chau L.P. et al.* THE DRIVER LINAC OF THE NEUTRON SOURCE FRANZ // Proceedings of IPAC2011. — 2011. — P. 2577–2579.

16. *Schweizer W., Ratzinger U., Klump B. et al.* A high intensity 200 mA proton source for the FRANZ-Project (Frankfurt-Neutron-Source at the Stern-Gerlach-

Center) // Review of Scientific Instruments. — 2014. — Vol. 85, no. 2. — P. 02A743.

17. *Pisent A., Fagotti E., Colautti P.* MUNES A COMPACT NEUTRON SOURCE FOR BNCT AND RADIOACTIVE WASTES CHARACTERIZATION // Proceedings of LINAC2014. — 2014. — P. 261–263.

18. *Kropachev G., Kulevoy T., Sitnikov A.* The Proton Linac for Compact Neutron Source Daria // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. — 2019. — Vol. 13, no. 6. — P. 1126–1131.

19. *Taskaev S., Berendeev E., Bikchurina M. et al.* Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target // Biology. — 2021. — Vol. 10, no. 5. — P. 350.

20. *Huang Z.-W., Wang J.-R., Wei Z. et al.* Development of a compact D-D neutron generator // Journal of Instrumentation. — 2018. — Vol. 13, no. 01. — P. P01013–P01013.

21. *Skalyga V., Izotov I., Golubev S. et al.* High yield neutron generator based on a high-current gasdynamic electron cyclotron resonance ion source // Journal of Applied Physics. — 2015. — Vol. 118, no. 9. — P. 093301.

22. *Scrivens R.* Classification of Ion Sources. — CERN Yellow Report CERN-2013-007, 2013. — P. 9–26.

23. *Zuo Ch., Li D., Chen D. et al.* Design of the RF negative hydrogen ion source at HUST // AIP Conference Proceedings. — 2018.

24. *Lei G. J., Yan L. W., Liu D. P. et al.* Development of megawatt radiofrequency ion source for the neutral beam injector on HL-2A tokamak // Nuclear Fusion. — 2021. — Vol. 61, no. 3. — P. 036019.

25. *Sorokin A., Belov V., Davydenko V. et al.* Characterization of 1 MW, 40 keV, 1 s neutral beam for plasma heating. // Review of Scientific Instruments. — 2010. — Vol. 81, no. 2. — P. 02B108.

26. *Rovey J. L., Ruzic B. P., Houlahan Th. J.* Simple Penning ion source for laboratory research and development applications // Review of Scientific Instruments. — 2007. — Vol. 78, no. 10. — P. 106101.

27. *Tarvainen O., Abel R., Lawrie S. et al.* Extending the pulse length of the ISIS H- Penning ion source // Review of Scientific Instruments. — 2019. — Vol. 90, no. 10. — P. 103311.

28. *Okamura M.* Laser ion source for heavy ion inertial fusion // Matter and Radiation at Extremes. — 2018. — Vol. 3, no. 2. — P. 61–66.

29. *Takahashi K, Sasaki T, Kikuchi T et al.* Extraction of ion beam from laser ion source for direct plasma injection scheme // Journal of Physics: Conference Series. — 2024. — Vol. 2743, no. 1. — P. 012060.

30. *Zhou B., Zhang H., Zhang P. et al.* Design and optimization study of a duoplasmatron ion source for high-intensity proton beam // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2021. — Vol. 1010. — P. 165550.

31. *Kuzumi T., Wada M.* Development of a miniaturized duoplasmatron ion source // Review of Scientific Instruments. — 2020. — Vol. 91, no. 1. — P. 013505.

32. *Fortgang C. M., Batygin Y. K., Draganic I. N. et al.* Design and fabrication of a duoplasmatron extraction geometry and LEBT for the LANSCE H+ RFQ project // Review of Scientific Instruments. — 2016. — Vol. 87, no. 2. — P. 02B907.

33. *Dimov G. I., Morozov I. I.* 50-A ion source IK-50 for AMBAL-M device // Review of Scientific Instruments. — 1990. — Vol. 61, no. 1. — P. 401.

34. *Gobin R., Beauvais P.-Y., Bogard D. et al.* High intensity ECR ion source (H+ , D+ , H−) developments at CEA/Saclay // Review of Scientific Instruments. — 2002. — Vol. 73, no. 2. — P. 922–924.

35. *Neri L., Celona L.* High stability microwave discharge ion sources // Scientific Reports. — 2022. — Vol. 12, no. 1.

36. *Ren H. T., Peng S. X., Lu P. N. et al.* Intense beams from gases generated by a permanent magnet ECR ion source at PKU // Review of Scientific Instruments. — 2012. — Vol. 83, no. 2.

37. *Kewlani H. M., Gharat S. H., Roychowdhury P. et al.* An experimental investigation of the proton fraction in a three electrode 2.45 GHz ECR ion source // Journal of Instrumentation. — 2024. — Vol. 19, no. 01. — P. T01006.

38. *Castro G., Mascali D., Gammino S. et al.* Overdense plasma generation in a compact ion source // Plasma Sources Science and Technology. — 2017. — Vol. 26, no. 5. — P. 055019.

39. *Wu W., Peng Sh., Zhang A. et al.* Theoretical and experimental study of the overdense plasma generation in a miniaturized microwave ion source // Journal of Applied Physics. — 2022. — Vol. 132, no. 8.

40. *Lyneis C. M., Leitner D., Todd D. S. et al.* Fourth generation electron cyclotron resonance ion sources (invited) // Review of Scientific Instruments. — 2008. — Vol. 79, no. 2. — P. 02A321.

41. *Mathew J. V., Bhattacharjee S.* Compact electrostatic beam optics for multi-element focused ion beams: Simulation and experiments // Review of Scientific Instruments. — 2011. — Vol. 82, no. 1. — P. 013501.

42. *Bekhterev V., Bogomolov S., Efremov A.* DEVELOPMENT OF THE NEW DECRIS-PM ION SOURCE // Proceedings of HIAT2015. — 2015. — P. 238–240.

43. *Kalvas T., Tarvainen O., Toivanen V. et al.* Design of a 10 GHz minimum-B quadrupole permanent magnet electron cyclotron resonance ion source // Journal of Instrumentation. — 2020. — Vol. 15, no. 06. — P. P06016–P06016.

44. *Skalyga V., Izotov I., Razin S. et al.* High current proton beams production at Simple Mirror Ion Source 37 // Review of Scientific Instruments. — 2014. — Vol. 85, no. 2. — P. 02A702.

45. *Bilheux H.* Initial Testing of the 6 GHz, All-Permanent Magnet, “Volume-Type” ECR ion Source // AIP Conference Proceedings. — 2003.

46. *Bokhanov A. F., Zorin V. G., Izotov I. V. et al.* Generation of dense multicharged ion flows from an ECR plasma confined in a quasi-gas-dynamic magnetic cusp trap // Plasma Physics Reports. — 2007. — Vol. 33, no. 5. — P. 347–355.

47. *Skalyga V. A., Izotov I. V., Sidorov A. V. et al.* Study of hydrogen ECR plasma in a simple mirror magnetic trap heated by 75 GHz pulsed gyrotron radiation // Review of Scientific Instruments. — 2017. — Vol. 88, no. 3. — P. 033503.

48. *Skalyga V. A., Izotov I. V., Golubev S. V. et al.* Gasdynamic electron cyclotron ion sources: Basic physics, applications, and diagnostic techniques // Review of Scientific Instruments. — 2022. — Vol. 93, no. 3. — P. 033502.

49. *Golubev S. V., Razin S. V., Vodopyanov A. V. et al.* Formation of Multicharged Ions in Plasma of ECR Discharge Sustained by Powerful Millimeter Wave Radiation in a Mirror Trap // Fusion Technology. — 1999. — Vol. 35, no. 1T. — P. 288–291.

50. *Skalyga V. A., Golubev S. V., Izotov I. V. et al.* High-Current Pulsed ECR Ion Sources // Plasma Physics Reports. — 2019. — Vol. 45, no. 10. — P. 984–989.

51. *Skalyga V. A., Bokhanov A. F., Golubev S. V. et al.* Status of the gasdynamic ion source for multipurpose operation (GISMO) development at IAP RAS // Review of Scientific Instruments. — 2019. — Vol. 90, no. 12. — P. 123308.

52. *Skalyga V. A., Izotov I. V., Mironov E. A. et al.* Design of permanent magnet trap for high current gasdynamic ECR ion sources with plasma heating by gyrotron radiation with frequency up to 45 GHz // AIP Conference Proceedings. — 2016.

53. *Kilmetova I. V., Kozlov A. V., Kropachev G. N. et al.* Hybrid Quadrupole Lens for the Focusing Channel of the DARIA Complex // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. — 2023. — no. 7. — P. 40–46.

Список публикаций автора по теме диссертации

1А. *Polyakov A. V., Izotov I. V., Skalyga V. A. et al.* Probe experiment on basic plasma parameter investigation in a quasi-gasdynamic ion source GISMO // Physics of Plasmas, 30 (4), 043519 (2023).

2А. *Vybin S. S., Izotov I. V., Golubev S. V. et al.* Pure proton beams production using dense ECR plasma // Physics of Plasmas, 33 (3), 033508 (2026).

3А. *Скалыга В. А., Изотов И. В., Выбин С. С. и др.* Применение плотной плазмы электронно-циклотронного резонансного разряда для генерации положительных и отрицательных ионов водорода // Письма в журнал технической физики, 49 (24), 35 (2023).

4А. *Vybin S. S., Skalyga V. A., Izotov I. V.* High current ion beam formation with strongly inhomogeneous electrostatic field // Plasma Sources Science and Technology. 29 (11), 11LT02 (2020).

5А. *Vybin S. S., Skalyga V. A., Izotov I. V. et al.* Experiments on intense ion beam formation with an inhomogeneous electric field // Plasma Sources Science and Technology. 30 (11), 125008 (2021).

6А. Патент RU 2726143 C1. Источник интенсивных пучков ионов на основе плазмы ЭЦР разряда, удерживаемой в открытой магнитной ловушке / *Выбин С. С., Изотов И. В., Сидоров А. В. и др.* Заявл. 26.12.2019. Опубл. 09.07.2020.

7А. *Skalyga V.A., Izotov I.V., Vybin S.S. et al.* Design of the Proton Injector for Compact Neutron Source DARIA // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 16 (3), 427-433 (2022).

8А. *Выбин С. С., Изотов И. В., Миронов Е. А. и др.* Оптимизация систем протонного инжектора компактного нейтронного источника DARIA // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. № 7. С. 4–19 (2023).

9А. *Vybin S. S., Izotov I. V., Skalyga V. A. et al.* Ion Beam Emittance Measurements of Proton Injector for Compact Neutron Source DARIA // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 18, 1615–1622 (2024).

10А. *Vybin S. S., Bokhanov A. F., Izotov I. V. et al.* Pulsed proton injector for compact neutron source DARIA // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1091, 171735 (2026).

ВЫБИН Сергей Сергеевич

ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ РАЗРЯД В НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ПРОТОННЫХ ПУЧКОВ

Автореферат

Подписано к печати 15.10.2026 г.
Формат 60×90¹⁄₁₆. Усл. печ. л. 2,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 25(2026).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46