



КУЛЕВОЙ ТИМУР ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

**ИСТОЧНИКИ ПУЧКОВ ИОНОВ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ
ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО И
ПЕННИНГОВСКОГО РАЗРЯДОВ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ
РЕЖИМОВ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ**

Специальность 01.04.04 – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Томск, 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Научный консультант: **ОКС** Ефим Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией/заведующий кафедрой Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **ГАВРИЛОВ** Николай Васильевич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург;
ИВАНОВ Александр Александрович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск;
РЕМНЕВ Геннадий Ефимович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород

Защита состоится 6 ноября 2019 года в 15 час.30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.268.04 в ФГБОУ ВО «ТУСУР» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201, телефон +7 (3822) 41-38-87.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ТУСУР» по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146, и на сайте ТУСУР, <https://postgraduate.tusur.ru/urls/isuaohud>.

Автореферат разослан «___»_____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.268.04
д.т.н., профессор



Акулиничев Ю.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Источники ионов в современном мире находят все большее применение. Они используются в качестве поставщиков пучков ионов для крупнейших ускорительных комплексов, таких как, например, крупнейший в мире ускорительный комплекс Большой адронный коллайдер (БАК) в ЦЕРН, на которых ведутся работы по фундаментальной физике. В то же время они генерируют ионные пучки для сугубо утилитарных установок, таких как имплантационные устройства для производства полупроводников (п/п), производящих почти все п/п изделия, без которых немислим сегодняшний мир. Требования, предъявляемые к источникам, определяются задачами, которые решаются с их помощью. Для высокоэнергетических установок, наподобие БАК, требуются пучки ионов с как можно более высоким зарядовым состоянием, чтобы увеличить темп набора энергии пучком и сократить размеры всего ускорительного комплекса. В то же время полупроводниковая промышленность стремится к созданию все более компактных изделий с постоянно повышающейся плотностью размещения единичных полупроводниковых элементов. Это обуславливает необходимость снижения характерных размеров ионного легирования (так называемые «проектные нормы», измеряемые на сегодняшний день в нанометрах), что в конечном итоге требует для этих целей генерацию низкоэнергетических пучков однозарядных ионов тяжелых молекул с высоким содержанием легируемого в полупроводник элемента.

Процессы воздействия на материалы высокоэнергетическими пучками многозарядных ионов или относительно медленными пучками тяжелых однозарядных ионов представляют собой особые режимы ионно-лучевой обработки или имплантации. Именно поэтому представляется обоснованным и целесообразным выделить реализацию этих режимов в отдельную научно-технологическую проблему – «экстремальные» режимы ионной имплантации.

Для получения пучков ионов веществ, находящихся в твердом состоянии в нормальных условиях, чаще всего необходимо перевести эти вещества в

газообразное состояние для их последующей ионизации и формирования ионного пучка. Для этого применяется либо нагрев твердотельного материала, либо непосредственное образование плазмообразующей среды в системах тлеющего разряда (ионное распыление катода) или вакуумной дуги (испарение материала в катодном пятне). В ряде случаев ионы твердотельных веществ получают из летучих соединений этих веществ, нитридов, оксидов и др. (так называемая технология MIVOC – **M**etal **I**ons from **V**olatile **C**ompounds). Однако в этом случае, как и при ионном распылении, в газоразрядной плазме, а следовательно, и в ионном пучке, присутствует заметная доля ионов примесей.

Ионный источник с вакуумно-дуговым разрядом в парах металла (MEVVA) способен обеспечить генерацию практически беспримесных пучков ионов требуемых твердотельных веществ высокой интенсивности вплоть до амперных токов. Использование источников данного типа для ускорительных комплексов пучков тяжелых ионов выглядит очень перспективным. Однако зарядность генерируемых в вакуумно-дуговом разряде ионов металлов относительно невысока. За последние годы было предложено и реализовано несколько различных методов и подходов для генерации многозарядных ионов в дуговой плазме, что привело к увеличению зарядового состояния почти вдвое без снижения интенсивности генерируемого пучка. Тем не менее проблема повышения среднего заряда ионного пучка, генерируемого вакуумно-дуговым источником, остается актуальной.

Для нужд полупроводниковой промышленности требуются установки, обеспечивающие имплантацию в подложку ионов примесей с очень широким спектром энергий – от сотни электронвольт до десятка мегаэлектронвольт. Фундаментальные законы физики делают практически невозможным реализацию всех этих режимов в одной установке при работе с пучками атомарных ионов. Однако надо отметить, что решить задачу создания универсального источника можно. Для этого требуется разработать ионный источник, который может обеспечить два альтернативных режима работы. С одной стороны, генерацию достаточно интенсивного пучка атомарных

ионов с высоким зарядовым состоянием. С другой стороны, при соответствующем изменении режима работы, способность генерировать пучки многоатомных молекулярных ионов с зарядовым состоянием $1+$. Увеличение зарядового состояния ионного пучка позволяет существенно сократить длину и снизить издержки на создание и эксплуатацию ускорительного канала для высокоэнергетической имплантации. В то же время использование однозарядных многоатомных молекулярных пучков, содержащих большое число атомов рабочего вещества на единицу электрического заряда, позволяет использовать ускоряющие поля, традиционно используемые для высокоинтенсивной и/или высокоэнергетической имплантации. Таким образом, сохраняют свою актуальность как задача повышения зарядового состояния генерируемых для высокоэнергетической имплантации ионных пучков, так и разработка методов и устройств для генерации многоатомных молекулярных пучков однозарядных ионов для низкоэнергетической ионной имплантации.

Цель диссертационной работы

Разработка ионных источников с экстремальными параметрами пучка для ускорителей заряженных частиц, а также для ионно-имплантационных установок как высокоэнергетических, так и ультранизкоэнергетических, а также создание на их основе экспериментальной базы для проведения фундаментальных исследований и прикладных работ.

Научная новизна

1. Для источника ионов металлов на основе вакуумной дуги предложены и реализованы методы повышения средней зарядности пучка тяжелых ионов в результате инъекции ускоренного пучка электронов в плазму дуги, а также в результате реализации ступенчатого дугового разряда в сильном нарастающем магнитном поле.

2. Для источника ионов в скрещенных электрическом и магнитном полях ЕхВ типа Bernas на основе разряда Пеннинга с катодом косвенного накала предложен и реализован метод повышения зарядового состояния ионов,

закрывающийся в инжекции доли электронного пучка для накала катода в разрядный промежуток.

3. Разработаны принципы получения пучка многоатомных молекулярных ионов с высоким содержанием бора в источниках, применяемых в промышленности, что позволило получать данные пучки без существенного изменения конструкции промышленных источников с интенсивностью не хуже, чем у лучших мировых аналогов.

4. Предложен способ генерации многоатомных молекулярных ионов с высоким содержанием бора с организацией непрерывного процесса самоочистки разрядной камеры в результате использования молекулярных многоатомных борсодержащих соединений с включением атомов сильных оксидантов.

5. На основе генерируемых ионных пучков разработаны и внедрены методики облучательных экспериментов для проведения экспресс-анализа радиационной стойкости конструкционных материалов, используемых или разрабатываемых для ядерных и термоядерных реакторов.

Практическая ценность

Увеличение среднего заряда генерируемых ионных пучков позволяет сократить энергопотребление и размеры установок, используемых для ускорения ионов в научных и прикладных целях, в частности в ускорителях тяжелых частиц больших ускорительных комплексов, а также в установках для высокоэнергетической имплантации.

Способ обеспечения генерации многоатомных молекулярных ионов с высоким содержанием бора с организацией процесса самоочистки разрядной камеры позволил увеличить срок службы соответствующих ионных источников, полностью убрав проблему влияния на качество пучка продуктов диссоциации многоатомных борсодержащих молекул.

Создана экспериментальная база для проведения работ по исследованию фундаментальных процессов взаимодействия ионного пучка с энергией 101 кэВ/нуклон с плазменной и газовой мишенью, для которых на сегодняшний день нет точного теоретического описания.

Создана экспериментальная база для проведения экспресс-анализа радиационной стойкости конструкционных материалов, используемых или разрабатываемых для ядерных и термоядерных реакторов на основе имитационных экспериментов на пучках тяжелых ионов.

Результаты работы значительно расширяют научные знания о механизмах генерации и формирования ионных пучков в вакуумно-дуговом и пеннинговском разряде для экстремальных режимов ионной имплантации, что используется в технологиях создания полупроводниковых изделий с технологической нормой менее 20 нм, а также ускорителях тяжелых ионов, имитационных экспериментах по экспресс-анализу конструкционных материалов для ядерных и термоядерных реакторов. Понимание механизма процесса фрагментации многоатомных борсодержащих молекулярных ионов дает уникальную возможность создания ионных установок для имплантации в кремниевые подложки с высокой плотностью пучка, сравнимой с достигаемой на атомарных пучках, а также организации режима самоочистки разрядной камеры, что решает ключевую проблему данного направления ионной имплантации. Предложенные подходы и технические решения защищены патентами РФ и США.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Инжекция высокоэнергетического пучка электронов в плазму вакуумно-дугового разряда, обеспечивающая дополнительную ионизацию ускоренными электронами, приводит к повышению как максимального зарядового состояния ионов металлов, так и их среднего заряда в дуговой плазме. При этом возможность независимого регулирования параметров электронного пучка и плазмы обуславливает расширение диапазона устойчивых параметров дуги. Разработанная на этом принципе оригинальная конструкция вакуумно-дугового источника ионов металлов e-MEVVA позволила повысить зарядность пучка ионов свинца с $3+$ до $6+$ без потери интенсивности извлекаемого из плазмы ионного пучка.

2. Реализация вакуумной дуги в форме так называемого «ступенчатого разряда» в сильном нарастающем продольном магнитном поле,

характеризующаяся последовательным вводом энергии в дуговой разряд, приводит к увеличению удельного энерговклада в плазму и образованию фракции высокоэнергетических плазменных электронов, обеспечивающих условия для ступенчатой ионизации в дуговой плазме. В созданном на основе этого подхода вакуумно-дуговом источнике ионов металлов MEVVA-M для пучков ионов урана и свинца достигнуто повышение в 1,5 раза средней зарядности ионного пучка.

3. В разрядной системе ячейки Пеннинга с термокатодом косвенного накала, используемой в источнике ионов газов и ионов твердотельных непроводящих веществ типа Vernas, широко используемом для легирования полупроводников, инжекция части высокоэнергетического электронного пучка, предназначенного для нагрева катода, в разрядный промежуток приводит к дополнительному нагреву электронного компонента плазмы. Это обеспечивает многократную ионизацию в плазме, и, соответственно, повышение средней зарядности извлеченного из плазмы ионного пучка.

4. В ионном источнике типа Vernas модернизация конструкции разрядной ячейки вместе с оптимизацией режимов горения разряда и его параметров обеспечивает условия для генерации в плазме молекулярных ионов многоатомных борсодержащих соединений (декаборана, карборана и др.) и формирования интенсивного пучка многоатомных молекулярных ионов с высоким долевым содержанием бора с плотностью тока ионного пучка уровня 1 mA/cm^2 .

5. В ионном источнике типа Vernas, модернизированном для получения пучков многоатомных молекулярных ионов с высоким долевым содержанием бора, использование в качестве рабочего вещества специального борсодержащего соединения, наряду с генерацией интенсивного пучка молекулярных ионов, обеспечивает непрерывную очистку электродов разрядной камеры ионного источника от тугоплавких фрагментов борсодержащих соединений. Самоочистка разрядной камеры существенно повышает надежность ионного источника и увеличивает его срок службы.

6. Результаты проведенных исследований по развитию и совершенствованию источников ионов твердотельных веществ позволили создать в НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ сеть экспериментальных установок ионного облучения и имплантации, а именно:

– ускоритель пучков тяжелых ионов ТИПр (**ТяжелоИонный Прототип**) с оригинальными конструкциями канала вывода пучка и мишенной камеры для экспресс-анализа материалов ядерных и термоядерных реакторов, а также для изучения процессов по взаимодействию ускоренного ионного пучка с плазменными и газовыми мишенями;

– установку СОРМАТ для воздействия ионного пучка на образцы, предназначенные для последующего их исследования методами атомно-зондовой томографии;

– установку УСИ для ультранизкоэнергетической ионной имплантации в полупроводниковые подложки.

Степень достоверности и апробация работы

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных методик, проведением измерений на различных экспериментальных установках, сопоставлением и удовлетворительным совпадением результатов экспериментов с результатами теоретического анализа и численного моделирования, а также сравнением полученных результатов с результатами других исследователей, практической реализацией научных положений и выводов при создании конкретных устройств, используемых в настоящее время как в нашей стране, так и за рубежом.

Материалы диссертационной работы опубликованы в 27 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК научных изданий и/или индексируемых Web-of-Science и Scopus, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук. Способ непрерываемого производства пучка ионов карборана с постоянной самоочисткой ионного источника и компонент системы экстракции ионного

имплантатора защищен патентом Российской Федерации за № 2 522 662 и патентом США WO/2013/019432. Также опубликовано одиннадцать статей в трудах различных конференций и рабочих совещаний и одиннадцать препринтов ИТЭФ.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на IX-XVI Международных конференциях по ионным источникам (Дубна, Россия, 2003 г.; Каэн, Франция, 2005 г.; Джеджу, Ю. Корея, 2007 г.; Гатлинбург, США, 2009 г.; Сицилия, Италия, 2011 г.; Чибо, Токио, Япония, 2013 г.; Нью-Йорк, США, 2015 г.); XII Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц (ИТЭФ, Москва, октябрь 1990 г.); 18-й Международной конференции по технологиям ионной имплантации, Киото, Япония, 2010 г.; Международной конференции по модификации материалов пучками частиц и плазменными потоками, Томск, 2010 г., 5-м Международном конгрессе «Энергетические потоки и радиационные эффекты» (EFRE-2016), 2016 г.; Российских конференциях по ускорителям заряженных частиц; 2014 г., 2018 г.; Научных сессиях НИЯУ МИФИ, 2008 г., 2012 г., 2014 г.; конференциях по линейным ускорителям заряженных частиц LINAC, Лондон, Великобритания, 1994 г. и 2002 г.; международных рабочих совещаниях по ускорителям заряженных частиц, Алушта (2005 г., 2007 г., 2009 г., 2011 г.); Научно-исследовательском семинаре «Новые применения вакуумно-дуговых плазменных, ионных и электронных пучков» (Байкал, 2002 г.); Совещании по ионным источникам MEVVA (Беркли, США, 1995 г.); 11-ой международной конференции по применению ускорителей тяжелых ионов, Венеция, Италия, 2009 г.; международных европейских конференциях по ускорителям частиц EPAC (Лондон, Великобритания, 1994 г., Вена, Австрия, 2000 г., Генуя, Италия, 2008 г.); международном тематическом совещании под эгидой МАГАТЭ по применению ядерных исследований и использованию ускорителей, Вена, 4-8 мая 2009 г.; научных семинарах отдела Линейных ускорителей НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, Национальной Лаборатории Леньяро (LNL-INFN, Италия, 1993 г.,

2018 г.), Ускорительного центра тяжелых ионов GSI (Германия, 1995 г.), Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, 2000 г.).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 252 страницы, в том числе 138 рисунков и 30 таблиц, список цитируемой литературы включает 276 наименований.

Личный вклад соискателя

В представленные в диссертационной работе результаты автором внесен определяющий вклад в постановку задач исследований, проведение экспериментов и анализ полученных результатов, а также в разработку основных конструктивных решений, используемых в экспериментальных макетах и устройствах. В обсуждении результатов работ активное участие принимали С.В. Петренко, Д.Н. Селезнев, С.В. Рогожкин, А.Д. Фертман и Е.М. Окс.

Автору работы принадлежит идея и обоснование использования плазменного катода для формирования электронного пучка в источнике e-MEVVA. Эксперименты по разработке и исследованию различных конфигураций вакуумно-дугового источника ионов металлов e-MEVVA проведены автором совместно с Р.П. Куйбидой, а обсуждение результатов данных исследований велось совместно с Е.М. Оксом, И.В. Гушенцом, С.В. Петренко, В.А. Баталиным и А.А. Коломийцем. Также автору принадлежит идея источника MEVVA-M, конструкционное решение этого источника, и им выполнен весь цикл экспериментального исследования этого источника. В экспериментальных исследованиях автору помогал Р.П. Куйбида.

Исследования по увеличению зарядности ионов плазмы разряда в источнике типа Bernas выполнены совместно с С.В. Петренко, Д.Н. Селезневым и Р.П. Куйбидой. Автору принадлежит идея источника, постановка задач и последовательность его исследования, а также обработка и интерпретация достигнутого результата. Моделирование разряда в источнике

типа Vernas по поставленной автором задаче выполнено И.В. Рудским, который также принимал участие в обсуждении полученных результатов.

Исследования по разработке источника многоатомных борсодержащих молекулярных ионов, определение и оптимизация режимов работы устройства проведены совместно с С.В. Петренко, Д.Н. Селезевым и Р.П. Куйбидой. Моделирование систем формирования и транспортировки ионного пучка выполнено Г.Н. Кропачевым, который принимал участие в обсуждении полученных результатов. Автору принадлежит идея источника, постановка задач и последовательность его исследования, а также обработка и интерпретация достигнутого результата.

Разработка конструкционных решений ионных источников осуществлялась при активном участии Ю.Н. Волкова, Д.А. Кашинского и В.А. Кошелева. Соавторы, принимавшие участие в отдельных направлениях исследований, указаны в списке основных публикаций по теме диссертации. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснованы актуальность и цель диссертации. Сформулированы цель и задачи исследований, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, указан личный вклад автора в выполненные работы.

Глава 1 содержит три раздела. В первом разделе приведен литературный обзор ионных источников для генерации пучков ионов металлов. Обоснована целесообразность поиска путей увеличения зарядового состояния ионов пучка, генерируемого вакуумно-дуговым источником ионов металлов (ВДИИМ), как самым высокоинтенсивным и простым источником ионов металлов. Приведена базовая конструкция ВДИИМ, разработанного автором диссертационной работы в НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ (рис. 1), которая стала отправной точкой для разработки двух его модификаций, названных e-MEVVA и MEVVA-M.



Рисунок 1 – Фотография ВДИИМ ускорителя ТИПр-1

Второй раздел главы посвящен описанию идеи и конструкции ионного источника e-MEVVA с вакуумно-дуговым разрядом с инжекцией в плазму разряда высокоинтенсивного электронного пучка от независимой электронной пушки. Для повышения зарядового состояния ионов вакуумно-дугового разряда была разработана оригинальная конструкция ионного источника на основе вакуумно-дугового разряда с инжекцией электронов (рис. 2, а). В результате работ по оптимизации конструкции и параметров ионного источника в извлекаемом из источника пучке ионов урана зафиксированы ионы U^{6+} . Необходимо отметить, что ионы урана столь высокой зарядности до этого детектировались только в пучке, генерируемом вакуумно-дуговым ионным источником при использовании либо сильного магнитного поля, либо сильноточного разряда. Аналогичный результат получен на пучках ионов свинца. Спектры генерируемого пучка свинца без инжекции и с инжекцией высокоэнергетического пучка представлены на рис. 2, б.

Увеличение зарядового состояния ионов вакуумно-дугового разряда также возможно за счет реализации дуги в форме так называемого «ступенчатого разряда» в сильном продольном нарастающем от катода к аноду

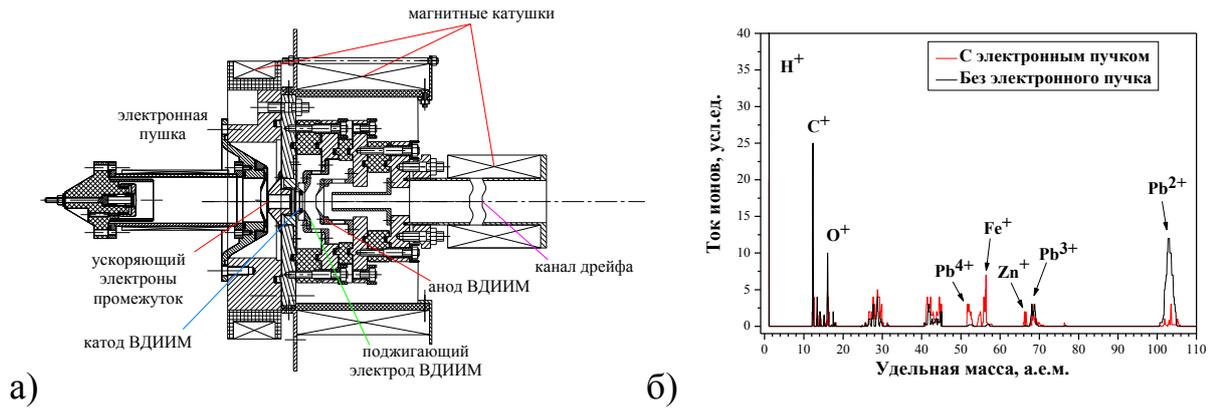


Рисунок 2 – Конструкция и масс-зарядовый спектр ионного пучка для источника e-MEVVA с катодом из свинца

магнитном поле. Такая форма дугового разряда характеризуется последовательным вводом в него энергии от различных источников питания и приводит к увеличению удельного энерговклада в плазму и образованию фракции высокоэнергетических плазменных электронов, обеспечивающих условия для ступенчатой ионизации в дуговой плазме.

Представленные в этом разделе результаты исследований позволили сформулировать следующие выводы:

1. Инжекция высокоэнергетического пучка электронов в плазму вакуумно-дугового разряда, обеспечивающая дополнительную ионизацию ускоренными электронами, приводит к повышению как максимального зарядового состояния ионов металлов, так и их среднего заряда в дуговой плазме. Разработанная на этом принципе оригинальная конструкция вакуумно-дугового источника ионов металлов e-MEVVA позволила повысить зарядовое состояние пучков ионов свинца и висмута с 3+ до 6+ без потери интенсивности извлекаемого из плазмы ионного пучка.

2. Реализация вакуумной дуги в форме «ступенчатого разряда» в магнитном поле с сильным продольным градиентом, характеризующаяся последовательным вводом энергии в дуговой разряд и магнитным сжатием плазмы разряда, приводит к увеличению удельного энерговклада в плазму и образованию условий для увеличения зарядового состояния генерируемых ионов. В созданном на основе этого подхода вакуумно-дуговом источнике

ионов металлов MEVVA-M для пучков ионов урана и свинца достигнуто повышение в 1,5 раза средней величины зарядового состояния ионов пучка, генерируемого вакуумно-дуговым разрядом (рис. 3).

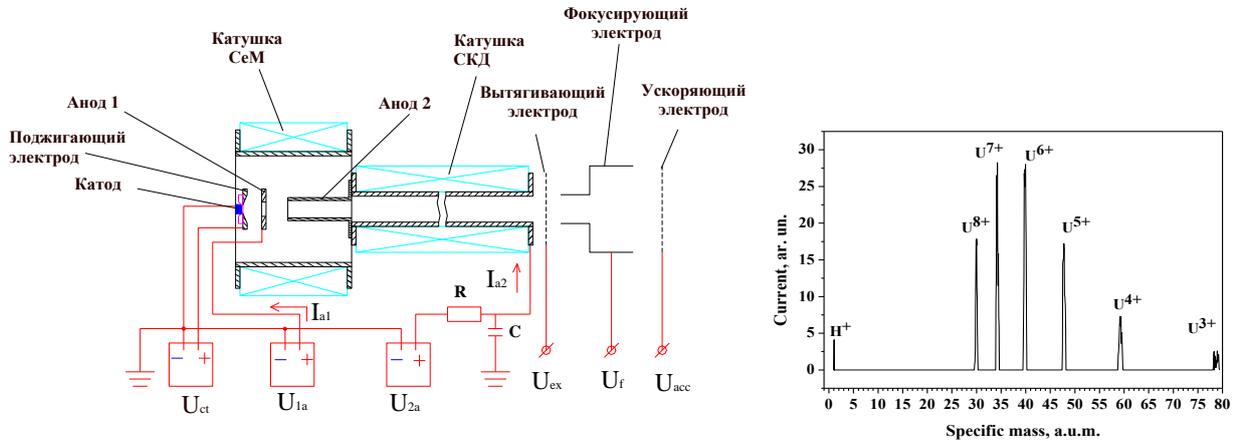


Рисунок 3 – Схема источника MEVVA-M и зарядовый спектр пучка ионов урана при токе разряда 2,4 кА. Магнитное поле в канале дрейфа 1 Т

Глава 2 посвящена ионному источнику типа Bernas, используемому для генерации пучков ионов для ионной имплантации в полупроводники. В начале главы приведен литературный обзор установок по ионной имплантации, используемых в полупроводниковой промышленности. Показано, что для данной отрасли требуются пучки ионов как с высокой энергией, так и с ультранизкой энергией.

Представлены результаты модернизации конструкции ионного источника типа Bernas, позволившие инжектировать часть электронного пучка, предназначенного для разогрева катода с косвенным накалом, в разрядный промежуток и осуществлять их накопление в этой области (т.н. режим «накопления») (рис. 4).

В таблице 1 представлены результаты измерений зарядового распределения ионов пучка сурьмы для двух крайних режимов работы источника: в отсутствие инжекции электронов и в режиме «запирания» высокоэнергетического электронного пучка в разрядном промежутке. Данные, приведенные в таблице, показывают, что инжекция электронов обеспечивает увеличение как максимального зарядового состояния генерируемых ионов, так и средней зарядности ионного пучка. Результаты численного моделирования

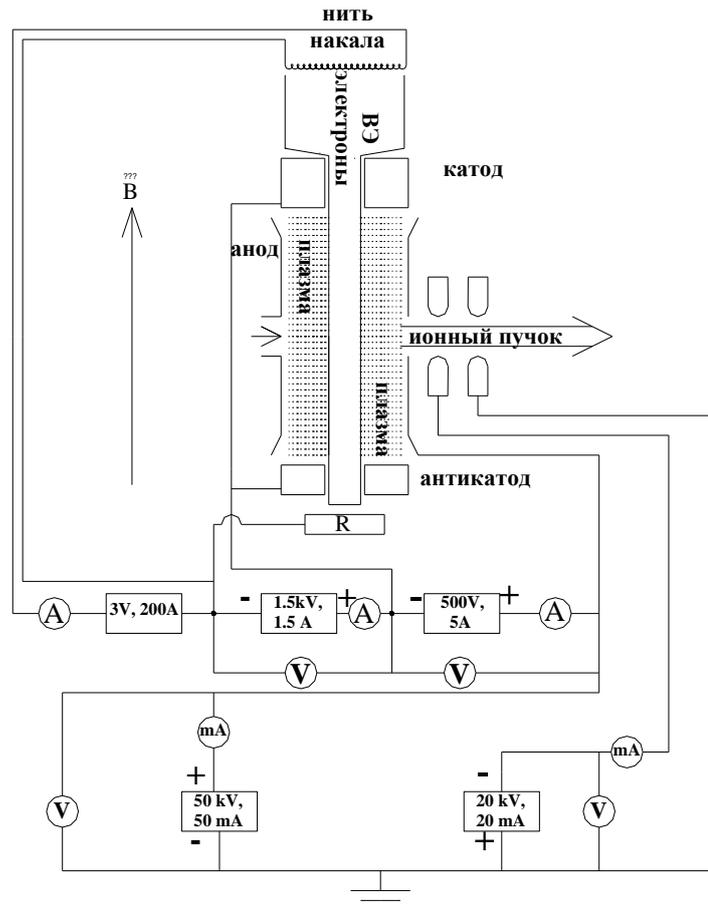


Рисунок 4 – Схема источника с направлением части высокоэнергетического электронного пучка, предназначенного для нагрева катода, в разрядный промежуток

ионизационных процессов показывают, что инжекция электронного пучка в разрядный промежуток приводит к дополнительному нагреву электронного компонента плазмы и повышению средней энергии электронов с ~ 150 эВ до ~ 260 эВ. В результате обеспечивается повышение зарядового состояния генерируемых ионов.

Таблица 1 – Распределение ионов пучка сурьмы по зарядовым состояниям для различных модификаций ионного источника типа Bernas

Модификация	Sb^+	Sb^{2+}	Sb^{3+}	Sb^{4+}	Sb^{5+}	Sb^{6+}	$\langle Q \rangle_i$
Стандартный источник типа Bernas	61,8	27	9	Следы			1,51
Дополнительный электрод соединен с нитью накала, режим инжекции электронного пучка	44,1	26,6	16,2	7,6	3,3	2,2	2,06

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- инъекция части электронного пучка в область разряда приводит к более устойчивому горению разряда;
- использование режимов, при которых высокоэнергетические электроны осциллируют в области разряда, приводит к повышению зарядового состояния генерируемых ионов сурьмы при практически неизменном токе пучка, извлекаемом из источника;
- использование дополнительного электрода для организации осцилляции высокоэнергетических электронов приводит к заметному увеличению среднего заряда ионов пучка, извлекаемых из ионного источника, что, по-видимому, объясняется меньшими потерями данных электронов за счет неоднородности электрического поля внутри разрядной камеры.

Глава 3 посвящена разработке ионного источника для экстремально низкоэнергетической ионной имплантации для полупроводниковых технологий. На основании представленного в этой главе обзора литературы обоснован выбор исследований, связанных с генерацией пучков многоатомных борсодержащих молекулярных ионов. Получение таких пучков обеспечивает возможность создания современных полупроводниковых схем с топологической нормой ниже 20 нм. Проведено изучение работы источника типа Vernas в режиме генерации пучков многоатомных молекулярных борсодержащих ионов. Выявлены основные проблемы, возникающие при генерации молекулярных пучков при использовании в качестве рабочего вещества многоатомных борсодержащих молекулярных соединений, и определены методы решения данных проблем. Для этого необходимо, с одной стороны, обеспечить эффективное охлаждение разрядной камеры, чтобы предотвратить фрагментацию ионов рабочего вещества, которая в случае декаборана наступает при температуре $\sim 350^{\circ}\text{C}$, а с другой стороны, поддерживать равномерный нагрев канала транспортировки паров вышеуказанных веществ для избегания образования стеклообразных пробок.

Кроме того, показано, что канал транспортировки паров не должен содержать сечений резкого изменения диаметра, так как эти точки провоцируют образование пробок. Мощность, вводимая в разряд при работе источника с данными веществами, ограничена. Главным образом необходимо следить за током разряда, поскольку его увеличение ведет к усилению фрагментации рабочего вещества. Увеличение напряжения разряда не ведет к столь губительным последствиям.

Для транспортировки пучка ионов разработаны оригинальные технические решения для трех основных систем (рис. 5):

- формирования пучка с плазменной границы разряда, на основе ускоряюще-замедляющей (accel-decel) конфигурации электродов (рис. 6, а);
- транспортировки пучка до магнитного масс-сепаратора на основе электростатической линзы с прямоугольными отверстиями (рис. 6, б);
- транспортировки пучка от выхода магнитного масс-сепаратора до мишени на основе электростатического ондулятора с эллиптическими отверстиями (рис. 7).

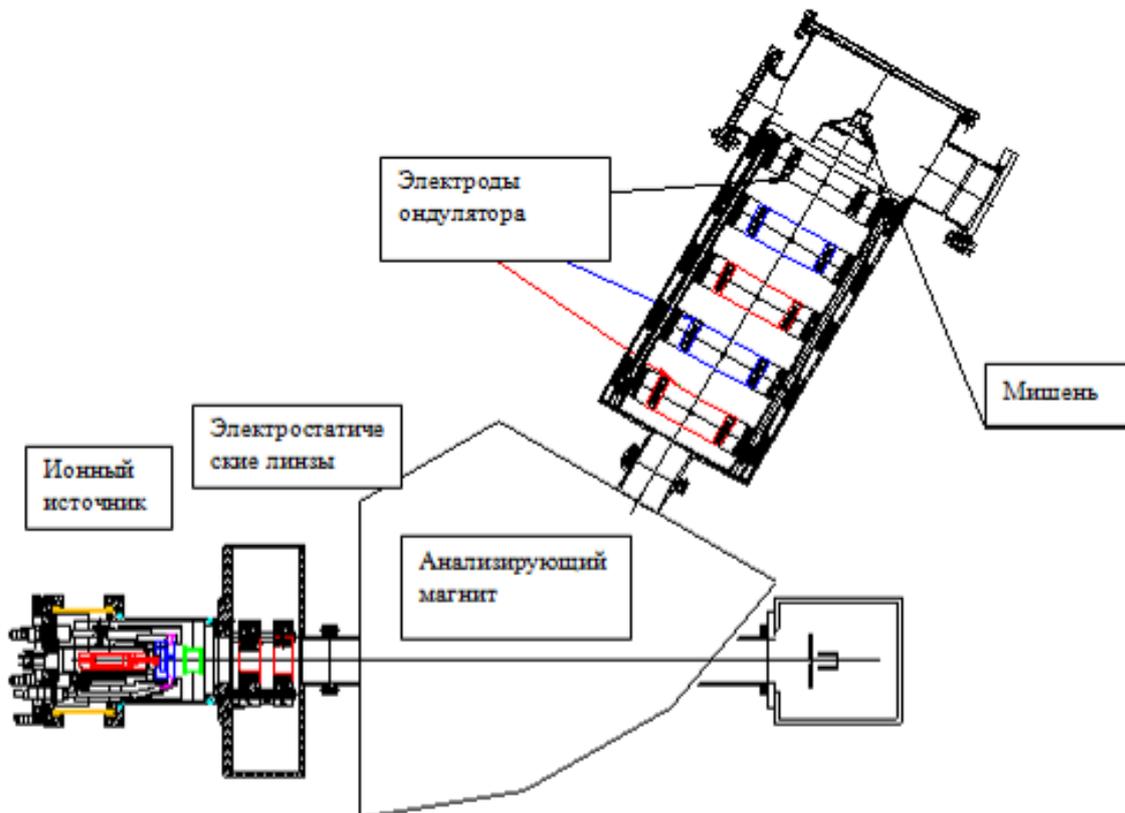


Рисунок 5 – Схема канала транспортировки ионного пучка на стенде УИС

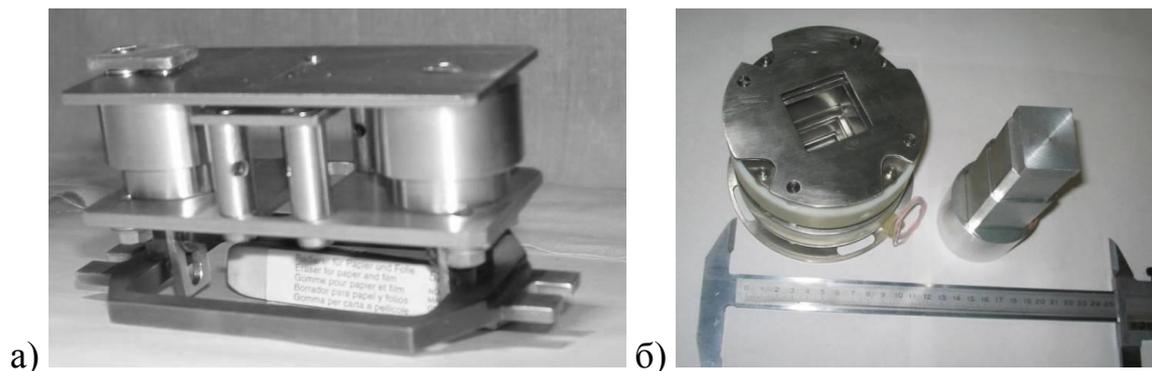


Рисунок 6 – Фотографии: а) системы формирования пучка в сборе; б) электростатической линзы в сборе вместе с приспособлением для сборки

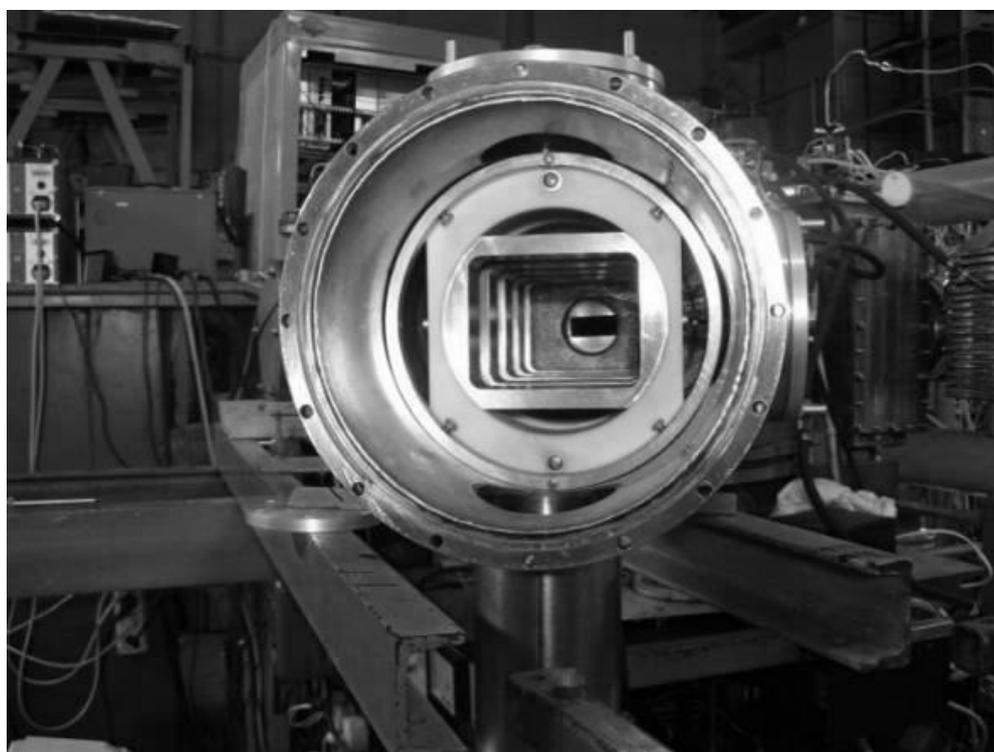


Рисунок 7 – Фотография канала транспортировки на основе электростатических линз, установленного на стенде УИС (внутренний диаметр бака 250 мм)

В результате в ионном источнике типа Bernas модернизация конструкции разрядной ячейки вместе с оптимизацией режимов горения разряда и его параметров позволила обеспечить условия для устойчивой генерации молекулярных ионов многоатомных борсодержащих соединений (декаборана, карборана и др.) и формирования интенсивного пучка

многоатомных молекулярных ионов с высоким долевым содержанием бора с плотностью тока ионного пучка уровня 1 мА/см^2 (рис. 8). Для пучков ионов декаборана или карборана это соответствует плотности тока 10 мА/см^2 в пересчете на атомарный пучок ионов бора.

Проведена имплантация ионов карборана в полупроводниковую подложку при ускоряющем напряжении 4 кВ, что в пересчете на пучок атомарных ионов бора соответствует имплантации атомарным пучком ионов с энергией 300 эВ. Представлены результаты исследования распределения по глубине имплантированных ионов.

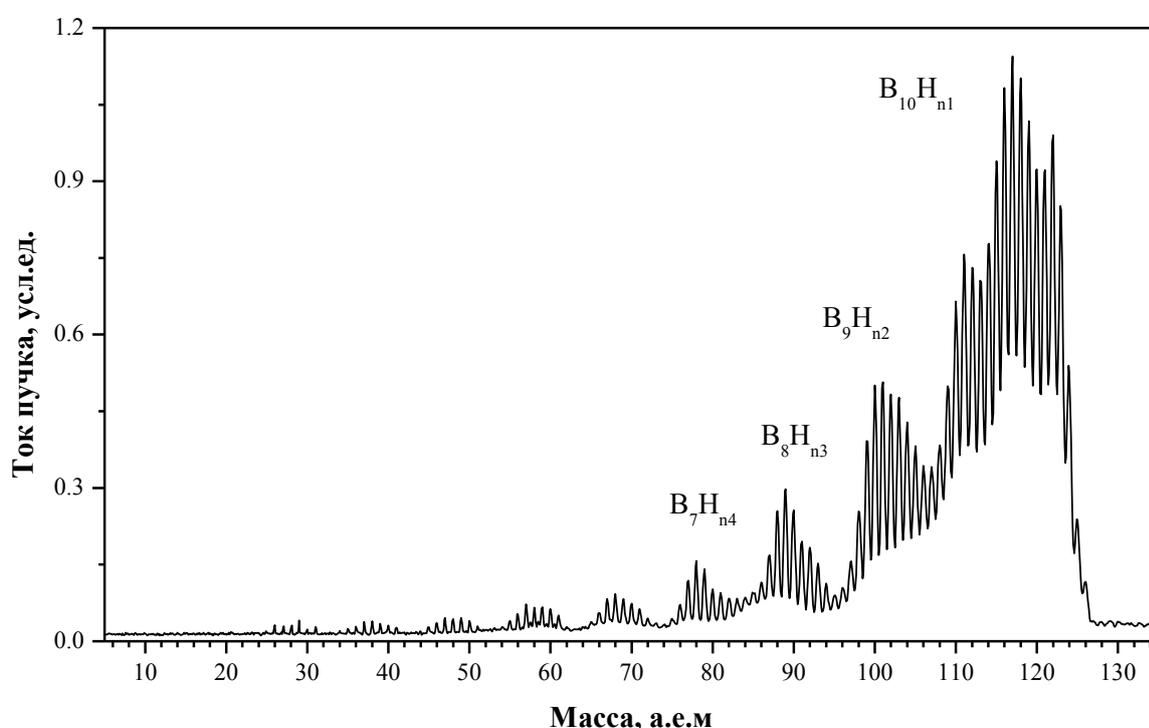


Рисунок 8 – Массовый спектр ионов пучка при использовании декаборана в качестве рабочего вещества ионного источника типа Bernas

Таким образом, в ионном источнике типа Bernas модернизация конструкции разрядной ячейки вместе с оптимизацией режимов горения разряда и его параметров позволила обеспечить условия для генерации в плазме молекулярных ионов многоатомных борсодержащих соединений (декаборана, карборана и др.) и формирования интенсивного пучка многоатомных молекулярных ионов с высоким долевым содержанием бора.

Однако работа источника по генерации многоатомных борсодержащих молекулярных ионов сопровождается загрязнением разрядной камеры продуктами развала борводородов с высокой температурой плавления. Данные образования не мешают генерации разряда, но их оседание в области экстракции ионного пучка приводит к нарушению однородности извлекаемого пучка, что неприемлемо в промышленной установке.

Глава 4 посвящена исследованиям, направленным на решение проблемы загрязнения разрядной камеры ионного источника Vernas продуктами фрагментации рабочего вещества при генерации пучков многоатомных молекулярных борсодержащих ионных пучков (рис. 9). Для решения данной проблемы использованы несколько подходов. Первый заключается во вводе в разрядную камеру одновременно с рабочим веществом вспомогательного вещества-окислителя. Второй подход заключается в использовании молекул рабочего вещества, созданного на базе карборана, в состав которого входят атомы сильных окислителей – фтора и кислорода.

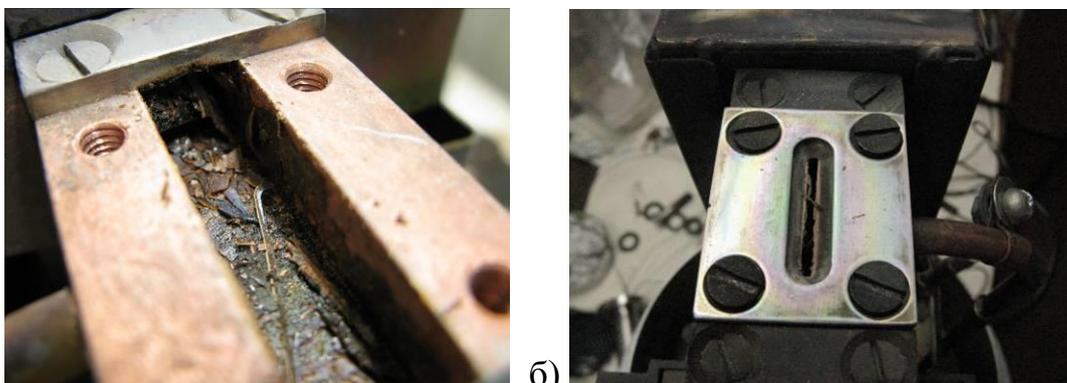


Рисунок 9 – а) разрядная камера после работы с карборановым пучком; б) нитеобразные образования из продуктов распада многоатомной молекулы карборана, перекрывающие отверстие формирующей оптики (размер разрядной камеры – $10 \times 50 \text{ мм}^2$, экстракционной щели $1 \times 20 \text{ мм}^2$)

Использование в качестве вспомогательного газа чистого кислорода приводило к очистке разрядной камеры ионного источника. Однако при неизменном полном токе ионного пучка доля «полезных» ионов в нем существенно снизилась за счет присутствия в пучке заметного количества ионов кислорода.

В качестве сложных молекулярных соединений с атомами окислителя были исследованы следующие вещества: 3-фторо-о-карборан ($C_2B_{10}H_{11}F$), м- и 1-о-карборанкарбоновая кислота ($C_3H_{12}B_{10}O_2$), м- и о-карборандикарбоновая кислота ($C_4H_{12}B_{10}O_4$) и др. Показано, что только при использовании карборандикарбоновых кислот можно осуществить режим самоочистки разрядной камеры (рис. 10). При этом результат достигается независимо от того м- или о-карборандикарборановая кислота используются в качестве рабочего вещества (для промышленного применения возможно использование любой доступной карборандикарборановой кислоты). Таким образом, решена проблема генерации пучка ионов молекулярных многоатомных борсодержащих ионов с обеспечением режима самоочистки разрядной камеры. При этом использование соединения $C_4H_{12}B_{10}O_4$ не только обеспечивает режим самоочистки, но и за счет увеличения массы молекулы позволяет прикладывать более высокое ускоряющее напряжение. Так, в пересчете на требуемую низкую энергию атомарных ионов бора ускоряющее напряжение для ионов данного вещества может быть в ~ 21 выше, чем для пучка атомарных ионов. Для сравнения, для карборана этот коэффициент равен ~ 13 . Выход на рабочий режим генерации многоатомных борсодержащих молекулярных ионов требует предварительной работы на малых температурах нагрева тигля, во время которой осуществляется «сушка» рабочего вещества. На рис. 11 представлены измеренные масс-зарядовые спектры пучка в момент «сушки» и при рабочем режиме генерации многоатомных молекулярных ионов.

В заключение главы сформулированы следующие выводы: в ионном источнике типа Bernas, модернизированном для получения пучков многоатомных молекулярных ионов с высоким долевым содержанием бора, использование в качестве рабочего вещества специального борсодержащего соединения наряду с генерацией интенсивного пучка молекулярных ионов обеспечивает непрерывную очистку электродов разрядной камеры ионного источника от тугоплавких фрагментов борсодержащих соединений. Эффект достигается за счет использования молекул на основе карборана, в которых к



Рисунок 10 – Состояние разрядной камеры из молибдена после работы на 1,2-о-карборандикарбоновой кислоте

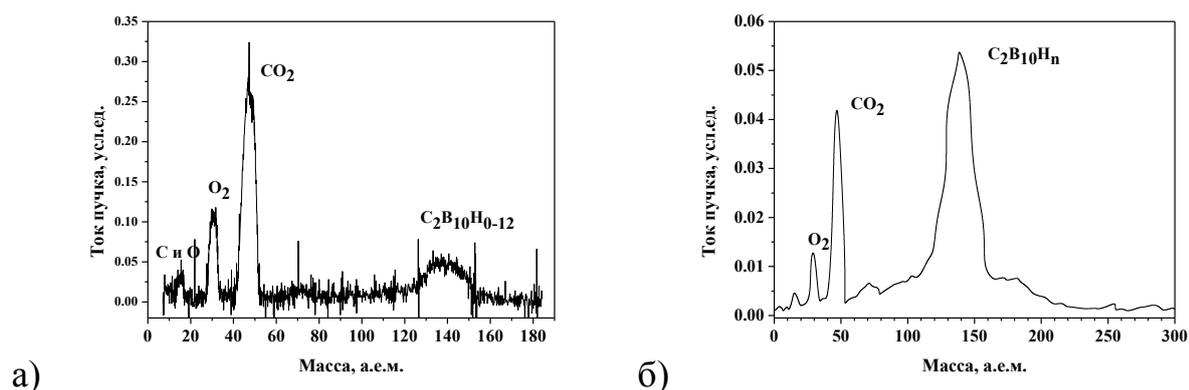


Рисунок 11 – Масс-зарядовый спектр 1,2-о-карборандикарбоновой кислоты:

- а) в течение первых тридцати минут работы;
 б) при установившемся режиме работы

атомам карборановой основы присоединены цепочки молекул с атомами сильного окислителя. Наивысший эффект достигается при использовании веществ, в которых цепочки молекул присоединены к атомам углерода, и в состав которых входит более одного атома сильного окислителя. Самоочистка разрядной камеры существенно повышает надежность ионного источника и увеличивает его срок службы. Сделанные выводы позволили сформировать предложение по дополнительным веществам, которые могут быть

использованы для имплантации многоатомных борсодержащих молекулярных ионов в полупроводники.

Глава 5 посвящена различным применениям пучков твердотельных ионов. Созданные ионные источники позволили продемонстрировать способность структур с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой ускорять высокоинтенсивные пучки тяжелых ионов (таких как U^{4+} и Cu^{2+}) при малых начальных скоростях. Полученное значение тока ускоренного пучка ионов урана до сих пор остается близким к рекордному значению. Впервые в мире именно с использованием разработанных источников была экспериментально продемонстрирована возможность одновременного ускорения пучка ионов с различным отношением массы к заряду в ускоряющих структурах данного типа. Сегодня эта идея находит применение во многих проектах, в частности, в проекте ускорительного комплекса FRIB в США.

На установках ТИПр (тяжелоионный прототип) и СОРМАТ (стенд облучения реакторных материалов) с использованием разработанных источников реализована методика экспресс-анализа радиационной стойкости конструкционных материалов, используемых или разрабатываемых для действующих и проектируемых ядерных реакторов, а также для будущих термоядерных установок. В конструкционных материалах ядерных реакторов радиационные дефекты образуются, прежде всего, за счет упругих столкновений с нейтронами. При этом они генерируются в каскадах атом-атомных соударений. Нейтрон с энергией 1 МэВ передает около 70 кэВ первично выбитому атому (ПВА). Считается, что ПВА с энергией выше 50 кэВ приводят к образованию субкаскадов со средней энергией около 20-30 кэВ. Однако сечение взаимодействия нейтронов с веществом мало, порядка 10^{-27} м², и, исходя из этого, длительность экспериментов по накоплению нужного количества дефектов, как правило, исчисляется годами. Низкоэнергетические ионы могут моделировать ПВА, образующиеся при реакторном облучении нейтронами, и, соответственно, моделировать каскады, характерные для нейтронного облучения. Поскольку сечение взаимодействия ионов с

веществом на несколько порядков выше, чем у нейтронов, длительность опыта по накоплению достаточного количества дефектов значительно меньше – порядка нескольких часов вместо месяцев и даже лет. Ионное облучение не вносит в материал наведенной радиации, что позволяет в дальнейшем исследовать облученный материал с помощью стандартного инструментария. Идея проводить имитационные эксперименты на пучках тяжелых ионов видится привлекательной, поскольку при этом становится возможным проведение экспресс-анализа радиационной стойкости конструкционных материалов. Только для материалов, прошедших данную проверку, имеет смысл в дальнейшем проводить дорогостоящую процедуру облучения нейтронами, чтобы анализ на радиационную стойкость был полным. Для исключения влияния химических реакций облучение проводится на пучках ионов, составляющих основу исследуемого материала. На установках ТИПр (рис. 12) и СОРМАТ проведено облучение образцов пучками ионов железа с флюенсами вплоть до 10^{17} см⁻² (что соответствует достижению радиационной повреждаемости кристаллического материала на уровне более 10 сна – смещений-на-атом) при нагреве образцов вплоть до +500°С.

На рис. 13 показана достигнутая повреждающая доза и скорость ее набора на установке ТИПр. На этом же рисунке представлены для сравнения ряд других установок, на которых проводятся исследования радиационной стойкости материалов, включая самый мощный исследовательский реактор БОР=60.

Ускоренный в ТИПр-1 пучок ионов меди, генерируемый разработанным источником с вакуумно-дуговым разрядом, был использован для работ по изучению взаимодействия ионного пучка с веществом в разных агрегатных состояниях. Проведены экспериментальные исследования тормозных потерь ионов меди с начальной энергией 101 кэВ/нуклон в различных материалах. На основе полученных данных определены тормозные способности газов (азота и водорода) и углеродных фольг для ионов меди данной энергии:

$$S_{N,exp} = (9,9 \pm 0,6) \text{ МэВ см}^2/\text{мг}; \quad S_{H,exp} = (27,1 \pm 5,0) \text{ МэВ см}^2/\text{мг};$$

$$S_{C,exp} = (9,45 \pm 0,70) \text{ МэВ см}^2/\text{мг}.$$

Продемонстрирован существенный рост

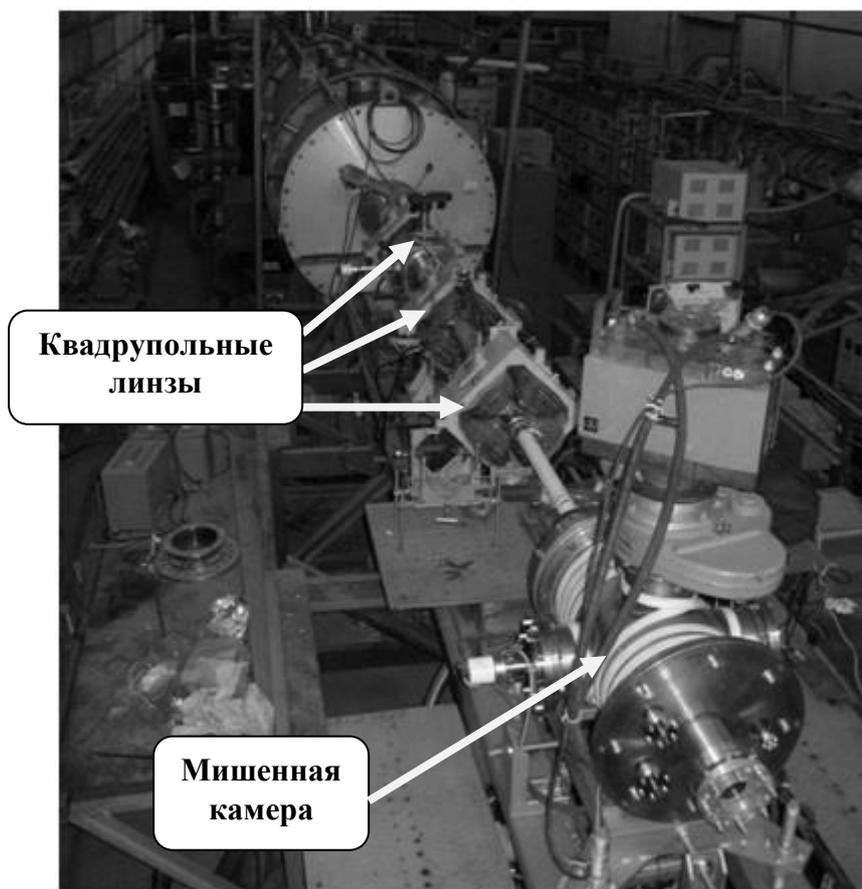


Рисунок 12 – Внешний вид канала вывода
(общая длина канала вывода пучка ~5,5 метров)

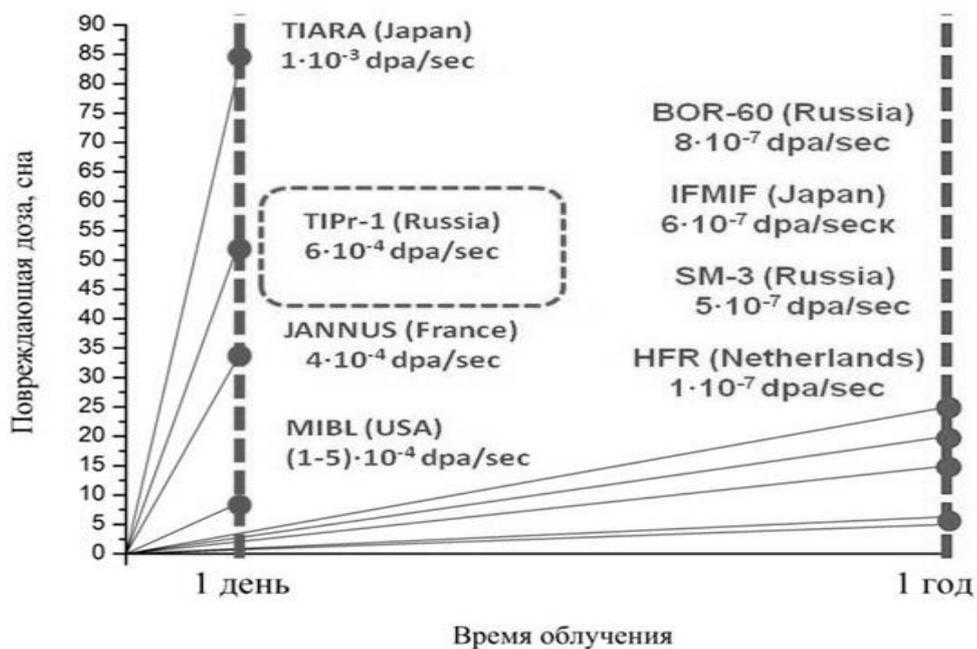


Рисунок 13 – Скорость набора дозы радиационных повреждений сна
(смещений-на-атом, в англоязычной литературе - dpa) на различных
установках

тормозной способности водородной плазмы по сравнению с холодным неионизованным веществом (минимум в 5 раз).

На стенде УИС (универсальный исследовательский стенд) проведены работы по изучению возможности создания полупроводниковых устройств на основе дисилицида рения. Проведены облучения с флюенсами вплоть до 10^{18} см⁻², и показано образование структур, близких к так называемым квантовым точкам, представляющим интерес для создания уникальных полупроводниковых устройств на их основе.

Результаты проведенных исследований по развитию и совершенствованию источников ионов твердотельных веществ позволили создать в НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ сеть экспериментальных установок ионного облучения и имплантации:

– ускоритель пучков тяжелых ионов ТИПр с оригинальными конструкциями канала вывода пучка и мишенной камеры для экспресс-анализа материалов ядерных и термоядерных реакторов, а также для изучения процессов по взаимодействию ускоренного ионного пучка с плазменными и газовыми мишенями;

– установку СОРМАТ для воздействия ионного пучка на образцы, предназначенные для последующего их исследования методами атомно-зондовой томографии;

– установку УСИ для ультранизкоэнергетической ионной имплантации в полупроводниковые подложки.

Все это предопределило развертывание широкого круга исследований как в области фундаментальной физики, так и для решения прикладных задач.

В Заключение представлены основные результаты работы, а именно:

1. Установлено, что инжекция высокоэнергетического пучка электронов в плазму вакуумно-дугового разряда, обеспечивающая дополнительную ионизацию ускоренными электронами, приводит к повышению как максимального зарядового состояния ионов металлов, так и их среднего заряда в дуговой плазме. При этом возможность независимого регулирования параметров электронного пучка и плазмы обуславливает расширение

диапазона устойчивых параметров дуги. Разработанная на этом принципе оригинальная конструкция вакуумно-дугового источника ионов металлов e-MEVVA позволила повысить зарядность пучка ионов свинца с $3+$ до $6+$ без потери интенсивности извлекаемого из плазмы ионного пучка.

2. Экспериментально показано, что реализация вакуумной дуги в форме так называемого «ступенчатого разряда» в сильном продольном магнитном поле с большим градиентом, характеризующаяся последовательным вводом энергии в дуговой разряд, приводит к увеличению удельного энерговклада в плазму и образованию фракции высокоэнергетических плазменных электронов, обеспечивающих условия для ступенчатой ионизации в дуговой плазме. В созданном на основе этого подхода вакуумно-дуговом источнике ионов металлов MEVVA-M для пучков ионов урана и свинца достигнуто повышение в 1,5 раза величины среднего заряда ионного пучка.

3. Установлено, что в разрядной системе ячейки Пеннинга с термокатодом косвенного накала, используемой в источнике ионов газов и ионов твердотельных непроводящих веществ типа Bernas, широко используемом для легирования полупроводников, инжекция части высокоэнергетического электронного пучка, предназначенного для нагрева катода, в разрядный промежуток, приводит к дополнительному нагреву электронного компонента плазмы. Это обеспечивает многократную ионизацию в плазме и, соответственно, повышение средней зарядности извлеченного из плазмы ионного пучка.

4. Экспериментально показано, что в ионном источнике типа Bernas модернизация конструкции разрядной ячейки вместе с оптимизацией режимов горения разряда и его параметров обеспечивает условия для генерации в плазме молекулярных ионов многоатомных борсодержащих соединений (декаборана, карборана и др.) и формирования интенсивного пучка многоатомных молекулярных ионов с высоким долевым содержанием бора с плотностью тока ионного пучка уровня 1 mA/cm^2 .

5. В ионном источнике типа Bernas, модернизированном для получения пучков многоатомных молекулярных ионов с высоким долевым содержанием

бора, экспериментально показано и теоретически обосновано, что использование в качестве рабочего вещества специального борсодержащего соединения, наряду с генерацией интенсивного пучка молекулярных ионов, обеспечивает непрерывную очистку электродов разрядной камеры ионного источника от тугоплавких фрагментов борсодержащих соединений. Самоочистка разрядной камеры существенно повышает надежность ионного источника и увеличивает его срок службы. Получен патент на способ самоочистки разрядной камеры в ходе работы по генерации пучков многоатомных борсодержащих молекулярных ионов.

6. Результаты проведенных исследований по развитию и совершенствованию источников ионов твердотельных веществ позволили создать в НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ сеть экспериментальных установок ионного облучения и имплантации:

- ускоритель пучков тяжелых ионов ТИПр с оригинальными конструкциями канала вывода пучка и мишенной камеры для экспресс-анализа материалов ядерных и термоядерных реакторов, а также для изучения процессов по взаимодействию ускоренного ионного пучка с плазменными и газовыми мишенями;

- установку СОРМАТ для воздействия ионного пучка на образцы, предназначенные для последующего их исследования методами атомно-зондовой томографии;

- установку УИС для ультранизкоэнергетической ионной имплантации в полупроводниковые подложки.

7. Разработанный источник на основе вакуумной дуги и его вариации, увеличивающие зарядовое состояние ионов генерируемого им пучка, позволили развернуть в НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ широкую программу по использованию пучков тяжелых ионов как для фундаментальных исследований, так и для работ прикладного назначения. В области фундаментальных исследований проведены экспериментальные работы по изучению взаимодействия пучка с плазменной и газовой мишенью при энергиях пучка на пределе применимости классической теории

торможения заряженных частиц. Использование ионного источника с вакуумной дугой позволило добиться большого прогресса в разработке и применении методик имитационных экспериментов по исследованию радиационной стойкости существующих и разрабатываемых конструкционных материалов как для ядерных, так и для будущих термоядерных реакторов. Разработаны методики пучковых экспериментов для облучения образцов пучками ионов непосредственно с ионного источника для последующего их изучения самыми современными методами атомно-зондовой томографии. Кроме того, пучки ионов железа, титана, ванадия, вольфрама, генерируемые ВДИИМ и ускоренные тяжелоионным ускорителем с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой до энергии 100 кэВ/нуклон в ускорителе ТИПр-1, используются для проведения имитационных экспериментов на образцах, приготовленных для последующего изучения методами электронной микроскопии.

Перспективные результаты получены с использованием разработанного вакуумно-дугового источника ионов ВДИИМ в области получения полупроводников на основе силицида рения. Генерируемый ВДИИМ пучок ионов рения имплантировался в кремниевую подложку, в результате чего образовывались так называемые «квантовые точки».

Источник пучков многоатомных борсодержащих молекулярных ионов обеспечивает техническую возможность вывода отечественных имплантационных установок на уровень технологических норм 20 нм и менее.

Основные публикации автора по теме диссертации:

1. Источник тяжелых малозарядных ионов с вакуумной дугой / В.А. Баталин, А.А. Васильев, Ю.Н. Волков, Т.В. Кулевой, С.В. Петренко // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-Физические Исследования (Теория и Эксперимент). – 1989. – Вып. 5 (5). – стр. 98-100.

2. Vacuum Arc Ion Source for the IТЕР RFQ Accelerator / V. Batalin, Y. Volkov, T. Kulevoy, S. Petrenko // Review of Scientific Instruments. – 1994.- 65(10). - pp. 3104-3108.

3. Optimization of U(4+) Ions at Output MEVVA Ion Source / V. Batalin, R. Kuybeda, T. Kulevoy, S. Petrenko // Review of Scientific Instruments.– 1996. - 67(2). - pp. 1-2.
4. Electron-Beam Enhancement of Ion Charge State Fractions in the Metal-Vapor Vacuum-Arc Ion Source / A. Bugaev, V. Gushenets, G. Yushkov, E. Oks, T. Kulevoy, A. Hershcovitch, B.M. Jonson, // Applied Physics Letters. – 2001. – V.79, No. 7. – pp. 919-921.
5. Повышение зарядности пучка ионов урана в источнике вакуумно-дугового типа (MEVVA) / Т.В. Кулевой. Р.П. Куйбида, С.В. Петренко, Д.Н. Селезнев, В.И. Першин, В.А. Баталин, А.А. Коломиец // Приборы и Техника Эксперимента. – 2002. – № 3. – стр. 5-9.
6. Electron-beam enhancement of the metal vapor vacuum arc ion source / V.A. Batalin, A.S. Bugaev, V.A. Gushenets, A. Hershcovitch, B.M. Jonson, A.A. Kolomiets, R.P. Kuibeda, T.V. Kulevoy, E.M. Oks, V.I. Pershin, S.V. Petrenko, D.N. Seleznev, G.Yu. Yushkov // Journal of Applied Physics. – 2002.– V.92. – N.5. – pp. 2884-2889.
7. Further development of the E-MEVVA ion source. / V.A. Batalin, A.S. Bugaev, V.A. Gushenets, A. Hershcovitch, B.M. Jonson, A.A. Kolomiets, R.P. Kuibeda, T.V. Kulevoy, E.M. Oks, V.I. Pershin, S.V. Petrenko, D.N. Seleznev, G.Yu. Yushkov // Review of Scientific Instruments. – 2002. – vol.73, no.2. – pp. 702-705.
8. Two approaches to electron beam enhancement of the metal vapor vacuum arc ion source / B.M. Johnson, A.Hershcovitch, A. Bugaev, V. Gushenets, E. Oks, G. Yushkov, V.A. Batalin, A.A. Kolomiets, R.P. Kuibeda, T.V. Kulevoy, V.I. Pershin, S.V. Petrenko, D.N. Seleznev // Laser and Particle beams.– 2003. – 21. – pp. 103-108.
9. Highly stripped ion sources for MeV ion implantation / V.A. Batalin, A.S. Bugaev, V.I. Gushenets, A. Hershcovitch, B.M. Johnson, A.A. Kolomiets, R.P. Kuibeda, B.K. Kondratiev, T.V. Kulevoy, I.V. Litovko, E.M. Oks, V.I. Pershin, H.J. Poole, S.V. Petrenko, D.N. Seleznev, A.Ya. Svarovski, V.I. Turchin, and

G.Yu. Yushkov // Review of Scientific Instruments. – 2004. – 75(5). – pp. 1900-1903.

10. Новый Экспериментальный Канал на ускорителе ТИПр-1 / А.Д. Фертман, В.П. Дубенков, С.А. Высоцкий, В.А. Кошелев, Т.В. Мутич, Т.В. Кулевой, Р.П. Куйбида, В.И. Першин, А.А. Голубев, Б.Ю. Шарков // Приборы и Техника Эксперимента. – 2005.– № 5. – стр. 5-9.

11. Enhancement of ion beam charge states by adding a second anode to the metal-vapor vacuum-arc ion source / T.V. Kulevoy, V.A. Batalin, A. Hershcovitch, B.M. Jonson, A.A. Kolomiets, R.P. Kuibeda, D.A. Kashinsky, V.G. Kuzmichev, V.I. Pershin, S.V. Petrenko, D.N. Seleznev, E.M. Oks // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.– 2004. – 522. – pp. 171-177.

12. IТEP Berna IS with additional e-beam / T.V. Kulevoy, R.P. Kuibeda, S.V. Petrenko, V.A. Batalin, V.I. Pershin, G.N. Kropachev, A. Hershcovitch, B.M. Jonson, V.I. Gushenets, E.M. Oks, H.J. Poole // Review of Scientific Instruments. – 2006. – V.77 (3). – 03C110.

13. Ion sources for the varying needs of ion implantation / A. Hershcovitch, V.A. Batalin, A.S. Bugaev, V.I. Gushenets, B.M. Johnson, A.A. Kolomiets, G.N. Kropachev, R.P. Kuibeda, T.V. Kulevoy, I.V. Litovko, E.S. Masunov, E.M. Oks, V.I. Pershin, S.V. Petrenko, S.M. Polozov, H.J. Poole, I. Rudskoy, D.N. Seleznev, P.A. Storozhenko, A.Ya. Svarovski, G.Yu. Yushkov // Review of Scientific Instruments. – 2006 – V.77. - 03B510.

14. Transport line for beam generated by IТEP Bernas ion source / S.V. Petrenko, G.N. Kropachev, R.P. Kuibeda, T.V. Kulevoy, and V.I. Pershin // Review of Scientific Instruments. - 2006. - 77(3). – 03C112.

15. Decaborane beam from IТEP Berna ion source / T.V. Kulevoy, S.V. Petrenko, R.P. Kuibeda, A. Batalin, V.A. Pershin, A.V. Kozlov, Yu.B. Stasevich, A. Hershcovitch, V.B. Johnson, E.M. Oks, V.I. Gushenets, H.J. Poole P.A. Storozhenko⁵, E.L. Gurkova⁵, O.A. Alexeyenko // Review of Scientific Instruments. – 2006. – V.77(3). – 03C102.

16. Status of IТEP decaborane ion source program / T.V. Kulevoy, S. Petrenko, R. Kuibeda, D.N. Seleznev, V. Koshelev, A. Kozlov, Y. Stasevich,

A.L. Sitnikov, I.M. Shamailov, V. Pershin, A. Hershcovitch, B. Jonson, V. Gushenets, E. Oks, E.S. Masunov, S.M. Polozov, H. Poole // Review of Scientific Instruments. – 2008. – V.79. – 02C501.

17. Bernas ion source discharge simulation / I. Roudskoy, T.V. Kulevoy, S.V. Petrenko, R.P. Kuibeda, D.N. Seleznev, V.I. Pershin, A. Hershcovitch, B.M. Jonson, V.I. Gushenets, E.M. Oks, H.P. Poole // Review of Scientific Instruments. – 2008. – V.79. - 02B313.

18. Ion sources for energy extremes of ion implantation / A. Hershcovitch, V.A. Batalin, A.S. Bugaev, V.I. Gushenets, B.M. Johnson, A.A. Kolomiets, G.N. Kropachev, R.P. Kuibeda, T.V. Kulevoy, I.V. Litovko, E.S. Masunov, E.M. Oks, V.I. Pershin, S.V. Petrenko, S.M. Polozov, H.J. Poole, I. Rudskoy, D.N. Seleznev, P.A. Storozhenko, A.Ya. Svarovski, G.Yu. Yushkov // Review of Scientific Instruments. – 2008. – V.79. – 02C507.

19. ITEP MEVVA ion beam for reactor material investigation / T. Kulevoy, R. Kuibeda, G. Kropachev, A. Kozlov, B. Chalyh, A. Aleev, A. Fertman; A. Nikitin, S. Rogozhkin // Review of Scientific Instruments. – 2010. – v. 81. – p. 02B906.

20. Carborane beam from ITEP Bernas ion source for semiconductor implanters / D. Seleznev G. Kropachev, A. Kozlov, R. Kuibeda, V. Koshelev, T. Kulevoy, A. Hershcovitch, B. Jonson, J. Poole, O. Alexeyenko, E. Gurkova, E. Oks, V. Gushenets, S. Polozov, and E. Masunov // Review of Scientific Instruments. – 2010. – V.81. – 02B901.

21. ITEP MEVVA ion beam for rhenium silicide production / T. Kulevoy, N. Gerasimenko, D. Seleznev, G. Kropachev, A. Kozlov, R. Kuibeda, P. Yakushin, S. Petrenko, N. Medetov, O. Zaporozhan // Review of Scientific Instruments. – 2010. – V.81. – 02B905.

22. Исследование динамики пучка ионов железа второй зарядности в канале вывода пучка линейного ускорителя тяжелых ионов ТИПр-1 с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой / Г.Н. Кропачев, А.И. Семенников, Р.П. Куйбида, И.А. Стоякин, Б.Б. Чалых, С.В. Плотников, С.В. Рогожкин, А.А. Алеев, А.А. Никитин, Н.Н. Орлов, Д.Н. Селезнев,

Т.В. Кулевой // Ядерная физика и инжиниринг. – 2012. – том 3, № 3. – стр. 246-251.

23. Настройка Канала Вывода Ускорителя ТИПр-1 для Имитационных Экспериментов по Изучению Радиационной Стойкости Реакторных Материалов / Р.П. Куйбида, Т.В. Кулевой, Б.Б. Чалых, А.И. Семенников, Т.В. Кулевой, Г.Н. Кропачев, И.А. Стоякин, А.О. Черница, А.Д. Фертман, А.А. Алеев, А.А. Никитин, Н.Н. Орлов, С.В. Рогожкин // Вопросы атомной науки и техники, сер. Ядерно-физические исследования. – 2012. – в.4. – стр. 68-70.

24. Имитационный Эксперимент по Изучению Радиационной Стойкости Реакторных Материалов на Инжекторе Ускорителя ТИПр-1/ Р.П. Куйбида, Б.Б. Чалых, В.Б. Шишмарев, Н.Ю. Грачев, А.Д. Фертман, А.А. Алеев, А.А. Никитин, Н.Н. Орлов, С.В. Рогожкин, Т.В. Кулевой // Вопросы атомной науки и техники, сер. Ядерно-физические исследования. – 2012. – в.4. – стр. 188-190.

25. Rhenium ion beam for implantation into semiconductors / T.V. Kulevoy, N.N. Gerasimenko, D.N. Seleznev, P. Fedorov, A.A. Temirov, M.E. Alyoshin, S.V. Kraevsky, D.I. Smirnov, P.Ev. Yakushin, V.V. Khoroshilov // Review of Scientific Instruments. – 2012 – V.83. – 02B913.

26. Имитационный эксперимент по изучению радиационной стойкости перспективной ферритно-мартенситной стали, упрочненной дисперсными включениями / С.В. Рогожкин, Т.В. Кулевой, Н.А. Искандаров, Н.Н. Орлов, Б.Б. Чалых, А.А. Алеев, Н.Ю. Грачев, Р.П. Куйбида, А.А. Никитин, А.Д. Фертман, В.Б. Шишмарев // Атомная энергия. – 2013. – Т. 114. – стр. 12-16.

27. Development of the ion source for cluster implantation / T.V. Kulevoy, D.N. Seleznev, A.V. Kozlov, R.P. Kuibeda, G.N. Kropachev, O.A. Alexeyenko, S.N. Dugin, E.M. Oks, V.I. Gushenets, A. Hershcovitch, V.B. Johnson, H.J. Poole // Review of Scientific Instruments. – 2014. – 85. – 02A501.

28. Molecular ion sources for low energy semiconductor ion implantation / A. Hershcovitch, V.I. Gushenets, D.N. Seleznev, A.S. Bugaev, S. Dugin, E.M. Oks,

T.V. Kulevoy, O. Alexeyenko, A. Kozlov, G.N. Kropachev, R.P. Kuibeda, S. Minaev, A. Vizir and G.Yu. Yushkov // Review of Scientific Instruments. – 2016. – 87. – 02B702.

29. Simulation of irradiation effects with ions on the RFQ linac HIPr / P.A. Fedin, M.S. Saratovskikh, R.P. Kuibeda, A.L. Sitnikov, T.V. Kulevoy, A.A. Nikitin and S.V. Rogozhkin // 6th International Congress «Energy Fluxes and Radiation Effects», IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1115 – 2018. – 032026.

Патент Российской Федерации и США по теме диссертации:

30. Д.Н. Селезнев, Т.В. Кулевой, Г.Н. Кропачев, Р.П. Куйбида, А. Гершкович, Е.М. Окс, В.И. Гушенец, О.В. Алексеенко, Э.Л. Гуркова, С.Н. Дугин, П.А. Стороженко. Способ непрерываемого производства пучка ионов карборана с постоянной самоочисткой ионного источника и компонент системы экстракции ионного имплантатора // Патент РФ, № 2 522 662. Бюл. № 20, 03.08.2011

A. Hershcovitch, O. Alexeyenko, T. Kulevoy, R. Kuibeda, E. Oks, V. Gushenets, P. Storozhenko, E. Gurkova, S. Dugin, G. Kropachev, D. Seleznev. Method for Uninterrupted Production of a Polyatomic Boron Molecular Ion Beam with Self-Cleaning // Patent US WO/2013/019432 07.02.2013.