

На правах рукописи



ФРОЛОВА Валерия Петровна

**ГЕНЕРАЦИЯ МНОГОЗАРЯДНЫХ И МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ
ИМПУЛЬСНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ НА ОСНОВЕ СИЛЬНОТОЧНОЙ
ВАКУУМНОЙ ДУГИ МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

01.04.04 - физическая электроника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

ТОМСК – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской Академии наук и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники".

Научный руководитель: **Юшков Георгий Юрьевич,**
доктор технических наук

Официальные оппоненты: **Паперный Виктор Львович,**
доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет», заведующий кафедрой общей и космической физики

Ремнёв Геннадий Ефимович,
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», заведующий научно-производственной лабораторией "Импульсно-пучковые, электроразрядные и плазменные технологии" Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

Защита состоится 08 июня 2018 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.031.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) по адресу: 634055, г. Томск, просп. Академический 2/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИСЭ СО РАН по адресу: 634055, г. Томск, просп. Академический 2/3.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор физико-математических наук



Рыжов В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Практический интерес к исследованию вакуумного дугового разряда определяется его использованием в установках нанесения покрытий на поверхность, в высокоточных коммутаторах, источниках пучков заряженных частиц и нейтронов. Привлекательность данного вида разряда для этих задач обусловлена его уникальными возможностями генерации плазмы высокой плотности, образующейся при практически полной ионизации материала катода в катодных пятнах вакуумной дуги. На протяжении ряда последних лет интерес к исследованию дуги связан с формированием на её основе высокоточных пучков многозарядных ионов металлов. Повышение зарядовых состояний ионов плазмы вакуумной дуги позволяет обеспечить увеличение энергии ионов в извлекаемом пучке без соответствующего повышения ускоряющего напряжения. Это делает оборудование для генерации таких пучков более компактным, менее затратным при изготовлении и рентгено-безопасным при эксплуатации. Ранее для повышения зарядовых состояний ионов в плазме вакуумного дугового разряда и, соответственно, в ионном пучке использовались следующие подходы: создание в катодной области разряда сильного аксиального магнитного поля, кратковременное приложение дополнительных импульсов тока дуги, инжекция в плазму разряда электронного пучка, а также нагрев электронов плазмы в условиях электронного циклотронного резонанса микроволновым излучением мощного гиротрона. Каждый из реализованных методов обеспечивает увеличение зарядности ионов в плазме вакуумного дугового разряда, но это увеличение достигается лишь в некоторых ограниченных пределах. В связи с этим, относительно новый и наименее экспериментально изученный метод генерации многозарядных ионов в высокоточной вакуумной дуге короткой длительности обладал большей перспективностью, а проведение исследований, направленных на дальнейшее увеличение зарядовых состояний ионов пучка с применением этого метода, являлось актуальной задачей физики вакуумных разрядов и ионных пучков.

Генерация многокомпонентных ионных пучков на основе вакуумной дуги расширяет область их технологического применения. Она осуществима при использовании в дуговой разрядной системе катода, выполненного из нескольких элементов, даже в том случае, если один из элементов материала катода в «чистом виде» не обладает достаточной для функционирования вакуумной дуги проводимостью. К такому случаю, в первую очередь, следует отнести бор, поскольку этот материал является одним из перспективных элементов для решения задач модификации поверхности. Именно бориды обладают высокой твердостью, износо- и коррозионной стойкостью. Вместе с тем, особенности функционирования дугового разряда с многокомпонентным катодом и взаимосвязь ионного и зарядового состава плазмы с условиями горения и параметрами разряда изучены недостаточно. Исследования, направленные на решение этих задач, важны как для понимания физических процессов генерации многоэлементной вакуумной дуговой плазмы, так и для получения многокомпонентных

ионных пучков.

Одним из методов получения импульсных потоков нейтронов является термоядерная реакция при взаимодействии ускоренных ионов дейтерия с мишенью, содержащей дейтерий или тритий. В системах на основе вакуумной дуги генерация ионов дейтерия осуществляется при использовании катода, насыщенного дейтерием. Повышение интенсивности потока нейтронов за импульс может быть обеспечено как увеличением длительности импульса тока ионного пучка, так и повышением доли ионов дейтерия в нем. Таким образом, более детальное исследование дугового разряда с дейтерированным катодом представляется актуальной задачей.

Цели и задачи работы заключались в комплексном изучении сильноточного вакуумного дугового разряда микросекундной длительности с металлическим, многоэлементным и газонасыщенным катодами для генерации на их основе многозарядных и многокомпонентных ионных пучков.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Определены условия, при которых в плазме сильноточной вакуумной дуги микросекундной длительности реализуется многократная ионизация, обеспечивающая генерацию пучков многозарядных ионов металлов с рекордными параметрами.

2. Выявлена взаимосвязь долевого соотношения ионов в плазме вакуумной дуги и их зарядового распределения со стехиометрическим составом материала катода и потенциалами ионизации каждого из его компонентов.

3. Показана возможность эффективной генерации широкоапертурного пучка ионов дейтерия микросекундной длительности в вакуумном дуговом источнике Mevva-V.Ru с газонасыщенным катодом.

Научная и практическая ценность работы определяется тем, что научные положения и выводы, сделанные на основании проведенных исследований, вносят вклад в понимание особенностей функционирования сильноточной вакуумной дуги микросекундной длительности с различными типами катодов и на их основе обеспечена генерация многозарядных и многокомпонентных ионных пучков. Исследования по диссертации были поддержаны грантами РФФИ № 14-19-00083 и № 16-19-10034, РФФИ № 14-08-00031_а и № 17-08-00133_а, а также стипендией Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам СП-2288.2018.2.

Практическое использование результатов, полученных при выполнении настоящей диссертационной работы, состоит в разработке и создании модернизированного вакуумного дугового источника ионов Mevva - V.Ru, поставленного по международному контракту в Национальный центр ядерных исследований Республики Польша (г. Отвоцк), а также источника сверхзвуковых потоков многозарядных ионов металлов, поставленного в Институт прикладной физики РАН (г. Н.-Новгород).

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается систематическим характером результатов исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных методик, прове-

дением измерений на различных экспериментальных установках, сопоставлением и удовлетворительным совпадением результатов экспериментов с результатами численных оценок, а также сравнением полученных результатов с результатами других исследователей, практической реализацией научных положений и выводов при создании конкретных устройств.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. При генерации ионных пучков в системах на основе сильнооточного вакуумного дугового разряда микросекундой длительности импульса кратный рост зарядовых состояний ионов обусловлен сжатием («пинчеванием») разряда собственным магнитным полем тока дуги. Перетяжка пинча образуется на расстоянии около одного сантиметра от катода в момент достижения амплитудой импульса тока дуги оптимального значения. Степень повышения зарядовых состояний ионов определяется материалом катода и параметрами разряда, и, например, в случае висмута максимальное зарядовое состояние ионов достигает $17+$ при средней зарядности этих ионов $12,6+$.

2. Для импульсного вакуумного дугового разряда с катодом, выполненным из материала, содержащего различные элементы, зарядовое распределение ионов в плазме и, соответственно, в извлеченном из нее ионном пучке, определяется потенциалами ионизации каждого из элементов, а долевое соотношение ионов этих элементов в пучке соответствует стехиометрическому составу материала катода. Так, например, для дуги с катодом из LaV_6 доля ионов бора в пучке составляет 86 %.

3. Для импульсной вакуумной дуги с газонасыщенным металлическим катодом, существенное превышение доли ионов газа в плазме по сравнению со степенью насыщения газом катода, а, следовательно, и доминирование газового компонента в извлеченном из плазмы ионном пучке, связано с выходом и последующей ионизацией атомов с поверхности катода, превышающей размеры катодного пятна. В случае катода из циркония, насыщенного дейтерием до 40 ат.%, это обеспечивает генерацию пучков с долевым содержанием ионов дейтерия уровня 80 %.

Апробация. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XXI и XXII Международных симпозиумах по разрядам и электрической изоляции в вакууме - ISDEIV (2014, г. Мумбаи, Индия; 2016, г. Суджоу, Китай); 42-ой и 44-ой Международных конференциях по физике мы - ICOPS (2015, г. Анталья, Турция; 2017, г. Атлантик-сити, США); XVI и XVII Международных конференциях по ионным источникам - ICIS (2015, г. Нью-Йорк, США; 2017, г. Женева, Швейцария); XII и XIII Международных конференциях по модификации материалов пучками частиц и потоками плазмы - EFRE (2014, 2016, г. Томск); XII и XIII Международных конференциях по газоразрядной плазме и ее применениям - GDP (2015, г. Томск; 2017, г. Новосибирск); XI и XIII Международных научно-практических конференциях «Электронные средства и системы управления» (2015, 2017, г. Томск).

Личный вклад автора диссертации состоит в модернизации экспериментальной установки, применительно к задачам работы, выборе методик проведе-

ния экспериментов, проведении исследований и анализе их результатов, воплощении результатов исследований в разработанных устройствах. Автором самостоятельно выдвинуты защищаемые научные положения, сделаны выводы по работе, которые вносят существенный вклад в понимание физических процессов в импульсном вакуумном дуговом разряде. Обсуждение задач исследований, методов их решения и результатов анализа экспериментальных данных проводилось совместно с соавторами, фамилии которых указаны в опубликованных по теме диссертации работах.

Публикации. По результатам исследований по теме диссертации опубликовано 28 печатных работ: 16 статей в рецензируемых журналах, из которых 13 статей входят в список ВАК; 12 публикаций в трудах международных симпозиумов и конференций.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 135 страниц текста, 65 рисунков, 4 таблицы и список литературы из 173 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновываются актуальность, цели и задачи работы, научная новизна, научная и практическая ценности работы, а также достоверность результатов исследований. Отмечен личный вклад автора. Кратко излагается содержание диссертации. Представлены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава «Процессы генерации ионных пучков в источниках на основе вакуумного дугового разряда» посвящена критическому обзору научных публикаций по тематике диссертации.

Раздел 1.1 посвящен анализу физических особенностей генерации и параметров плазмы вакуумного дугового разряда. Рассмотрены процессы, протекающие в катодном пятне вакуумной дуги, и эмиссионный метод исследования плазмы разряда. На основе анализа данных для практически всех металлов, использовавшихся в качестве материала катода вакуумной дуги, продемонстрирована связь средней зарядности ионов плазмы дуги с её напряжением горения и температурой электронов. Показано, что плазма вакуумного дугового разряда содержит многозарядные ионы и обладает высокой ионно-эмиссионной способностью. Сделан вывод о эффективности использования плазмы дуги для задач генерации широкоапертурных ионных пучков.

В **разделе 1.2** рассмотрены практические аспекты формирования ионных пучков на основе вакуумного дугового разряда, проведено сравнение параметров вакуумных дуговых источников ионов, и выделены их конструктивные особенности. Показано, что такие источники способны обеспечить эффективную генерацию пучков ионов любых твердотельных электропроводных материалов, а так же гибридных пучков ионов газа и металла, что делает этот тип источников универсальным устройством для решения широкого круга задач ионно-пучковой модификации поверхности. Отмечается, что увеличение заря-

довых состояний ионов в плазме дуги приводит к увеличению их энергии в пучке и, тем самым, расширяет технологические возможности вакуумных дуговых ионных источников.

Раздел 1.3 посвящен сравнительному анализу методов повышения зарядовых состояний ионов металлов, реализованных в ионных источниках на основе вакуумного дугового разряда: приложения к разрядному промежутку дополнительного импульса тока, создания в катодной области сильного магнитного поля индукцией ≥ 1 Тл, инъекции в плазму разряда импульсного электронного пучка, реализации сильноточной (единицы килоампер) вакуумной дуги короткой (единицы микросекунд) длительности, нагрева плазмы излучением мощного импульсного гиротрона с частотой 75 ГГц в открытой магнитной ловушке. Достигнутые этими методами средние зарядности ионного пучка $\langle Q_i \rangle$ и максимальные зарядовые состояния ионов Q_{imax} в нем представлены в Табл. 1, на примере ионов висмута и платины. Сделан вывод, о перспективности проведения исследований сильноточной вакуумной дуги короткой длительности с целью дальнейшего повышения зарядовых состояний ионов пучка, генерируемого на основе этой формы разряда.

Таблица 1. Методы увеличения зарядовых состояний ионов в вакуумных дуговых ионных источниках.

Метод	Катод	$\langle Q_i \rangle$	Q_{imax}
Вакуумный дуговой ионный источник с параметрами разряда: 200 А, 250 мкс; измерения на 150 мкс	Ві	1,2+	2+
	Pt	2,1+	3+
Дополнительный импульс тока	Pt	2,5+	4+
Создание сильного магнитного поля в катодной области	Ві	2,7+	4+
Инжекция в плазму электронного пучка	Ві	3,5+	7+
Сильноточная вакуумная дуга короткой длительности	Pt	6,7+	10+
Нагрев плазмы СВЧ излучением гиротрона с частотой 75 ГГц	Pt	7,1+	10+

В разделе 1.4 рассмотрен вопрос генерации многокомпонентного ионного пучка при использовании в качестве катода вакуумного дугового источника ионов материала сложного состава. Показано, что использование катода из дейтерида металла обеспечивает генерацию содержащих ионы этого изотопа водорода пучков, применяемых для генерации нейтронных потоков. Перспектива исследования вакуумной дуги с катодом на основе соединений бора, например, гексаборида лантана - LaB_6 , обоснована возможностью генерации пучков, содержащих ионы бора, для задач модификации поверхности. Сделан вывод, что вопрос о получении в таких пучках максимальных долей ионов дейтерия и бора, их корреляции с атомарными долями этих элементов в материале катода требует проведения детального экспериментального исследования.

В разделе 1.5 приведены выводы по первой главе и сформулированы задачи исследований.

Вторая глава «Генерация пучков многозарядных ионов металлов в источнике на основе сильноточной вакуумной дуги короткой длительности импульса» посвящена экспериментальным исследованиям, направленным на увеличение зарядовых состояний ионов пучка, генерируемого на основе разрядной системы с характерными параметрами импульса дуги: длительность - единицы

микросекунд, амплитуда тока - единицы килоампер. В ней рассмотрены вопросы влияния магнитного поля в катодной области разряда на зарядовые состояния ионов материала катода, приведены результаты оптимизации параметров импульса дуги, выявлены особенности физического механизма, ответственного за генерацию ионов с высокими зарядовыми состояниями, представлены параметры широкоапертурных пучков многозарядных ионов металлов.

Раздел 2.1 посвящен методике и технике экспериментальных исследований. Приведено описание экспериментального стенда, конструкции, принципов функционирования и параметров ионного источника (рис. 1) и эксперимен-

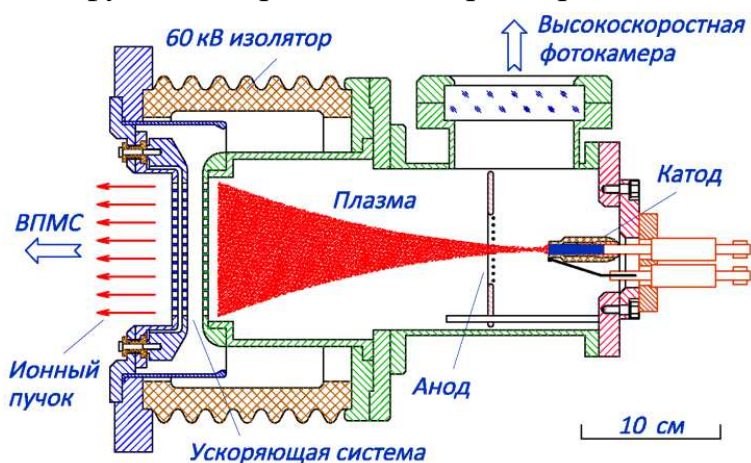


Рис. 1. Обобщенная схема экспериментального вакуумного дугового ионного источника.

тальных разрядных систем, особенностей диагностического оборудования. Рассмотрен принцип работы времяпролетного масс-спектрометра (ВПМС), использовавшегося для изучения распределения ионного пучка по зарядовым состояниям. Приведены формулы для определения отношения массы к зарядовому состоянию ионов M_i/Q_i по времени их пролета t_i базы спектрометра $L=1$ м, а также по временному интервалу Δt между t_i и аналогичной величиной для ионов с известным отношением M_d/Q_d :

$$\frac{M_i}{Q_i} = \frac{2eU_{acc}t_i^2}{L^2} \quad \text{и} \quad \frac{M_i}{Q_i} = \left(\frac{t_i \sqrt{M_d/Q_d}}{t_i + \Delta t} \right)^2 \quad (1)$$

где U_{acc} - ускоряющее напряжение, e - элементарный заряд. Представлены масс-зарядовые спектры ионного пучка и рассмотрена методика их анализа. Приведены типичные импульсы тока вакуумной дуги и тока ионного пучка. Показано, что, вследствие "разброса" ионов по скоростям и направлениям движения, в плазме разряда длительность импульса тока ионного пучка существенно больше, чем тока дуги. Например, при длительности импульса (ширина на полувысоте) тока дуги 3 мкс и его амплитуде 3 кА, импульс полного тока пучка ионов свинца имел, при ускоряющем напряжении 60 кВ, длительность 8 мкс и амплитуду 0,6 А (рис. 2). Сделан вывод, что созданный комплекс экспериментального и диагностического оборудования позволяет проводить исследования по генерации пучков многозарядных ионов на основе сильноточного вакуумного дугового разряда с микросекундной длительностью импульса.

В разделе 2.2 представлены результаты исследований по генерации многозарядных ионов в плазме сильноточной вакуумной дуги короткой длительности с внешним магнитным полем уровня 0,5 Тл в катодной области разряда. На основе экспериментов, проведенных с двумя разрядными системами, показано, что магнитное поле приводило к незначительному повышению средней зарядности ионов металла пучка, приблизительно на 20 - 30 % (рис. 3). Сделан вы-

вод, что создание сильного магнитного поля в катодной области сильноточного вакуумного дугового разряда с короткой длительностью импульса не приводит, в отличие от вакуумной дуги с большей длительностью импульса, к значительному увеличению зарядовых состояний ионов и, таким образом, такой подход не является оптимальным.

Раздел 2.3 посвящен оптимизации параметров импульсной вакуумной дуги без магнитного поля, направленной на достижение максимальных зарядовых состояний ионов материала катода. Экспериментально показано, что ионы с наиболее высокими зарядовыми состояниями регистрируются в начале импульса тока ионного пучка (см. рис. 2), а "хвост" импульса образован ионами с существенно меньшими зарядовыми состояниями. Обнаружено, что степень увеличения зарядовых состояний ионов имеет немонотонную зависимость от амплитуды импульса тока дуги (табл. 2). Оптимальное значение амплитуды тока дуги I_{opt} , при котором степень увеличения зарядовых состояний ионов наибольшая, было определено для всех исследуемых материалов катода вакуумной дуги (табл. 3).

Сделано предположение о связи оптимального тока дуги с импульсным нагревом поверхности катода. При этом, испарение с поверхности катода тонкого слоя материала и десорбция из него остаточных газов, адсорбированных в промежутке между импульсами дуги, приводит к уменьшению зарядовых состояний ионов металла за счет снижения температуры плазмы при ионизации нейтралов и интенсификации процессов перезарядки высокозарядных ионов металла на нейтралах и ионах остаточного газа. Возможность реализации такого механизма подтверждается изменением состава плазмы дуги и микрорельефа рабочей поверхности

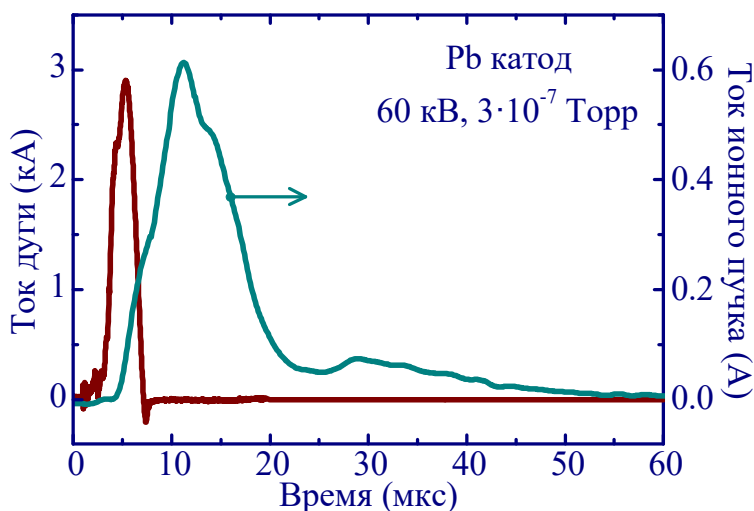


Рис. 2. Импульсы токов дуги и ионного пучка.

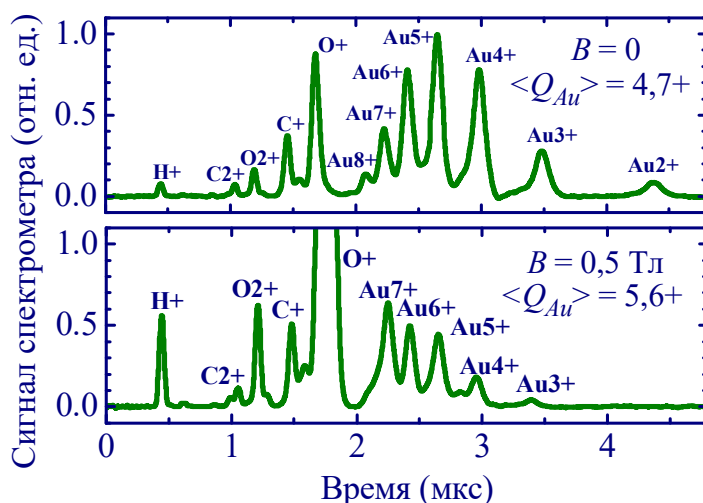


Рис. 3. Состав ионного пучка без магнитного поля (вверху) и с магнитным полем (внизу).

Табл. 2. Максимальная Q_{max} , наиболее вероятная Q_{mp} и средняя $\langle Q_i \rangle$ зарядности ионов висмута от амплитуды импульса тока дуги I_{max} длительностью 3 мкс.

I_{max} , кА	Q_{max}	Q_{mp}	$\langle Q_i \rangle$
1,0	5+	3+	2,9+
3,1	12+	7+	7,7+
8,6	9+	6+	6,8+

Табл. 3. Оптимальный ток дуги и зарядности ионов для различных материалов катода. Длительность импульса - 2 мкс.

Катод	I_{opt} , кА	Q_{max}	Q_{mp}	$\langle Q_i \rangle$
Mg	5,0	4+	3+	2,8+
Al	5,0	4+	3+	2,8+
Zr	4,5	5+	4+	4,3+
Sn	4,3	8+	6+	5,8+
Ta	4,0	11+	8+	8,0+
Au	3,7	12+	9+	8,7+
Pb	3,6	13+	9+	8,2+
Bi	3,5	14+	10+	9,7+

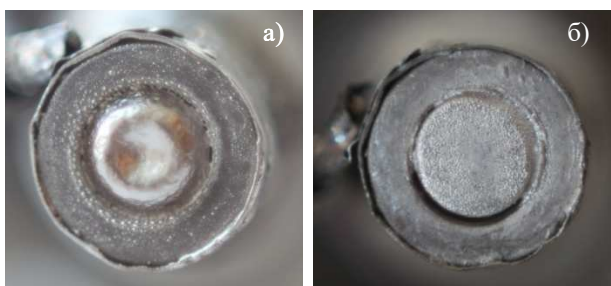


Рис. 4. Катоде из висмута: а – дуга с током 2,5 кА $< I_{opt}$, прошедший заряд -30 Кл; б – 5,3 кА $> I_{opt}$, 8 Кл. Длительность импульса – 6 мкс.

катода (рис. 4), на которой, при превышении тока дуги свыше I_{opt} , появляются следы оплавления. В приближении диффузии тепла сделаны оценки глубины расплавленного слоя l поверхности катода:

$$l = \sqrt{\lambda\tau/\rho C}, \quad (2)$$

где λ - коэффициент теплопроводности (Вт/м·К), τ - время температурного воздействия (с), ρ - плотность катода (кг/м³), C - удельная теплоемкость материала катода (Дж/кг·К). Величина l для условий рис. 4.а составила около 10 мкм.

Отметим, что оплавление рабочей поверхности катода наблюдалось не только для висмута, но и для более тугоплавкого металла - тантала.

Исследования влияния протяженности разрядного промежутка в разрядной системе с перемещаемым плоским сетчатым анодом показали, что увеличение разрядного промежутка с 3 до 46 мм приводит к росту максимальных зарядовых состояний ионов висмута Q_{max} с 7+ до 12+, причем рост замедляется

на расстояниях свыше 10 мм. С использованием метода ограничения амплитуды импульса тока дуги при шунтировании промежутка управляемым разрядником, вносящим малые искажения в форму импульса до момента его срабатывания, показано, что генерация ионов наиболее высоких зарядовых состояний осуществляется при достижении импульсом тока дуги амплитудного значения, равного I_{opt} для данного материала катода и параметров импульса.

При выявленных оптимальных условиях генерации высокозарядных ионов были проведены исследования по влиянию длительности импульса разряда t_{pulse} на зарядовые состояния ионов (табл. 4). В результате было показано, что, например, в случае катода из висмута максимальное зарядовое состояние ионов

Табл. 4. Оптимальный ток дуги и зарядности ионов висмута для различных длительностей импульса.

t_{pulse} , мкс	I_{opt} , кА	Q_{max}	Q_{mp}	$\langle Q_i \rangle$
6	3,9	13+	10+	9,1+
2	3,5	14+	10+	9,7+
1	3,3	17+	12+	12,6+
0,7	3,0	16+	14+	14,4+

этого материала в извлеченном ионном пучке было увеличено вплоть до 17+ (рис. 5) при средней зарядности ионов свыше 12,6+. Значительное увеличение максимального и среднего зарядового состояния ионов материала катода вакуумной дуги было достигнуто и для других материалов катода вакуумной дуги, а именно для магния, алюминия, циркония, олова, тантала, золота, свинца.

Раздел 2.4 представляет собой анализ особенностей процессов генерации многозарядных ионов металлов в сильноточной вакуумной дуге короткой длительности импульса. Показано, что кажущееся противоречие между появлением ионов с максимальными зарядовыми состояниями в начале импульса тока ионного пучка и генерацией их в максимуме импульса тока разряда объясняется связью направленных скоростей ионов в

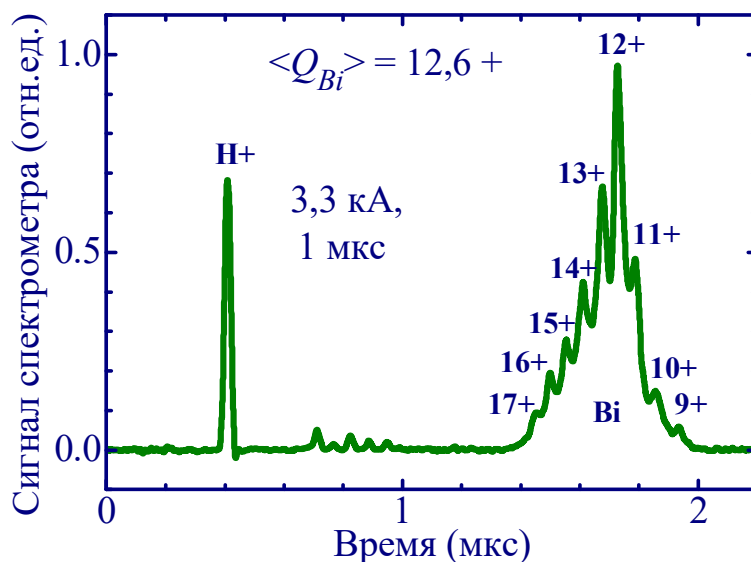


Рис. 5. Масс-зарядовый состав пучка ионов висмута.

плазме дуги и средней зарядностью ионов плазмы, поскольку оба эти параметра определяются температурой плазмы разряда. В результате реализуется ситуация, когда более высокозарядные ионы, появляющиеся приблизительно в середине импульса тока дуги, обладают более высокими направленными скоростями в плазме, первыми достигают области эмиссии, удаленной от катода на 10 - 15 см, и поэтому регистрируются в начале импульса тока ионного пучка.

Особенности эволюции зарядовых состояний ионов материала катода в течении импульса тока дуги и их зависимость от протяженности разрядного промежутка, наблюдаемые в эксперименте, логично объясняются реализацией процесса сжатия (пинчевания) плазмы разряда собственным азимутальным магнитным полем при достижении импульсом тока дуги максимума. Пинчевание разряда также объясняет слабое влияние магнитного поля на увеличение зарядовых состояний ионов (раздел 2.2), поскольку "вмороженное" в плазму внешнее магнитное поле препятствует её сжатию. И, наконец, увеличение степени сжатия плазмы собственным магнитным полем разряда при увеличении его тока объясняет рост зарядовых состояний ионов при токах дуги ниже I_{opt} . Для подтверждения этого механизма было осуществлено фотографирование процесса пинчевания плазмы четырехканальной высокоскоростной фотокамерой HSFC-Pro с наносекундными временами экспозиции. В результате было показано, что сжатие плазмы разряда действительно наблюдается при достижении импульсом тока дуги максимума, а перетяжка пинча диаметром около 2 мм образуется на характерных расстояниях 10 мм от поверхности катода (фотография 2, рис. 6b). Сопоставление фотографий плазмы и масс-зарядовых спектров ионного пучка показало, что именно пинчевание разряда приводит к появлению ионов материала катода с высокими зарядовыми состояниями.

В разделе 2.5 приведены выводы по второй главе.

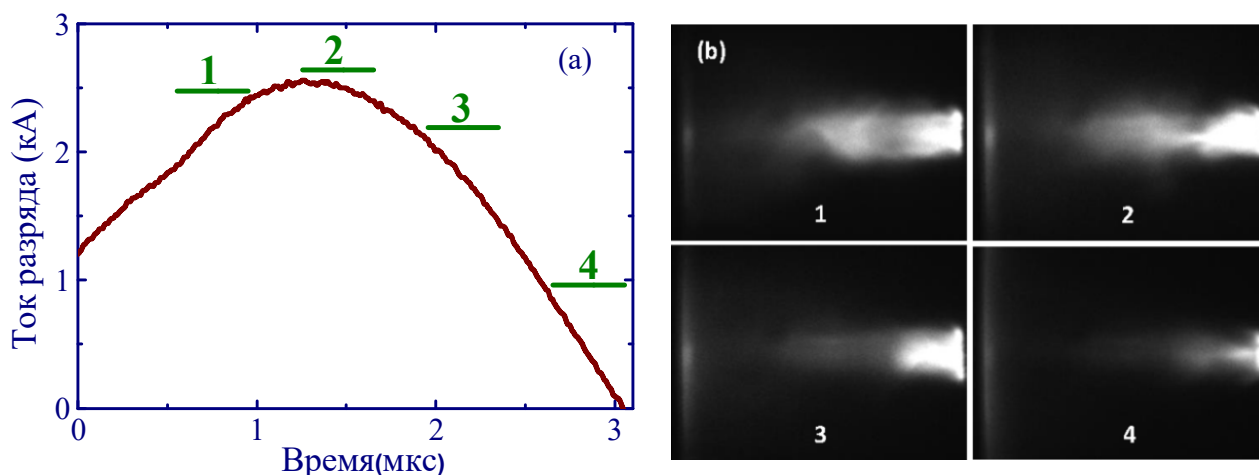


Рис. 6. Импульс разрядного тока и экспозиции снимков (а). Фотографии плазмы в видимом свете (b): катод из висмута \varnothing 6 мм – справа, сетчатый анод – слева, расстояние между ними – 46 мм.

Третья глава «Исследование масс-зарядового состава плазмы вакуумного дугового разряда с многокомпонентными катодами», посвящена изучению плазмы разряда с катодом из материала, включающего пары элементов типа "металл-газ", "металл-неметалл" и "металл-металл", а так же генерации на основе такого разряда многокомпонентных импульсных ионных пучков. В качестве модельных материалов катода использовались: цирконий, насыщенный дейтерием, гексаборид лантана и сплавы олова и свинца с различным долевым соотношением этих металлов.

В *разделе 3.1* рассмотрены особенности конструкции катодных узлов экспериментального ионного источника с катодами, выполненными из приведенных выше материалов. Приведены типичные импульсы токов вакуумной дуги и ионного пучка, а так же масс-зарядовые спектры ионного пучка для каждого типа катода.

Раздел 3.2 посвящен экспериментальным исследованиям вакуумного дугового разряда с катодом из циркония, насыщенного дейтерием до уровня 40 ат.%. Типичный масс-зарядовый спектр ионного пучка в случае такого катода приведен на рис. 7. Показано, что для вакуумной дуги с длительностью импульса 250 мкс и амплитудой тока 100 - 300 А, доля ионов дейтерия в плазме разряда зависит от тока дуги, максимальна в начале импульса, а ее суммарная за весь импульс величина достигает 50 %.

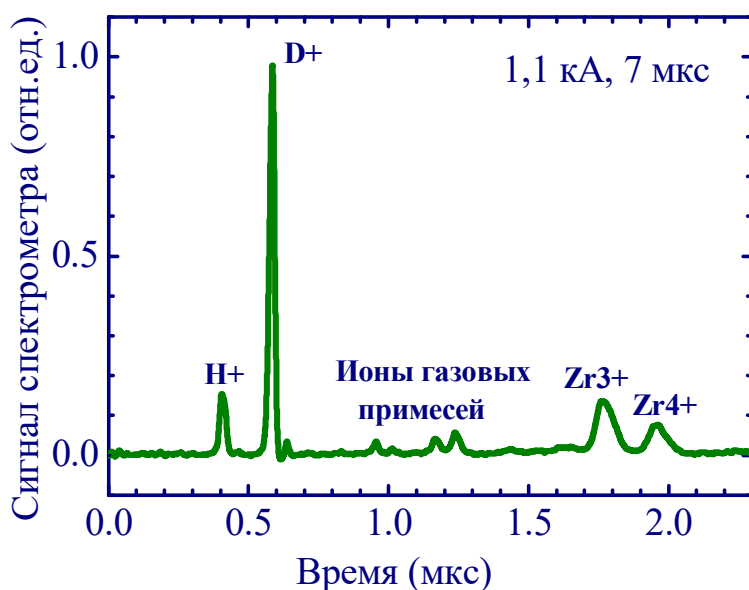


Рис. 7. Масс-зарядовый состав ионного пучка в случае катода из циркония, насыщенного дейтерием.

На основании исследования

ний разрядов с более короткими длительностями импульсов t_{pulse} установлено, что для t_{pulse} уровня единиц микросекунд и диапазона амплитуд токов дуги 0,6 - 1,3 кА суммарная доля ионов дейтерия вдвое превышает количество атомов дейтерия в катоде и составляет более 80 % (рис. 8). Такое высокое содержание ионов дейтерия в плазме дуги достигается за счет совместного влияния двух процессов: выхода атомов дейтерия не только с поверхности катода, но и из его объема, нагреваемого катодным пятном, и эффективной ионизации дейтерия при более высокой температуре плазмы, реализуемой при относительно короткой длительности импульса.

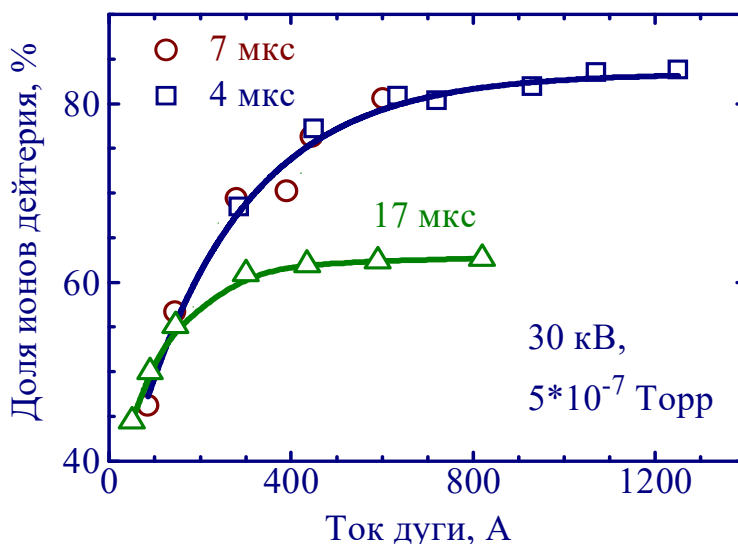


Рис. 8. Зависимость суммарной доли ионов дейтерия за импульс тока ионного пучка от тока дуги при её различных длительностях.

Раздел 3.3 посвящен исследованию масс-зарядового состава плазмы дуги с катодами, выполненными из модельного сплава олова и свинца. На основе экспериментов, проведенных при использовании катодов из олова и свинца, а также их сплавов с различными соотношениями этих металлов, показано, что напряжение горения вакуумного дугового разряда определяется энергией связи атомов в катоде, а не, например, его температурой плавления, которая для оловянно-свинцовых сплавов имеет немонотонную зависимость от относительной концентрации компонентов. Определено, что соотношение долей ионов олова и свинца в плазме дуги с катодом из их сплава всегда соответствует стехиометрическому составу катода. Показано, что в случае сильноточного вакуумного дугового разряда короткой длительности импульса с катодом из сплава появление максимальных зарядовых состояний ионов каждого металла в плазме разряда определяется его потенциалами ионизации.

В разделе 3.4 рассмотрены процессы генерации плазмы и пучков на основе вакуумной дуги с борсодержащим катодом. Показано, что для вакуумного дугового разряда с длительностью импульса 250 мкс во всем диапазоне исследуемых токов разряда (50 - 100 А), суммарные доли ионов бора за импульс в случае катодов выполненных из LaB_6 и CB_4 , составляют 86 ± 2 % и 80 ± 2 %, соответственно, что совпадает с содержанием атомов бора в материалах катодов.

При исследовании вакуумной дуги с катодом из гексаборида лантана и импульсами тока разряда меньшей длительности (7 - 14 мкс) найдено, что доля ионов бора в плазме разряда существенно изменяется в течении импульса тока ионного пучка. В начале импульса доля ионов бора превышает долю ионов лантана, а в конце импульса эти доли приблизительно равны (рис. 9). Показано, что такое изменение состава пучка связано с более высокими направленными

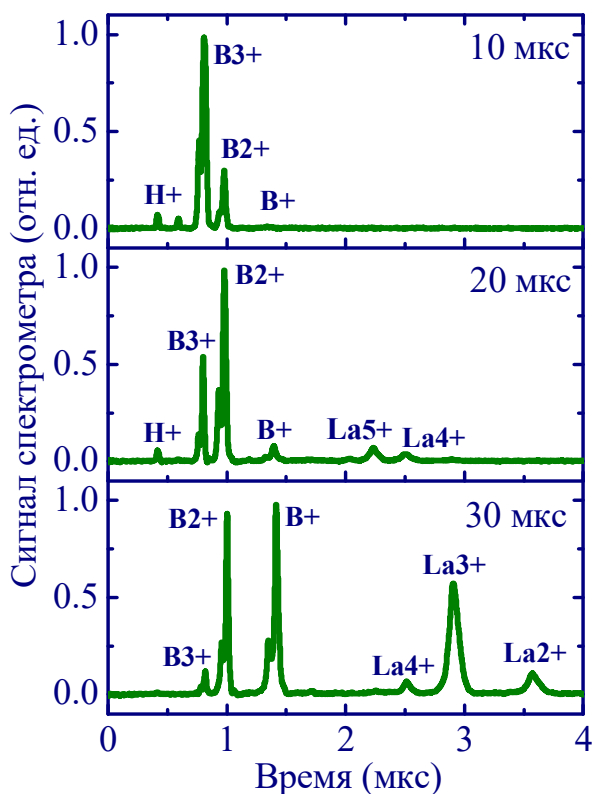


Рис. 9. Масс-зарядовый спектр ионного пучка в случае катода из LaB_6 . Импульс тока дуги - 700 А, 7 мкс.

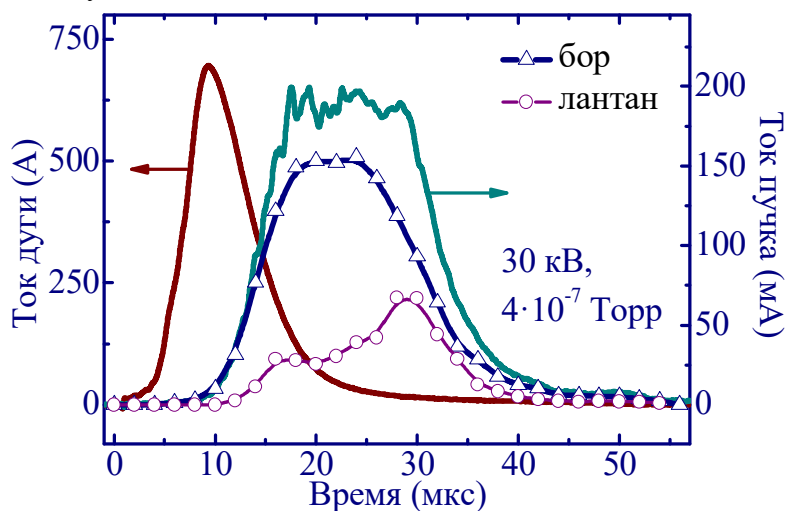


Рис. 10. Импульс тока разряда, соответствующий ему импульс тока ионного пучка и составляющие ионного тока: токи ионов бора и лантана.

скоростями ионов бора в плазме разряда. Проведение детальных измерений масс-зарядового состава ионного пучка, генерируемого на основе вакуумной дуги с катодом из гексаборида лантана, позволило выявить динамику изменения токов ионов бора и ионов лантана в течении импульса тока ионного пучка (рис. 10). В результате было показано, что, как и в случае вакуумной дуги большей длительности, суммарная доля ионов бора в пучке, а соответственно и в плазме разряда, составляет $86 \pm 3\%$. Найдено, что для вакуумной дуги с катодом из гексаборида лантана появление максимальных зарядовых состояний ионов бора и лантана в плазме разряда определяется, как и в случае катода из сплава олова и свинца, потенциалами ионизации компонентов, входящих в материал катода.

В *разделе 3.5* приведены выводы по третьей главе.

Четвертая глава «Источники ионов и плазмы на основе вакуумного дугового разряда» посвящена описанию оборудования, модернизированного и созданного на основе исследований, проведенных при выполнении настоящей диссертации.

В *разделе 4.1* представлены описание и параметры модернизированного вакуумного дугового источника Mevva - V.Ru, созданного и поставленного в Национальный центр ядерных исследований

(г. Отвоцк, Польша). Внешний вид установки представлен на рис. 11. При использовании многокомпонентных катодов ионный источник позволяет осуществлять ионную модификацию поверхности одновременно несколькими типами ионов элементов, входящих в материал катода. Приведены принципиальные изменения, внесенные в ионный источник: новая конструкция катодного узла и анодного электрода.



Рис. 11. Установка Mevva-V.Ru.

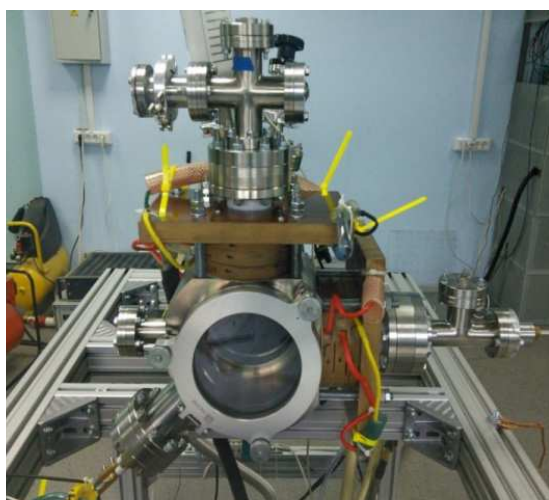


Рис. 12. Экспериментальная установка с источником сверхзвуковых потоков плазмы (внизу слева).

Раздел 4.2 посвящен компактному источнику потоков плазмы со сверхзвуковыми скоростями ионов металлов на основе сильноточного вакуумного дугового разряда короткой длительности. Источник был создан для лабораторного моделирования астрофизических процессов на установке "Солнечный ветер" (рис. 12) Института прикладной физики РАН (г. Н.-Новгород). Основные параметры источника: амплитуда тока разряда - единицы килоампер при длительности импульса уровня 10 мкс, скорость ионов в потоке плазмы - около 3 чисел Маха. В качестве примера представлены результаты совместных экспериментов по обтеканию потоком плазмы магнитного поля арочной конфигурации, моделирующих воздействие солнечного ветра на магнитосферу планеты.

В разделе 4.3 приведены выводы по главе.

В **заклучении** изложены основные результаты работы, указаны апробация и публикации по теме диссертации, перспектива дальнейшего практического развития проведенных исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В результате исследований, направленных на генерацию ионных пучков с высокими зарядовыми состояниями ионов металлов на основе сильноточного вакуумного дугового разряда с длительностями импульса уровня единиц микросекунд, показано, что, для каждой длительности импульса разряда и материала катода, имеется своя оптимальная амплитуда импульса тока дуги, при которой увеличение зарядовых состояний этих ионов наибольшее, определяемая, с одной стороны, сжатием потока плазмы разряда собственным магнитным полем, а, с другой стороны, импульсным нагревом и испарением материала поверхности катода разрядом. Например, для катода из висмута при длительности импульса тока уровня 1 мкс (ширина на полувысоте) значение оптимального разрядного тока составляет $3,3 \pm 0,2$ кА.

2. Экспериментально определено, что генерация высокозарядных ионов

материала катода в плазме сильноточной вакуумной дуги короткой длительности импульса происходит в момент его пинчевания под действием собственного магнитного поля при достижении импульсом тока разряда максимального значения, на расстояниях около 10 мм от поверхности катода.

3. При оптимальных условиях функционирования вакуумного дугового разряда значительное увеличение зарядовых состояний ионов в пучке, генерируемом на основе такого разряда, получено для всех исследованных металлов: магния, алюминия, циркония, олова, тантала, золота, висмута, свинца. Так, в случае катода из висмута, максимальное зарядовое состояние этих ионов в пучке достигало $17+$, при средней зарядности ионов $12,6+$.

4. Для сильноточной вакуумной дуги с длительностью импульса в единицы микросекунд создание внешнего аксиального магнитного поля величиной уровня $0,5$ Тл в катодной области разряда не приводит к существенному увеличению зарядности ионов материала катода в дуговой плазме, поскольку внешнее магнитное поле стабилизирует поток плазмы и препятствует его сжатию при пинчевании.

5. Экспериментально показано, что для вакуумной дуги с катодом, выполненным из нескольких металлов, суммарные доли ионов этих металлов в плазме дуги соответствуют их атомарным долям в материале катода. На примере катодов из модельного сплава олова и свинца показано, что напряжение горения дуги для таких катодов определяется, главным образом, энергией связи атомов в материале катода.

6. Для сильноточного вакуумного дугового разряда с многокомпонентным катодом при микросекундной длительности импульса рост тока дуги приводит к существенному увеличению зарядовых состояний ионов всех элементов, входящих в материал катода, при этом достижение максимальных зарядовых состояний ионов каждого элемента определяется его потенциалами ионизации.

7. На основе импульсного вакуумного дугового разряда с катодом, выполненным из гексаборида лантана, получены пучки с высоким содержанием ионов бора, причем суммарная доля ионов бора в пучке соответствует атомной доле этого элемента в материале катода и составляет 86% .

8. Экспериментально показано, что для вакуумной дуги с катодом, выполненным из циркония, насыщенного дейтерием, доля ионов дейтерия в извлеченном ионном пучке может существенно превышать его атомарную долю в катоде. Так, для катода из циркония с атомарной долей дейтерия 40% , в случае дуги длительностью импульса тока 250 мкс доля ионов дейтерия в пучке достигала 50% , а для дуги длительностью в единицы микросекунд - 80% . Превышение доли ионов дейтерия в пучке над долей атомов дейтерия в материале катода связано с выходом и последующей эффективной ионизацией дейтерия из всего объема разогретого катодным пятном участка катода.

9. На основе проведенных исследований был модернизирован вакуумный дуговой источник ионов $MeV\alpha - V.Ru$, обеспечивающий генерацию как однокомпонентных, так и многокомпонентных широкоапертурных пучков, который

в составе установки для пучковой модификации поверхности поставлен в Национальный центр ядерных исследований (г. Отвоцк, Польша). Для лабораторного моделирования астрофизических процессов создан и поставлен в Институт прикладной физики РАН (г. Н.-Новгород) источник потоков плазмы со сверхзвуковыми скоростями ионов металлов на основе сильноточного вакуумного дугового разряда короткой длительности.

10. Перспектива практического развития работ, по результатам проведенных исследований, заключается в возможности создания компактных источников ионов металлов с энергией МэВ-ного диапазона при ускоряющем напряжении уровня 100 кВ, источников ионов дейтерия и бора для широкого круга практических приложений.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Николаев А.Г., Окс Е.М., Фролова В.П., Юшков Г.Ю., Шмелев Д.Л., Уйманов И.В., Баренгольц С.А. Влияние параметров разряда на генерацию ионов дейтерия в плазме сильноточной импульсной вакуумной дуги с композиционным катодом из дейтерида циркония // Журнал технической физики, 2017, Т. 87, № 5, С. 681-687.

2. Бугаев А.С., Визирь А.В., Гушенец В.И., Николаев А.Г., Окс Е.М., Савкин К.П., Фролова В.П., Юшков Г.Ю. Генерация многозарядных ионов металлов в плазме вакуумного дугового разряда // Известия вузов Физика, 2017, Т. 60, № 8, С.115-122.

3. Николаев А.Г., Окс Е.М., Фролова В.П., Юшков Г.Ю. Угловые распределения плазменных потоков в вакуумной дуге с боросодержащими катодами // Известия вузов Физика, 2017, Т. 60, № 9, С.62-65.

4. Баренгольц С.А., Карнаухов Д.Ю., Николаев А.Г., Савкин К.П., Окс Е.М., Уйманов И.В., Фролова В.П., Шмелев Д.Л., Юшков Г.Ю. Генерирование ионов изотопов водорода в вакуумном дуговом разряде с композиционным катодом из дейтерида циркония // Журнал технической физики, 2015, Т. 85, № 7, С. 45-54.

5. Николаев А.Г., Окс Е.М., Фролова В.П., Юшков Г.Ю. Генерация плазмы бора в вакуумной дуге с катодом из гексаборида лантана // Письма в журнал технической физики, 2015, Т. 41, № 18, С. 30-37.

6. Викторов М.Е., Водопьянов А.В., Голубев С.В., Мансфельд Д.А., Николаев А.Г., Фролова В.П., Юшков Г.Ю. Экспериментальный стенд для исследования взаимодействия плотных сверхзвуковых потоков плазмы с магнитным полем арочной конфигурации // Письма в журнал технической физики, 2015, Т. 41, № 18, С. 74-81.

7. Юшков Г.Ю., Николаев А.Г., Фролова В.П., Окс Е.М., Румянцев Г.С., Баренгольц С.А. Масс-зарядовый состав плазмы вакуумной дуги с катодом из циркония, насыщенного дейтерием // Письма в журнал технической физики, 2014, Т. 40, № 23, С. 74-81.

8. Frolova V.P., Gushenets V.I., Nikolaev A.G., Oks E.M., Savkin K.P.,

Yushkov G.Yu Generation of boron-rich plasma by a pulsed vacuum arc with lanthanum hexaboride cathode // IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, V. 45, No. 8, P. 2070-2074.

9. Yushkov G.Yu, Nikolaev A.G., Frolova V.P., Oks E.M., Rousskikh A.G., Zhigalin A.S. Multiply charged metal ions in high current pulsed vacuum arcs // Physics of Plasmas, 2017, V. 24, No. 12, P. 123501 (1-8).

10. Yushkov G.Yu, Nikolaev A.G., Oks E.M., Frolova V.P. A vacuum spark ion source: High charge state metal ion beams // Review of Scientific Instruments, 2016, V. 87, No. 2, 02A905 (1-3).

11. Nikolaev A.G., Oks E.M., Vizir A.V., Yushkov G.Yu, Frolova V.P. Boron ion beam generation utilizing lanthanum hexaboride cathodes: Comparison of vacuum arc and planar magnetron glow // Review of Scientific Instruments, 2016, V. 87, No. 2, 02A902 (1-3).

12. Yushkov G.Yu, Anders A., Frolova V.P., Nikolaev A.G., Oks E.M., Vodopyanov A.V. Plasma of vacuum discharges: the pursuit of elevating metal ion charge states, including a recent record of producing Bi^{13+} // IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, V. 43, No. 8, P. 2310-2317.

13. Nikolaev A.G., Oks E.M., Savkin K.P., Yushkov G.Yu, Frolova V.P., and Barenholtz S.A. Charge state, angular distribution, and kinetic energy of ions from multicomponent-cathodes in vacuum arc devices // Journal of Applied Physics, 2014, V. 116, No. 21, 213303 (1-8).