

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 537.533:621.384(043.3)

**ЗАЛЕССКИЙ**

Виталий Геннадьевич

**ЭМИССИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ  
ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

по специальности  
01.04.04 – физическая электроника

Минск 2015

Научная работа выполнена в УО «Полоцкий государственный университет».

Научный консультант –

**Груздев Владимир Алексеевич,**

доктор технических наук, профессор,  
лауреат Государственной премии России в области науки и техники, профессор кафедры физики УО «Полоцкий государственный университет».

Официальные оппоненты:

**Асташинский Валентин Миронович**

доктор физ.-мат. наук, член-корреспондент НАН Беларуси,  
заместитель директора по научной работе и инновационной деятельности ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси»;

**Гончаров Виктор Константинович**

доктор физ.-мат. наук, профессор,  
заведующий отделом радиофизики НИУ «Научно исследовательский институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета;

**Кундас Семён Петрович**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые источники энергии» Белорусского национального технического университета.

Оппонирующая организация –

**ГНУ «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси».**

Защита состоится 27 февраля 2015 г. в 10-00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.10 при Белорусском государственном университете по адресу: 220030, г. Минск, ул. Ленинградская, 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407; телефон учёного секретаря (+375 17) 209 57 09.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета

Автореферат разослан «\_\_» января 2015 г.

Учёный секретарь совета по защите диссертаций  
кандидат технических наук

А.Ф. Романов

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Широкий спектр технологических возможностей электронно-лучевого воздействия определил использование электронных пучков во многих технологических процессах, в том числе для резки, плавки, сварки и термической обработки: закалки, упрочнения и модификации поверхности, в плазмохимии. Одновременно с исследованием физических основ обработки материалов электронными пучками сформировалось научное направление по созданию электронно-оптических систем (ЭОС) формирования электронных пучков с требуемыми параметрами.

Опыт широкой технологической эксплуатации ЭОС с термокатадами выявил ряд их существенных недостатков: недолговечность, требуемое низкое давление остаточных газов, интенсивное разрушение термокатодов парами некоторых обрабатываемых материалов. Это актуализировало исследования альтернативных термокатодным ЭОС на основе плазменных образований, в частности, на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) с основным ускорением электронов в анодном падении потенциала, на основе ВТР с основным ускорением электронов в катодном падении потенциала и источников электронов с плазменным эмиттером. Наиболее близкими концептуально к ЭОС с термокатадами оказались источники электронов с плазменным эмиттером (ИЭП, ПИЭЛ, или ЭОС с плазменным эмиттером).

Накопленные результаты исследований и практического применения ЭОС с плазменным эмиттером показали, что они, во-первых, способны формировать электронные пучки с параметрами (яркость, плотность мощности), приближающимися к параметрам пучков ЭОС с термокатадами. Во-вторых, к ЭОС с плазменным эмиттером применимы принципы регулирования и стабилизации параметров пучка, концептуально подобные разработанным для ЭОС с термокатадами. В-третьих, вследствие меньшей чувствительности ЭОС с плазменным эмиттером к вакуумным условиям и парам обрабатываемого материала, они способны обеспечить в идентичных технологических условиях более высокую долговечность (наработку на отказ) и производительность электронно-лучевого оборудования, чем ЭОС с термокатодом. В-четвертых, физические принципы, реализуемые в ЭОС с плазменным эмиттером, позволяют формировать не только сфокусированные электронные пучки, но и электронные пучки большого сечения, а также ионные пучки.

Однако до настоящего времени создано всего несколько типов таких ЭОС, пригодных для применения в промышленности. Это обусловлено, в частности, недостаточностью теоретического анализа физических основ формирования пучков в ЭОС с плазменным эмиттером. Поэтому дальнейшее развитие теории таких ЭОС, исследование путей улучшения их эксплуатационно-технологических характеристик, а также разработка новых типов плазменных эмиттеров представляются актуальными.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнялась в УО «Полоцкий государственный университет» по заданиям Республиканских научно-технических программ, БРФФИ, а также в рамках совместных проектов с российскими научными организациями:

1. Государственная программа фундаментальных и опытно-исследовательских работ «Плазмотермодинамика 02» (№ гос. регистрации 2002801) «Теоретические и экспериментальные исследования эффективности переключения электронного тока в плазменных источниках электронов с замагниченной эмитирующей плазмой» (2003 – 2005 гг.).

2. Государственная программа прикладных научных исследований «Материалы в технике», задание 1.36.2 (№ гос. регистрации 20072125) «Разработка процессов и технологических основ получения изделий из отходов тугоплавких металлов электронно-лучевым переплавом» (2007 – 2010 гг.).

3. Государственная программа научных исследований «Конвергенция», задание 2.4.03 (№ гос. регистрации 20111981) «Разработка принципов формирования электронных пучков с помощью плазменных образований» (2011 – 2013 гг.).

4. Государственная программа научных исследований «Функциональные и машиностроительные материалы, наноматериалы» подпрограмма «Материалы в технике», задание 4.3.03 (№ гос. регистрации 20111413) «Исследование и разработка технологических параметров получения модифицированных поверхностных структур с целью упрочнения и повышения износостойкости инструмента и деталей машин» (2011 – 2013 гг.).

5. Совместный проект УО «ПГУ» и РУП «МТЗ», г. Минск (договор № 24396 от 01.11.04) «Разработка и изготовление опытного образца электронно-лучевой пушки с плазменным источником электронов» (2004 – 2008 гг.).

6. Проект по заданию инновационного фонда Министерства образования РБ (договор № 05-54 от 17.04.10, № гос. регистрации 20102193) «Разработать опытный образец отечественного электронно-лучевого энергокомплекса на базе пушки с плазменным эмиттером» (2010 – 2012 гг.).

7. Совместный проект УО «ПГУ» и Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (г. Новосибирск, Россия, договор № Ф10Р-219 от 01.05.10, № гос. регистрации 20101999) в рамках гранта БРФФИ и РФФИ «Вычислительные технологии решения задач анализа и синтеза электронно-оптических систем» (2010 – 2012 гг.).

8. Совместный проект УО «ПГУ» и ЗАО «Институт плазмохимических технологий», (г. Новосибирск, Россия, договор № 13155 от 10.04.2013) «Численное моделирование электронно-оптической системы электростатического формирования пучка и расчёт на его основе оптимальной геометрии электронно-оптической системы с целью повышения токопрохождения в пушке с плазменным эмиттером» (2013 г.).

## Цель и задачи исследования

Целью диссертационного исследования является разработка теоретических основ формирования электронных пучков в системах с плазменным эмиттером и создание на их основе новых типов плазменных источников электронов. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Провести анализ эмиссионных и ионизационных процессов в ЭОС с плазменным эмиттером, установить взаимосвязь между этими процессами и степень их влияния на условия формирования эмиттирующей плазмы и горения разряда.

2. Разработать физико-математические модели и на их основе алгоритмы, учитывающие совместное влияние ионизационных процессов в ускоряющем промежутке, подвижности и формы плазменной поверхности, а также процессов в разряде на свойства плазменного эмиттера, условия формирования пучка и свойства электронно-оптической системы.

3. Экспериментально и теоретически исследовать влияние основных факторов, таких как повышенное (относительно типичных для ИЭП значений) давление в ускоряющем промежутке, влияние геометрии системы формирования пучка и потенциала эмиттерного электрода на условия формирования эмиттирующей плазменной поверхности и ток эмиссии и, учитывая это влияние, разработать физические принципы формирования электронных пучков в источниках с плазменным эмиттером.

4. Разработать системы диагностики (программное обеспечение и аппаратуру) параметров электронно-оптических систем (эмиттанса, яркости, расходимости, положения кроссовера и др.) и эмиттирующей плазмы и провести сравнительный анализ параметров пучков, формируемых в различных источниках с плазменным эмиттером.

5. На основе разработанных принципов формирования электронных пучков в ЭОС с плазменным эмиттером предложить способы повышения эффективности таких систем, создать новые конструкции ИЭП различного технологического назначения и исследовать их характеристики для оценки технологической пригодности таких источников.

**Объект исследования** – генераторы эмиттирующей плазмы, электронно-оптические системы с плазменным эмиттером и электронные пучки, формируемые в них.

**Предмет исследования** – физические принципы формирования эмиссионного тока и эмиттирующей плазмы, а также характеристики электронных пучков в системах с плазменным эмиттером.

## Научная новизна

- Концепция плазменного эмиттера, включающая разработанные принципы генерации эмитирующей плазмы, формирования эмитирующей плазменной поверхности и эмиссионного тока, а также физико-математические модели процессов в ИЭП и созданные на их основе алгоритмы для численного моделирования процессов в ЭОС с плазменным эмиттером;
- Дрейфовый механизм формирования эмиссионного тока, обуславливающий переключение электронного тока в газоразрядной структуре и возмущение эмитирующей плазмы отбором электронов в ИЭП, основанный на гипотезе о существенной, зависящей от эффективности извлечения, роли плазменных электронов в формировании плазмы и электронного пучка;
- Физические принципы использования в ИЭП изолированных эмиттерных электродов и способы повышения эффективности извлечения в ИЭП;
- Способ и аппаратура для экспресс-диагностики параметров эмитирующей плазмы и пучков электронов, формируемых в системах с плазменным эмиттером, основанные на анализе трёхмерных фазовых портретов электронных пучков;
- Конструкции плазменных источников электронов различного технологического назначения, в которых реализованы разработанные принципы генерации плазмы и формирования пучков.

## Положения, выносимые на защиту

1. Разработанная концепция плазменного эмиттера, включающая модели процессов в ускоряющем промежутке, эмиссионном канале и генераторе плазмы, а также совокупность созданных соответствующих согласованных алгоритмов, позволяют реализовать численное моделирование эмитирующей плазменной поверхности и фазовых портретов электронных пучков, осуществлять анализ ранее не рассматриваемых в известных моделях процессов в ЭОС с плазменным эмиттером в стационарном и нестационарном режимах, проводить оптимизацию таких ЭОС по току эмиссии или расходимости пучка.
2. Электронно-оптические системы с катодным, анодным или промежуточным («плавающим») потенциалом эмиттерного электрода принципиально отличаются условиями формирования эмитирующей поверхности плазмы, проникающей в эмиссионный канал, позволяющими: в ЭОС с изолированным эмиттерным электродом увеличить эффективность извлечения до 60% (в 1,5 – 2 раза выше в сравнении с известными ЭОС с катодным потенциалом эмиттерного электрода) и существенно снизить вероятности пробоев высоковольтного промежутка; в ЭОС с анодным потенциалом эмиттерного электрода формировать пучки с высокой яркостью и стабильностью геометрии при изменении энергии электронов пучка.

3. Временная и пространственная динамика ионного объёмного заряда и вторичной плазмы, возникающей в эмиссионном канале ИЭП при превышении критического давления (0,4 – 0,8 Па в зависимости от параметров эмитирующей плазмы и геометрии ЭОС), приводит к периодическому процессу изменения формы и смещения поверхности эмитирующей (первичной) плазмы из эмиссионного канала в разрядную камеру ИЭП вплоть до подавления и последующего восстановления разряда, что составляет суть установленного физического механизма экспериментально обнаруженной модуляции эмиссионного тока в мегагерцовом диапазоне частот.

4. Формирование эмиссионного тока в ИЭП с анодным потенциалом эмиттерного электрода обусловлено существованием дополнительного (дрейфового) механизма, отличающегося от известного диффузионного (связанного с осевой неоднородностью распределения концентрации плазмы), возникновением в плазме градиента потенциала порядка 100 В/м, вызывающего дрейф электронов из всего объёма плазмы в область эмиссионного канала, вследствие чего обеспечивается увеличение вклада плазменных электронов в ионизационные процессы формирования эмитирующей плазмы в ИЭП, сравнимого по интенсивности со вкладом  $\gamma_{ie}$ -электронов (эмитированных катодом в результате ионно-электронной эмиссии), и достигается существенное (более 40% для ИЭП, формирующих фокусируемые электронные пучки) увеличение эффективности извлечения электронов в ИЭП такого типа.

5. Новые принципы конструирования ИЭП, заключающиеся в создании условий для реализации установленных физических механизмов повышения эффективности и улучшения эксплуатационно-технологических характеристик плазменных источников, позволяют создавать оригинальные конструкции ИЭП с изолированным или анодным потенциалами эмиттерного электрода, которые обладают широким спектром возможностей как для реализации традиционных электронно-лучевых технологий, так и решения специфических технологических задач.

#### **Личный вклад соискателя учёной степени**

Личный вклад соискателя заключается в постановке задач исследований, в непосредственном выполнении основных исследований, анализе и интерпретации полученных результатов. Научный консультант д.т.н., проф. В.А. Груздев участвовал в выборе направления и обсуждении полученных результатов, оказывал помощь при формулировании выводов. Ряд экспериментов проводились совместно с к.т.н. Ю.П. Голубевым, к.т.н. Д.А. Антоновичем, к.т.н. А.С. Снарским и к.т.н. В.И. Сороговцом. Изготовление экспериментальной аппаратуры осуществлялось совместно с И.С. Русецким. В разработке отдельных моделей и алгоритмов моде-

лирования процессов в ЭОС принимала участие к.т.н. О.Н. Петрович. Программное обеспечение на основе разработанных алгоритмов создано к.т.н. О.Н. Петрович и Д.Г. Руголем. Остальные соавторы, фамилии которых указаны в списке публикаций, принимали участие в разработке отдельных вопросов, не относящихся к научным положениям диссертации. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации, получены автором лично.

### **Апробация диссертации и информация об использовании её результатов**

Результаты исследований, включённые в диссертацию, докладывались автором на следующих конференциях и семинарах:

1. II, III, IV Международном крейнделевском семинаре по плазменной эмиссионной электронике, 2006, 2009, 2012, г. Улан-Уде, Россия;
2. II, III, IV, V, VI International Conference on Plasma Physics and Plasma Technology, 2001, 2003, 2006, 2009, 2012, Minsk, Belarus;
3. VII, IX, X, XI International Conference on Electron Beam Technologies, 2003, 2009, 2012, 2014, Varna, Bulgaria;
4. X Всероссийском семинаре по проблемам теоретической и прикладной электронной и ионной оптики, 2011, г. Москва, Россия;
5. 21<sup>st</sup> International Conference on Plasma Physics and Technology, 2004, Prague, Czech;
6. V симпозиуме Беларуси, Сербии и Черногории по физике и диагностике лабораторной и астрофизической плазмы (ФДП-V 2004), 2004, Минск, Беларусь;
7. Международной научно-технической конференции «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств», 2008, Новополоцк, Беларусь;
8. I и II Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в машиностроении», 2011, 2013, г. Новополоцк, Беларусь.

Разработанные конструкции источников запатентованы и прошли апробацию на ОАО «Минский тракторный завод» и в лаборатории электрофизики Государственного научного учреждения «Физико-технический институт НАН Беларуси».

### **Опубликование результатов диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 73 научных работах, в том числе в 1 монографии (объёмом 11,57 а.л.) и 35 статьях в научных журналах (общим объёмом 28,9 а.л.), удовлетворяющих требованиям п. 18 Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь, а также в 2 монографиях (Полоцк-Минск, 2005; С.-Петербург, 2012), 25 статьях в сборниках материалов и трудов научных конференций, 10 тезисах.

На основании результатов диссертации получено 5 патентов. Общий объём материалов, опубликованных по теме диссертации, составляет 59,3 а.л.

## Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, шести глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка, приложений. Полный объём диссертации составляет 316 страниц, в том числе 85 рисунков на 70 страницах, 4 приложения на 4 страницах. Библиографический список состоит из 301 наименования, включая собственные публикации автора.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первая глава** «Исходная концепция плазменного эмиттера электронов» содержит анализ сложившейся физической модели ИЭП и основных физических процессов, определяющих энергетическую и эксплуатационно-технологическую эффективность ЭОС с плазменным эмиттером. Рассмотрены механизмы переключения электронного тока из плазмы в ускоряющий промежуток ИЭП на основе теории зонда в невозмущённой плазме с бесконечной эмиссионной способностью; факторы, влияющие на эффективность переключения; условия формирования эмитирующей плазменной поверхности и влияние параметров эмиссионного канала на параметры эмитирующей плазмы и ток эмиссии. Обсуждаются основные факторы и процессы в ЭОС с плазменным эмиттером, определяющие электронно-оптические характеристики электронного пучка, ионизационные процессы в основных типах газоразрядных структур (генераторах эмитирующей плазмы), используемых в ИЭП, а также способы регулирования и стабилизации параметров электронного пучка.

На основе анализа характеристик практически реализованных ИЭП выявлен ряд особенностей, которые не объясняются сложившимися физическими представлениями, обоснованы и сформулированы конкретные задачи исследований, необходимые для дальнейшего развития концепции плазменного эмиттера, создания плазменных источников нового типа и улучшения характеристик разработанных ранее типов ИЭП.

**Во второй главе** «Моделирование электронно-оптических свойств ИЭП» предложены модели физических процессов в ускоряющем промежутке и алгоритмы численного моделирования ЭОС с плазменным эмиттером, учитывающие их особенности, представлены результаты решения стационарной и нестационарной задач моделирования таких ЭОС в условиях повышенного (порядка  $10^{-1}$  Па) давления в различной геометрии электродов ЭОС и при различных потенциалах эмиттерного электрода.

В предложенных алгоритмах движение электронов пучка описывается известным методом деформируемых ламинарных трубок тока с разбиением

эмитирующей поверхности плазмы на аксиально-симметричные участки. В различных поперечных сечениях трубки плотность тока может не оставаться постоянной и изменяется при расходимости (или сходимости) граничных траекторий, а также за счёт пересечения трубок. Распределение потенциала электрического поля, самосогласованного с объёмными зарядами эмитированных из плазмы тепловых электронов, ионов и электронов, возникающих вследствие ионизации газа в ЭОС, и электронов, эмитированных в результате вторичной ионно-электронной эмиссии из плазмы, находится как решение уравнения Пуассона в расчётной области с подвижными границами. В качестве граничных условий задаются потенциалы эмитирующей плазмы, эмиттерного электрода и ускоряющего электрода, а также распределение потенциала в пристеночном ионном слое.

Для определения положения и формы плазменной границы в режиме эмиссии с открытой поверхностью плазмы предложено два алгоритма: итерации по условию нулевой напряжённости поля на границе плазмы и декомпозиции расчётной области. Последний метод позволяет совмещать аналитические и численные методы расчёта ЭОС и устанавливать положение плазменной границы при значительно меньшем количестве итераций.

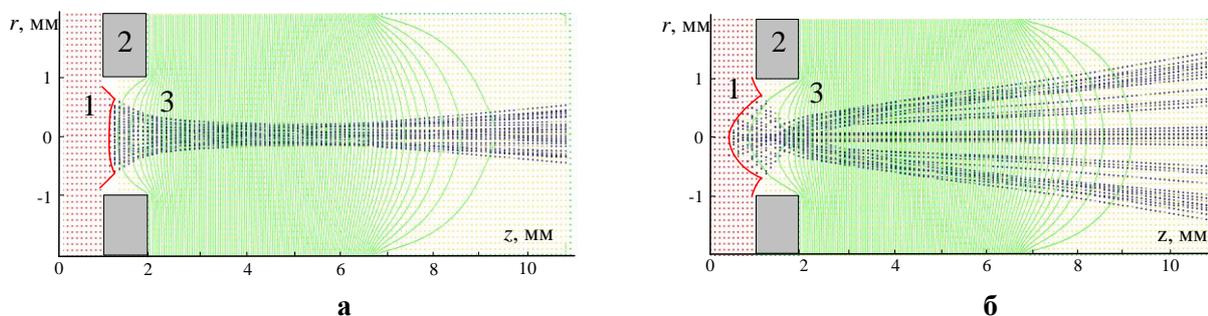
Предложен алгоритм численного моделирования фазовой характеристики пучка на основе метода деформируемых трубок тока. Суть алгоритма основана на решении уравнения траектории путём его численного интегрирования с двукратным последовательным применением явной схемы Эйлера. В качестве граничных условий задаются значения начальной скорости электронов из плазмы и угол её наклона к оси. Полученные для каждой граничной траектории трубок электронного потока зависимости угла расходимости (и плотности тока) от радиальной и аксиальной координат определяют фазовую характеристику электронного пучка в каждом поперечном сечении потока.

Разработан алгоритм частичного решения задачи синтеза ЭОС методом последовательного многократного решения задачи анализа с оптимизацией по одному из параметров пучка (расходимость или ток пучка). Задача оптимизации характеристик пучка решается в многомерном пространстве, включающем эмиссионную способность эмиттера, геометрию ЭОС, приведённую напряжённость ускоряющего поля. В выбранной геометрии ЭОС варьируемыми параметрами являются отношение длины эмиссионного канала к его радиусу, отношение ускоряющего напряжения к длине промежутка ускорения, концентрация эмитирующей плазмы. Решение оптимизационной задачи строится на основе метода декомпозиции. В качестве начального приближения для оптимизации задаётся ЭОС, соответствующая известным физическим представлениям и экспериментальным данным.

Изложенные алгоритмы использовались для численного моделирования физических процессов в ускоряющем промежутке ИЭП и для решения задач анализа и синтеза ЭОС с плазменным эмиттером.

Моделирование показало, что на расходимость пучка определяющее влияние оказывает не только положение, но и форма эмиттирующей плазменной поверхности, которая устанавливается в соответствии с геометрией эмиссионного канала, концентрацией плазмы, её потенциалом относительно эмиттерного электрода и распределением потенциала в ускоряющем промежутке.

Установлено, что объёмный ионный заряд, генерируемый ионизационными процессами, искажает распределение потенциала в промежутке ускорения пучка, что приводит к изменению формы и положения эмиттирующей поверхности плазмы и, как следствие, изменению траекторий электронов пучка. В некотором диапазоне давлений возможно установление динамического равновесия между скоростями ионизации и ухода ионов из области их генерации и формирование стационарного, хотя и деформированного, распределения потенциала. При более высоких давлениях динамическое равновесие нарушается, а накопление ионного объёмного заряда приводит к смещению границы эмиттирующей плазмы в направлении разрядной камеры. В результате этого кривизна эмиттирующей поверхности увеличивается и наблюдается возникновение или смещение кроссовера пучка, как показано на рисунке 1, что может приводить к формированию сильно неламинарных пучков с кроссовером, в том числе и внутри эмиссионного канала.



**а** – вакуумный случай; **б** – давление 0,7 Па;

**1** – эмиттирующая поверхность плазмы; **2** – эмиттерный электрод;

**3** – траектории электронов пучка; ускоряющее напряжение 30 кВ;

концентрация и потенциал плазмы на входе в эмиссионный канал:  $8 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ , 200 В

**Рисунок 1.** – Изменение формы и положения эмиттирующей поверхности плазмы вследствие влияния объёмного ионного заряда

Для систем с «точечным» (малой площади) эмиттером значение критического давления составляет, в зависимости от типа ЭОС и параметров плазмы, 0,4–0,8 Па, а для систем, формирующих пучки большого сечения (ПБС), – 0,3–1,3 Па.

При давлении выше критического в некоторой области промежутка ускорения скорость генерации ионов начинает превышать скорость их ухода и возникает

эффект накопления ионного объёмного заряда. Это снижает градиент потенциала, ускоряющего электроны в этой области промежутка, практически вплоть до его исчезновения. В результате в этой области промежутка создаются условия для формирования вторичной плазмы с концентрацией, сравнимой с концентрацией эмитирующей (первичной) плазмы. Возникновение вторичной плазмы, которую можно рассматривать как виртуальный электрод, приводит к увеличению градиента потенциала на участке ускоряющего промежутка между первичной и вторичной плазмами, что может существенно влиять на положение и форму эмитирующей поверхности первичной плазмы.

В случае «точечного» эмиттера установлено, что изменение положения, формы и потенциала (первоначально порядка сотни вольт относительно первичной) вторичной плазмы со временем обуславливает временную динамику характеристик электронного пучка и ЭОС по одному из возможных (в зависимости от соотношения скоростей генерации и ухода ионов) сценариев:

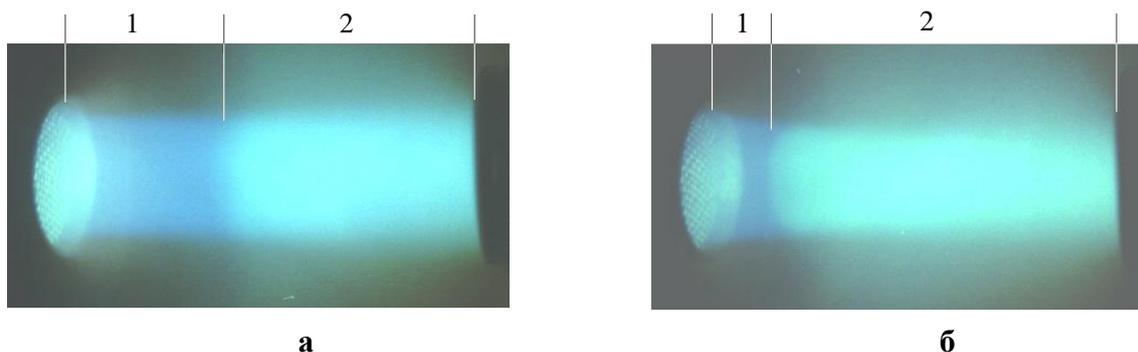
- взаимообусловленное перемещение эмитирующей поверхности первичной плазмы и вторичной плазмы вглубь эмиссионного канала по направлению к разрядной камере вызывает нарастание тока эмиссии и может приводить к подавлению разряда;
- возможная периодическая смена процессов генерации и разрушения вторичной плазмы сопровождается соответствующим изменением характеристик (тока и расходимости) пучка. Такой режим эмиссии, наблюдаемый экспериментально, проявляется в возникновении колебаний тока пучка во временном диапазоне, обусловленном уходом ионов из области интенсивной ионизации (согласно оценкам – доли микросекунд) и сопровождается периодическим перемещением плазменной границы в эмиссионном канале.

В ИЭП, формирующих пучки большого сечения, влияние ионизационных процессов при давлении газа выше критического и выполнении других условий, приближённых к технологическим (плотность тока эмиссии, ускоряющее напряжение, ускоряющий электрод – поверхность обрабатываемой детали), сводится к следующим эффектам, объясняющим механизмы пробоя ускоряющего промежутка в системах с сеточным эмиттерным электродом<sup>1</sup>:

- первоначально вторичная плазма формируется в области, прилегающей к ускоряющему электроду, и её потенциал близок к потенциалу ускоряющего электрода (киловольты), что можно рассматривать как образование подвижного виртуального плазменного ускоряющего электрода, наблюдаемого экспериментально, как показано на рисунке 2;

---

<sup>1</sup> Об электрической прочности ускоряющего промежутка плазменного источника электронов в форвакуумном диапазоне давлений / В.А. Бурдовичин [и др.] // ЖТФ. – 2002. – Т. 72, Вып. 7. – С. 134–136.



ускоряющее напряжение 15 кВ; ток пучка 70 мА; давление, Па: а – 0,2; б – 0,6;  
 1 – эффективная длина ускоряющего промежутка; 2 – вторичная плазма

**Рисунок 2. – Вторичная плазма в ускоряющем промежутке при формировании ПБС**

- сокращение ускоряющего промежутка (см. рисунок 2) вследствие образования виртуального ускоряющего электрода приводит к деформации распределения потенциала в ячейках сетки по причине компенсации тормозящего для электронов пучка поля сеточного электрода. В результате этого сеточный эмиттерный электрод перестаёт обеспечивать стабильность положения эмиттирующей плазменной поверхности и реализуется переход от режима эмиссии через потенциальный барьер к режиму эмиссии с открытых точечных участков плазменной поверхности, т.е. к режиму отбора электронов через набор эмиссионных каналов малой длины. В этом случае возможна реализация эффектов, рассмотренных для «точечного» эмиттера.

Моделирование фазовых портретов формируемых пучков позволило установить, что влияние на расходимость потока электронов, кроме формы эмиттера, оказывает также глубина проникновения плазмы в эмиссионный канал. Чем меньше проникновение эмиттирующей плазмы в эмиссионный канал, тем больше неламинарность пучка. При увеличении глубины проникновения эмиттирующей плазмы в эмиссионный канал электронный пучок, несмотря на вогнутую форму эмиттера, может стать ламинарным, а его фазовый портрет симметричным. Этот факт с новых позиций может объяснить наличие экстремума в зависимости расходимости пучка от приведённой напряжённости<sup>2</sup>, что, как показали расчёты и эксперименты, обусловлено совокупным влиянием положения, формы эмиттирующей плазменной поверхности и распределения поля в периферийных областях канала.

В данной главе также представлен аппаратно-программный измерительный комплекс, который позволяет решать задачи экспресс-диагностики качества ЭОС, определять экспериментальные параметры электронных пучков в ИЭП различных типов, проводить расчёт параметров эмиттирующей плазмы и формируемых пучков (начальную энергию электронов, эмиттанс, яркость, расходимость, минимальный диаметр пучка) и на основе сравнительного анализа этих характеристик осуществлять оптимизацию систем формирования и фокусировки пучка.

<sup>2</sup> Источники электронов с плазменным эмиттером на основе отражательного разряда с полым катодом / В.Л. Галанский [и др.] // Известия вузов. Физика. – 1992. – Т. 35, № 5. – С. 5–23.

Суть метода диагностики состоит в регистрации, построении и анализе трёхмерных фазовых поверхностей, основанием которых является эмиттанс, представленный в координатах: расходимость (мрад) и радиальная координата (мм), а по оси аппликат – плотность тока (в отн. ед.).

В третьей главе «Влияние потенциала эмиттерного электрода на свойства эмитирующей плазмы» рассмотрено влияние потенциала стенок эмиссионного канала на параметры проникающей плазмы в отсутствие или при наличии эмиссии электронов для трёх случаев потенциала эмиттерного электрода: катодного, когда током электронов на стенки эмиссионного канала можно пренебречь; анодного, когда ток электронов на стенки канала зависит от потенциала плазмы относительно анода, наличия и параметров магнитного поля вблизи анода, в результате чего требуется уточнение соотношения плотностей токов электронов и ионов на анод для каждой ситуации; «плавающего» (промежуточного между катодным и анодным), когда выполняется условие равенства токов ионов и электронов на стенки канала в изолированном эмиттерном электроде.

На основе решения уравнений непрерывности в диффузно-дрейфовом приближении и с учётом предположения о том, что радиус плазмы, проникающей в эмиссионный канал, является слабо изменяющейся вдоль оси канала функцией, получены оценочные аналитические соотношения для градиентов концентрации и потенциала в канале, позволяющие провести анализ влияния эмиссии электронов на эти градиенты:

$$\begin{aligned}
 n_i(z) &= n_0 \exp(-\lambda_{1,2,3}z), \\
 \Delta\varphi_{em}^1(z) &= \varphi_{em}(z) - \varphi_{em}(0) = -\frac{kT_e}{e} \lambda_1 z + \frac{j_e}{en_0 \lambda_1 \mu_e} (\exp(\lambda_1 z) - 1), \\
 \Delta\varphi_{em}^2(z) &= -\frac{D_e - D_i}{\mu_e + \mu_i} \lambda_2 z + \frac{j_e}{en_0 \lambda_2 (\mu_e + \mu_i)} (\exp(\lambda_2 z) - 1), \\
 \Delta\varphi_{em}^3(z) &= \left( \varphi_{em}^{cp} - \varphi_{em}(0) \right) \frac{z}{2z_{pl}}, \\
 \lambda_1 &= \sqrt{\frac{0,8\mu_e}{D_i\mu_e + D_e\mu_i}} \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}} \frac{1}{r_{pl}}, \quad \lambda_2 = \sqrt{\frac{0,8(\mu_e + \mu_i)}{D_i\mu_e + D_e\mu_i}} \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}} \frac{1}{r_{pl1}} > \lambda_1, \\
 \lambda_3 &= \sqrt{\frac{2\mu_e\mu_i}{D_i\mu_e + D_e\mu_i} \left( \frac{0,4}{\mu_i} \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}} + \frac{1}{4\mu_e} \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \exp\left(-\frac{e\varphi_{em}^{cp}}{kT_e}\right) \right)} \frac{1}{r_{pl2}} > \lambda_2,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где индексы 1, 2, 3 соответствуют случаям катодного, промежуточного («плавающего») и анодного потенциалов эмиттерного электрода;  $n_0$ ,  $\varphi_{em}(0)$  – концентрация и потенциал невозмущённой (на входе в эмиссионный канал) плазмы

в разрядной камере относительно эмиттерного электрода;  $T_e$  – электронная температура;  $\varphi_{em}(z)$  – потенциал плазмы на координате  $z$  в эмиссионном канале относительно эмиттерного электрода;  $\Delta\varphi_{em}$  – осевая разность потенциалов в плазме (относительно эмиттерного электрода);  $\varphi_{em}^{cp}$  – среднее значение потенциала плазмы в эмиссионном канале относительно эмиттерного электрода, которое определяется уравнением баланса токов в эмиссионном канале;  $r_{pl1,2,3}$  – средние значения радиуса плазмы в эмиссионном канале в указанных случаях;  $m_{e,i}$ ,  $\mu_{e,i}$ ,  $D_{e,i}$  – массы, коэффициенты подвижности и диффузии электронов и ионов, соответственно.

Показано, что при некотором значении плотности тока эмиссии возможно исчезновение тормозящего поля в эмиссионном канале. Это, в случае неограниченной эмиссионной способности плазмы и в отсутствие ограничения подвижности электронов (диффузионный режим переключения), может привести к полному переключению электронной компоненты разрядного тока в эмиссионный канал, резкому увеличению тока эмиссии, изменению условий горения разряда и перестройке всего разряда. Поэтому наличие тормозящего электроны поля в плазме можно считать критерием устойчивости эмиссии электронов из плазмы в ИЭП с неограниченной эмиссионной способностью.

Получены оценочные предельные значения плотностей тока, при достижении которых отрицательный осевой градиент потенциала в плазме исчезает:

$$j_e^{cr1} = \frac{eD_e n_0 \lambda_1^2 z_{pl}}{\exp(\lambda_1 z_{pl}) - 1}, \quad j_e^{cr2} = \frac{e(D_e - D_i) n_0 \lambda_2^2 z_{pl}}{\exp(\lambda_2 z_{pl}) - 1}, \quad (2)$$

$$j_e^{cr3} \approx en_i \left( (D_e + D_i) \lambda_3 + (\mu_e - \mu_i) \frac{d\varphi_{em}}{dz} \Big|_{z=0} - \frac{2\pi z_{pl}}{r_{pl3}} \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}} \left( 0,4 + \sqrt{\frac{m_i}{\pi m_e}} \exp\left(-\frac{e\varphi_{em}^{cp}}{kT_e}\right) \right) \right),$$

где  $\frac{d\varphi_{em}}{dz} \Big|_{z=0}$  – градиент потенциала плазмы на входе в канал,  $z_{pl}$  – глубина проникновения плазмы в канал, зависящая от параметров плазмы, геометрии канала и величины ускоряющего напряжения.

Зависимости градиента потенциала плазмы в канале от плотности тока эмиссии показаны на рисунке 3. Из рисунка 3 и выражения (2) следует, что в рамках принятых допущений выполняется неравенство  $j_e^{cr1} > j_e^{cr2} > j_e^{cr3}$ .

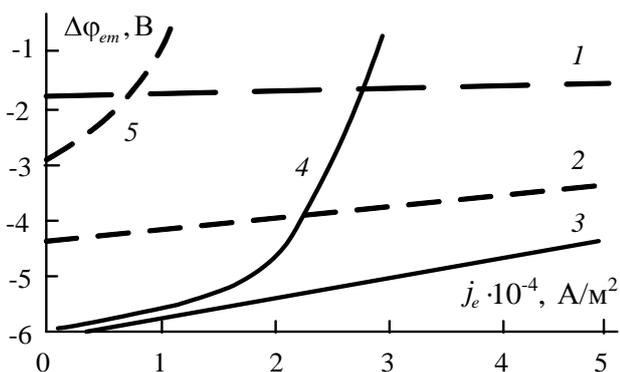
Показано, что в случае анодного потенциала эмиттерного электрода (стенок канала) в проникающей плазме создаются условия для формирования градиента потенциала, ускоряющего электроны, что принципиально отличает такие эмиссионные системы от систем с тормозящим для электронов полем в

эмиссионном канале и обеспечивает более высокую эффективность извлечения, недостижимую при других условиях. Однако для получения устойчивых режимов эмиссии с высокой эффективностью извлечения в таких системах необходимо создавать условия для ограничения подвижности плазменных электронов в генераторе плазмы. Такое ограничение переключения электронной компоненты разрядного тока в эмиссионный канал возможно за счёт со-

ответствующей «замагниченности» электронов в основной области разряда, но при сохранении диффузионного (без ограничения подвижности плазменных электронов) механизма переключения электронов из области плазмы вблизи входной апертуры эмиссионного канала.

Это предположение о возможном способе стабилизации режима высокой эффективности эмиссии потребовало в дополнение к диффузионному механизму переключения, связанному с неоднородностью распределения концентрации эмитирующей плазмы, ввести в рассмотрение дрейфовый механизм переключения электронного тока и предложить структуру модифицированного отражательного разряда (ОРМ) для его реализации.

В этой главе также рассмотрены особенности реализации изолированного эмиттерного электрода в структурах на основе отражательного разряда с полым катодом (ОРПК). Структура такого разряда представлена на рисунке 4. Экспериментально определено совокупное влияние тока разряда, расположения и геометрических размеров изолированного электрода  $b$  (см. рисунок 4), в зависимости от которых его «плавающий» потенциал  $U_s$  мог изменяться в пределах от почти катодного (порядка 50 В относительно катода) до почти анодного (порядка 300 В). Переход от низкого к высокому потенциалу изолированного электрода происходит в узком диапазоне токов разряда (ширина диапазона порядка 10 мА), что свидетельствует о пороговом характере этого эффекта, подобном эффекту полого катода. С увеличением давления потенциал изолированного эмиттерного электрода



радиус эмиссионного канала 1 мм;  $z = 1$  мм;  
концентрация плазмы  $10^{17} \text{ м}^{-3}$   
давление, Па: 1 – 1; 2, 5 – 3; 3, 4 – 5;  
потенциал эмиттерного электрода:  
1, 3 – катодный, 2 – «плавающий»  
4, 5 – анодный

**Рисунок 3.** – Зависимость осевой разности потенциалов в плазме, проникающей в эмиссионный канал на глубину  $z$ , от плотности тока эмиссии

снижается, а при увеличении тока эмиссии электронов из плазмы его потенциал растёт. Это свидетельствует о возникновении отрицательной обратной связи, обеспечивающей автоматическое регулирование потенциала в зависимости от тока эмиссии и давления газа.

На основе уравнений баланса токов в разряде и токов на эмиттерный электрод получено соотношение для его потенциала:

$$U_s = U_d - \frac{kT_e}{e} \ln \left( \frac{0,8 \sqrt{\frac{\pi m_e}{m_i}} \frac{S_a + S_c}{S_a} - f_{pl}(U_{ac}) \frac{S_{em}}{S_a} (1 - \beta(p))}{0,8 \sqrt{\frac{\pi m_e}{m_i}} + f_{pl}(U_{ac}) \beta(p) \frac{S_{em}}{S_a} - 2 \frac{n_b}{n_e} \frac{S_{ap}}{S_{em}} \sqrt{\frac{\pi e U_b}{kT_e}}} \right), \quad (3)$$

где  $\rho(p) = eB\lambda_e(p)/(m_e v_T)$  – фактор, учитывающий наличие магнитного поля с индукцией  $B$ , препятствующего движению электронов на анод;

$\beta(p)$  – отношение плотности тока ионов, образованных в ускоряющей промежулке и попадающих на эмиттерный электрод, к

плотности тока эмиссии электронов;  $v_T$  – тепловая скорость электронов в плазме;  $p$  – давление

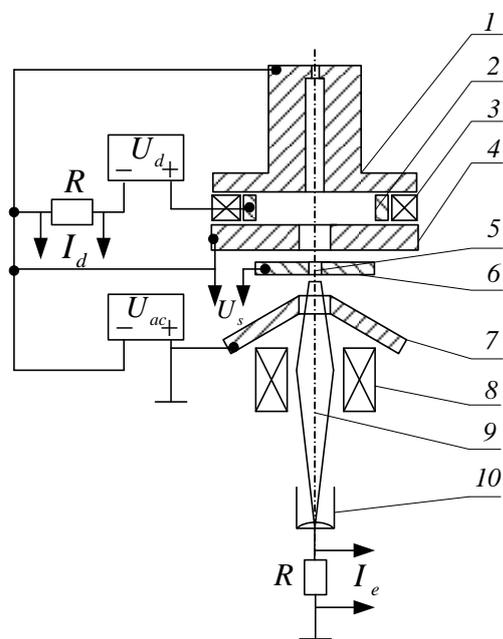
газа;  $\lambda_e(p)$  – средняя длина свободного пробега электронов в плазме;  $S_{ap}$ ,  $S_c$ ,  $S_a$ ,  $S_{em}$  – площади

апертуры катодной полости, поверхности катода, анода и эмиттерного электрода, контактирующего с плазмой;

$f_{pl}(U_{ac}) = S_e(U_{ac})/S_{em}$  – относительная площадь эмитирующей плазменной поверхности как функция

ускоряющего напряжения  $U_{ac}$ ;  $U_d$  – напряжение горения разряда;  $n_e$  – концентрация плазмы;  $n_b$  – кон-

центрация плазмы;  $n_b$  – кон-

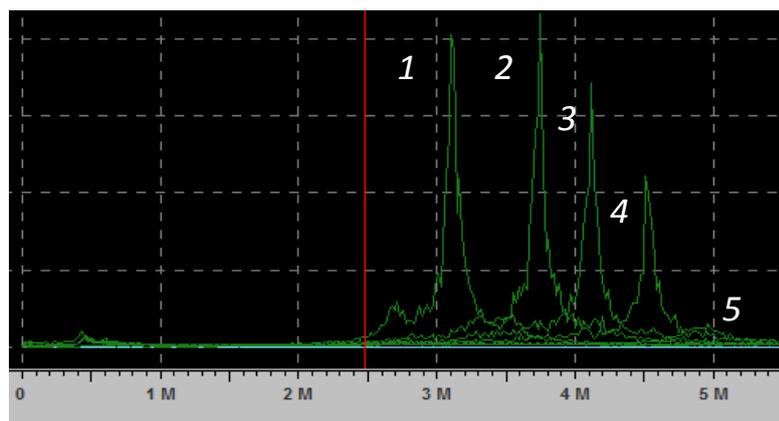


1 – полый катод; 2 – анод; 3 – постоянные магниты; 4 – отражательный катод; 5 – эмиссионный канал; 6 – изолированный эмиттерный электрод; 7 – ускоряющий электрод; 8 – система фокусировки (магнитная линза); 9 – электронный пучок; 10 – цилиндр Фарадея;  $I_d$  – ток разряда;  $I_e$  – ток эмиссии;  $U_d$  – напряжение горения разряда;  $U_s$  – потенциал изолированного эмиттерного электрода относительно катода;  $U_{ac}$  – ускоряющее напряжение;  $R$  – сопротивление

Рисунок 4. – Электродная структура ИЭП на основе разряда с полым катодом и изолированным эмиттерным электродом

центрация быстрых  $\gamma_{ie}$ -электронов (образованных в результате ионно-электронной эмиссии и ускоренных в прикатодном слое разряда), попадающих на эмиттерный электрод из полости с энергией  $eU_b \gg kT_e$ . Зависимости, полученные с использованием соотношения (3) для потенциала изолированного эмиттерного электрода, удовлетворительно согласуются с экспериментами и позволяют выявить основные факторы, влияющие на величину потенциала такого электрода.

Экспериментальное исследование условий эмиссии электронов в ИЭП на основе отражательного разряда с полым катодом и изолированным эмиттерным электродом (ОРПКИЭ) позволило обнаружить модуляцию эмиссионного тока с частотой в мегагерцовом диапазоне и амплитудой от минимального до максимального значения тока эмиссии. Модуляция наблюдается в диапазоне ускоряющих напряжений, соответствующем переходу от низкоэффективной (эффективность извлечения не более 10%) к высокоэффективной (более 40%) эмиссии. Частота модуляции зависит от ускоряющего напряжения, как показано на рисунке 5, напуска плазмообразующего газа и тока разряда (концентрации плазмы). Установлены следующие закономерности: частота модуляции тока эмиссии возрастает с увеличением длины эмиссионного канала и с ростом ускоряющего



эмиссионный канал: диаметр 2 мм; длина 0,5 мм;  
напуск  $1,7 \text{ мПа} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ ; ток разряда 200 мА;  
ускоряющее напряжение, кВ: 1 – 2; 2 – 4; 3 – 6; 4 – 8; 5 – 10  
Рисунок 5. – Спектры колебаний эмиссионного тока при различных ускоряющих напряжениях (по оси ординат – ток эмиссии в отн. ед., по оси абсцисс – частота в МГц)

напряжения; частота модуляции тока эмиссии снижается с ростом тока разряда, величины напуска плазмообразующего газа и с увеличением диаметра эмиссионного канала.

Полученные закономерности позволяют представить механизм обнаруженной мегагерцовой модуляции эмиссионного тока в виде совокупности последовательных процессов: формирование вто-

ричной плазмы в эмиссионном канале, движение эмитирующей поверхности вглубь канала, рост эффективности эмиссии, возникновение минимума потенциала в области вторичной плазмы, рост потенциала эмитирующей плазмы на оси и одновременное снижение ускоряющей разности потенциалов между первичной и вторичной плазмами, «запирание» эмиссионного тока минимумом потенциала, снижение интенсивности ионизационных процессов в промежутке ускорения между плазмами, разрушение ионного объёмного заряда, обеспечивающего «за-

пирание» электронного пучка. Поскольку временной диапазон процессов возникновения и разрушения вторичной плазмы, обусловленный перемещением ионов в пределах слоя порядка дебаевской длины, соответствует  $\sim 10^{-7}$  с, то частота модуляции эмиссионного тока относится к мегагерцовому диапазону, что наблюдается в экспериментах и подтверждено расчётами с использованием разработанных алгоритмов.

Эксперименты и расчёты показали, что при формировании границы эмитирующей поверхности плазмы вне эмиссионного канала в разрядной камере эффект «запирания» тока не реализуется (см. рисунок 5, кривая 5). При этом с увеличением тока разряда концентрация плазмы растёт, и она (плазма) снова может проникать в эмиссионный канал, что приводит к восстановлению модуляции эмиссионного тока, которая вновь исчезает с увеличением ускоряющего напряжения.

С увеличением давления газа мегагерцовая модуляция тока проявляется в цепях отражательного и полого катодов, что свидетельствует о появлении дополнительных процессов, связывающих параметры плазмы и ток эмиссии. Возможной причиной появления такой связи может служить формирование движущегося двойного электрического слоя в плазме<sup>3</sup> (фронта ионизации или вторичной плазмы), перемещение которого может приводить к нарушению условий горения разряда вплоть до его подавления.

**В четвертой главе** «Газоразрядные структуры для формирования эмитирующей плазмы в ИЭП» рассматривается взаимосвязь основных процессов в генераторах плазмы: эффективность ионизации газа в разряде, процессы переключения тока в эмиссионный канал и возмущения эмитирующей плазмы отбором электронов. Разработанные модели процессов в генераторе плазмы дополняют модели процессов в ускоряющей промежутке и составляют основу новой концепции плазменного эмиттера.

Предложена модель формирования эмитирующей плазмы в ИЭП, учитывающая, наряду со вкладом  $\gamma_{ie}$ -электронов, вклад плазменных электронов в ионизационные процессы в газовом разряде генератора ИЭП. В модели предполагается, что ионизация газа осуществляется обеими группами электронов, а основной энерговклад в разряд осуществляют  $\gamma_{ie}$ -электроны, ускоренные в катодном падении и теряющие свою энергию в результате следующих процессов: упругих взаимодействий с вероятностью  $\omega_{el} = n_n \sigma_t L_{eff}$  ( $\sigma_t$  – транспортное сечение рассеяния,  $L_{eff}$  – эффективное расстояние, которое проходит  $\gamma_{ie}$ -электрон в плазме,  $n_n$  – концентрация атомов плазмообразующего газа); неупругих взаимодействий

---

<sup>3</sup> Орешко, А.Г. Двойные электрические слои объёмного заряда в катодной плазме / А.Г. Орешко // Физика плазмы. – 1991. – Т. 17, Вып. 6. – С. 679–685.

с вероятностью  $\omega_{nel} = n_n(\sigma_i + \sigma_g)L_{eff}$  ( $\sigma_i, \sigma_g$  – сечения ионизации и возбуждения); коллективных взаимодействий с вероятностью  $\omega_k$ .

Получено выражение для плотности тока разряда (вольт-амперная характеристика разряда):

$$j_d = \frac{j_T z_i^{pl}(T_e) - j_{ia} S_a / (S_c + S_a)}{\frac{S_c}{S_c + S_a} - \frac{2\gamma_{ie} z_i^\gamma(U_c) S_c (\omega_k + L_{eff} / \lambda_\gamma)}{S_a \sqrt{2n_n \sigma_t L_{eff} - U_a / U_c}}}, \quad (4)$$

где  $\lambda_\gamma \approx (n_n(\sigma_i + \sigma_g + \sigma_t))^{-1}$  – полная средняя длина пробега  $\gamma_{ie}$ -электрона в плазме;  $U_c, U_a$  – падение потенциала в прикатодном и прианодном слоях;  $j_{ia}$  – плотности ионного тока на аноде;  $j_T$  – тепловая плотность электронного тока в плазме;  $z_i^{pl}(T_e), z_i^\gamma(U_c)$  – количества ионизаций, совершаемых, соответственно, плазменным электроном и  $\gamma_{ie}$ -электроном в межкатодном пространстве, заполненном плазмой;  $\gamma_{ie}$  – коэффициент ионно-электронной эмиссии.

Выражение (4) позволяет объяснить увеличение крутизны вольт-амперной характеристики разряда с ростом его тока<sup>4</sup>. На основании (4) получено приближённое неравенство, показывающее, что вкладом плазменных электронов в ионизационные процессы в сравнении с числом ионизаций  $\gamma_{ie}$ -электронами можно пренебречь ( $z_i^{pl}(T_e) \rightarrow 0$ ) только при достаточно большом значении отношения  $L_{eff} / \lambda_\gamma$ :

$$\frac{2\gamma_{ie} z_i^\gamma(U_c)}{\sqrt{2L_{eff} / \lambda_\gamma - U_a / U_c}} \geq \frac{S_a}{S_c + S_a}. \quad (5)$$

Поэтому при определяющем вкладе  $\gamma_{ie}$ -электронов следует ожидать, что уменьшение эффективной длины  $L_{eff}$  и изменение средней энергии, вносимой ими в разряд, должно приводить к нарушению условий существования разряда. Однако эксперименты в структурах пеннинговского типа с неэквипотенциальными катодами (отражательного разряда, ОРПК и ОРМ, представленного на рисунке 6) показали, что изменение потенциала одного из катодов, вызывающее нарушение условий осцилляции  $\gamma_{ie}$ -электронов в плазме, при высоких концентрациях плазмы не приводит к значительным изменениям условий формирования плазмы. Это возможно при существовании дополнительного механизма ионизации, не связанного с прямой ионизацией газа  $\gamma_{ie}$ -электронами, интенсивность которого

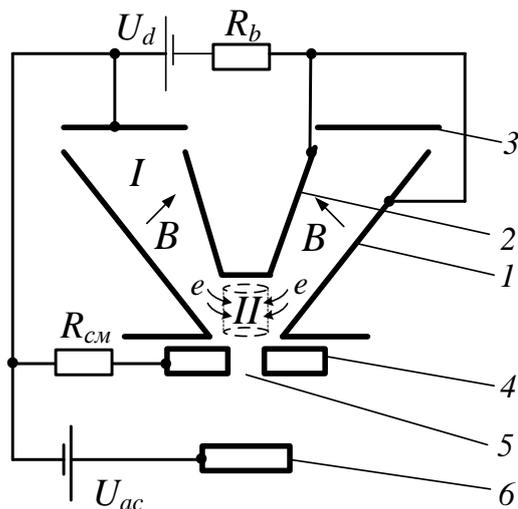
<sup>4</sup> Крейнфельд, Ю.Е. Плазменные источники электронов / Ю.Е. Крейнфельд. – М. : Атомиздат, 1977. – 144 с.

зависит от концентрации плазмы, средней энергии плазменных электронов ( $\omega_k$  и  $j_T$ ) и обусловлена взаимодействием  $\gamma_{ie}$ -электронов и плазменных электронов с увеличением ионизационной способности последних.

Предложена модель формирования эмиссионного тока в ИЭП, в которой эффективность извлечения электронов из плазмы ( $\alpha$ ) рассматривается как результат совокупного влияния двух процессов ( $\alpha = \zeta\eta$ ): 1) перераспределения токов в области эмиттерного электрода и эмиссионного канала (область  $I$ , рисунок 6) в соответствии с параметром переключения  $\zeta$  (диффузионный механизм, связанный с неоднородностью распределения концентрации плазмы в разряде); 2) переключения тока из объёма плазмы (область  $II$ , рисунок 6) за счёт перераспределения токов между остальными электродами генератора плазмы в соответствии с параметром переключения  $\eta$  (дрейфовый механизм переключения, обусловленный формированием поля в плазме).

Получены выражения для параметров переключения, которые являются функциями ускоряющего напряжения, падения потенциала в слое между плазмой и эмиттерным электродом, геометрии эмиссионного канала и ускоряющего промежутка. Экспериментальные результаты, полученные при исследовании эмиссии электронов в источниках на основе ОРПК и ОРМ, удовлетворительно согласуются с результатами расчётов.

В рамках модели формирования эмиссионного тока в ИЭП представлен энергетический анализ, раскрывающий механизмы влияния эмиссии электронов на условия формирования эмитирующей плазмы. С целью определения способов повышения энергетической эффективности плазменных источников  $H(U_{ac}) = \alpha(U_{ac})/U_d(U_{ac})$ , введён в рассмотрение энергетический параметр  $\kappa(U_{ac}) = U_d(U_{ac})i_d(U_{ac})(1 - \alpha(U_{ac})) / (U_d i_{d0})$ , показывающий долю мощности, которую необходимо вкладывать от источника питания разряда для поддержания эффективности извлечения  $\alpha$  на заданном уровне.

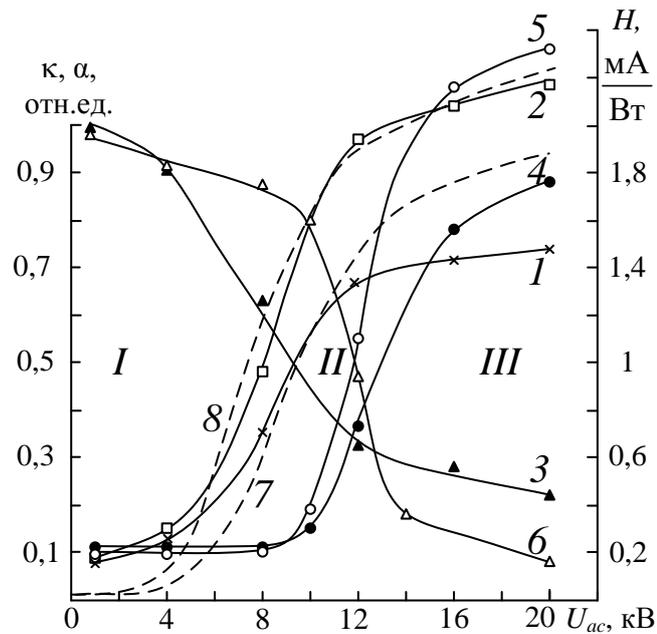


1 – внешний катод; 2 – внутренний катод; 3 – анод; 4 – эмиттерный электрод; 5 – эмиссионный канал; 6 – ускоряющий электрод;  $B$  – индукция магнитного поля  $R_b$  и  $R_{см}$  – балластное сопротивление и сопротивление смещения

Рисунок 6. – Электродная структура модифицированного отражательного разряда

На рисунке 7 показаны сравнительные зависимости эффективности извлечения электронов, энергетической эффективности и энергетического параметра для источников на основе ОРПК и ОРМ. При малой эффективности извлечения отбор электронов не оказывает влияние на параметры плазменного эмиттера, что соответствует «режиму зондовых измерений». В переходной области II (рисунок 7), не только эффективность извлечения, но и энергетическая эффективность резко возрастают. Это может быть обусловлено увеличением площади эмитирующей плазменной поверхности и (при снятии потенциального барьера для электронов) её перемещением в область большей концентрации плазмы с ростом ускоряющего напряжения. При этом для обоих типов плазменных эмиттеров электронов (ОРПК и ОРМ) крутизна зависимостей  $H(U_{ac})$  выше, чем  $\alpha(U_{ac})$ , что свидетельствует о повышении интенсивности ионизационных процессов в разряде и существенном вкладе в них плазменных электронов. В области II (рисунок 7) также происходит интенсивное перераспределение токов между эмиттерным электродом и эмиссионным каналом.

В области III (рисунок 7) рост тока обеспечивается дополнительными механизмами, например, формированием слабого электрического поля в плазме, способствующего формированию потока плазменных электронов в область эмиссии. Эффективность извлечения ( $\alpha$ ) стремится к насыщению, энергетическая эффективность ( $H$ ) слабо растёт, а энергетический параметр ( $\kappa$ ) меняется слабо и составляет 10 – 20% от его первоначального значения. Это позволяет предположить, что основная доля энергии, необходимой для поддержания такого режима, обусловлена источником ускоряющего напряжения. В этом слу-



**1 – 6:** ток разряда 0,2 А; давление, Па: 7 – 0,5; 8 – 0,8; напуск газа, мПа·м<sup>3</sup>/с: 1, 2, 3 – 2,2; 4, 5, 6 – 1,7; эмиссионный канал: длина, мм: 1, 2, 3 – 2; 4, 5, 6 – 1; радиус, мм: 1 – 6 – 1; 7, 8 – 0,93

**Рисунок 7.** – Экспериментальные (1 – 6) и расчётные (7, 8) зависимости эффективности извлечения  $\alpha$  (1, 4), энергетической эффективности  $H$  (2, 5, 7, 8) и энергетического параметра  $\kappa$  (3, 6) от ускоряющего напряжения для эмиттеров типа ОРПК (4 – 6) и ОРМ (1 – 3, 7, 8)

чае основная часть разрядного тока ( $\alpha > \alpha_{cr}$ ) переключается в ускоряющий промежуток и на ускоряющий электрод, который начинает выполнять функцию основного анода газоразрядной структуры, т.е. реализуется «режим полного переключения». Под «режимом полного переключения» следует понимать переход плазменного эмиттера в такое состояние, когда определяющий энерговклад в формирование плазмы вносит источник, обеспечивающий извлечение электронов, а не достижение эффективностью извлечения величины, близкой к единице. Поэтому для реализации «режима полного переключения» эффективность извлечения  $\alpha$  должна превысить критическое значение  $\alpha_{cr}$ , которое может оставаться существенно меньше единицы.

Удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчётных зависимостей параметров переключения и эффективности извлечения свидетельствует об адекватности модели и обоснованности учитываемых факторов. Это позволяет рассматривать появление в плазме электрического поля при извлечении электронов как возникновение в плазменном эмиттере положительной обратной связи между параметрами разряда, ускоряющим напряжением и током эмиссии. При этом источник ускоряющего напряжения, посредством формируемого в плазме электрического поля, начинает оказывать на разряд такое же влияние, как и источник разрядного напряжения, т.е. обеспечивать определённый энерговклад в разряд. Расчёты показали, что напряжённость формируемого в плазме электрического поля достигает величины порядка  $E_0 = kT_e / el_{pl}$  ( $E_0$  – «тепловая» напряжённость электрического поля в плазме, протяжённостью  $l_{pl}$ , с электронной температурой  $T_e$ ). Такое поле не нарушает квазинейтральности плазмы, но его напряжённость зависит от эффективности извлечения  $\alpha$ .

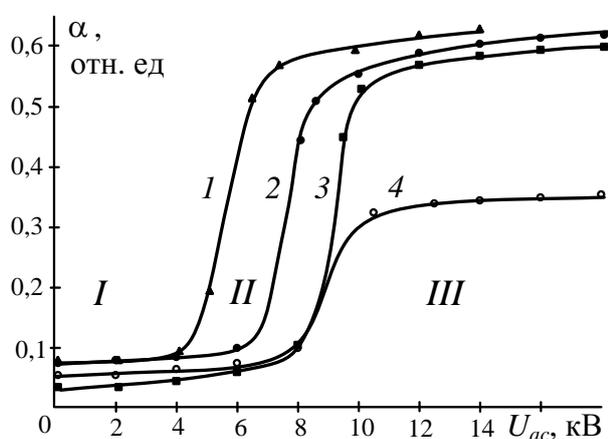
Также в данной главе экспериментально и теоретически рассмотрены условия формирования плазмы в разряде с расширителем. Показано, что отбор электронов из плазмы в таких системах приводит к формированию слабого электрического поля, обеспечивающего поток электронов в область эмиссии, напряжённость которого зависит от давления и тока эмиссии. Установлено существование критического давления, при достижении которого плазма в расширителе формируется в основном за счёт ионизационных процессов в объёме (плазменными электронами), а не потоком плазмы из основного разряда, что свидетельствует о переходе расширителя в «активный» режим – режим полого анода.

В **пятой главе** «ИЭП для формирования пучков заряженных частиц» представлены результаты исследования ИЭП, разработанных на основе новых принципов конструирования, обеспечивающих увеличение роли плазменных электронов в ионизационных процессах в генераторе плазмы, повышение эффективности извлечения за счёт реализации дрейфового механизма переключе-

ния тока в разряде, создания условий для установления оптимального значения потенциала эмиттерного электрода и реализации физических механизмов стабилизации эмиссионного тока.

В первом разделе главы приведены сведения о принципе работы и основных характеристиках ИЭП на основе отражательного разряда с полым катодом и изолированным эмиттерным электродом, электродная структура которого показана на рисунке 4. Вольт-амперные характеристики ОРПКИЭ качественно соответствуют вольт-амперным характеристикам ОРПК. Влияние дополнительного изолированного электрода проявляется в незначительном увеличении напряжения горения разряда (10 – 20 В) и параллельном смещении характеристик в область его бóльших значений. При этом повышается (на 20 – 30 мА) нижнее значение тока разряда, необходимого для реализации эффекта полого катода при прочих равных условиях. Зависимости эффективности извлечения от ускоряющего напряжения приведены на рисунке 8.

На характеристиках можно выделить три области. Область *I* соответствует малой эффективности извлечения при невысоких ускоряющих напряжениях. Область *II* является переходной и реализуется в относительно узком диапазоне ускоряющего напряжения. В этом режиме наблюдаются колебания эмиссионного тока с частотой в мегагерцовом диапазоне, природа которых обсуждалась выше. Ускоряющее напряжение, при котором реализуется переходный режим эмиссии, слабо зависит от величины



**1, 2, 3 – ОРПКИЭ; 4 – ОРПК;**  
**эмиссионный канал: диаметр 2 мм;**  
**длина, мм: 1, 2, 3 – 2; 4 – 0,8;**  
**ток разряда без эмиссии, А: 1, 2, 3 – 0,2; 4 – 0,4;**  
**напуск газа, мПа·м<sup>3</sup>/с: 1, 4 – 1,4; 2 – 1,25; 3 – 1,1**

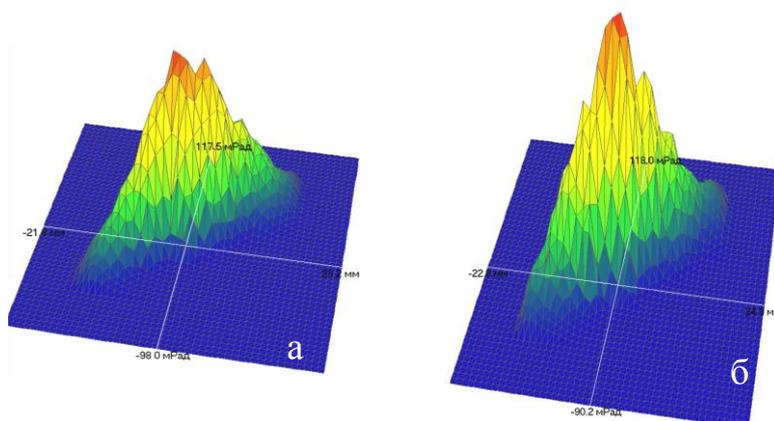
**Рисунок 8. – Вольт-амперные характеристики извлечения**

начального тока разряда и определяется давлением в разрядной камере (расходом газа), при этом с его ростом переход смещается в область меньших ускоряющих напряжений. Область *III* соответствует высокой эффективности извлечения, причём с увеличением ускоряющего напряжения в этой области эффективность извлечения слабо растёт, а модуляция тока эмиссии практически отсутствует. При прочих равных условиях в ИЭП на основе ОРПКИЭ (рисунок 8, кривые 1 – 3) обеспечивается более высокая эффективность извлечения электронов из плазмы в сравнении с ИЭП на основе ОРПК (кривая 4). Для ИЭП на основе ОРПКИЭ изменение длины эмиссионного канала в диапазоне величин от одного до двух диаметров практически не оказывает заметного влияния на эффек-

тивность извлечения, а с увеличением диаметра эмиссионного канала эффективность извлечения возрастает.

Обнаруженный высокоэффективный режим эмиссии электронов из плазмы ОРПКИЭ представляется промежуточным между известными режимами эмиссии электронов из газоразрядных структур без возмущения плазмы (режим работы зонда в плазме) и при эмиссии электронов из плазмы ВТР с большим анодным падением потенциала, когда параметры эмитирующей плазмы полностью определяются параметрами электронного пучка. Установлено, что слабая (практически линейная) зависимость тока эмиссии от ускоряющего напряжения в области III обусловлена соответствующей зависимостью тока разряда (тока полого катода) от ускоряющего напряжения, что свидетельствует о возникновении положительной обратной связи между током эмиссии и током разряда, т.е. о влиянии процесса отбора электронов на режим горения ОРПКИЭ. Зависимости тока эмиссии от тока разряда, полученные при постоянном ускоряющем напряжении и соответствующие области III на рисунке 8, близки к линейным, что обеспечивает возможность эффективного управления эмиссионным током регулированием (схемотехнически) тока разряда. При этом эффективность извлечения с ростом тока разряда в диапазоне от 0,2 А до 0,6 А снижается от 0,6 до 0,53, причем с уменьшением напуска газа эффективность извлечения снижается в большей степени.

Источник обеспечивает получение электронных пучков с током до 200 мА при ускоряющем напряжении до 30 кВ. Сравнительный анализ трёхмерных фазовых портретов электронных пучков (рисунок 9), формируемых в ИЭП на основе ОРПК и ОРПКИЭ, показал перспективность использования источника типа ОРПКИЭ в технологиях, требующих применения сфокусированных электронных пучков с высокой яркостью. Зависимость интенсивности ионизационных процессов в плазме такого ИЭП от тока эмиссии исключает срывы эмиссионного тока, которые в случае



ускоряющее напряжение 12 кВ; ток эмиссии, мА: а – 45; б – 135; средняя расходимость, мрад: а – 66; б – 64; эмиттанс, м·мрад: а – 0,251; б – 0,245; яркость, кА/(м·рад)<sup>2</sup>: а – 8,1; б – 21; оси: аппликата – плотность тока, отн. ед.; в плоскости – расходимость (мрад) и радиальная координата (мм)

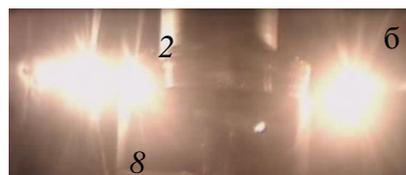
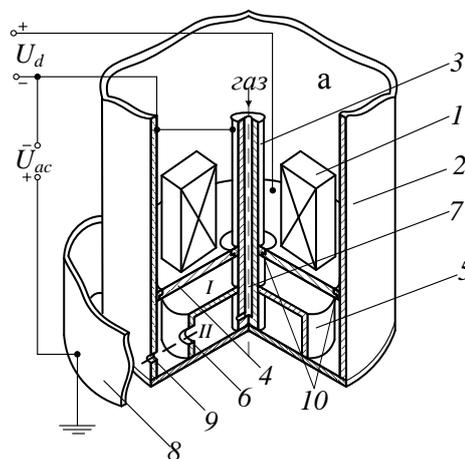
Рисунок 9. – Трёхмерные фазовые портреты электронных пучков в ИЭП на основе ОРПК (а) и ОРПКИЭ (б)

ОРПК могут возникать при эффективной эмиссии вследствие погасания разряда. Кроме этого, наличие в ускоряющей промежутке изолированного электрода, потенциал которого согласуется с током эмиссии автоматически, исключает интенсивные электрические пробои ускоряющего промежутка, что также обеспечивает высокую стабильность работы источника при нестабильных технологических условиях.

В этом же разделе представлен ИЭП, обеспечивающий формирование радиальных (два или три) электронных пучков с током до 50 мА каждый при ускоряющем напряжении до 30 кВ в диапазоне давлений  $10^{-3} - 10^{-1}$  Па (рисунок 10). Диаметр каждого пучка на обрабатываемой поверхности не превышает 3 мм, что позволяет реализовывать технологии модификации поверхностей с оплавлением поверхности.

Во втором разделе главы представлены основные характеристики, конструкция и принцип работы ИЭП на основе ОРМ с анодным (или близким к нему) потенциалом эмиттерного электрода (см. рисунок 6), в котором реализован дрейфовый механизм переключения за счёт ограничения подвижности плазменных электронов магнитным полем. Присутствие магнитного поля практически во всём объёме разрядной структуры способствует эффективной ионизации газа, что обеспечивает исключение стадии инициирования разряда. В области эмиссионного канала (область II, см. рисунок 6) магнитное поле имеет продольное оси эмиссионного канала направление индукции и не препятствует эмиссии электронов. Движение электронов в область II из области I осуществляется в слабом магнитном поле с поперечной компонентой вектора индукции. Это в определённой мере ограничивает движение электронов в область эмиссионного канала и затрудняет переключение электронного тока из плазмы в эмиссионный канал, что обеспечивает стабильность эмиссии.

Показано, что эмиссионные характеристики (зависимость тока эмиссии от тока разряда) в рабочем диапазоне токов разряда имеют участок, близкий



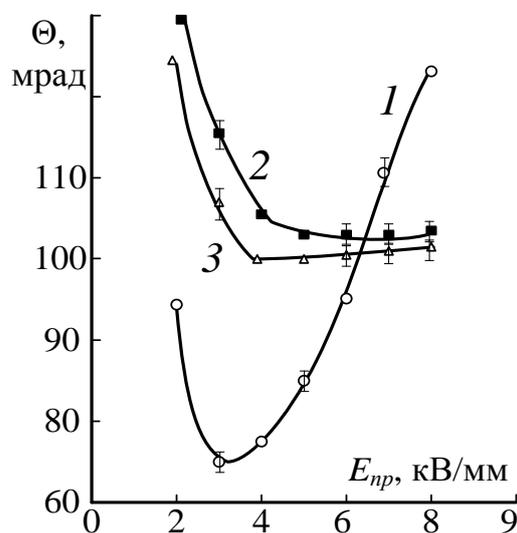
- 1 – магниты (3 шт.); 2 – внешний катод;
- 3 – внутренний катод; 4 – анод;
- 5 – полый катод; 6 – отверстие в полой катод;
- 7 – канал для напуска газа;
- 8 – обрабатываемая деталь;
- 9 – эмиссионное отверстие;
- 10 – изоляторы

Рисунок 10. – Структура ИЭП (а) и фотография радиальных пучков (б)

к линейному, с крутизной, существенно меньшей в сравнении с ИЭП на основе ОРПК. Зависимость тока пучка от ускоряющего напряжения имеет область квазинасыщения. В таком источнике существует возможность управления эффективностью извлечения в достаточно широких пределах от 0,1 до 0,5 за счёт использования сопротивления смещения в цепи анода (для увеличения эффективности извлечения, см. рисунок 6) или эмиттерного электрода (для её снижения и стабилизации), имеющего анодный, относительно катода, потенциал.

Установлено также, что использование сопротивления смещения в цепи эмиттерного электрода (см. рисунок 6) обеспечивает возможность снижения минимальной расходимости пучка и оказывает стабилизирующее действие на ток эмиссии, сравнимое с авторегуляцией потенциала изолированного электрода в ИЭП на основе ОРПКИЭ. Показано, что максимальное значение мощности пучка (до 4,5 кВт при ускоряющем напряжении до 30 кВ), плотности мощности (до  $q_{max} \approx 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>) и минимальный эффективный диаметр электронного пучка (1 мм на уровне 0,1  $q_{max}$ ) соответствуют типичным значениям плотности мощности электронных пучков, применяемых для электронно-лучевой сварки. Это, а также вид газовой характеристики, свидетельствуют о возможности применения данного источника для сварки, в том числе и материалов с повышенным газоотделением (при давлении вплоть до 0,3 Па) в процессе термообработки.

Сравнительный анализ расчётных и экспериментальных (рисунок 11) характеристик электронных пучков (эмиттанса, яркости, расходимости) позволил выявить принципиальные отличия условий их формирования в ИЭП с анодным (ОРМ) и катодным (ОРПК) потенциалами эмиттерного электрода, заключающиеся в том, что при изменении ускоряющего напряжения в наибольшей степени стабильность тока эмиссии обеспечивается при катодном потенциале эмиттерного электрода (крутизна характеристики извлечения в области насыщения меньше), а стабильность геометрии формируемого пучка выше при анодном потенциале эмиттерного электрода (зависимость расходимости пучка от приведённой напряжённости меньше, рисунок 11, кривые 2, 3).



ток разряда 0,2 А; ток эмиссии 0,05 А;  
напуск газа, мПа·м<sup>3</sup>/с: 1, 2 – 2,2; 3 – 3,3;  
эмиссионный канал: радиус, мм: 1 – 1,1; 2, 3 – 0,9;  
длина, мм: 1 – 0,8; 2, 3 – 2

Рисунок 11. – Зависимость расходимости электронного пучка, формируемого в ИЭП на основе ОРПК (1) и ОРМ (2, 3), от приведённой напряжённости

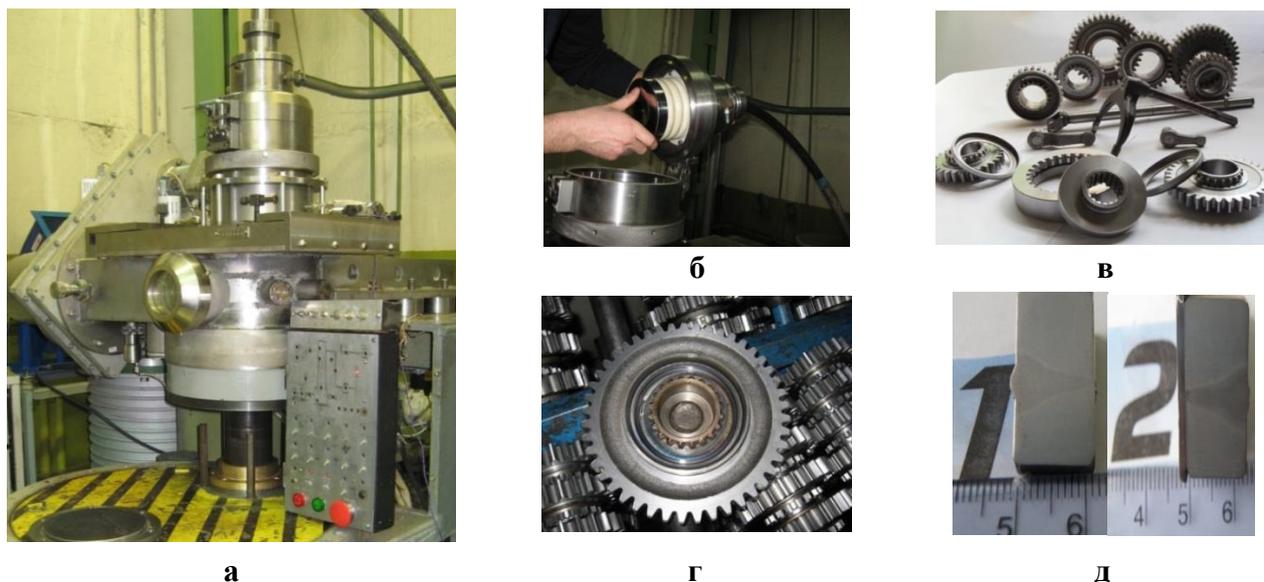
Это обусловлено различием преобладающих механизмов переключения (диффузионный – в случае ОРПК и дрейфовый – в случае ОРМ) и изменением условий формирования градиентов потенциала в плазме, проникающей в эмиссионный канал, с анодным или катодным потенциалом стенок.

В третьем разделе главы представлены конструкции и основные характеристики ИЭП на основе ОРМ, формирующие пучки большого сечения с диаметром пучка до 50 мм, высокой равномерностью распределения плотности тока по сечению пучка и параметрами, достаточными для поверхностной модификации материалов и реализации ряда упрочняющих и плазмохимических технологий.

Показано, что при ускоряющем напряжении до 20 кВ могут быть получены электронные пучки с током до 500 мА в стационарном режиме, а в импульсном режиме ток эмиссии при той же эффективности извлечения может быть увеличен практически на порядок (до 5 А) при длительности импульса до 100 мкс.

Для повышения устойчивости работы при обработке поверхностей с интенсивным газоотделением в ИЭП с ПБС на основе ОРМ использован способ двухсечеточной стабилизации плазменной поверхности, основанный на использовании эмиттерных электродов в виде двойных эквипотенциальных сеток с высокой геометрической прозрачностью каждой сетки в отдельности и обеспечивающий значительное увеличение предельного значения рабочего давления в ускоряющем промежутке вплоть до 1 Па в стационарном режиме и до 10 Па – в импульсном. Показана также возможность создания на основе ОРМ источника низкоэнергетичных (до 5 кВ) электронных (с током до 150 мА) и ионных (с током до 50 мА) пучков, обеспечивающих попеременное комбинированное термическое электронное и модифицирующее ионное воздействие на поверхности в стационарном режиме.

В **шестой главе** «Технологическая апробация разработанных ИЭП» представлены некоторые примеры технологических применений источников различного назначения. Разработанные ИЭП сварочного типа проходили апробацию на ОАО «МТЗ» в составе экспериментальной электронно-лучевой установки для отработки режимов сварки новых видов шестерён, валов и других видов изделий (рисунок 12). При мощности электронного пучка до 3 кВт (30 кВ) ИЭП на основе ОРМ обеспечивает диаметр электронного пучка в области кроссовера не более 1 мм и позволяет получать сварной шов глубиной до 12 мм. Зона термического влияния в верхней части сварного шва в зависимости от мощности пучка и скорости сварки не превышает 4 – 5 мм, что удовлетворяет всем технологическим требованиям, предъявляемым к сварным соединениям данных изделий. Созданы модификации разработанных ИЭП для реализации специфических условий электронно-лучевой сварки, таких как система для формирования прерывистых швов с реализацией ввода и вывода кратера сварного шва на каждом его отрезке, ИЭП с газодинамическим каналом и двухступенчатой фокусировкой пучка для его



**Рисунок 12. – Внешний вид экспериментальной установки (а), источника электронов (б), свариваемых изделий (в, г) и поперечные шлифы сварных соединений (д)**

вывода в область с повышенным на 1 – 2 порядка давлением в технологической области действия пучка в сравнении с давлением в области его формирования.

Показана возможность и перспективность использования разработанных ИЭП для реализации ряда упрочняющих технологий. Установлено, что электронно-лучевое воздействие на наплавленные покрытия системы Fe-B-C-W-Mo-Cr-V в значительной степени улучшает эксплуатационные свойства таких борсодержащих материалов, повышая их твёрдость и увеличивая сопротивление материала хрупкому разрушению, что позволяет рассматривать такие материалы как инструментальные, а в некоторых случаях и в качестве заменителей твёрдых сплавов.

Показана возможность локального электронно-лучевого упрочнения на примере цилиндрических образцов деталей тракторов (сталь 45, сталь 40X, исходная твёрдость 200 – 220 НV, параметры воздействия: ширина воздействия 8 – 12 мм, плотность мощности  $(1 - 5) \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, ускоряющее напряжение 16 – 20 кВ, ток пучка 40 – 90 мА). Установлено, что ЭЛВ повышает твёрдость в 1,8 – 2,5 раза по сравнению с исходной с возможностью достижения максимума твёрдости на глубину 0,3 – 0,5 мм, что позволяет проводить окончательную размерную механическую обработку поверхностей с сохранением свойств упрочнённого слоя.

В лаборатории электрофизики ФТИ НАН Беларуси осуществлялся электронно-лучевой переплав с использованием ИЭП на основе ОРПКИЭ. Исследовалось влияние переплава на свойства образцов из сплава HS-21 «Carpenter Technology Corporation» (США), которые моделировали отходы материала, образующиеся при изготовлении эндопротеза тазобедренного сустава. Проводился также переплав изношенных платиновых фильер для формообразования во-

локон различного диаметра из стекла (кремнезема) с целью электронно-лучевого рафинирования и повторного использования платины. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения ИЭП для разработки установок такого назначения.

Предложен способ управления толщиной модифицируемого слоя за счет оптимального выбора длительности, скважности и количества импульсов электронно-лучевого воздействия, реализуемого в импульсном режиме работы разработанных источников электронных пучков. Разработана прикладная программа для расчёта распределения температуры в материалах, подвергнутых теплофизическому электронно-лучевому воздействию, которая позволяет проводить анализ термического влияния на одно- и двухслойные материалы в стационарном и импульсном режимах и подобрать оптимальные параметры воздействия (время обработки или параметры и количество импульсов) для достижения требуемой температуры на заданной глубине.

Сформулированы перспективные направления и проекты по внедрению разработанных ИЭП в производство и расширению области практического применения электронно-лучевых технологий, в частности в плазмохимии, технологиях комбинированного ионно-электронного воздействия, обработки непроводящих материалов и создания на их основе покрытий.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

В результате проведённых экспериментальных и теоретических исследований получены следующие основные результаты, имеющие приоритетный характер:

1. На основании критического анализа исходной модели разработана концепция плазменного эмиттера, основанная на экспериментально подтверждённых моделях процессов в ускоряющем промежутке [32, 33, 68], эмиссионном канале [62], генераторе плазмы [3, 63] и соответствующих алгоритмах их численного моделирования [29, 32, 33, 68], учитывающих совместное влияние на эмиссионные и электронно-оптические свойства источников электронов с плазменным эмиттером таких факторов, как подвижность, положение и форма плазменной эмитирующей поверхности, начальные тепловые скорости эмитированных электронов, изменение параметров проникающей в эмиссионный канал плазмы, потенциал стенок и геометрию эмиссионного канала, ионизацию остаточного газа электронами пучка, формируемого в ЭОС [17, 24, 32, 33, 62, 63]; ионизационную способность плазменных электронов; механизмы переключения тока; перераспределение токов в разряде и возмущение эмитирующей плазмы [3, 9, 12, 22, 30, 58], что в совокупности позволяет повысить достоверность результатов моделирования ЭОС такого типа за счёт учёта ранее не

рассматриваемых процессов и существенно уменьшить объём исследований по экспериментальной оптимизации конструкций ИЭП.

2. Установлен физический механизм обнаруженного экспериментально перехода [3, 17, 40, 58, 62] от стационарного режима эмиссии к нестационарному (импульсному) режиму эмиссии с глубоким уровнем модуляции тока электронного пучка в системах с плазменным эмиттером различного типа. Этот переход реализуется при достижении в ускоряющем промежутке критического давления (для «точечных» эмиттеров – 0,4 – 0,8 Па, для ПБС – 0,3 – 1,3 Па) и обусловлен ионизационными процессами в нём, приводящими к накоплению ионного объёмного заряда и формированию в ускоряющем промежутке вторичных плазменных образований с потенциалом несколько сотен вольт для «точечных» эмиттеров [17, 24, 63] или порядка ускоряющего напряжения (десятки киловольт) для эмиттеров большого сечения [4, 9, 17, 18]. Эти плазменные образования можно рассматривать как виртуальные электроды, динамика которых изменяет электронно-оптические и эмиссионные свойства плазменных эмиттеров [7, 17, 62, 63, 69].

3. Обнаружены принципиальные отличия механизмов формирования эмитирующей плазмы в эмиссионном канале для трёх основных случаев (катодного, анодного и «плавающего») потенциала эмиттерного электрода [3, 38, 62], что позволило объяснить причины возникновения неустойчивости эмиссионного тока и сформулировать критерий устойчивости эмиссии: существование в плазме, проникающей в эмиссионный канал, тормозящего электроны градиента потенциала, в системах с кнудсеновским (диффузионным, т.е. в отсутствии ограничений на подвижность плазменных электронов) переключением, реализуемых, например, в разрядах с полым катодом. Удовлетворительное соответствие экспериментальных данных результатам расчётов в рамках предложенной модели процессов в эмиссионном канале свидетельствует о правомерности использования разработанной модели для анализа способов стабилизации тока эмиссии [10, 30, 58, 60, 62].

4. Показано, что в генераторах плазмы в ИЭП вклад плазменных электронов в формирование эмитирующей плазмы сравним со вкладом высокоэнергетичных  $\gamma_{ie}$ -электронов [3, 9, 22, 30, 31, 58], эмитированных катодами в результате ионно-электронной эмиссии, а в формировании эмиссионного тока является определяющим. Обнаружено, что ток эмиссии формируется в результате совместного действия двух механизмов: за счёт изменения параметров приэлектродных слоёв в области эмиттерного электрода и перераспределения (переключения) токов на электроды. Введены в рассмотрение [22, 58] параметры переключения ( $\zeta$  и  $\eta$ ), соответствующие принципиально различным механизмам формирования эмиссионного тока и определяющие в совокупности эффективность извлечения  $\alpha$ . Установлено, что параметры переключения и эффективность извлечения зависят от уско-

ряющего напряжения, неоднородности распределения концентрации, формирующихся в разряде полей и распределения токов на электроды, в результате чего стабилизация только тока разряда не обеспечивает стабильности тока эмиссии. Удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчётных зависимостей свидетельствует об адекватности разработанной модели формирования тока эмиссии в плазменных эмиттерах [3, 22, 30, 58].

5. Теоретически обоснован и экспериментально установлен дрейфовый механизм переключения эмиссионного тока в газоразрядных структурах с ограничением подвижности плазменных электронов, который в отличие от диффузионного, характерного для разрядов с высокой осевой неоднородностью распределения концентрации (разряд с полым катодом), связан с возникновением в плазме слабого, порядка 100 В/м, локального электрического поля, способствующего извлечению электронов за счёт их дрейфа из всего объёма плазмы в область отбора. Извлечение электронов в этом случае приводит к перераспределению токов в разряде и изменению параметров эмитирующей плазмы [3, 22, 30, 31, 36, 44, 51, 58]. На основе энергетического анализа установлено и экспериментально подтверждено существование трёх режимов эмиссии: режим «зонда» без возмущения плазмы; переходный режим, связанный с перестройкой пристеночных слоёв и перераспределением токов в генераторе плазмы, и режим «полного переключения», связанный с полной перестройкой разряда, возникновением в ней слабых электрических полей и формированием нового типа разряда с электропитанием от двух источников – разрядного и ускоряющего напряжений [3, 8, 17, 30, 58]. Обнаружено, что режим «полного переключения» реализуется при эффективности извлечения электронов существенно ниже единицы, но выше некоторого критического значения [3, 11, 16, 17, 30, 40, 47, 51, 58], достигаемого в ИЭП и зависящего от параметров плазмы, геометрии ЭОС, давления газа, наличия и величины магнитного поля.

6. Предложен способ и разработан аппаратно-программный измерительный комплекс для экспресс-диагностики параметров электронного пучка. Комплекс позволяет анализировать электронный пучок на основе трёхмерных поверхностей (фазовых объёмов), изображать фазовый портрет пучка, рассчитывать эмиттанс, яркость и другие его параметры. Комплекс может быть использован для экспериментальных исследований формируемых пучков и оценки качества системы формирования пучка [2, 3, 20, 21, 29, 56].

7. Предложена конструкция ИЭП на основе отражательного разряда с полым катодом и изолированным эмиттерным электродом [78], значение потенциала которого устанавливается автоматически в соответствии с потоками зарядов на него. Установлено, что в ИЭП на основе разряда с полым катодом и изолированным эмиттерным электродом реализуется саморегулирующийся режим, обеспечивающий повышение эффективности извлечения до 60% [3, 28,

34, 62], существенно большей (в 1,5 – 2 раза), чем для традиционных ИЭП на основе ОРПК. Вероятность и интенсивность пробоев высоковольтного промежутка в технологических ИЭП при этом снижается. Обнаружен переходный режим от низкой к высокой эффективности извлечения. Показано, что экспериментально обнаруженная в этом режиме модуляция эмиссионного тока вызвана периодическим перемещением эмитирующей плазменной поверхности в эмиссионном канале и обусловлена возникновением обратной связи между током эмиссии и процессами в эмитирующей плазме [28, 62].

8. Разработана новая конструкция ИЭП, совмещающая в себе условия формирования эмитирующей плазмы в ОРМ и ОРПК и позволяющая формировать радиальные пучки [3, 23, 55, 77] для реализации термической обработки внутренних цилиндрических поверхностей.

9. Предложены конструкции плазменного эмиттера для создания ИЭП нового типа с анодным потенциалом эмиттерного электрода [2, 3, 4, 17, 35, 37, 39, 41, 45, 48, 74, 75], в которых реализованы принципы дрейфового механизма переключения электронного тока. Показана возможность использования такого типа ИЭП для реализации электронно-лучевых технологий [1, 6, 7, 13, 42, 43, 49, 52, 53, 54, 57, 59, 64, 70, 71, 73]. Установлены принципиальные отличия характеристик электронных пучков, формируемых в ИЭП с анодным и катодным потенциалами эмиттерного электрода (относительно катода), заключающиеся в том, что при изменении ускоряющего напряжения в случае катодного потенциала эмиттерного электрода обеспечивается бóльшая стабильность тока эмиссии, а при анодном потенциале эмиттерного электрода – бóльшая стабильность геометрии формируемого пучка. Это обусловлено различием реализуемых механизмов переключения (диффузионного и дрейфового) и изменением условий формирования градиентов потенциала в плазме, проникающей в эмиссионный канал с анодным или катодным потенциалом стенок [22, 27, 38, 58].

10. Разработан ряд способов несхемотехнического (физического) управления параметрами плазменных эмиттеров различного типа. В ИЭП на основе модифицированного отражательного разряда предложен способ управления эффективностью извлечения в ИЭП такого типа [2, 3, 19, 27, 60, 65], основанный на управлении его эмиссионными свойствами за счёт усиления или ослабления механизмов переключения токов между анодным и эмиттерным электродами. Для ИЭП с пучками большого сечения предложен способ расширения диапазона рабочих давлений в область повышенных (на 30 – 40%) значений при сохранении стабильности тока эмиссии и электрической прочности ускоряющего промежутка [7, 16, 18, 50, 74]. Это достигается использованием эмиттерных электродов в виде двойных эквипотенциальных сеток с высокой геометрической прозрачностью каждой сетки в отдельности (метод двухсеточной стабилизации эмиссионного тока), что позволяет сохранить высокую эффективность извлечения. В ИЭП для

формирования пучков большого сечения показана также возможность реализации «активного» режима, когда ионизация газа плазменными электронами оказывает определяющее влияние на формирование плазмы в расширителе [19, 27, 46, 50, 58, 60, 62], что позволяет повысить эффективность извлечения в таких источниках и оптимизировать геометрию расширителя.

11. Предложен способ управления толщиной модифицируемого слоя в технологиях термического воздействия электронным пучком за счёт использования многоимпульсного режима воздействия при варьировании длительностью, скважностью и количеством импульсов тока эмиссии. Разработана прикладная программа, которая позволяет оценить результат такого термического влияния и на предварительном этапе подобрать требуемые параметры электронного пучка [1, 5, 15, 66].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Разработанные ИЭП обладают значительно более высоким (в десятки раз) ресурсом в сравнении с известными термокатодными источниками электронов и позволяют реализовать как традиционные, так и новые технологии.

Показано, что разработанные ИЭП могут быть использованы для реализации известных электронно-лучевых технологий [1, 2, 6, 7, 61], таких как получение сварных соединений с требуемыми параметрами [2, 7, 54, 70, 71], закалка [6, 7, 13, 42, 64], переплав материалов и сплавов [57, 59], реализация плазмохимических процессов [73], нанесение и обработка покрытий, в частности, обработка боросодержащих наплавленных покрытий с формированием слоя с высокой твердостью (до 1100 HV), трещиностойкостью (150 – 220 МПа/мкм) и износостойкостью, превышающей в 7 – 12 раз указанный показатель покрытий без соответствующей обработки [1, 2, 7, 43, 45], а также для решения нетрадиционных задач, например, получение прерывистых сварных швов [53], разработка высокопроизводительных такт-машин с выводом пучка в рабочую камеру с повышенным давлением [54, 61, 70, 71]. Обоснована возможность и перспективность разработки комбинированных способов воздействия, совмещающих электронно-лучевое с другим (например, ионным) типом воздействия [35, 37, 39, 48, 73].

Предложены варианты реализации систем управления и автоматизации отечественных электронно-лучевых энергокомплексов сварочного и другого типа на основе разработанных ИЭП [8, 11, 12, 14, 25, 26, 67, 70, 71, 72, 76].

Разработанные ИЭП запатентованы и прошли апробацию на ОАО «Минский тракторный завод» [70, 71] и в лаборатории электрофизики Физико-технического института НАН Беларуси [57, 59].

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### Монографии

1. Закономерности электронно-лучевого воздействия на борсодержащие материалы и принципы оптимизации электронно-лучевого оборудования для технологий упрочнения и восстановления / Ф.И. Пантелеенко, В.А. Груздев, А.С. Снарский, В.Г. Залесский, В.И. Сороговец – Минск : Технопринт; Полоцк : ПГУ, 2005. – 120 с.

2. Технологические процессы и системы в микроэлектронике / А. П. Достанко, В.Г. Залесский, С.В. Русецкий, В.Л. Ланин, И.Б. Петухов, Д.А. Голосов, Е.В. Телеш, С.В. Бордусов, С.М. Завадский; под общей ред. А.П. Достанко. – Минск : Беспринт, 2009. – 200 с.

3. Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий / В.Т. Барченко, О.Л. Вересов, О.И. Гребнев, В.А. Груздев, В.Г. Залесский, А.А. Лисенков; под общ. ред. В.Т. Барченко. – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 220 с.

### Статьи в журналах

4. Груздев, В.А. Плазменный источник электронов с пучком большого сечения / В.А. Груздев, Ю.П. Голубев, В.Г. Залесский // Инженерно-физ. журн. – 2002. – Т. 75, № 3. – С. 166–170.

5. Залесский, В.Г. Управление параметрами модифицируемого слоя при электронно-лучевой обработке / В.Г. Залесский, А.Г. Маняк, Д.Г. Руголь // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2003. – № 4. – С. 120–124.

6. Плазменные источники электронов – перспективные устройства для электронно-лучевых технологий / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев // Мир технологий. – 2003. – № 1. – С. 45–54.

7. Возможности и перспективы использования плазменных источников электронов для реализации электронно-лучевых технологий в машиностроении / В. А. Груздев, В. Г. Залесский, Д. А. Антонович, Ю. П. Голубев // Тяжелое машиностроение. – 2004. – № 9. – С. 25–32.

8. Антонович, Д.А. Генератор эмитирующей плазмы как сложная нагрузка систем электропитания плазменных источников электронов / Д.А. Антонович, В.Г. Залесский, И.С. Русецкий // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2004. – № 11. – С. 86–90.

9. Universal plasma electron source / V.A. Grusdev, V.G. Zaleski, D.A. Antonovich, Yu.P. Golubev // Vacuum. – 2005. – № 77. – P. 399–405.

10. Груздев, В.А. Анализ возможности стабилизации эмиссионного тока плазменных эмиттеров при возмущении плазмы отбором электронов / В.А. Груз-

дев, Ю.П. Голубев, В.Г. Залесский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2005. – № 4. – С. 103–109.

11. Источник питания плазменного эмиттера / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский, И.С. Русецкий // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2005. – № 4 – С. 122–127.

12. Блок питания разряда плазменного источника электронов. / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский, И.С. Русецкий / Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 5. – С. 130–132.

13. Залесский, В.Г. Электронно-лучевая обработка быстроизнашивающихся деталей / В.Г. Залесский, Ю.П. Голубев, Ю.В. Мазаник // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2005. – № 10. – С. 63–66.

14. Автоматизированная система управления параметрами электронно-лучевой пушки с плазменным эмиттером / В.Г. Залесский, П.В. Павловец, Д.Г. Руголь, И.С. Русецкий // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2006. – № 10. – С. 83–89.

15. Груздев, В.А. Моделирование температурного поля в поверхностном слое при импульсном электронно-лучевом воздействии / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.Г. Руголь // Инженерно-физ. журн. – 2007. – № 2. – С. 134–142.

16. Влияние давления газа на эмиссионные свойства плазменного эмиттера / Д.А. Антонович, В.Г. Залесский, Д.Г. Руголь, И.С. Русецкий // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2007. – № 4. – С. 122–127.

17. Груздев, В.А. Физические процессы формирования электронных пучков в плазменных источниках / В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2007. – № 9. – С. 2–14.

18. Zalesski, V.G. Peculiarities of plasma electron sources operation at high pressures / V. G. Zalesski, D.A. Antonovich // J. Phys. D, Appl. Phys. – 2007. – № 40. – P. 7771–7777.

19. Антонович, Д.А. Эмиссионные свойства плазменного эмиттера электронов / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2008. – № 9. – С.114–123.

20. Способ и устройство для диагностики электронно-оптических систем плазменных источников электронов / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д. Г. Руголь, И.С. Русецкий // Докл. БГУИР. – 2009. – № 1 (39). – С. 71–77.

21. Программно-аппаратный комплекс для диагностики электронно-оптических систем и пучков заряженных частиц / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д. Г. Руголь, И. С. Русецкий // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 2. – С. 177–178.

22. Груздев, В.А. Формирование эмиссионного тока в плазменных эмиттерах электронов (Emission current formation in Plasma electron emitters) /

В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Прикладная физика. – 2009. – № 5. – С. 82–90; Plasma Physics Reports. – 2010. – Vol. 36 (13). – P. 1191–1198.

23. Antonovich, D.A. The gas-discharge structure for the formation of radial electron beams / D.A. Antonovich, V.A Gruzdev, V.G. Zalesski // Electrotechnica and electronica (Bulgaria). – 2009. – V. 44, № 5-6. – P. 186–188.

24. Залесский, В.Г. Особенности формирования эмитирующей поверхности в плазменных источниках электронов / В.Г. Залесский, О.Н. Петрович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2009. – № 9. – С. 69–76.

25. Залесский, В.Г. Программная компонента визуализации датчиков для автоматизированных систем управления электронно-лучевыми энергокомплексами / В.Г. Залесский, А.К. Корольков, П.В. Павловец // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2009. – № 3. – С. 127–130.

26. Залесский, В.Г. Автоматизированное управление электронно-лучевой пушкой с плазменным эмиттером, реализуемое на базе персонального компьютера / В.Г. Залесский, А.К. Корольков, П.В. Павловец // Доклады БГУИР. – 2009. – № 8 (39). – С. 57–62.

27. Способы повышения эффективности извлечения электронов в источниках с плазменным эмиттером / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский, И.С. Русецкий // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2010. – № 3. – С. 103–108.

28. Груздев, В.А. Плазменный источник электронов с изолированным эмиттерным электродом / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, И.С. Русецкий // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2010. – № 9. – С. 61–67.

29. Груздев, В.А. Численное моделирование фазовой характеристики электронного пучка / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, О.Н. Петрович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2010. – № 9. – С. 102–110.

30. Залесский, В.Г. Энергетическая эффективность плазменных источников электронов (Energy efficiency of electron plasma emitters) / В.Г. Залесский // Прикладная физика. – 2011. – № 1. – С. 63–71; Plasma Physics Reports. – 2011. – Vol. 37 (13). – P. 1196–1201.

31. Груздев, В.А. О роли плазменных электронов в формировании газоразрядной плазмы (Role of plasma electrons in the generation of a gas discharge plasma) / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, И.С. Русецкий // Прикладная физика. – 2012. – № 1. – С. 64–72; Plasma Physics Reports. – 2012. – Vol. 38 (13). – P. 1056–1064.

32. Залесский, В.Г. Моделирование ЭОС с плазменным эмиттером на основе метода декомпозиции расчётной области / В.Г. Залесский, О.Н. Петрович, В.М. Свешников // Прикладная физика. – 2012. – № 2. – С. 40–44.

33. Залесский, В.Г. Алгоритм оптимизации ЭОС с плазменным эмиттером на основе метода декомпозиции расчётной области / В.Г. Залесский, О.Н. Петрович, В.М. Свешников // Вестн. ХНТУ. – 2012. – № 2 (45). – С. 320–324.

34. Gruzdev, V.A. The electron gun with a plasma emitter and isolated emitter electrode / V.A. Gruzdev, V.G. Zalesski, I.S. Rusetski // Electrotechnica and Electronica (Bulgaria). – 2012. – V. 47, № 5-6. – P. 89–92.

35. Груздев, В.А. Плазменный ионно-электронный источник // В.А. Груздев, В.Г. Залесский, П.Н. Солдатенко / Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2013. – № 4. – С. 63–68.

36. Груздев, В.А. О механизме возникновения электрического поля в плазме при эмиссии электронов / В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2014. – № 4. – С. 103–108.

37. Антонович, Д.А. Электронно-ионный источник для реализации комбинированного воздействия на поверхность / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2014. – № 4. – С. 113–118.

38. Gruzdev, V.A. Electron-optical characteristics of the beam generated by the electron plasma sources / V.A. Gruzdev, V.G. Zalesski // Electrotechnica and Electronica (Bulgaria). – 2014. – V. 49, № 5-6. – P. 264–268.

#### **Доклады на конференциях**

39. Plasma source of charged particles based on superdense pulse glow discharge / V.A. Grusdev, V.G. Zalesski, D.A. Antonovich, Yu.P. Golubev // Plasma Physics and Plasma Technology : proc. III Intern. Conf., Minsk, 18–22 Sept. 2000 / Institute of Molecular and Atomic Physics National Academy of Sciences of Belarus. – Minsk, 2000. – Vol. I. – P. 60–63.

40. Grusdev, V.A. Disturbance of the gas-discharge plasma by switching of electron current to a probe / V.A. Grusdev, V.G. Zalesski // Plasma Physics and Plasma Technology : proc. III Intern. Conf., Minsk, 18–22 Sept. 2000 / Institute of Molecular and Atomic Physics National Academy of Sciences of Belarus. – Minsk, 2000. – Vol. I. – P. 153–156.

41. Импульсный плазменный источник электронов / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев // Ресурсосберегающие эко-технологии : возобновление и экономия энергии, сырья и материалов : материалы 4-й Междунар. науч.-техн. конф., Гродно, 11–13 окт. 2000 г. / ГрГУ. – Гродно, 2001. – Ч. II. – С. 19–25.

42. Залесский, В.Г. Особенности электронно-лучевого воздействия на борсодержащие износостойкие наплавленные покрытия / В.Г. Залесский, А.С. Снарский, В.И. Сороговец // Теоретические и технологические основы

упрочнения и восстановления изделий машиностроения : сб. науч. тр. / Полоц. гос. ун-т. – Минск, 2001. – С. 378–381.

43. Изучение влияния электронно-лучевого воздействия на структуру и свойства боридостали / Ф.И. Пантелеенко, В.Г. Залесский, А.С. Снарский, В.И. Сороговец // Пленки и покрытия 2001 : тр. 6-ой междунар. конф., СПб., 3–5 мая 2001 г. / СПбГТУ – СПб., 2001. – С. 582–586.

44. Gruzdev, V.A. Processes of self-organizing in plasma at simulated local infringement of its quasi-neutrality / V.A. Gruzdev, V.G. Zalesski // Nonlinear phenomena in complex systems : proc. X Annual seminar. Minsk, 15-18 May 2001 / Institute of Molecular and Atomic Physics National Academy of Sciences of Belarus. – Minsk, 2001. – P. 318–320.

45. Плазменный электронно-ионный источник для термической модификации поверхностей материалов / Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев, В.Г. Залесский, А.Г. Маняк // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения : сб. науч. тр. / Полоц. гос. ун-т. – Минск, 2001. – С. 369–372.

46. Golubev, Yu.P. Investigation of processes in an expander of plasma of electron sources with large cross section beam / Yu.P. Golubev, V.A. Gruzdev, V.G. Zalesski // on Plasma Physics And Plasma Technology : proc. IV Intern. Conf., Minsk, 15–19 Sept. 2003 / Institute of Molecular and Atomic Physics National Academy of Sciences of Belarus. – Minsk, 2003. – Vol. II. – P. 118–121.

47. Gruzdev, V.A. Energy balance of plasma electron emitter / V.A. Gruzdev, V.G. Zalesski, D.A. Antonovich // Proc. Int. Conf. on Plasma Physics and Technology, Prague, 14–17 June 2004. – Prague, 2004. – P. 149–151.

48. Груздев, В.А. Плазма как источник технологических электронных пучков / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский // ФДП-V 2004 : тр. V симп. Беларуси, Сербии и Черногории по физике и диагностике лабораторной и астрофизической плазмы, Минск, 20–23 сент. 2004 г. / ИМАФ. – Минск, 2004. – С. 187–191.

49. Применение электронных пушек с плазменным эмиттером для сварки и других электронно-лучевых технологий / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.А. Антонович, Ю.В. Мазаник, Д.Г. Руголь // Электротехнология : материалы заседаний секции «Источники питания и системы автоматического управления сварочным оборудованием» 3-й Междунар. выставки, СПб., 25–26 мая 2005 г. / СПбГТУ. – СПб., 2005. – С. 51–62.

50. Груздев, В.А. Особенности работы плазменных источников электронов (ПИЭЛ) при повышенных давлениях / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.А. Антонович // Плазменная эмиссионная электроника : тр. II Междунар.

крейнделевского семинара, Улан-Уде, 17-24 июня 2006 г. / БНЦ СО РАН. – Улан-Уде, 2006. – С. 70–78.

51. Gruzdev, V.A. Gas discharge plasma disturbance by electron extraction / V.A. Gruzdev, V.G. Zalesski, D.A. Antonovich // Plasma Physics and Plasma Technology : proc. V Intern. Conf. on, Minsk, 18-22 Sept. 2006. / Institute of Molecular and Atomic Physics National Academy of Sciences of Belarus. – Minsk, 2006. – Vol. I. – P. 154–157.

52. Залесский, В.Г. Перспективы применения электронно-лучевых технологий в тракторостроении / В.Г. Залесский, В.А. Лактионов, Ю.В. Мазаник // НТК «Сварка и резка материалов» : сб. докл., Минск, 27–30 марта 2007 г. / Ин-т сварки и защитных покрытий. – Минск, 2007. – С. 341–348.

53. Антонович, Д.А. Формирование прерывистых электронных пучков в пушках с плазменным эмиттером / Д.А. Антонович, В.Г. Залесский, И.С. Русецкий // Материалы, технологии и оборудование в производстве, в ремонте и модернизации машин : сб. науч. тр. VI междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 25–27 апр. 2007 г. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2007. – Т.3. – С. 92–95.

54. Особенности применения плазменных источников электронов для сварки и родственных технологий / В.И. Дьяченко, В.Г. Залесский, В.А. Лактионов, Ю.В. Мазаник // Технологии и оборудование ЭЛС–2008 : материалы Междунар. науч.-техн. конф., СПб., 19–22 мая 2008 г. – СПб., 2008. – С. 183–189.

55. Антонович, Д.А. Плазменный эмиттер для формирования радиально расходящихся электронных пучков / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств : сб. материалов V Междунар. науч.-техн. конф.: в 3-х т., Новополоцк, 29–30 мая 2008 г. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2008. – Т. II. – С. 48–51.

56. Программно-аппаратный комплекс для оптимизации конструкции плазменных источников электронов / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.Г. Руголь, И.С. Русецкий // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств : сб. материалов V Междунар. науч.-техн. конф. : в 3-х т., Новополоцк, 29–30 мая 2008 г. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2008. – Т. III : Информатика. – С. 67–70.

57. Груздев, В.А. Электронные пушки с плазменным эмиттером для плавки материалов / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, И.С. Русецкий // III Междунар. науч.-техн. конф., : сб. материалов, Минск, 15-17 окт., 2008 г. : в 4-х кн. – Минск, 2008. – Кн. 2 «Высокоэнергетические технологии получения и упрочнения материалов и деталей машин». – С. 263–268.

58. Груздев, В.А. Режимы эмиссии электронов в плазменных источниках двух типов / В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Плазменная эмиссионная электрони-

ка : тр. III Междунар. крейнделевского семинара, Улан-Уде, 23–30 июня 2009 г. / БНЦ СО РАН. – Улан-Уде, 2009. – С. 22–29.

59. Гордиенко, А.И. Переработка отходов штамповки сплава Co–Cr–Mo с использованием электронно-лучевого переplava / А.И. Гордиенко, И.Л. Поболь, В.Г. Залесский // Плазменная эмиссионная электроника : тр. III Междунар. крейнделевского семинара, Улан-Уде, 23–30 июня 2009 г. / БНЦ СО РАН. – Улан-Уде, 2009. – С. 145–150.

60. Zaleski, V.G. Ways of the plasma electron sources operation / V.G. Zaleski, I.S. Rusetski // Plasma Physics and Plasma Technology: proc. VI Intern. Conf., Minsk, 18–22 Sept., 2009 / Institute of Molecular and Atomic Physics NAS of Belarus. – Vol. I. – P. 173–176.

61. Антонович, Д.А. Применение плазменных источников электронов при повышенных давлениях в рабочей камере / Д.А. Антонович, В.Г. Залесский // Инновационные технологии в машиностроении : тр. Междунар. конф., Новополоцк, 19-20 сент. 2011 г. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2011. – С. 95–97.

62. Груздев, В.А. О возможном механизме автомодуляции электронного тока плазменного эмиттера / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, И.С. Русецкий // Плазменная эмиссионная электроника : тр. III Междунар. крейнделевского семинара, Улан-Уде, 25–30 июня 2012 г. / БНЦ СО РАН. – Улан-Уде, 2012. – С. 21–28.

63. Effect of plasma processes on the electron-optical properties of the plasma emitter source / V.A. Gruzdev, O.N. Petrovich, V.G. Zaleski, V.T. Barchenko // Plasma Physics and Plasma Technology : proc. VII Intern. Conf., Minsk, Sept. 17-21, 2012 / Institute of Physics NAS of Belarus. – Minsk, 2012. – Vol. II. – P. 573–576.

### **Тезисы**

64. Голубев, Ю.П. Применение плазменного источника электронов для упрочняющей обработки поверхностей / Ю.П. Голубев, В.Г. Залесский, А.С. Снарский // Наука – образованию, производству, экономике : реф. докл. междунар. науч.-тех. конф. : в 2-х т., Минск, 4–7 февр. 2003 г. / БНТУ. – Минск, 2003. – Т. I. – С. 15.

65. Залесский, В.Г. Способ управления параметрами газового разряда в плазменном источнике электронов / В.Г. Залесский, Д.А. Антонович // Наука – образованию, производству, экономике : реф. докл. междунар. науч.-тех. конф. : в 2-х т., Минск, 4–7 февр. 2003 г. / БНТУ – Минск, 2003. – Т. I. – С. 201.

66. Залесский, В.Г. Управление параметрами модифицируемого слоя при электронно-лучевой обработке / В.Г. Залесский, А.Г. Маняк, Д.Г. Руголь // Материалы, технологии для упрочнения и восстановления деталей машин : темат. сб. / Полоц. гос. ун-т. – Минск, 2003. – С. 250–251.

67. Antonovich, D.A. Features of systems of automated management by electron energy-complexes on the basis of e-beam guns with the plasma emitter / D.A. Antonovich, V.G. Zalesski, P.V. Pavlovets // European and National Dimension in Research : Junior Researchers Conf., Novopolotsk, 15-16 Apr. 2009 / Polotsk State University. – Novopolotsk, 2009. – P. 17–20.

68. Залесский, В.Г. Расчёт ЭОС с плазменным эмиттером на основе метода декомпозиции расчётной области / В.Г. Залесский, О.Н. Петрович, В.М. Свешников // Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики : тез. докл. X Всерос. семинара, Москва, 24–26 мая 2011 г. / Гос. науч. центр РФ ФГУП НПО «ОРИОН». – Москва, 2011. – С. 13–14.

69. Залесский, В.Г. Механизмы снижения электрической прочности в ПИЭЛ с эмиттером большого сечения / В.Г. Залесский, О.Н. Петрович // Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики : тез. докл. X Всерос. семинара, Москва, 24–26 мая 2011 г. / Гос. науч. центр РФ ФГУП НПО «ОРИОН». – Москва, 2011. – С. 68–69.

70. Залесский, В.Г. Электронно-лучевые энергокомплексы сварочного типа на основе пушек с плазменным эмиттером / В.Г. Залесский, В.А. Лактионов, Ю.В. Мазаник // Сварка и родственные технологии : тез. докл. Междунар. симп., Минск, 15–17 мая 2012 г. / Ин-т сварки и защитных покрытий. – Минск, 2012. – С. 112–116.

71. Залесский, В.Г. Электронно-лучевые энергокомплексы на основе пушек с плазменным эмиттером / В.Г. Залесский, В.А. Лактионов, Ю.В. Мазаник // Новые материалы и технологии : порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : тез. докл. X междунар. конф., Минск., 12-14 сент. 2012 г. / Ин-т порошковой металлургии. – Минск, 2012. – С. 90–92.

72. Zalesski, V.G. Features of systems of automated management by electron energy-complexes on the basis of e-beam guns with the plasma emitter // V.G. Zalesski, P.N. Soldatenko // European and National Dimension in Research : Junior Researchers Conf., Novopolotsk, 15-16 Apr. 2012 / Polotsk State University. – Novopolotsk, 2012. – P. 21–25.

73. Zalesski, V.G. / Plasma devices for combined electron-ion beam influence on small details // V.G. Zalesski, P.N. Soldatenko // European and National Dimension in Research : Junior Researchers Conf., Novopolotsk, 24-25 Apr. 2013 / Polotsk State University. – Novopolotsk, 2013. – P. 89–92.

## **Патенты**

74. Плазменный источник электронов с пучком большого сечения : пат. 469 Респ. Беларусь, Н 01 J 3/04/ В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Ю.П. Голубев; за-

явитель Полоц. гос. ун-т - № u20010194; заявл. 31.07.2001; Опубл. 08.11.2001// Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства РБ. – 2002. – № 1. С. 221–222.

75. Плазменный источник электронов : пат. 7573 Респ. Беларусь, Н 01 J 3/02/ В.А. Груздев, В.Г Залесский; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u 20000085; заявл. 01.06.00 ; опубл. 30.12.2005 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 4 (47), ч. 1. – С. 240.

76. Блок питания разряда : пат. 2539 Респ. Беларусь, Н 01 J 37/077/ Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г Залесский; И.С. Русецкий; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u 20050410; заявл. 05.07.05; опубл. 28.02.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 1 (48). – С. 217.

77. Источник электронов с плазменным эмиттером для получения радиального пучка : пат. 4995 Респ. Беларусь, Н 01 J 3/00/ Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г Залесский; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u 20080551; заявл. 07.07.08; опубл. 15.10.2008// Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 1 (66). – С. 209.

78. Плазменный источник электронов : пат. 15662 Респ. Беларусь, Н 01 J 3/00/ В.А. Груздев, В.Г. Залесский, И.С. Русецкий; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а 20100180 от 08.02.2010; опубл. 26.12.2011// Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 5 (82), С 39.

## РЭЗІЮМЭ

Залескі Віталій Генадзьевіч

### ЭМІСІЙНЫЯ І ЭЛЕКТРОННА-АПТЫЧНЫЯ СІСТЭМЫ ПЛАЗМАВЫХ КРЫНІЦ ЭЛЕКТРОНАЎ

**Ключавыя словы:** плазма, плазмавыя эмітары, узбурэнне плазмы, газавыя разрады, электронныя і іонныя пучкі, электронна-прамянёвыя тэхналогіі.

**Мэта даследавання:** распрацоўка тэарэтычных асноў фарміравання электронных пучкоў у сістэмах з плазмавым эмітарам і стварэнне на іх аснове новых тыпаў плазмавых крыніц электронаў.

**Метады даследавання.** У працы выкарыстоўваліся метады колькаснага мадэлявання фізічных працэсаў, розныя мадыфікацыі метаду зондавых вымярэнняў, стандартныя метады вымярэння электрафізічных велічынь, метады дыферэнцыяльнага і інтэгральнага вылічэння.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Распрацавана канцэпцыя плазмавага эмітара, што ўключае ў сябе мадэлі працэсаў у паскараючым прамежку, генератары плазмы і эмісійным канале плазмавай крыніцы электронаў, якія ўлічваюць уплыў патэнцыялу эмітарнага электрода, перапамеркаванне токаў у разрадзе і ўзбурэнне плазмы адборам электронаў. Прапанаваны алгарытмы колькаснага мадэлявання працэсаў у паскараючым прамежку электронна-аптычных сістэм з плазмавым эмітарам, якія ўлічваюць сукупны ўплыў рухомасці плазмавай мяжы і іонізацыйных эфектаў. Уведзены ў разгляд параметры пераключэння і энергетычны параметр, якія дазваляюць абгрунтаваць і ўлічыць розныя механізмы фарміравання току эмісіі. Створаны шэраг канструкцый плазмавых крыніц электронаў, у якіх рэалізуецца дрэйфавы механізм фарміравання току эмісіі. Крыніцы дазваляюць фарміраваць электронныя пучкі высокай яркасці і пучкі вялікага сячэння, а таксама забяспечваюць камбінаванае электронна-іоннае ўздзеянне. Распрацаваны шэраг новых канструкцый крыніц электронаў на аснове разрадаў з полым катодам, якія забяспечваюць фарміраванне электронных пучкоў як для рэалізацыі традыцыйных электронна-прамянёвых тэхналогій, так і для вырашэння нетрадыцыйных задач, у тым ліку атрымання радыяльных электронных пучкоў для апрацоўкі ўнутраных цыліндрычных паверхняў. Прапанавана метадыка і распрацавана апаратура для экспрэс-дыягностыкі эмісійных і электронна-аптычных уласцівасцей крыніц з плазмавым эмітарам.

**Галіна ўжывання:** развіццё тэорыі плазмавых эмітараў, пашырэнне галіны прымянення электронна- і іонна-прамянёвых тэхналогій, распрацоўка сучасных тэхналагічных крыніц электронаў з плазмавым эмітарам.

## РЕЗЮМЕ

Залесский Виталий Геннадьевич

### ЭМИССИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

**Ключевые слова:** плазма, плазменные эмиттеры, возмущение плазмы, газовые разряды, электронные и ионные пучки, электронно-лучевые технологии.

**Цель работы:** разработка теоретических основ формирования электронных пучков в системах с плазменным эмиттером и создание на их основе новых типов плазменных источников электронов.

**Методы исследования.** В работе использовались методы численного моделирования физических процессов, различные модификации метода зондовых измерений, стандартные методы измерения электрофизических величин, методы дифференциального и интегрального исчисления.

**Полученные результаты и их новизна.** Разработана концепция плазменного эмиттера, включающая в себя модели процессов в ускоряющем промежутке, генераторе плазмы и эмиссионном канале плазменного источника электронов, учитывающие влияние потенциала эмиттерного электрода, перераспределение токов в разряде и возмущение плазмы отбором электронов. Предложены алгоритмы численного моделирования процессов в ускоряющем промежутке электронно-оптических систем с плазменным эмиттером, учитывающие совокупное влияние подвижности плазменной границы и ионизационных эффектов. Введены в рассмотрение параметры переключения и энергетический параметр, позволяющие обосновать и учесть различные механизмы формирования тока эмиссии. Создан ряд конструкций плазменных источников электронов, в которых реализуется дрейфовый механизм формирования тока эмиссии. Источники позволяют формировать электронные пучки высокой яркости и пучки большого сечения, а также обеспечивать комбинированное электронно-ионное воздействие. Разработан ряд новых конструкций источников электронов на основе разрядов с полым катодом, обеспечивающих формирование электронных пучков как для реализации традиционных электронно-лучевых технологий, так и решения нетрадиционных задач, в том числе получения радиальных электронных пучков для обработки внутренних цилиндрических поверхностей. Предложена методика и разработана аппаратура для экспресс-диагностики эмиссионных и электронно-оптических свойств источников с плазменным эмиттером.

**Область применения:** развитие теории плазменных эмиттеров, расширение области применения электронно- и ионно-лучевых технологий, разработка современных технологических источников электронов с плазменным эмиттером.

## SUMMARY

**Zaleski Vitali**

### EMISSION AND ELECTRON-OPTICAL SYSTEMS OF ELECTRON PLASMA SOURCES

**Key words:** plasma, plasma emitter, plasma disturbance, gas discharge, electron and ion beams, electron-beam technologies.

**Objective of research:** the development of the theoretical framework of electron beams formation in systems with plasma emitter and the creation of new types of plasma electron sources.

**Research methods:** methods of the numerical simulation of physical processes, various modifications of the probe measurements, standard methods for measuring electro-physical values, methods of differential and integral calculus were used in the present research.

**The results obtained and their novelty.** The concept of the plasma emitter, which includes models of processes in the accelerating gap, in the plasma generator and in the emission channel of plasma electron source, and takes into account the effect of the emitter electrode potential, the redistribution of the currents in the plasma discharge and plasma disturbance by electrons selection was developed. The algorithms for the numerical simulation of the processes in the accelerating gap of the electron-optical systems with plasma emitter were proposed. They take into consideration the cumulative effect of the plasma boundary mobility and ionization effects. Switching parameters and the energy parameter, that allow justifying and accounting for different mechanisms of emission current formation were introduced. The number of structures of plasma electron sources was created. They implement the drift mechanism of the emission current formation. The sources enable to create high-brightness electron beams and beams of large cross-section, as well as to provide a combined electron-ion impact. The number of new electron sources, based on hollow cathode discharge, was developed. They ensure electron beams formation both for the implementation of traditional electron-beam technologies and non-traditional tasks solution, including the obtainment of the radial electron beams for treatment of internal cylindrical surfaces. The technique and equipment were designed for rapid diagnosis of emission and electron-optical properties of sources with plasma emitter.

**Application field:** the development of the plasma emitter theory, the extension of the application scope of electron- and ion-beam technologies, the development of modern technological electron sources with plasma emitter.

