

На правах рукописи

**Визирь Алексей Вадимович**

**СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНЫХ  
ГАЗОВЫХ РАЗРЯДОВ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ  
ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ПОТОКОВ ИОНОВ И ПЛАЗМЫ**

05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

ТОМСК – 2011

Работа выполнена в Институте сильноточной электроники СО РАН,  
Томском государственном университете систем управления  
и радиоэлектроники

Научный консультант: доктор технических наук,  
профессор  
Окс Е.М.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Бельченко Юрий Иванович

доктор технических наук,  
с.н.с.  
Озур Григорий Евгеньевич

доктор технических наук,  
профессор  
Усов Юрий Петрович

Ведущая организация: Институт прикладной физики РАН,  
г. Нижний Новгород.

Защита состоится «18» ноября 2011 г. в 15 часов на заседании  
диссертационного совета Д.003.031.01 в Институте сильноточной Электро-  
ники СО РАН по адресу: 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института сильноточ-  
ной электроники СО РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук

Рыжов В.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Наблюдаемый в последние годы значительный научный и практический интерес к разработке новых устройств для генерации низкоэнергетических ионных пучков и потоков плазмы обусловлен непрерывно расширяющейся областью их применений. Среди наиболее перспективных применений таких устройств следует, прежде всего, отметить создание различных функциональных покрытий, а также процессы модификации поверхностных свойств различных материалов, в том числе и полупроводников. Основными направлениями совершенствования методов генерации ионных пучков и плазмы на современном этапе их развития являются:

- повышение интенсивности генерации ионов с целью увеличения производительности и сокращения времени технологического цикла;
- уменьшение энергии ионов для снижения глубины модифицированного слоя обрабатываемой поверхности, а также для снижения, вплоть до полного исключения, «загрязнения» ионных пучков и плазменных потоков продуктами распыления материалов электродов разрядных систем и стенок вакуумной камеры;
- точное управление энергией ионов вместе с уменьшением ширины энергетического спектра ионного потока;
- снижение расхода рабочего газа, повышение эффективности ионизации газа, а также расширение диапазона рабочих давлений этих устройств в область более низких значений, необходимых для транспортировки ионов с минимально возможной энергией;
- генерация плазмы и пучков ионов доноров и акцепторов для ионной имплантации в полупроводники.

Несмотря на существовавшее к моменту начала работ многообразие источников ионов и генераторов плазмы, многие из которых обладают комплексом уникальных параметров, потребность в улучшении эксплуатационных характеристик и параметров таких устройств обуславливает необходимость их дальнейшего совершенствования. На определенном этапе развития существующих ионно-плазменных систем возможности их дальнейшего совершенствования в результате оптимизации конструкции и рабочих параметров были уже детально отработаны и, в какой-то мере, исчерпали себя. В связи с этим потребовался принципиально новый подход к методам генерации пучков ионов и плазмы.

В диссертационной работе предложены физические принципы создания и представлены пути технической реализации принципиально новых типов ионно-плазменных технологических устройств, которые, в определенном смысле, могут рассматриваться как одна из альтернатив существующим источникам ионных пучков и генераторам плазмы. Основой для

этих устройств служат самостоятельные разряды двух типов. Это, прежде всего, самостоятельный разряд с внешней инжекцией электронов, концепция использования которого в ионно-плазменных технологических системах была предложена и опубликована автором диссертационной работы в 1997 году. Ко второму типу относится самостоятельный импульсный магнетронный разряд с мишенью из бора в режиме самораспыления, впервые реализованный в 2010 году. К настоящему времени на основе таких разрядных систем создан достаточно широкий ряд ионно-плазменных устройств с более широкими функциональными возможностями и более высокими удельными и интегральными выходными параметрами.

В большинстве разработанных разрядных систем с инжекцией электронов, генерация электронов осуществляется на основе разряда с «холодным» (не накаливаемым до термоэмиссионных температур) катодом, обладающим известными преимуществами по сравнению с термоэмиттером. По своим функциональным возможностям и выходным параметрам разработанные ионно-плазменные системы с инжекцией электронов наиболее близки к плазменным ускорителям на основе эффекта Холла (так называемые «торцевые холловские ускорители», а также «ускорители с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения»). Область применений холловских ускорителей в настоящее время чрезвычайно широка, а поскольку разрядные системы с инжекцией электронов превосходят вышеназванные устройства по ряду принципиальных параметров, а именно – минимальному рабочему давлению и энергии ионов, они могут не только заменить плазменные ускорители Холла, но и существенно расширить область их технологического применения.

С точки зрения генерации объемной плазмы и ионных пучков бора ближайшими аналогами по выходным параметрам разработанных устройств являются ионные источники Фримана, в которых используется разряд с термоэмиттером в продольном магнитном поле. В таких источниках для подачи в разрядную камеру рабочего вещества применяются два способа: использование газообразных при комнатной температуре соединений бора ( $\text{BF}_3$ ,  $\text{B}_{10}\text{H}_{14}$ ), и испарение соединений бора с относительно низкой температурой сублимации ( $\text{BN}$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{B}_6\text{Si}$ ). Очевидно, что для получения пучков с высоким содержанием ионов бора и первый, и второй способы требуют массовой сепарации пучка после его ускорения с помощью поворотного магнита, поскольку в ускоряемом пучке присутствует высокая доля посторонних ионов элементов вышеуказанных соединений бора.

**Цель работы** состояла в следующем:

1. Исследование систем на основе несамостоятельных газовых разрядов низкого давления, а именно разрядов с внешней инжекцией электронов, и несамостоятельного магнетронного импульсного разряда. Выявление условий устойчивого горения таких разрядов в области низких давлений и низких напряжений, прикладываемых к разрядному промежутку. Исследование ионно-эмиссионных свойств плазмы этих разрядов.

2. Оптимизация конфигурации разрядных систем и их рабочих параметров для решения следующих задач:

- генерации сильноточного (до 5 А) ионного потока низкой энергии (единицы-десятки эВ);
- получения ионных потоков с минимальным содержанием примесей;
- генерации однородной объемной плазмы;
- обеспечения устойчивого функционирования разрядов при пониженном давлении;
- генерации плазмы химически активных газов (кислорода, азота), и газообразных углеводородов;
- генерации плазмы и ионных пучков с высоким содержанием ионов материала мишени в системах на основе импульсного магнетронного разряда.

3. Разработка и реализация ионно-плазменного технологического оборудования на основе несамостоятельных разрядов низкого давления и демонстрация возможностей его эффективного применения для модификации поверхностных свойств различных материалов, в том числе и полупроводников.

**Научная новизна** работы заключается в том, что впервые:

1. Предложена и реализована концепция построения источников низкоэнергетических ионных пучков и потоков плазмы на основе двухступенчатой разрядной системы с инжекцией электронов, первая ступень которой является собственно эмиттером электронов, а вторая ступень обеспечивает ускорение инжектированных электронов и эффективную генерацию плазмы.

2. В качестве первой ступени разрядной системы с инжекцией электронов предложен и реализован ненакальный эмиттер электронов на основе дугового контрагированного разряда со «скрытыми» катодными пятнами. Показано, что принципы функционирования и оригинальная конструкция эмиттера обеспечивают многократное повышение ресурса устройства.

3. Показана возможность генерации однородной объемной газовой плазмы с концентрацией до  $8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$  на основе разряда с инжекцией электронов. Исследованы процессы генерации плазмы и измерены ее параметры.

4. Показано, что наложение аксиально-симметричного расходящегося магнитного поля на область инжекции электронов, которая одновремен-

но является областью генерации ионов и плазмы, приводит к формированию сильноточного ионного потока со сверхнизкой энергией (единицы-десятки эВ).

5. Сформулированы условия и определена область оптимальных параметров разрядной системы с инжекцией электронов, обеспечивающие генерацию ионных пучков и потоков плазмы с минимальным уровнем загрязнения.

6. Для несамостоятельного импульсного разряда магнетронного типа с катодом из бора реализован устойчивый режим самораспыления, обеспечивающий генерацию плазмы с долевым содержанием ионов бора до 99%.

**Научная и практическая ценность** работы состоит в том, что:

Совокупность полученных результатов, научных положений и выводов диссертационной работы, связанной с комплексным исследованием несамостоятельных разрядов низкого давления с ненакаливаемым эмиттером, может быть квалифицирована как новое крупное научное достижение в развитии вакуумной и плазменной электроники, заключающееся в создании на основе этих исследований нового класса источников ионов и генераторов плазмы с рекордными параметрами и более широкими функциональными возможностями, и отвечающими современным требованиям эффективного использования ионно-плазменных устройств в технологических процессах модификации поверхностных свойств различных материалов, включая полупроводниковые материалы.

**Практическая реализация** результатов работы. На основании проведенных исследований созданы и поставлены по международным контрактам Института сильноточной электроники СО РАН следующие ионно-плазменные устройства:

- источник ионов газов на основе тлеющего разряда с инжекцией электронов – в Национальную лабораторию Лоуренса, Беркли, США;
- источник газоразрядной плазмы и ионных пучков “SPACE” и три генератора объемной газоразрядной плазмы “SPACE-2” – в компанию «Файджен», Миннеаполис, США;
- малогабаритный источник пучков ионов газов и объемной плазмы – в Университет Сао-Пауло, Сао-Пауло, Бразилия;
- генератор объемной газоразрядной плазмы “SPACE-1” – использовался в Университете СунгКунКван, Сувон, Корея;
- источники интенсивных низкоэнергетических направленных потоков ионов газа ULEHIS-1, ULEHIS-2 и ULEHIS-3 – в компанию 4Wave, Inc., Стерлинг, Вирджиния, США.

Уникальные параметры созданных устройств обеспечивают эффективность их применения в различных вакуумно-плазменных технологических процессах и в научных исследованиях.

**Личный вклад автора.** В представленных в диссертационной работе результатах автор внес 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 постановке отдельных задач и обсуждении результатов работ активное участие принимали Е.М. Окс, Г.Ю. Юшков и П.М. Щанин. Существенная часть экспериментальных и конструкторских работ, обработка и анализ экспериментальных данных по разряду с внешней инжекцией электронов проведена автором совместно с М.В. Шандриковым. Фамилии соавторов, принимавших 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.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

1. Разряд с внешней инжекцией электронов, реализованный в двухкаскадной системе электродов, первая ступень которой является эмиттером электронов, а вторая - собственно генератором плазмы, обеспечивает получение объемной газовой плазмы, в том числе и плазмы химически активных газов, при давлении от  $3 \cdot 10^{-5}$  Торр с низким (менее  $10^{-5}$ ) уровнем примесей, что делает привлекательным его использование в технологических источниках ионных пучков и плазмы.

2. Ускорение инжектируемых электронов в катодном падении потенциала второй ступени двухкаскадной разрядной системы обеспечивает условия для достижения минимального напряжения горения сильноточного основного разряда (ниже порога ионного распыления), а также для стабильного инициирования и горения разряда в области предельно низких давлений.

3. В двухкаскадных газоразрядных системах с инжекцией электронов, используемых в технологических процессах ионно-плазменной модификации поверхностных свойств материалов, для генерации электронного потока целесообразно использовать ненакаливаемые плазменные эмиттеры электронов, в которых для генерации эмиссионной плазмы используются тлеющий разряд с полым катодом или дуговой разряд. При создании условий, затрудняющих попадание продуктов эрозии материала катода плазменного эмиттера во вторую разрядную ступень, использование дугового разряда вместо тлеющего обеспечивает повышение концентрации плазмы на порядок величины и снижение в той же степени уровня ее загрязнений.

4. В двухкаскадных разрядных системах с инжекцией электронов из плазмы дугового контрагированного разряда, повышение ресурса плазменного эмиттера электронов обеспечивается выполнением катодного электрода эмиттерного узла в виде полости с покрытием ее внутренней поверхности металлом с более низким пороговым током образования катодного

пятна. Расположение выходной апертуры этой полости на противоположном по отношению к сеточному аноду эмиттера торце обеспечивает эффективную фильтрацию микрокапельной фракции и снижает долю загрязнений генерируемой плазмы атомами и ионами металла материала дугового катода эмиттера до уровня, не превышающего 0,001%.

5. В аксиально-симметричной плазме разрядных систем с инжекцией электронов в область расходящегося магнитного поля, создается такое распределение потенциала, которое затрудняет радиальный дрейф ионов и, одновременно, обеспечивает их ускорение вдоль оси системы. В результате формируется интенсивный направленный поток ионов, с регулируемой в диапазоне единиц – десятков эВ энергией и энергетическим спектром шириной 2-3 эВ.

6. В планарной магнетронной разрядной системе с мишенью из слабопроводящего бора использование вспомогательного слаботоочного стационарного разряда в условиях термоизоляции мишени обеспечивает реализацию сильноточного импульсного разряда и его переход в режим самораспыления, при котором доля однозарядных ионов бора в плазме достигает 99 %.

7. На основе разрядных систем с инжекцией электронов создан и поставлен заказчику ряд ионно-плазменных устройств нового поколения с более высокими выходными характеристиками и эксплуатационными параметрами, способных функционировать в области низких давлений и обеспечивающих минимальный уровень примесей в плазме. Эти устройства удовлетворяют требованиям, предъявляемым к их использованию в микроэлектронике, и, по сравнению с аналогами, обеспечивают более высокое качество обработки. Кроме того, они привлекательны для их применения в технологических процессах предварительной активации и очистки поверхности металлов перед нанесением различных функциональных покрытий, синтеза твердых алмазоподобных покрытий, а также для получения сверхчистых оксидных и нитридных пленок.

**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 и численных оценок, сравнением полученных результатов с результатами других исследователей, а также практической реализацией научных положений и выводов при создании конкретных устройств, используемых в настоящее время в различных организациях.

**Апробация работы и публикации.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались более чем на 20 международных и отечественных научных конференциях, в том числе на 8, 12, 13 Международ-



ных конференциях по ионным источникам (ICIS) (Киото, Япония, 1999; Де Джу, Корея, 2007; Гатлинбург, США, 2009); 11 Международной конференции по физике плазмы (ICPP) (Австралия, Сидней, 2002); 31, 32, 34 Международных конференциях по физике плазмы (ICOPS) (Балтимор, США, 2004; Монтерей, США, 2005; Альбукерке, США, 2007); 18 Международной конференции по технологии ионной имплантации (ИТ) (Киото, Япония, 2010); 14 Международной конференции по модификации материалов ионными пучками (SMMIB) (Кушадасы, Турция, 2005); 12 Международной конференции по мощным пучкам частиц (BEAMS) (Хайфа, Израиль, 1998); 4 Азиатско-Европейской международной конференции по технологиям плазменной обработки поверхности (AEPSE) (Де Джу, Корея, 2003); 4-10 Международных конференциях по модификации свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц (СММ) (Томск, 1996, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010); 12 Симпозиуме по сильноточной электронике (SHCE) (Томск, 2000); 10 международной конференции по плазме газовых разрядов и ее технологическим применениям (GDPTTA) (Томск, 2007); 34 Объединенной конференции и выставке по воздушным и космическим двигателям (AAIA/ASME/SAE/ASEE) (Кливленд, США, 1998); на Международном совещании по новым применениям плазмы вакуумной дуги (озеро Байкал, 2002); Всероссийской научной конференции по физике низкотемпературной плазмы (Петрозаводск, 2004).

Материалы диссертационной работы опубликованы в 19 статьях и более чем в 20 докладах международных и Российских симпозиумов и конференций. Список основных публикаций приведен в конце автореферата. Эмиттер электронов на основе дугового контрагированного разряда с полым двухкомпонентным катодом защищен патентом Российской Федерации.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения с общим объемом 314 страниц, содержит 150 рисунков и 6 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 226 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность, цель, научная новизна и практическая ценность работы. Излагается краткое содержание диссертации и формулируются выносимые на защиту научные положения.

**Первая глава** содержит обзор современных литературных данных по физике и технике генерации низкоэнергетических ионных пучков и потоков плазмы. Анализируются принципы получения, конструктивные особенности и выходные параметры наиболее близких аналогов. Рассмотрены известные ионно-плазменные устройства на основе самостоятельных и не-самостоятельных газовых разрядов низкого давления; источники ионов

низкой энергии с электростатическим ускорением пучка; торцевые холловские ускорители и УЗДП; наиболее распространенный источник ионов полупроводниковых веществ, в частности бора (источник Фримана).

На основе физических оценок и анализа диапазонов рабочих параметров существующих устройств делается следующий вывод. Процессы рассеяния и перезарядки ионов газов, а также осаждения (аккомодации) атомов газа на поверхность, подвергающуюся ионно-плазменной обработке, накладывают ограничение на величину максимального рабочего давления ионно-плазменных устройств. Указанные факторы имеют особо сильное отрицательное влияние на процесс ионной обработки при низкой энергии ионов, необходимость снижения которой во многих процессах обусловлена, например, снижением структурных размеров обрабатываемых изделий и необходимостью создания сверхчистых покрытий с минимальным уровнем загрязнений частицами распыленных материалов вакуумного оборудования. Для более эффективной обработки требуется снижение рабочего давления, по сравнению с рабочим давлением существующих устройств.

Отмечается, что:

Наряду со снижением рабочего давления и энергии ионов, для создания сверхчистых покрытий требуется снижение напряжения горения разрядов, в которых генерируются ионы, до уровня порядка энергетического порога ионного распыления материалов, для снижения и даже полного предотвращения загрязнения газоразрядной плазмы частицами материала электродов (катодов) разрядных систем.

Понижение давления в известных устройствах на основе самостоятельных разрядов осуществляется за счет удлинения траектории ионизирующих электронов их магнитным или электростатическим удержанием в разрядной системе, либо комбинацией обоих методов.

Использование несамостоятельных разрядов для снижения напряжения горения и давления наиболее эффективно, однако в настоящее время наиболее распространенными разрядными системами на его основе являются системы с термоэмиттерами. Наряду с известными достоинствами термоэмиттера, такие системы имеют низкий ресурс при работе с химически активными газами, а испарение материала катода приводит к загрязнению плазмы и обрабатываемой подложки атомами и ионами материала эмиттера.

Существующие разрядные системы на основе двухступенчатых несамостоятельных разрядов с холодными электродами свободны от недостатков, присущих ионно-плазменным устройствам с термокатодом. Однако к моменту начала работы не существовало разрядных систем, обеспечивающих наиболее эффективный режим инжекции электронов с точки зрения понижения рабочего давления и напряжения горения разряда.

Поскольку в ионных источниках с системой ускорения пучка снижение энергии ионов при сохранении его тока ограничено пространственным зарядом, для генерации низкоэнергетических пучков широкое распространение получили ионные источники с бессеточным ускорением пучка – торцевые холловские ускорители и ускорители с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения. К известным недостаткам данных устройств следует отнести высокое рабочее давление, сравнительно высокую энергию ионов (сотни эВ) и широкий энергетический спектр ионного потока (от нуля до энергии, соответствующей напряжению горения разряда).

Существующие источники ионов твердотельных полупроводящих веществ основаны на использовании их различных химических соединений ( $\text{BN}$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{B}_6\text{Si}$ ,  $\text{BF}_3$ ,  $\text{B}_{10}\text{H}_{14}$ ), и, в связи с этим, в генерируемых ионных пучках присутствует значительная доля ионов посторонних веществ. Для получения пучков с высоким содержанием ионов требуемых элементов необходима магнитная сепарация ускоренных ионов.

На основании проведенного анализа в заключении главы формулируются задачи исследований.

**Вторая глава** посвящена технике и методикам эксперимента. Описаны используемые в работе устройства для генерации ионных пучков и плазмы на основе несамостоятельных разрядов низкого давления.

В низковольтных тлеющих разрядах доля электронов в токе катода составляет лишь единицы процентов. Поэтому при снижении рабочего давления до определенного значения недостаток ионизирующих

электронов начинает компенсироваться увеличением их ионизационной способности за счет повышения напряжения горения разряда. Для улучшения параметров разряда традиционно использовался термокатод. Разрядная система с внешней инъекцией электронов позволяет понизить рабочее давление и напряжение горения без использования термо катода. Обобщенная схема разрядных систем с внешней инъекцией электронов приведена на рис. 1. Тлеющий эмиттерный разряд с полым катодом производит электроны, а основной разряд ускоряет их в своем катодном падении и ионизует газ. Сеточный анод эмиттера и катод основного имеют один потенциал. Инжекция электронов эквивалентна повышению коэффициента вторичной

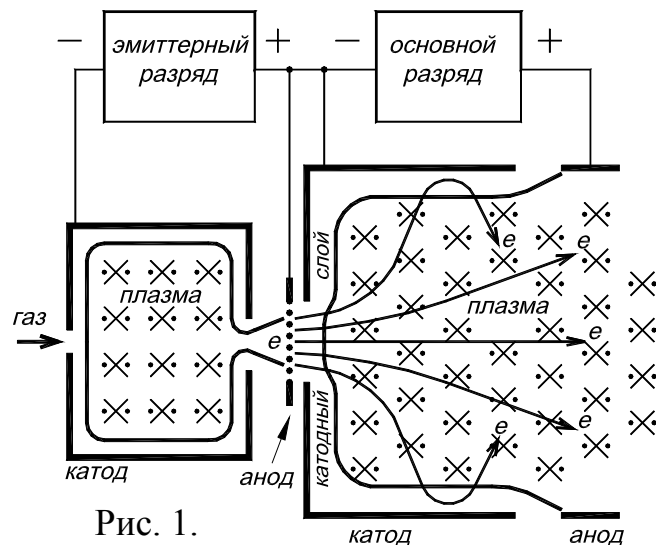


Рис. 1.

ионно-электронной эмиссии, значение которого является фундаментальной величиной, и не может быть повышено искусственно. Несмотря на кажущуюся простоту и ясность физического механизма данной системы, она к моменту начала работ не была реализована в конкретных ионно-плазменных устройствах.

Дальнейшее повышение тока разрядов ограничивается высокими энергетическими затратами на поддержание тлеющего эмиттерного разряда, и переходом в дугу. Дуговой разряд с катодным пятном мог бы быть эффективным эмиттером электронов, однако он характеризуется нестабильностью горения разряда при токах, близких к пороговому, и высокой эрозией катода, что приводит к загрязнению газовой плазмы и снижению ресурса. Проблема стабильного горения разряда решалась путем использования двухслойной внутренней поверхности катодной полости (рис. 2), когда основа катода, выполненная из металла с высоким пороговым током катодного пятна, покрывалась металлической пленкой с низким пороговым током.

В диапазоне токов между пороговыми для внешнего и рабочего металлов корпус катода не подвергается эрозии в катодном пятне, а внутренний металл переносится внутри полости с многократным осаждением его на внутреннюю поверхность, при относительно малом его выходе через катодную апертуру. В качестве материала основы использовались медь, молибден, тантал, а в качестве внутреннего материала – магний, висмут. Удельная эрозия магния в такой системе составила 1 мкг/Кл, что на 2 порядка ниже эрозии на плоском катоде. Интервал между техническим обслуживанием такого эмиттера – более 100 часов, а ресурс работы практически неограничен.

Несмотря на некоторые затраты напряжения внутри фильтра, необходимые для прохождения электронного тока по сложной траектории, напряжение горения эмиттера составляет лишь 25-40 вольт в широком диапазоне токов и давлений. Это позволило более чем на порядок увеличить ток, концентрацию плазмы и энергетическую эффективность по сравнению с эмиттером на основе тлеющего разряда.

Несмотря на низкий выход материала катода из эмиттера, для генерации плазмы с минимальным уровнем примесей требуется его дальнейшая фильтрация. Были реализованы разрядные системы для генерации объемной плазмы с различными фильтрами – от простейшего, со смещенными апертурами (рис. 3 а), до более сложных, исключающих прямую видимость выходной апертуры катода (рис. 3 б), и даже двукратно исключающих прямую видимость, с разворотом электронного потока на 180° (рис. 3 в).

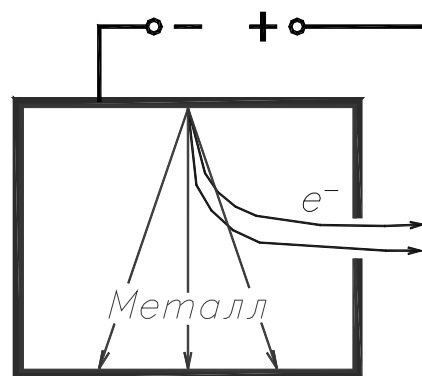


Рис. 2.

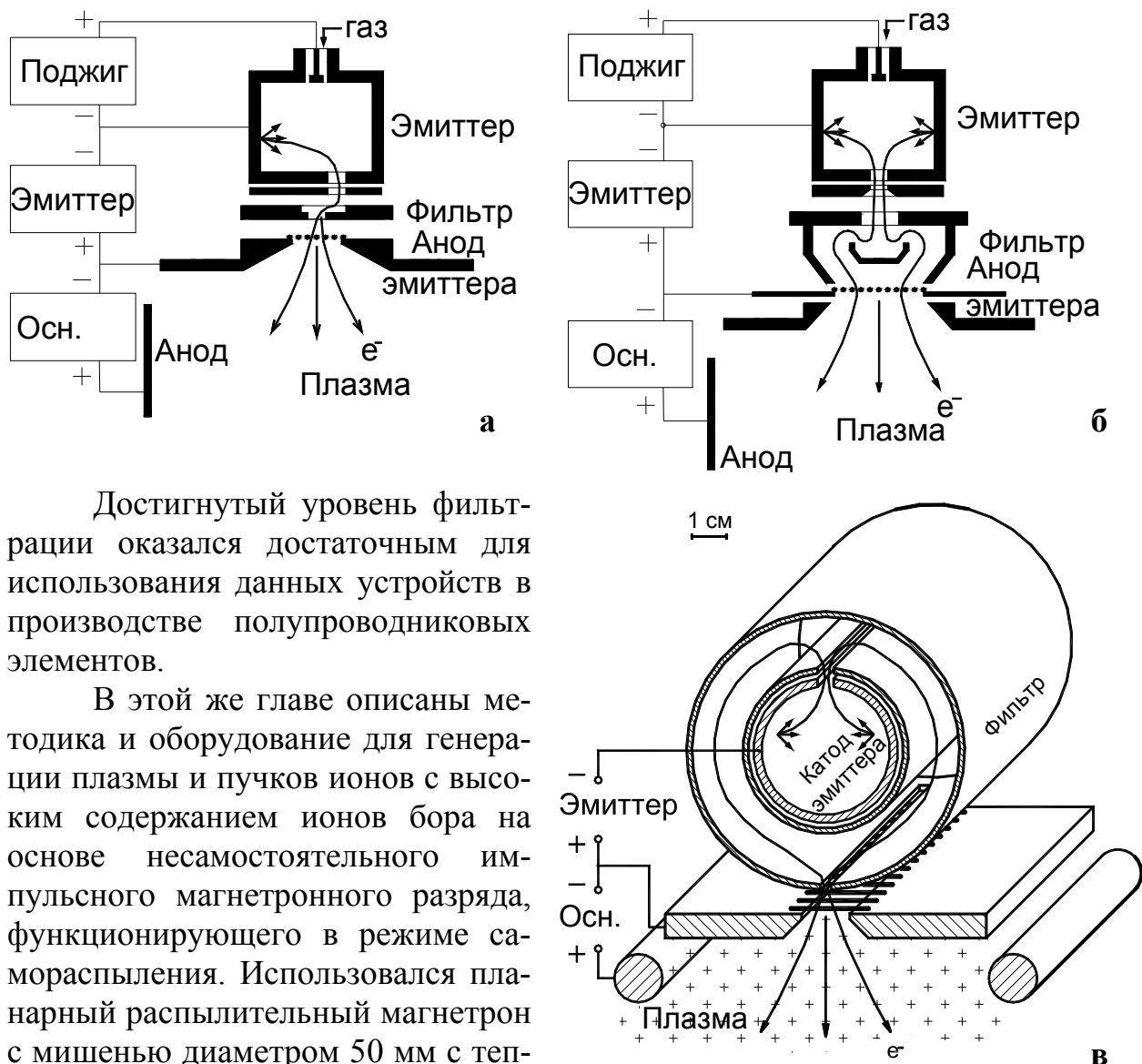


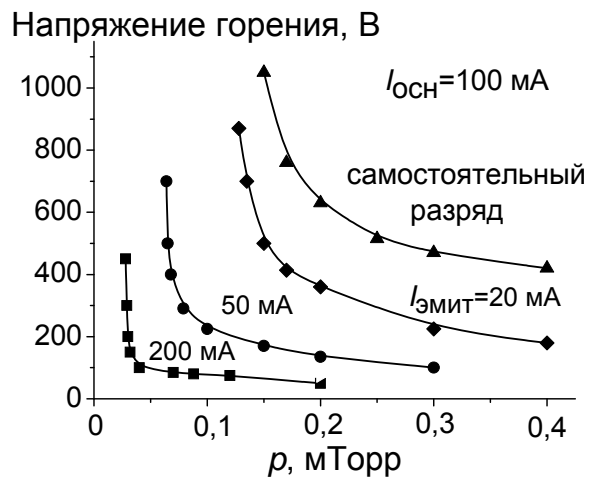
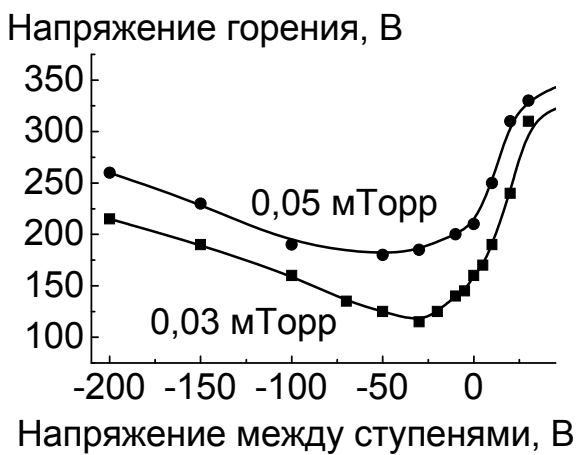
Рис. 3.

Достигнутый уровень фильтрации оказался достаточным для использования данных устройств в производстве полупроводниковых элементов.

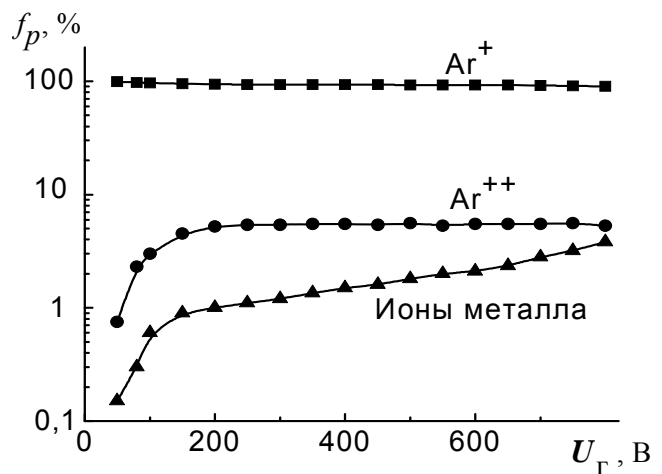
В этой же главе описаны методика и оборудование для генерации плазмы и пучков ионов с высоким содержанием ионов бора на основе несамостоятельного импульсного магнетронного разряда, функционирующего в режиме самораспыления. Использовался планарный распылительный магнетрон с мишенью диаметром 50 мм с теплоизолированной мишенью. Способ теплоизоляции обеспечивал большую площадь электрического контакта мишени с держателем и сохранение контакта при температурном расширении мишени.

Обсуждены особенности применения известных методик измерения параметров ионных пучков и плазмы для исследования разработанных разрядных систем. Помимо традиционных методик (цилиндр Фарадея, одиночные зонды Ленгмюра, двойные и накаливаемые зонды), использовалось и оригинальное экспериментальное оборудование - времяпролетный спектрометр, и электростатический анализатор энергии Юза-Рожанского. Для измерения масс-зарядового состава плазмы и распределения ионов по энергиям также использовался стандартный прибор "HIDEN", представляющий собой совокупность квадрупольного масс-спектрометра и анализатора энергии Юза-Рожанского.

**Третья глава** посвящена исследованию процессов генерации газоразрядной плазмы и ионных пучков на основе разряда с инжекцией электронов. Показано, что ускорение инжектированных электронов в слое положительного пространственного заряда катодного падения потенциала является оптимальным для уменьшения как напряжения горения, так и рабочего давления основного разряда. Между сеткой-анодом эмиттера и катодом основного разряда включался двухполярный источник напряжения. Это позволяло изменять энергию электронов относительно катодного падения потенциала основного разряда в сторону уменьшения и увеличения. Видно (рис. 4), что оптимальное напряжение на сетке лежит вблизи 0 В, что соответствует катодному падению. Уменьшение энергии ведет к снижению ионизационной способности, увеличение – к потерям электронов на стенках катодной полости. Небольшое отличие минимума от нулевого значения в сторону низких энергий объясняется предварительным ускорением электронов в двойном слое в выходной апертуре катода эмиттерного разряда.



Влияние инжекции электронов на напряжение горения при определенном рабочем давлении показано на рис. 5. Видно, что по сравнению с самостоятельным тлеющим разрядом с полым катодом, инжекция электронов позволяет снизить как напряжение горения, так и рабочее давление на порядок. Снижение рабочего давления необходимо для эффективного ускорения и транспортировки ионов; снижение напряжения горения - для значительного ослабления и даже исключения распыления электродов,



генерации чистой плазмы и повышения ресурса, о чем свидетельствует зависимость масс-зарядового состава плазмы от напряжения горения основного тлеющего разряда с полым катодом (рис. 6). Таким образом, получены следующие параметры разряда - одновременно 100 В,  $4 \cdot 10^{-5}$  Торр, и по отдельности 50 В,  $3 \cdot 10^{-5}$  Торр. Показано, что разрядные системы с инжекцией электронов позволяют генерировать плазму инертных газов, а также азота, кислорода, газообразных углеводородов со следующими параметрами: концентрация – до  $10^{11}$  см<sup>-3</sup>, объем плазмы - 1 м<sup>3</sup>, неоднородность концентрации -  $\pm 10\%$ , в том числе по углу, энергетическая эффективность – 120 эВ/ион, потенциал плазмы – 10-20 В, температура электронов – 4 – 10 эВ.

**Четвертая глава** посвящена генерации сильноточных ионных потоков сверхнизкой энергии (рис. 7). Холловские ускорители являются аналогами именно этих систем. Так же, как и в них, здесь на область генерации ионов накладывается расходящееся магнитное поле. Оно создается одним или двумя соленоидами. Дуговой эмиттер располагается внутри фильтра. Инжектируемый электронный поток разворачивается на 180°. Ионы извлекаются на коллектор. Отличие от холловских ускорителей – обратное направление электронного потока, от генератора в область более слабого магнитного поля, тогда как в холловских ускорителях электроны движутся в направлении более сильного поля.

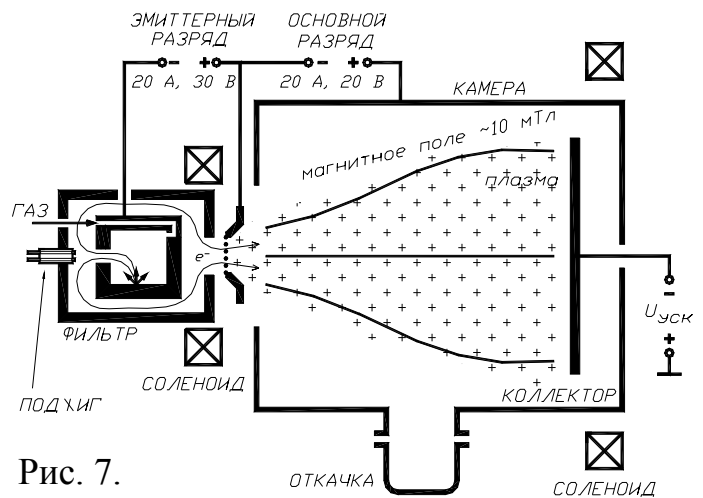


Рис. 7.

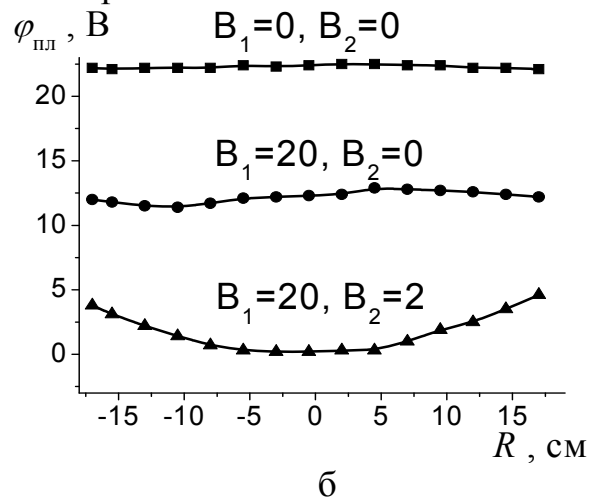
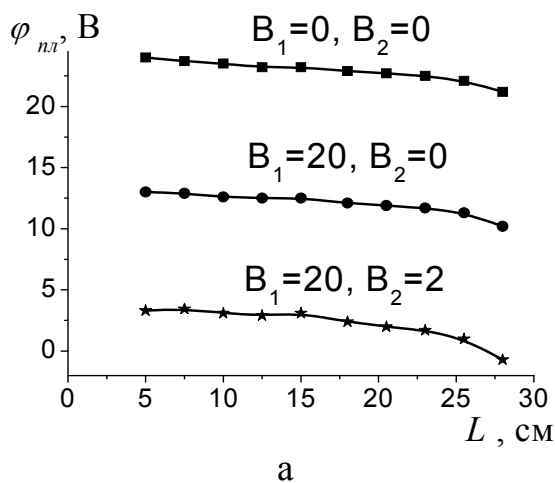


Рис. 8.

Показано, что в этих условиях в плазме возникает слабое электрическое поле, ускоряющее ионы к коллектору до энергии несколько эВ (рис. 8, а; у кривых указаны поля в центре левой и правой катушек в мТл), а радиальная составляющая этого электрического поля достигает величин, препятствующих потерям ионов на стенках разрядной камеры (рис. 8, б). В результате этих факторов при наложении магнитного поля ионный ток коллектора возрастает на порядок и достигает 5 А в стационарном режиме при токе эмиттерного разряда 37 А и рабочем давлении  $(2\div 5)\cdot 10^{-4}$  Торр, плотность тока достигает  $10 \text{ мА/см}^2$ . Ширина энергетического спектра ионов (рис. 9) хорошо соответствует аксиальному распределению потенциала в области генерации плазмы, где ионы набирают энергию. Средняя энергия ионов может регулироваться вариацией параметров разряда: снижается с рабочим давлением и магнитным полем, растет с током и напряжением основного разряда, и лежит в диапазоне единиц – десятков эВ.

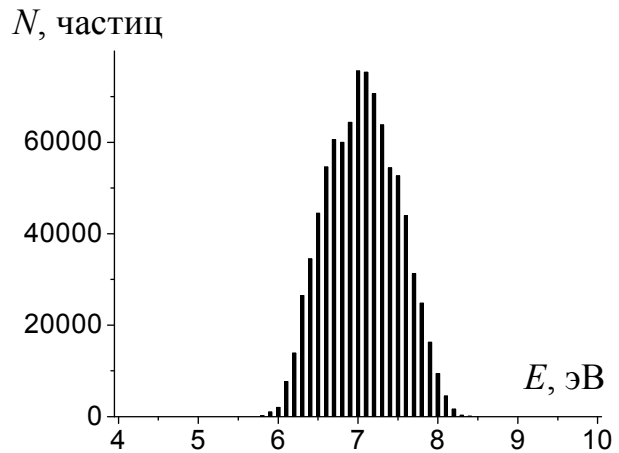


Рис. 9.

Результаты измерения масс-зарядового состава генерируемого ионного потока приведены на рис. 10.

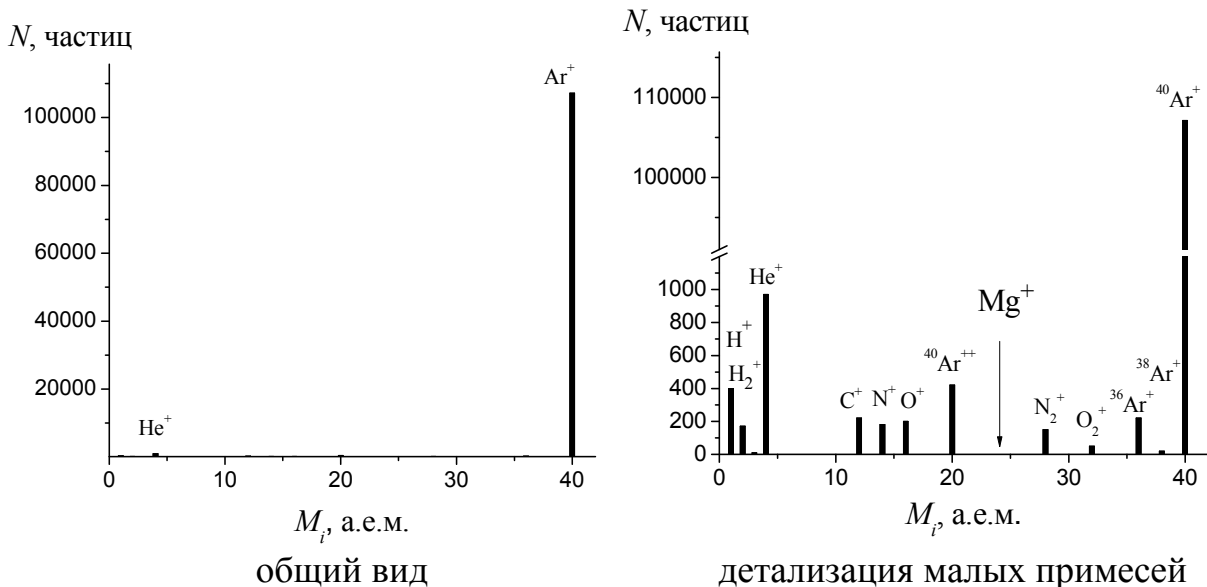


Рис. 10.

Доля однозарядных ионов рабочего газа (аргона) составляет 98,5%. Распределение ионов изотопов аргона с массой 36, 38, 40 а.е.м. соответствует их составу в природе. В потоке присутствуют ионы остаточного газа –



кислорода, азота, водорода и гелия, с суммарной долей порядка 1 %. Относительно высокое содержание ионов водорода и гелия, имеющих низкую температуру конденсации, объясняется использованием криогенной откачки. Ионов с массой более 40 а.е.м. зарегистрировано не было. В потоке есть 0,2% ионов углерода (единственного не газообразного материала), которые образуются из остаточного углекислого газа и из органических загрязнений вакуумной камеры. В пределах разрешающей способности анализатора HIDEN, который регистрирует  $10^5$  частиц, и, соответственно, долевое соотношение малых примесей не хуже  $10^{-5}$ , ионов металлов зарегистрировано не было, в том числе ионов магния – рабочего материала катода эмиттера. Такая степень чистоты ионного потока обеспечивается исключительно низким напряжением горения основного разряда (20 В), вместе с двухкратной фильтрацией инжектируемого электронного потока – в выходной апертуре эмиттера, и в фильтрующем электроде.

В пятой главе приведены результаты исследования параметров несамостоятельного сильноточного импульсного магнетронного разряда с мишенью из бора. Бор, являясь полупроводником, при комнатной температуре имеет низкую проводимость, недостаточную для реализации сильноточной формы разряда. Для этого требуется его нагрев. На рис. 11 приведена временная эволюция напряжения, тока и сопротивления мишени с момента приложения напряжения. Начальная проводимость контакта и мишени при комнатной температуре оказывается достаточной для горения разряда с током около 15 мА. Сопротивление мишени при этом составляет около 50 кОм. Через несколько минут мишень нагревается, и ее сопротивление снижается практически до нуля, напряжение падает, а ток возрастает до сотен мА. Это означает, что при высокой температуре электрический контакт мишени со-

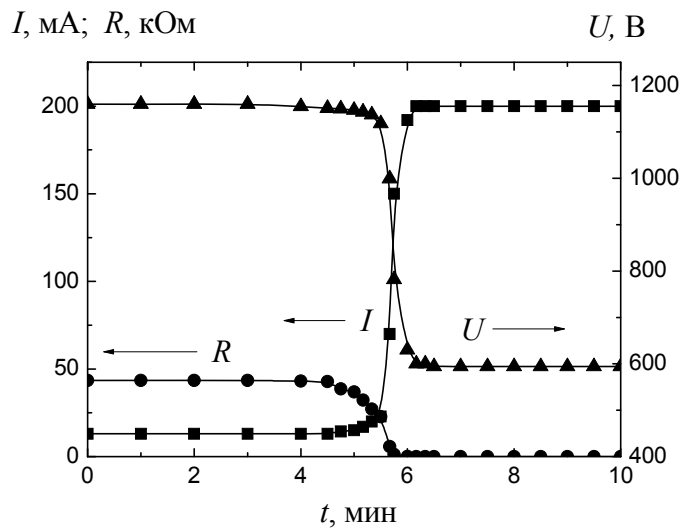


Рис. 11.

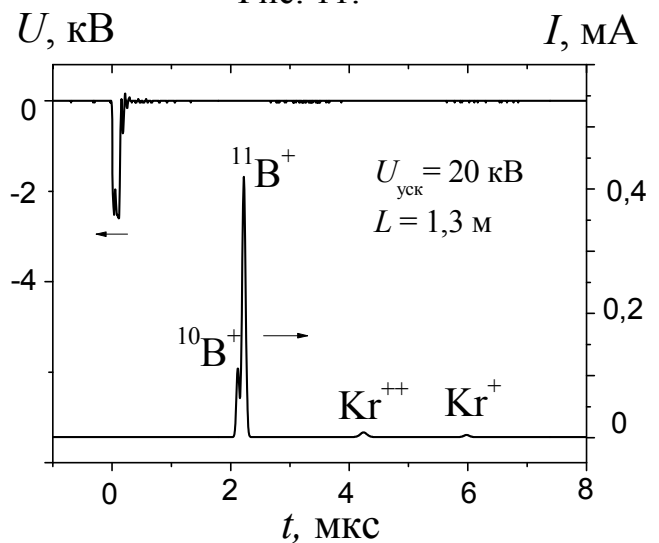


Рис. 12.

храняется. Измерения показали, что в данном режиме доля ионов бора в плазме разряда не превышает 5%. На фоне слаботочного вспомогательного разряда прикладывались импульсы с током до 40 А длительностью 100 мкс с частотой до 25 Гц. Времяпролетный спектр для этого режима приведен на рис. 12. Доля ионов бора достигает 99%. Времяпролетный спектрометр позволяет различать изотопы бора. Интегральная по импульсу доля бора составляет 95%. Таким образом, режим самораспыления мишени, который, согласно известным данным, реализуется лишь для некоторых металлов с высоким коэффициентом распыления (медь, серебро и некоторые другие) и принципиально невозможен для остальных металлов, был реализован для мишени из бора. Переход в режим самораспыления с повышением тока разряда осуществляется плавно, без скачка, начиная с токов единиц ампер, когда доля ионов бора составляет 70%. При токе разряда 10 А наблюдается насыщение. При токе 40 А и более наблюдались переходы разряда в дугу с катодным пятном, которые регистрировались как визуально, так и по снижению напряжения горения. Спектр, приведенный на рис. 12, получен в диффузном режиме горения магнетронного разряда.

Для самостоятельного импульсного разряда с нагретой мишенью (после выключения стационарного слаботочного разряда) существует определенное время задержки зажигания от момента подачи напряжения на разрядный промежуток, которое зависит от давления (рис. 13). Существование стационарного вспомогательного разряда с током всего 1 мА полностью устраняет данную задержку.

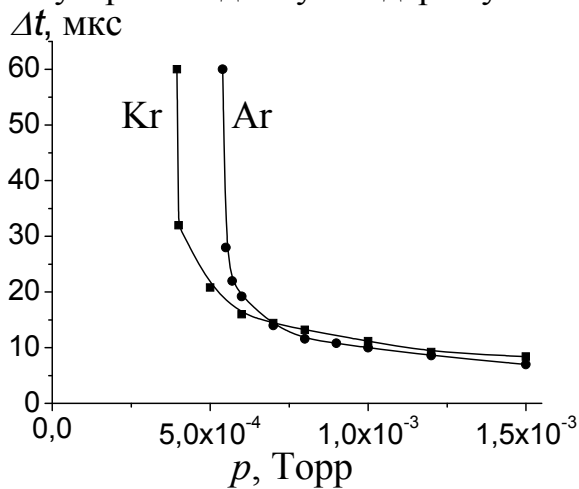


Рис. 13.

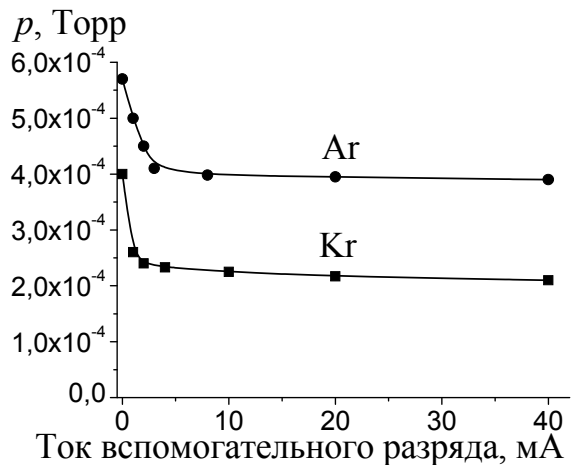


Рис. 14.

Кроме того, существование вспомогательного разряда снижает минимальное рабочее давление сильноточного импульсного разряда (рис. 14), а также снижает шумы тока и напряжения импульсного разряда.

**В шестой главе** представлены конструкции, описаны особенности функционирования и приведены рабочие и выходные параметры ионно-плазменных устройств, созданных на основе несамостоятельных разрядов низкого давления. 8 устройств - источников низкоэнергетических ионных

пучков, направленных низкоэнергетических ионных потоков и генераторов плазмы на основе разряда с инъекцией электронов успешно внедрены в различные научные и производственные организации. Акты приемки прилагаются. Области применения этих устройств включают в себя предварительную обработку поверхности подложек перед нанесением покрытий с целью улучшения адгезии, а также высокоскоростное нанесение сверхчистых металлических, оксидных, нитридных и алмазоподобных покрытий.

Ионный источник на основе тлеющего разряда с полым катодом с внешней инъекцией электронов (рис. 15) поставлен в Национальную лабораторию Лоуренса, Беркли, США. Источник генерирует пучки ионов инертных газов, азота, кислорода, газообразных углеводородов с током до 20 мА в стационарном режиме и до 2 А в импульсном режиме при ускоряющем напряжении до 30 кВ. Площадь поперечного сечения пучка составляет 100 см<sup>2</sup>. Рабочее давление лежит в диапазоне  $3 \cdot 10^{-5}$  -  $5 \cdot 10^{-4}$  Торр. Используется для активации и очистки поверхности, и ионного ассистирования при нанесении пленок металлов и оксидов.

Источник SPACE (Source of Plasma with Additional Cold Emitter, рис. 16) мог служить не только для генерации пучка, но и объемной плазмы. Ионный пучок генерировался в одноэлектродной



Рис. 15.

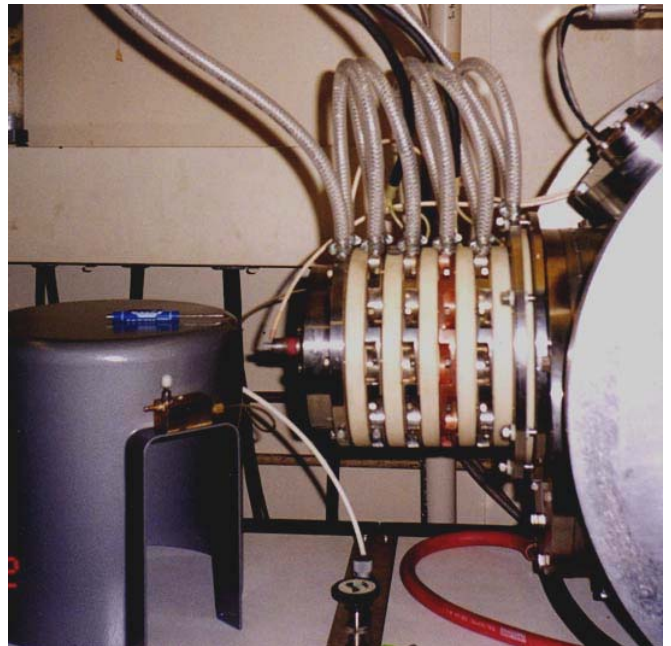


Рис. 16.

ускоряющей системе, в виде сетки под

небольшим по сравнению с ускоряющим напряжением отрицательным потенциалом. В режиме генерации объемной плазмы ускоряющий электрод удалялся, и плазма основного разряда распространялась в объем вакуумной камеры. Концентрация плазмы составляет  $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Источник имеет эмиттер на основе тлеющего разряда с полым катодом. Катоды эмиттерного и основного разряда состоят из двух секций. Благодаря этому были повышены токи разрядов до 10 А в стационарном режиме, а ионного пучка до 2,5 А, при ускоряющем напряжении до 2 кВ. Источник поставлен в компанию Phygen, Миннеаполис, США. Применяется для очистки и нагрева деталей перед нанесением покрытий.

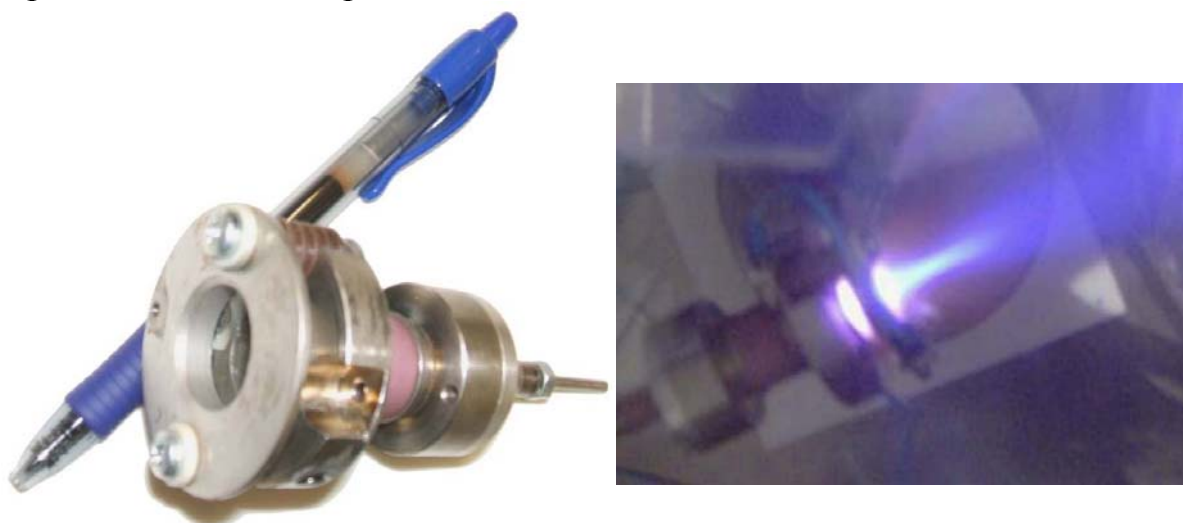


Рис. 17.

Малогобаритный и простой источник на основе разряда с инъекцией электронов (рис. 17, а – внешний вид, б – источник в режиме генерации плазмы) также может использоваться как для генерации пучков ионов газов (инертных, азота, кислорода и других) с током до 2,5 мА при ускоряющем напряжении до 10 кВ, так и для генерации объемной плазмы. Минимальное рабочее давление составляет  $1 \cdot 10^{-4}$  Торр. Конструктивной особенностью данного источника является использование керамики в качестве элементов, изолирующих электроды, что обеспечивает возможность функционирования без принудительного охлаждения, что существенно упрощает использование источника и обеспечивает возможность его применения в разнообразных установках. Поставлен в Университет Сан-Паоло, Бразилия. Применяется для изучения взаимодействия пучков и плазмы с поверхностью.

Далее представлены устройства с инъекцией электронов с использованием эмиттеров электронов на основе дугового контрагированного разряда с полым катодом, принцип работы которых представлен во второй главе.

Генератор SPACE-1 имеет две идентичные секции со щелевыми апертурами эмиттера и фильтра. На рис. 18 приведен вид разрядной системы со стороны вакуумной камеры, а на рис. 19 – внешний вид. Эффективная фильтрация инжектируемого электронного потока от материала катода эмиттера обеспечивается разворотом электронного потока внутри цилиндрического фильтрующего электрода на  $180^\circ$  (см. рис. 3, в). Материал основы катода эмиттера – медь, рабочий материал катода – магний. Щелевые апертуры эмиттера и фильтра позволяют создать необходимый для функционирования эмиттера перепад давления рабочего газа на выходной апертуре фильтра, и в то же время снизить удельную тепловую нагрузку на сеточный анод эмиттера, имеющий существенно большую площадь, за счет расширения электронного потока в области между выходной апертурой фильтра и анодом эмиттера. Анод выполнен в виде набора вольфрамовых стержней. Ток разрядов регулируется в диапазоне 2-10 А, напряжение основного разряда – 10-150 В, рабочие газы – инертные, кислород, азот и другие, рабочее давление –  $0,2 \div 1$  мТорр. Каждая из секций позволяет генерировать плазму с концентрацией  $10^{10}$  см<sup>-3</sup> в объеме 1 м<sup>3</sup>. Генератор тестировался в Центре передовых плазменных технологий Университета СунгКунКван (г. Сувон, Корея) в рамках совместных исследований по синтезу оксидных и нитридных пленок.



Рис. 18.

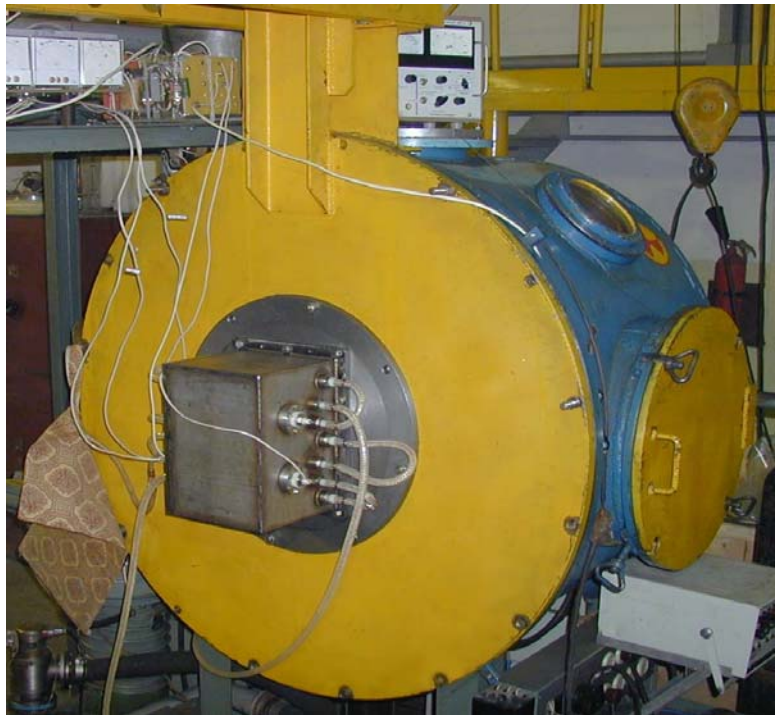


Рис. 19.

Комплект из трех одинаковых генераторов плазмы SPACE-2 (рис. 20) поставлен в компанию Phygen, Миннеаполис, США (рис. 21). Для каждого из генераторов ток разрядов лежит в диапазоне 3 – 20 А в стационарном режиме 10–150 В. Рабочие газы – инертные, азот, кислород, метан, ацетилен. При работе с химически активными газами в полость эмиттера напускается инертный газ с минимальной скоростью напуска порядка 10-20 см<sup>3</sup>·атм/мин, необходимой для функционирования эмиттера, а активный газ напускается непосредственно в вакуумную камеру. Рабочее давление лежит в диапазоне  $(4\div 10)\cdot 10^{-4}$  Торр. При одновременном функционировании трех генераторов концентрация плазмы в вакуумной камере объемом 1 м<sup>3</sup> составила  $8\cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup>. Генераторы применяются для нанесения твердых углеводородных покрытий на изделия из твердых сплавов, использующиеся для металлообработки.

Источник интенсивных низкоэнергетических направленных потоков ионов газов ULEHIS-1 (Ultra Low Energy High Intensity Ion Source, рис. 22) функционирует на

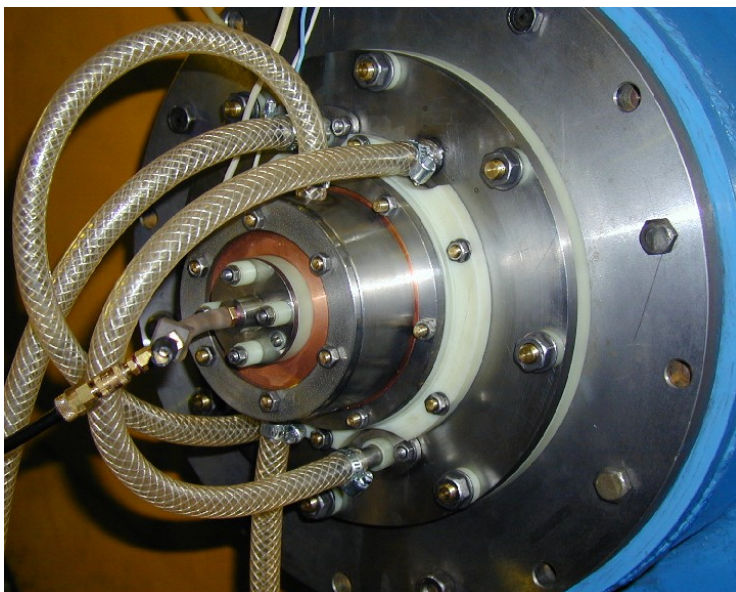


Рис. 20.



Рис. 21.

основе разряда с инжекцией электронов в область расходящегося магнитного поля. Ток эмиттерного разряда лежит в диапазоне 5 – 35 А в стационарном режиме. Ионный ток коллектора достигает 4,5 А. Энергия ионов – единицы-десятки эВ. Напряжение основного разряда – 10÷50 В. Рабочие газы – Ar, Ar+N<sub>2</sub>, Ar+O<sub>2</sub>. Рабочее давление – (2÷10)·10<sup>-4</sup> Торр.

Максимальная плотность ионного тока – 9 мА/см<sup>2</sup>.

Период технического обслуживания – 100 часов.

Доля примесей металла – не более 10<sup>-5</sup>. Источник имеет металлокерамический корпус с медными уплотнениями, полимерные материалы в конструкции отсутствуют, что обеспечивает особую чистоту генерируемой плазмы. Electrodes источника охлаждаются проточной водой. Магнитное поле создается соленоидом, расположенным с вакуумной стороны фланца камеры, основа которого также имеет водяное охлаждение. Источник поставлен в компанию 4Wave, Стерлинг, Вирджиния, США, где используется для создания чистых оксидных и нитридных покрытий.

Источник интенсивных низкоэнергетических направленных потоков

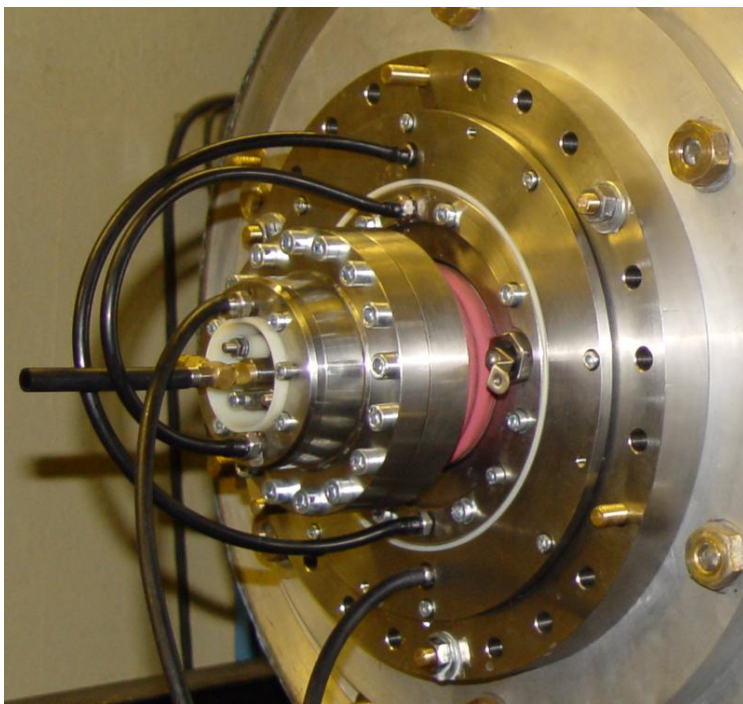


Рис. 22.

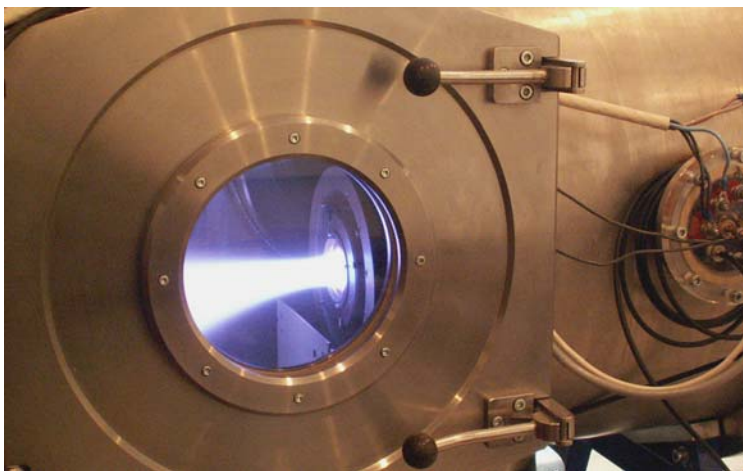
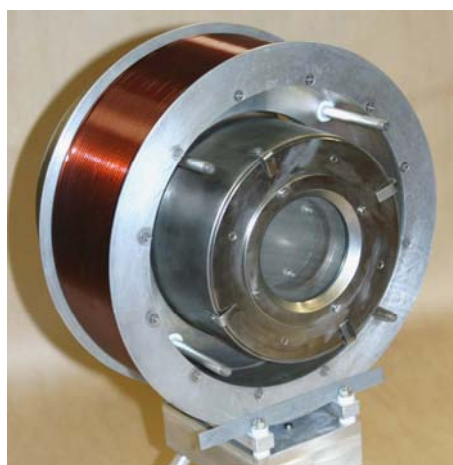


Рис. 23.

ионов газов ULEHIS-2 (рис. 23) имеет те же параметры, но устанавливается не на фланце вакуумной камеры, а внутри нее в любом положении, что обеспечивает универсальность его применения в различных установках. Выходная апертура эмиттера направлена в противоположную сторону по отношению к выходной апертуре источника (подобно системе, показанной на рис. 7), что обеспечивает эффективную фильтрацию материала эмиттера. Внешний кожух источника выполнен из ферромагнитного материала, поэтому магнитное поле внутри кожуха практически отсутствует, что облегчает радиальное движение электронов и делает возможным разворот электронного потока на  $180^\circ$  внутри фильтрующего электрода. Все электроды источника охлаждаются проточной водой. В конструкции используются только металл и керамика, полимерные материалы и резиновые уплотнения отсутствуют. Источник поставлен в компанию 4Wave, Стерлинг, Вирджиния, США, где используется для создания чистых оксидных и нитридных покрытий.

Источник интенсивных низкоэнергетических направленных потоков ионов газов ULEHIS-3 (рис. 24, внешний вид, и установка, на которой используется источник) имеет те же параметры. Этот источник – уже прототип промышленного образца, так как в нем используются промышленно

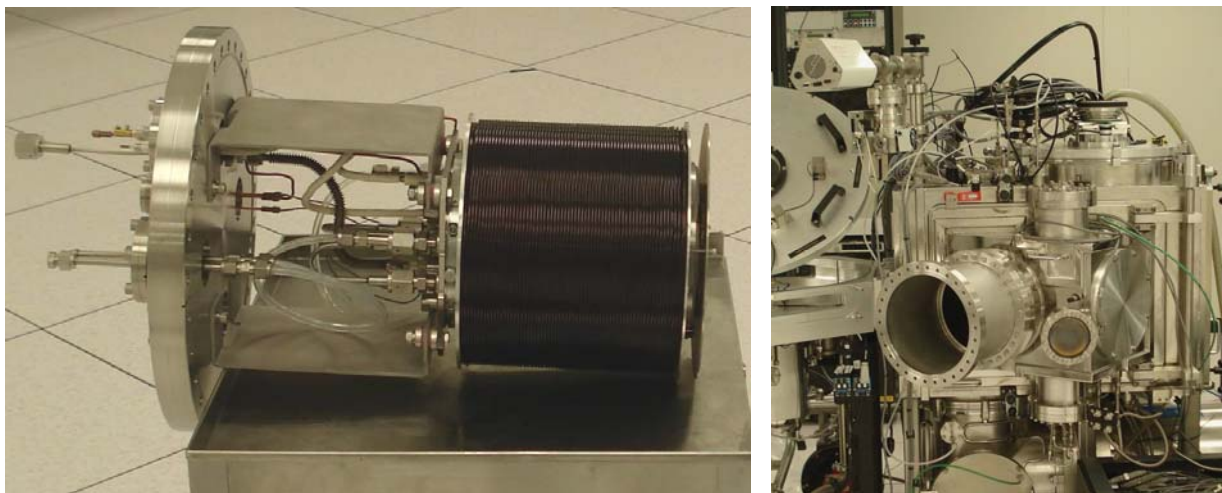


Рис. 24.

выпускаемые элементы американских стандартов и стандартные источники питания, управляемые компьютером через контроллер. Источник поставлен в компанию 4Wave, Стерлинг, Вирджиния, США, где используется для создания полупроводниковых элементов в процессе BTIBD (Biased Target Ion Beam Deposition), в котором, до поставки источников, использовались торцевые холловские ускорители. По сравнению с ними источники ULEHIS обеспечивают более высокие выходные параметры и чистоту ионного потока.

**В заключении** изложены основные результаты работы, обоснована достоверность проведенных исследований и отмечен личный вклад автора.



## ВЫВОДЫ

1. Предложена и реализована концепция двухступенчатой газоразрядной системы с внешней инжекцией электронов, в которой первая ступень – эмиттерный разряд с ненакальным катодом – служит для генерации ионизирующих электронов, а вторая ступень – основной разряд – для создания плотной газовой плазмы.

2. Установлено, что ускорение инжектируемых электронов до энергии, соответствующей катодному падению потенциала основного разряда с полым катодом, обеспечивает при токах разряда в сотни мА в непрерывном режиме и десятках А в импульсном режиме достижение минимальных значений напряжения горения этого разряда ( $\sim 50$  В) и рабочего давления ( $\sim 3 \cdot 10^{-5}$  Торр).

3. Установлено, что дальнейшее повышение тока инжектированных электронов может быть осуществлено путем замены тлеющего разряда в первой ступени на дуговой разряд с катодными пятнами. Повышение тока ионизирующих электронов позволило даже без электростатического удержания ионизирующих электронов во второй ступени реализовать стационарный сильноточный (20 А) низковольтный (десятки В) основной разряд низкого давления ( $1 \cdot 10^{-4}$  Торр), обеспечивающий генерацию в объеме порядка  $1 \text{ м}^3$  плазмы с концентрацией до  $8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

4. Показано, что при токе инжектируемых электронов более 10 А собственное магнитное поле инжектируемого электронного пучка приводит к его фокусировке и, как следствие, к повышению пространственной неоднородности генерируемой плазмы. Выравнивание распределения плотности плазмы можно осуществить с использованием рассеивающих электродов специальной формы. При этом неоднородность распределения плотности в радиальном и азимутальном направлениях не превышает  $\pm 10\%$

5. Предложена оригинальная конструкция дугового эмиттера электронов первой ступени разряда с полым катодом, выполненным из металла с высоким пороговым током формирования катодного пятна (например, меди или молибдена) и покрытым изнутри самовосстанавливающейся в процессе эрозии пленкой из металла с более низким пороговым током (например, магния или висмута). Такой подход обеспечил резкое снижение эрозии внутренней пленки, и, соответственно, многократное увеличение ресурса устройства

6. Показано, что расположение выходной апертуры катодной полости дугового эмиттера на противоположном по отношению к сеточному аноду эмиттера торце обеспечивает эффективную фильтрацию микрокапельной фракции из катодного пятна дуги. В сочетании с созданием условий для уменьшения напряжения горения основного разряда до уровня ниже энер-

гетического порога ионного распыления это позволяет генерировать плазму и ионные потоки с долей примесей ионов металлов менее 0,001 %.

7. Установлено, что при удержании инжектируемых электронов в плазме основного разряда аксиально-симметричным расходящимся магнитным полем, а также полем пробочной конфигурации, в плазме образуется электрическое поле величиной 5–7 В/м, формирующее направленный поток ионов вдоль оси системы к коллектору и препятствующее уходу ионов в радиальном направлении от оси системы. При этом многократно возрастает ионный ток на коллектор, который достигает 5 А в стационарном режиме.

8. Измерено распределение по энергиям ионов, генерируемых в разрядной системе с инжекцией электронов в область аксиально-симметричного расходящегося магнитного поля. Показано, что ширина на полувысоте распределения ионов по энергиям, достигающих коллектора, составляет 1,5 эВ, а полная ширина спектра по основанию – 3 эВ. Средняя энергия ионов может регулироваться не только приложением необходимого напряжения к коллектору, но и изменением параметров горения разряда.

9. Благодаря пониженному в результате инжекции электронов рабочему давлению разряда, и высокой интенсивности ионизации, при определенных параметрах разряда (токе более 20 А и расходе газа менее 20 см<sup>3</sup>·атм/мин) реализуется многократное использование атомов рабочего газа в процессах ионизации, при котором число ионов, попадающих на коллектор, в несколько раз превышает число атомов рабочего газа, поступающих в вакуумную камеру.

10. Показано, что для нагрева твердотельной мишени магнетронного разряда, выполненной из бора, целесообразно использование вспомогательного слаботокового (1-200 мА) стационарного магнетронного разряда. При эффективной теплоизоляции мишени, начальной проводимости бора при комнатной температуре оказывается достаточно для постепенного разогрева мишени до температуры около 400 °С и повышении ее проводимости до уровня, обеспечивающего реализацию сильноточной (десятки ампер) импульсной формы разряда.

11. Установлено, что существование слаботокового стационарного вспомогательного магнетронного разряда приводит к снижению минимального рабочего давления и устранению характерной для импульсного разряда временной задержки зажигания, а также обеспечивает резкое уменьшение уровня высокочастотных шумов на импульсах тока и напряжения.

12. В сильноточном импульсном магнетронном разряде с мишенью из бора реализован режим самораспыления мишени, при котором генерируемая в разряде плазма состоит из более чем 95% ионов бора. Высокая доля ионов бора в плазме является результатом действия двух факторов:

более низким потенциалом ионизации атомов бора, чем для атомов рабочего газа (аргон, криптон), и резко уменьшающемся количеством электронов в диапазоне энергий, соответствующих потенциалам ионизации бора и газа. Наблюдаемое аномальное снижение относительной доли ионов рабочего газа с ростом давления в диапазоне давлений менее  $1 \cdot 10^{-3}$  Торр объясняется смещением распределения электронов по энергиям в плазме в область более низких энергий.

### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Визирь А.В., Окс Е.М., Щанин П.М., Юшков Г.Ю. Несамостоятельный тлеющий разряд с полым катодом для широкоапертурных ионных источников // ЖТФ, 1997, Т. 67, №6, с. 27-31.
2. Oks E.M., Vizir A.V., Yushkov G.Yu. Low pressure hollow-cathode glow discharge for broad beam gaseous ion source // Rev. Sci. Instrum., 1998, 69(2), pp. 853-855.
3. Anders A., MacGill R.A., Brown I.G., Vizir A. A filamentless ion source for materials processing // Rev. Sci. Instrum., 1998, 69(2), p.880-882.
4. Vizir A.V., Oks E.M., Brown I.G. Ion beam formation under unusual conditions // IEEE Trans. Plasma Sci., 1998, V. 26, № 4, p.1353-1356.
5. Multilayer thin-films with chevron-like microstructure / O.R. Monteiro, A. Vizir, I.G. Brown // J. Physics D, 1998, 31(22), p. 3188-3196.
6. Визирь А.В., Окс Е.М., Юшков Г.Ю. Ионно-эмиссионные свойства несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом // Известия вузов, Физика, 2000, № 2, с. 14-20.
7. Vizir A.V., Yushkov G.Yu., Oks E.M. Further Development of a Gaseous Ion Source Based on Low-pressure Hollow Cathode Glow // Rev. Sci. Instrum., 2000, 71(2), pt.1-2 p.728-730.
8. Bugaev A.S., Vizir A.V., Gushenets V.I., Nikolaev A.G., Oks E.M., Yushkov G.Yu., Burachevsky Yu.A., Burdovitsin V.A., Osipov I.V., Rempе N.G. Current status of the plasma emission electronics: II. Hardware. // Laser and Particle Beams. 2003, V. 21, No. 2, p. 139-156.
9. Визирь А.В., Окс Е.М., Шандриков М.В., Юшков Г.Ю. Генератор объёмной плазмы на основе разряда с плазменным катодом // ПТЭ, 2003, №3, с. 108-111.
10. Визирь А.В., Окс Е.М., Шандриков М.В., Юшков Г.Ю. Генерация объёмной плазмы на основе сильноточного газового разряда с внешней инжекцией электронов // Прикладная физика, № 6, 2004, с. 115-119.
11. Vizir A.V., Oks E.M., Salvadori M.C., Teixeira F.S., Brown I.G. Small plasma source for materials application // Rev. Sci. Instrum., 2007, V. 78, (1-2), p. 086103.

12. Vizir A.V., Oks E.M., Shandrikov M.V. Generation of Space Charge Compensated Low Energy Ion Flux // *Rev. Sci. Instrum.*, 2008, Vol.79 (2) p. 02B719

13. Oks E.M., Vizir A.V., Shandrikov M.V., Yushkov G.Yu., Grishin D.M., Anders A., Baldwin D.A. Inverted End-Hall Type Low-Energy High-Current Gaseous Ion Source // *Rev. Sci. Instrum.*, 2008, V. 79(1) p. 007891 (1-3).

14. Vizir A.V., Tyunkov A.V., Shandrikov M.V. Improved plasma uniformity in a discharge system with electron injection. *Rev. Sci. Instrum.*, 2009, Vol.80 (2), p. 023301

15. Vizir A. V., Oks E. M., Yushkov G. Yu.. Broad-beam high-current dc ion source based on a two-stage glow discharge plasma // *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, v.81, p. 02B304.

16. Vizir A. V., Tyunkov A. V., Shandrikov M. V. Oks E. M.. Two-stage plasma gun based on a gas discharge with a self-heating hollow emitter // *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, V. 81, p. 02B903.

17. Vizir A.V., Shandrikov M.V., Yushkov G.Yu., E.M. Oks. Gridless, very low energy, high-current, gaseous ion source // *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, V. 81, p. 02B307.

18. Vizir A.V., Tyunkov A.V., Shandrikov M.V., Oks E.M. Two-stage plasma gun based on a gas discharge with a self-heating hollow emitter // *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, V. 81, p. 02B903.

19. Boron ion source based on planar magnetron discharge in self-sputtering mode V. I. Gushenets, A. Hershcovitch, T. V. Kulevoy, E. M. Oks, K. P. Savkin, A. V. Vizir, and G. Yu. Yushkov. // *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, V. 81, p. 02B303.

20. Визирь А.В., Окс Е.М., Щанин П.М., Юшков Г.Ю. Широкоапертурный ионный источник на основе несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом // Тез. докл. 4 конф. "Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц". Томск, 1996, с.50-52.

21. Разработка совмещенных с ионной обработкой методов нанесения нанокристаллических фаз внедрения на основе титана // Пинжин Ю.П., Сафаров А.Ф., Коротаев А.Д., Тюменцев А.Н., Коваль Н.Н., Борисов Д.П., Юшков Г.Ю., Визирь А.В. // Тез. докл. 4 конф. "Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц". Томск. 1996. с. 390-392.

22. High current ion source based on hollow cathode glow with e-beam injection E. Oks, A. Vizir and G. Yushkov. *Proceedings 12<sup>th</sup> International Conference on High Power Particle Beams, Beams-98, Haifa, Israel, 1998.* p.955-958.

23. Qi N., Gensler S., Prasad R.R., Krishnan M., Vizir A., Brown I.G. A pulsed vacuum arc ion thruster for distributed small satellite systems. 34<sup>th</sup>

AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Cleveland, OH, July, 1998, paper AIAA-98-3663.

24. Vizir A.V., Yushkov G.Yu., Oks E.M.. Extraction and transport of broad ion beams generated by high current hollow cathode glow // Proceed. 1<sup>st</sup> Intern. Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials, Tomsk, Russia, 2000, V. 2, (12<sup>th</sup> Symp. On High Current Electronics), p. 173-176.

25. Development of gaseous ion and plasma sources based on hollow cathode discharge with electron injection / A.V.Vizir, G.Yu.Yushkov, E.M.Oks // Proceed. I<sup>st</sup> Intern. Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials, Tomsk, Russia, 2000, V. 3 (5<sup>th</sup> Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows), p. 190-193.

26. Шандриков М.В., Визирь А.В., Юшков Г.Ю. Генератор плазмы на основе газового разряда с внешней инжекцией электронов // Proceed. 6<sup>th</sup> International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and plasma Flows, Tomsk, Russia, 2002, pp. 155-158.

27. Shandrikov M.V., Vizir A.V., Yushkov G.Yu., Oks E.M. Gaseous Plasma Production Using Electron Emitter Based on Arc Discharge // In Book "Emerging Applications of Vacuum-Arc-Produced Plasma, Ion and Electron Beams", Edited by Efim Oks and Ian Brown. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. 2002. p.115-122.

28. Визирь А.В., Шандриков М.В., Юшков Г.Ю. Генератор плазмы на основе газового разряда с внешней инжекцией электронов // Proceed. 6<sup>th</sup> International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and plasma Flows, "Наука", Томск, 2002, с. 155-158.

29. Shandrikov M.V., Vizir A.V., Yushkov G.Yu., Oks E.M. Bulk plasma production using gaseous discharge systems with external electron injection // AIP Conference Proceedings 2003, V. 669(1) p. 377-379, 11<sup>th</sup> ICPP, 2002, Sydney, Australia.

30. Визирь А.В., Шандриков М.В., Окс Е.М. Генераторы объемной плазмы на основе газового разряда с внешней инжекцией электронов // Научная сессия МИФИ, Москва, 2003, Т.4, стр. 89-90.

31. Vizir A.V., Oks E.M., Shandrikov M.V., Yushkov G.Yu. Effective Source of High Purity Gaseous Plasma // Proceed. 7<sup>th</sup> International Conference on modification of materials with particle beams and plasma flows, Tomsk, Russia, 2004, p. 81-84.

32. Визирь А.В., Окс Е.М., Шандриков М.В., Юшков Г.Ю. Сильноточный газовый разряд с инжекцией электронов // Всероссийская научная конференция по физике низкотемпературной плазмы, Петрозаводск, 2004, Т.1, стр.251-257.

33. Shandrikov M.V., Vizir A.V., Yushkov G.Yu., Oks E.M., Anders A., Baldwin D.A.. Generation of a High-Current, Very-Low-Energy Ion Beam with

Unconventional Space Charge Neutralization // Proceed. of 8<sup>th</sup> International Conference on modification of materials with particle beams and plasma flows, 2006, № 8, с. 80-83.

34. Vizir A.V., Tyunkov A.V., Shandrikov M.V. Energy spectra of electrons in non-self-sustained low pressure gaseous discharge plasma // Изв. Вузов. Физика, 2007, №9. Приложение. с. 218-221.

35. Shandrikov M.V., Vizir A.V. Formation of hard amorphous hydrogenated carbon films on metal by CVD method in acetylene plasma // Изв. Вузов. Физика, 2007, №9. Приложение. с. 460-463.

36. Vizir A.V. Influence of the beam plasma on current measurements of ion beam collector // Proceed. 9<sup>th</sup> International conference on modification of materials with particle beams and plasma flows, Tomsk, Russia, 2008, p. 55-57.

37. Tyunkov A.V., Vizir A.V., Shandrikov M.V., Oks E.M. The measurements of electron temperature in gaseous bulk plasma with electron injection // Proceed. 10<sup>th</sup> Int. Conf. On Material Modification with Particle Beams and Plasma flows, Tomsk, Russia, 2010, p. 41-44.

38. Vizir A.V., Gushenets V.I., Hershcovitch A., Kulevoy T.V., Oks E.M., Yushkov G.Yu. Ion source of pure single charged boron based on planar magnetron discharge in self-sputtering mode // Proceedings of 18th International Conference on Ion Implantation Technology IIT 2010, Kyoto, Japan. p. 472-475.

39. Визирь А.В., Окс Е.М., Тюньков А.В., Шандриков М.В., Юшков Г.Ю. Плазменный эмиттер электронов. Патент на изобретение по заявке 2010104592/07. Положительное решение от 04.04.2011.