

УДК 537.533

На правах рукописи



Климов Александр Сергеевич

**ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В ФОРВАКУУМНОЙ
ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПЛАЗМЕННО-ЭМИССИОННЫХ
РАЗРЯДНЫХ СИСТЕМ С ПОЛЫМ КАТОДОМ**

01.04.04 – Физическая электроника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Научный консультант:

Окс Ефим Михайлович

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Бурдаков Александр Владимирович

доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск

Косогоров Сергей Леонидович

доктор технических наук, начальник лаборатории КЛ-8 отдела ЛК-3 научно-технического центра ЛКиТ, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова» (АО «НИИЭФА»), г. Санкт-Петербург

Ремнёв Геннадий Ефимович

доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией №1 ИФВТ, Институт физики высоких технологий НИ ТПУ, г. Томск

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

Защита состоится 23 декабря 2016 г. В 15 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.268.04 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», 634050, г. Томск, пр. Ленина 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146, а также на официальном сайте ТУСУР <https://tusur.ru/ru/nauka-i-innovatsii/podgotovka-kadrov-vysshey-nauchnoy-kvalifikatsii/ob-yavleniya-o-zaschitah-dissertatsiy>

Автореферат разослан « ___ » октября 2016 г.

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



Ю.П. Акулиничев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В настоящее время одним из наиболее перспективных и интенсивно развивающихся направлений применения электронных пучков является электронно-лучевая обработка в вакууме материалов, различных по своему химическому составу и физическим свойствам, с целью повышения их эксплуатационных характеристик, а также придания им новых свойств, расширяющих сферу их применения. Развитие данного направления требует как непрерывного совершенствования существующих источников электронных пучков, так и создания принципиально новых – способных производить обработку различных материалов в одном технологическом цикле. Наиболее востребованными технологическими применениями электронных пучков являются электронно-лучевая сварка, плавка, размерная обработка, упрочнение тонкого поверхностного слоя, а также быстро развивающиеся в последнее время технологии электронно-лучевой наплавки и послойного синтеза изделий сложных объемных форм из порошковых материалов (3D-прототипирование или 3D-печать). Проведение таких технологических операций, как правило, сопровождается большим газовыделением, в связи с чем возникает потребность создания и совершенствования электронных источников, не критичных к тяжелым вакуумным условиям.

Плазменные источники электронов – устройства, основанные на формировании пучков электронов при их отборе с эмиссионной границы плазмы. В таких устройствах эмиссионная плазма, как правило, генерируется в разрядных системах тлеющего или дугового разряда с «холодным» (не накаливаемым до термоэмиссионных температур) катодом. Именно поэтому для решения задачи генерации электронных пучков при повышенных давлениях плазменные источники электронов являются реальной альтернативой термокатодным пушкам.

Источники электронов с плазменным катодом интенсивно создаются и совершенствуются на протяжении последних 50 лет. Одно из сравнительно новых направлений развития источников такого типа связано с так называемыми форвакуумными плазменными источниками электронов – устройствами, обеспечивающими возможность непосредственной генерации непрерывных и импульсных электронных пучков в ранее недоступной области повышенных давлений форвакуумного диапазона. Здесь и далее под форвакуумным диапазоном давлений подразумевается область пониженных давлений, которая достигается при использовании только одной механической ступени вакуумной откачки. В количественном выражении этот диапазон давлений находится в пределах от единиц до сотен паскаль. Использование лишь одной ступени откачных средств в электронно-лучевых установках, несомненно, упрощает и удешевляет технологическое оборудование. Но более привлекательным достоинством форвакуумных плазменных источников электронов является возможность осуществления с их использованием электронно-лучевой обработки диэлектрических материалов. Такая возможность обусловлена синтезом в области транспортировки электронного пучка плотной пучковой плазмы, нейтрализующей зарядку электронным пучком электрически непроводящей поверхности диэлектрика.

Перспективы развития электронно-лучевых методов обработки электрически непроводящих материалов стимулировали постановку комплексной научной проблемы генерации в форвакуумной области давлений электронных пучков в источниках с плазменным катодом применительно к созданию с использованием этих устройств научно-технических основ электронно-лучевых технологий обработки диэлектриков. Многогранность и широта сформулированной научной проблемы обусловили необходимость выделения внутри нее в качестве первоочередной отдельную крупную научно-техническую задачу, состоящую в исследовании процессов генерации непрерывных электронных пучков форвакуумными плазменными источниками для электронно-лучевой обработки высокотемпературных керамик. При этом в форвакуумных плазменных источниках непрерывных электронных пучков наиболее целесообразно использовать тлеющий разряд с полым катодом.

Цели и задачи работы заключались в следующем:

- в комплексном изучении процессов эмиссии электронов, формирования и транспортировки непрерывных электронных пучков, генерируемых плазменно-эмиссионными разрядными системами тлеющего разряда с полым катодом в форвакуумной области давлений;
- в создании на основе этих исследований нового поколения форвакуумных плазменных источников электронов, способных формировать электронные пучки различной конфигурации с широким диапазоном интегральных и удельных параметров электронного пучка;
- в демонстрации возможности эффективной электронно-лучевой обработки электрически непроводящих высокотемпературных керамик и других диэлектрических материалов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что:

1. Для источников электронов с плазменным катодом, функционирующих в форвакуумной области давлений, выявлены особенности процессов эмиссии электронов из плазмы, формирования и транспортировки непрерывных электронных пучков различных конфигураций.
2. Определены и реализованы условия, обеспечивающие расширение рабочего диапазона давлений форвакуумных плазменных источников электронов в область более высоких значений, а также достижение максимальных удельных и интегральных параметров электронных пучков.
3. Установлены основные физические механизмы, обуславливающие процессы генерации пучковой плазмы и нейтрализации отрицательного заряда, приносимого ускоренными электронами на облучаемую диэлектрическую мишень, и обеспечивающие, таким образом, возможность эффективной электронно-лучевой обработки электрически непроводящих материалов, в том числе высокотемпературных керамик.

Методология и методы исследования

В диссертационной работе использованы широко известные и многократно апробированные экспериментальные методики и оборудование для исследования газового разряда, плазмы и пучков заряженных частиц, а также численные

методы моделирования основных физических процессов генерации плазмы и формирования электронных пучков.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Результаты проведенных комплексных исследований вносят существенный вклад в понимание физических процессов генерации плазмы в разрядных системах с полым катодом, эмиссии электронов, формирования, ускорения и транспортировки электронных пучков в области повышенных давлений газа форвакуумного диапазона.

2. Решена крупная научно-техническая задача, заключающаяся в создании форвакуумных плазменных источников электронов, обеспечивающих генерацию электронных пучков различных конфигураций с рекордными параметрами, более высокими эксплуатационными характеристиками и новыми функциональными возможностями.

3. Возможности электронно-лучевых технологий существенно расширены за счет вовлечения в номенклатуру обрабатываемых изделий диэлектрических материалов, в том числе и высокотемпературных керамик.

4. Полученные результаты могут быть использованы при разработке широкого класса ионно-плазменных технологических установок, имеющих аналогичные разрядные структуры и функционирующих в области повышенных давлений.

Практическое использование результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждается использованием созданных на основе проведенных исследований плазменных электронных источников при проведении исследований в лаборатории плазменной электроники кафедры физики ТУСУР, в зарубежной корпорации Powertech Technology (Китай) для отработки процессов электронно-лучевого распыления непроводящих тугоплавких материалов, а также в научно-производственной компании ТЭТА при выполнении комплексного проекта «Создание производства нового поколения электронно-лучевого оборудования на основе различных эмиссионных систем для сварки, пайки, обработки поверхностей и аддитивных технологий, реализуемого в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации № 218 от 9 апреля 2010 года.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных методик, удовлетворительным совпадением расчетных зависимостей и моделей с полученными экспериментальными данными и величинами, а также практической реализацией научных положений и выводов при создании и применении форвакуумных плазменных электронных источников как в нашей стране, так и за рубежом.

Личный вклад автора настоящей работы состоит в определении направлений исследований, в подготовке и проведении большей части экспериментов, в личном формулировании выводов и научных положений. В постановке отдельных задач исследований и обсуждении результатов активное участие при-

нимали Е.М. Окс и В.А. Бурдовицин. Эксперименты по исследованию генерации узкофокусированных электронных пучков в форвакуумном диапазоне давлений, а также применению разработанных источников для обработки диэлектриков проводились совместно с А.А. Зениным. В разработке расчетных методик температурного поля в керамическом материале при облучении цилиндрическим электронным пучком участвовали Е.В. Скробов и В.А. Бурдовицин. Моделирование процессов образования пористого слоя на поверхности керамики при ее спекании проведено Э.С. Двилисом при совместном анализе и обсуждении результатов с автором настоящей работы. В конструировании экспериментальных установок активное участие принимал Ю.А. Бурачевский. Соавторы, принимавшие участие в отдельных направлениях исследований, указаны в списке основных публикаций по теме диссертации. Все результаты, составляющие научную основу диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Предельное рабочее давление форвакуумных плазменных источников электронов определяется достижением одного из ограничительных условий: превышение током высоковольтного тлеющего разряда в ускоряющем промежутке тока эмиссии электронов из плазмы, рассеянием большей доли электронного пучка на остаточном газе или нарушением электрической прочности ускоряющего промежутка. Очередность достижения того или иного условия определяется конфигурацией электродной системы электронного источника, параметрами электронного пучка, наличием магнитного поля в области транспортировки электронного пучка, а также давлением и родом рабочего газа. Оптимизация геометрии ускоряющего промежутка и выбор гелия в качестве плазмообразующего газа обеспечивает повышение предельного рабочего давления до 160 Па для сфокусированных электронных пучков и до 50 Па для широкоапертурных и ленточных пучков.

2. В форвакуумной области давлений на фокусировку электронного пучка оказывают негативное влияние процессы рассеяния ускоренных электронов в газе. Именно поэтому для форвакуумного плазменного источника электронов плотность мощности электронного пучка в кроссовере, а следовательно, и его яркость, не достигают соответствующих параметров электронного пучка, генерируемого плазменными источниками в традиционной области давлений 10^{-2} – 10^{-1} Па. Несмотря на это, повышение удельных эмиссионных параметров и оптимизация геометрии системы формирования и фокусировки электронного пучка обеспечивает для форвакуумных плазменных источников на основе разряда с полым катодом при энергии электронов 20 кэВ плотность мощности электронного пучка уровня 10^5 Вт/см², которой оказывается достаточно для прецизионной размерной обработки различных диэлектрических материалов, включая высокотемпературную керамику.

3. В форвакуумной области давлений создание однородной эмиссионной поверхности плазмы является необходимым, но недостаточным условием для генерации плазменным источником на основе разряда с протяженным полым

катодом ленточного электронного пучка с равномерным распределением плотности тока. Решение проблемы должно быть основано на сочетании условий генерации однородной эмиссионной плазмы и методов, ослабляющих влияние на параметры плазмы и устойчивость разряда обратного ионного потока из области ускорения и транспортировки электронного пучка. Одним из наиболее эффективных методов достижения необходимой равномерности плотности тока является использование неоднородной по поперечному сечению катодной полости в сочетании со специальной конфигурацией и параметрами системы формирования и ускорения ленточного электронного пучка. При этом достигнутая неоднородность плотности тока электронного пучка ленточной конфигурации по его протяженному размеру не превышает $\pm 10\%$.

4. При транспортировке электронного пучка ленточной конфигурации в остаточной газовой среде форвакуумного диапазона давлений даже в отсутствие сопровождающего магнитного поля возможна реализация условий для зажигания пучково-плазменного разряда, позволяющего формировать протяженное плазменное образование типа «плазменного листа» с концентрацией до 10^{16} м^{-3} и температурой электронов 1–2.5 эВ. При постоянной энергии электронов увеличение тока пучка приводит к росту концентрации и температуры плазменных электронов, при повышении давления газа также происходит рост концентрации плазмы, но температура электронов снижается. Достигнутые значения параметров плазмы и ее размеры позволяют использовать эту плазму для поверхностной модификации плоских протяженных изделий.

5. В форвакуумной области давлений при воздействии электронного пучка на диэлектрическую мишень процессы зарядки ускоренными электронами поверхности мишени практически полностью нейтрализуются ионами пучковой плазмы, образованной в области транспортировки пучка. Дополнительным фактором зарядовой нейтрализации являются ионы несамостоятельного разряда, возникающего между мишенью и заземленными стенками вакуумной камеры и поддерживаемого током электронного пучка. По мере нагрева электронным пучком диэлектрической мишени заметное влияние на нейтрализацию отрицательного заряда на поверхности диэлектрика оказывают повышение электропроводности материала мишени и термоэлектронная эмиссия с его поверхности. Нейтрализация поверхностного заряда обуславливает принципиальную возможность непосредственной электронно-лучевой обработки диэлектрических материалов.

6. Разработанные форвакуумные плазменные источники электронов обеспечивают возможность эффективного электронно-лучевого нагрева, плавки, сварки, спекания, а также размерной обработки высокотемпературных керамик. Применение электронного пучка для электронно-лучевой сварки керамики, а также керамики с металлом позволяет создавать качественные сварные соединения без использования дополнительных операций металлизации и полировки свариваемых поверхностей. Электронно-лучевое спекание керамических компактов из нанопорошков в форвакуумной области давлений позволяет существенно снизить средний размер зерна керамики, что обеспечивает повышение её прочностных характеристик.

Апробация. Результаты работ докладывались и обсуждались на 40-ой и 42-ой Международных IEEE конференциях по исследованию и применению плазмы (PPS&ICOPS 2013, Сан-Франциско, США, ICOPS 2015, Анталия, Турция), 9-ой и 11-ой международных конференциях по электронно-лучевым технологиям (Варна, Болгария, 2009, 2014 гг.), VI и VII международных конференциях «Лучевые технологии и применение лазеров» (Россия, Санкт-Петербург, 2009 и 2012 гг.), на 15-ом Международном симпозиуме по сильноточной электронике (Россия, Томск, 2008, г.), на 10-ой, 11-ой и 12-ой Международных конференциях по модификации материалов пучками частиц и потоками плазмы (Россия, Томск, 2010, 2012, 2014 гг.), 11-ой и 12-ой Международных конференциях «Газоразрядная плазма и ее применение» (Россия, Томск, 2013, 2015 гг.), на III и V Международном Крейнделевском семинаре «Плазменная эмиссионная электроника» (Россия, Улан-Удэ, 2009, 2015 гг.).

Публикации. Материалы диссертационной работы опубликованы в 23 статьях, входящих в перечень ВАК РФ, а также в 40 докладах в трудах международных и всероссийских конференций и симпозиумов. Результаты работы легли в основу монографии «Форвакуумные плазменные источники электронов» написанную в соавторстве с В.А. Бурдовициным, А.В. Медовником, Е.М. Оксом, Ю.Г. Юшковым, издание которой поддержано грантом РФФИ. Разработанные в результате выполнения работы технические решения защищены 8 патентами РФ.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 302 страницах, содержит 193 рисунка и 12 таблиц. Список цитируемой литературы включает 302 источника.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проанализированы основные условия, определяющие возможность повышения предельного рабочего давления плазменных электронных источников, основанных на разряде с полым катодом, рис. 1. Показано, что повышение давления приводит к значительному росту тока высоковольтного тлеющего разряда (ВТР), возникающего в ускоряющем промежутке при приложении высокого напряжения между анодом и экстрактором электронного источника. Величина тока ВТР может достигать нескольких десятков и даже сотен мА, что сравнимо с величиной тока эмиссии из плазмы тлеющего разряда источника. Ускоренные практически одной и той же разностью потенциалов электроны основного разряда и электроны из плазмы ВТР неразличимы между собой.

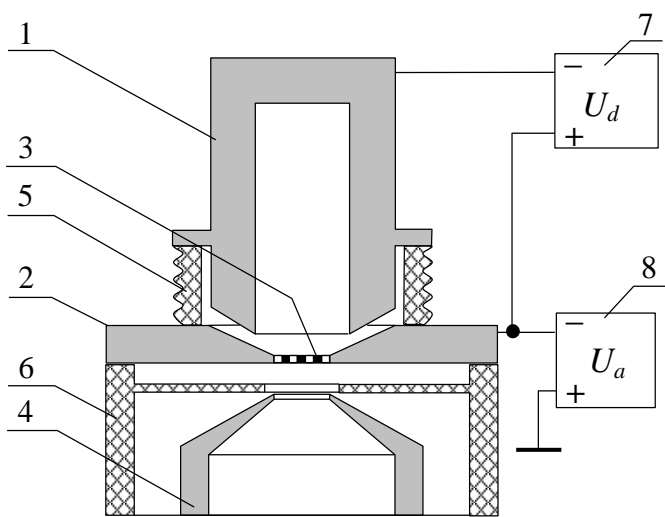


Рисунок 1 – Схема электронного источника: 1 – цилиндрический полый катод; 2 – анод; 3 – перфорированная пластина (эмитсионный электрод); 4 – экстрактор; 5, 6 – керамические высоковольтные изоляторы; 7 – источник питания разряда; 8 – источник ускоряющего напряжения.

Изменение геометрии ускоряющего промежутка, формы экстрактора и рода рабочего газа. Основное изменение геометрии связано с уменьшением открытой площади электродов ускоряющего промежутка, а также с подбором оптимального расстояния анод-экстрактор d (рис. 2).

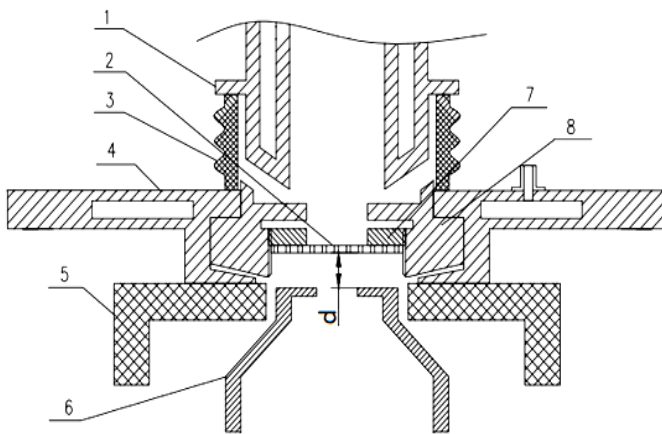


Рисунок 2 – Электродная схема ускоряющей системы форвакуумного плазменного источника электронов: 1 – полый катод; 2 – перфорированный электрод; 3, 5 – керамические изоляторы; 4 – анод; 6 – ускоряющий электрод (экстрактор); 7 – шайба; 8 – анодная вставка.

в основном за счет разогрева анода, подвергающегося интенсивной бомбардировке потоком ионов из плазмы ВТР).

Даже в отсутствие пробоя ускоряющего промежутка превышение электронным компонентом тока ВТР тока эмиссии электронов из плазмы делает режим функционирования форвакуумного плазменного источника электронов нерабочим, поскольку в этом случае затрудняется возможность независимого регулирования энергии и тока электронного пучка. ВТР с током, сравнимым с током эмитированных из плазмы электронов, следует отнести к основному фактору, определяющему предельное рабочее давление форвакуумных плазменных источников электронов. Наиболее эффективными способами снижения величины тока ВТР является изменение

В результате проведенной модернизации ускоряющего промежутка удалось снизить более чем в три раза величину тока ВТР, рис. 3. В качестве тока ВТР принимался ток нагрузки высоковольтного источника I_e ускоряющего напряжения при отключенном источнике питания плазмообразующего разряда с полым катодом ($I_d = 0$).

Еще одним положительным эффектом, связанным с меньшей величиной тока ВТР, стало повышение ресурса работы высоковольтного керамического изолятора между анодом и экстрактором, разогрев которого происходил в месте контакта с металлическими электродами

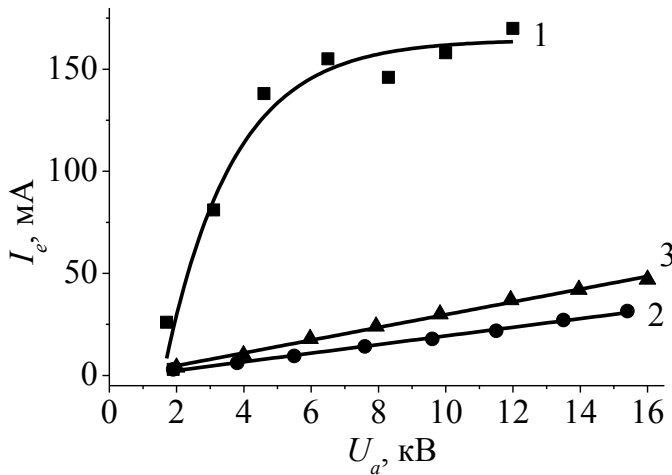


Рисунок 3 – Зависимость тока ВТР от ускоряющего напряжения: 1 – исходная геометрия, воздух; 2 – исходная геометрия, гелий; 3 – модернизированная геометрия, воздух. Давление 20 Па.

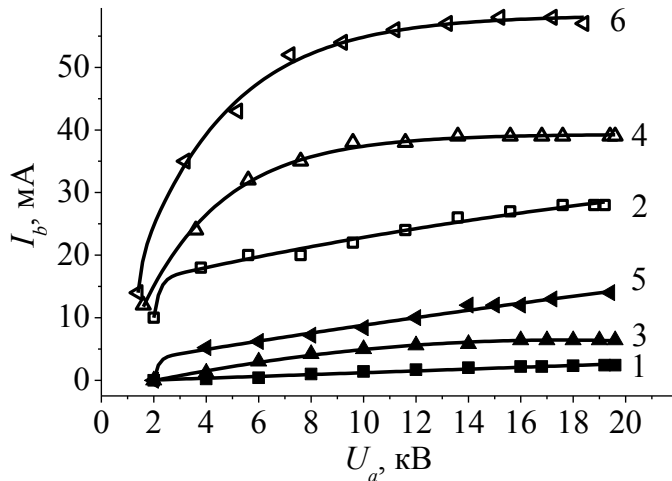


Рисунок 4 – Зависимость тока пучка от ускоряющего напряжения, рабочий газ – гелий: 1,2 – 60 Па; 3,4 – 100 Па; 5,6 – 160 Па; 1,3,5 – $I_d = 0$ мА; 2,4,6 – $I_d = 600$ мА.

приближение ее к аноду электронного источника, что, в свою очередь, приводит к возрастанию напряженности электрического поля вблизи эмиссионного электрода, появлению эмиссионных центров с последующим развитием катодных пятен и зажиганию дугового разряда, что в данном случае означает пробой ускоряющего промежутка.

Количественные оценки могут быть проведены с использованием следующих допущений. Для определения концентрации создаваемой электронным пучком плазмы воспользуемся уравнением баланса ионов

$$\sqrt{\frac{2kT_e}{M_i}} \cdot n = \sigma \cdot n_0 \cdot \frac{j_b \cdot D}{q}, \quad (1)$$

где T_e – электронная температура плазмы, К;

Существенное снижение тока ВТР позволило уменьшить величину неуправляемого тока в ускоренном пучке электронов. Вольт-амперные характеристики источника при его работе на гелии и остаточной атмосфере вакуумной камеры представлены на рис. 4 и 5.

Анализ факторов, способствующих наступлению пробоя ускоряющего промежутка электронного источника при повышении давления, не показал какой-либо существенной зависимости в характере пробоя в отсутствие и при наличии эмиссионного тока из плазмы основного разряда. В обоих случаях в момент пробоя происходило резкое повышение тока в цепи источника питания ускоряющего промежутка без повышения тока в цепи питания разряда.

Это дает основание предполагать, что основную роль в иницировании пробоя играет состояние поверхности эмиссионного электрода, обращенной к ускоряющему промежутку. Действительно, при повышении давления возрастает концентрация пучковой плазмы, и, как следствие, происходит

M_i – масса иона, кг;

σ – сечение ионизации газа электронами пучка, м²;

j_b – плотность тока пучка, А/м²;

n_0 – концентрация нейтральных молекул газа, м⁻³;

D – характерный продольный размер плазмы, равный ее диаметру, при котором еще возможно одномерное приближение, м.

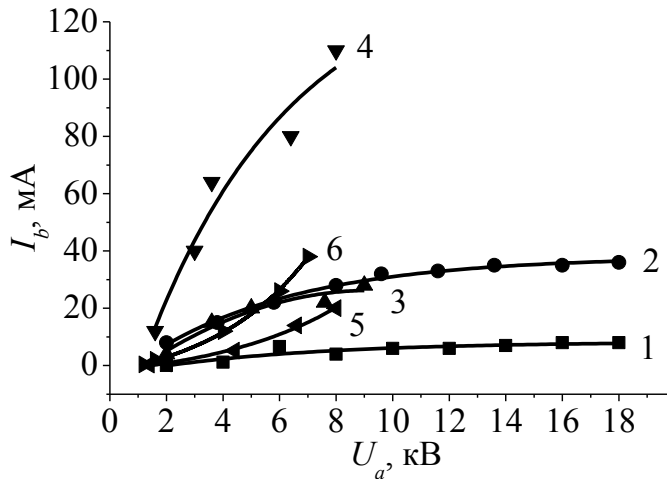


Рисунок 5 – Зависимость тока пучка от ускоряющего напряжения, воздух: 1, 2 – 20 Па; 3, 4 – 60 Па; 5, 6 – 100 Па; 1, 3, 5 – $I_d = 0$ мА; 2, 4 – $I_d = 200$ мА; 6 – при максимально допустимом I_d при данном U_a .

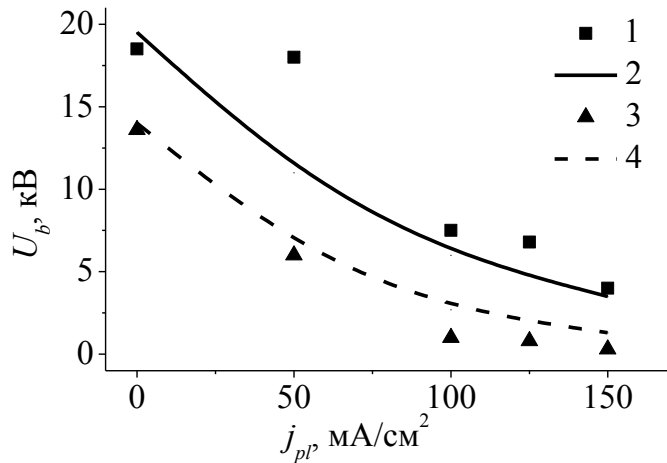


Рисунок 6 – Напряжение U_b пробоя как функция тока I_e эмиссии из плазмы для разных давлений воздуха: 1, 2 – 10 Па; 3, 4 – 20 Па. 1, 3 – эксперимент; 2, 4 – расчет.

В форвакуумном диапазоне давлений в токе пучка j_b присутствуют две компоненты:

$$j_b = \alpha U_a + j_{pl}, \quad (2)$$

где первое слагаемое соответствует току ВТР, а второе обусловлено эмиссией электронов из плазмы разряда. Коэффициент α , учитывающий зависимость тока пучка j_b от ускоряющего напряжения U_a , был определен экспериментально в отсутствие тока основного разряда. В предположении одного знака зарядов в слое между пучковой плазмой и эмиссионным электродом его толщина d может быть оценена по известному соотношению

$$d = \left(\frac{\varepsilon_0^2 U_a^3}{n^2 (qkT_e)} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (3)$$

где U_a – падение потенциала на слое, равное в данном случае ускоряющему напряжению.

Заменяв $d = \frac{U_a}{E}$ (где E – напряженность электрического поля в слое), выразив концентрацию плазмы n из (1) и подставив его в (3), после несложных преобразований получаем выражение:

$$\alpha U_a + j_{pl} = \left(\frac{\varepsilon_0 q^2 E^2}{\sigma n_0 D M_i^{\frac{1}{2}}} \right) \frac{1}{U_a^{\frac{1}{2}}}. \quad (4)$$

Уравнение (4) было использовано для анализа зависимости напряжения U_b пробоя от давления и тока эмиссии из плазмы при условии задания значения

критической напряженности поля E_{cr} , соответствующего образованию центров эмиссии на эмиссионном электроде. Понятно, что величина E_{cr} может быть задана лишь ориентировочно, тем не менее при $E = E_{cr} = 2 \times 10^4$ В/см получается зависимость, неплохо согласующаяся с результатами эксперимента (рис. 6). Это дает дополнительные аргументы в пользу предлагаемого механизма пробоя.

Таким образом, для модернизированного электронного источника доля неуправляемого тока при работе на гелии не превышает 20% от общего тока пучка вплоть до давлений 160 Па и ускоряющих напряжений 20 кВ, в то же время смена гелия на воздух приводит к существенному снижению величины максимального рабочего давления и тока пучка – до 100 Па и 40 мА при ускоряющем напряжении 7 кВ. Тем не менее, указанные величины рабочего давления форвакуумных плазменных источников оказываются значительно выше достигнутых ранее.

Немаловажным фактором, влияющим на эффективность применения электронного пучка для технологических целей, является плотность мощности вблизи обрабатываемого изделия. До попадания на обрабатываемое изделие электронный пучок, как правило, проходит некоторый путь в вакуумной камере. В условиях форвакуума на данном пути неизбежно рассеяние, а также потеря энергии. Эффективность прохождения электронного пучка через атмосферу рабочего газа определялась путем измерения диаметра и энергетического спектра пучка как наиболее важных параметров для дальнейшего технологического применения. Для оценки изменения диаметра электронного пучка при его прохождении

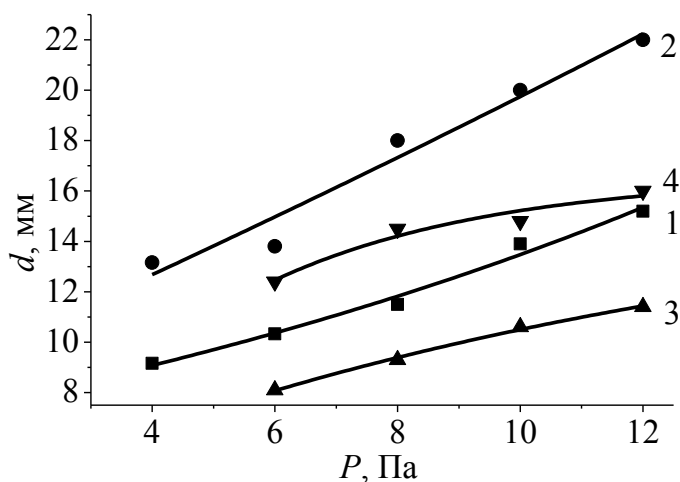


Рисунок 7 – Зависимость диаметра пучка от давления, ускоряющее напряжение 10 кВ, ток пучка 50 мА. Расстояние от эмиссионного электрода источника, z: 1 – 145 мм; 2 – 190 мм. Рабочий газ: 1,2 – воздух, 3, 4 – гелий.

сквозь атмосферу вакуумной камеры использовался метод вращающегося зонда, модернизированный для эффективного измерения диаметра пучка в присутствии пучковой плазмы. Модернизация заключалась в замене пары проволочек вращающимся металлическим диском с двумя параллельными прорезями, токосъемный коллектор при этом располагался на оси пучка под вращающимся диском. Для измерения энергетического спектра электронов пучка использовался магнитный анализатор, поскольку использование электростатического анализатора в форвакуумной области давлений затруднено в связи с повышенной вероятностью зажигания разряда между его электродами.

Результаты измерения диаметра электронного пучка в зависимости от давления газа, рис. 7, свидетельствуют о значительном расширении пучка как с повышением давления, так и по мере его транспортировки в вакуумной камере.

Измерение функции распределения электронов пучка по энергии осуществлялось по методике, описанной выше. Измерения, проведенные для двух давлений газа – 16 и 10^{-3} Па и двух расстояний z – 9 см и 17 см от фокусирующей катушки электронного источника до входной апертуры энергоанализатора, свидетельствуют о значительном расширении энергетического спектра пучка при переходе из области низких (10^{-3} Па) в форвакуумную область давлений (16 Па). Этот сдвиг оказывается более заметным с увеличением давления газа. При этом максимум в распределении энергии смещается в область более низких значений как при увеличении расстояния, пройденного пучком, так и при увеличении давления газа (рис. 8–9), что связано с потерей энергии электронами в результате неупругих столкновений с атомами газа.

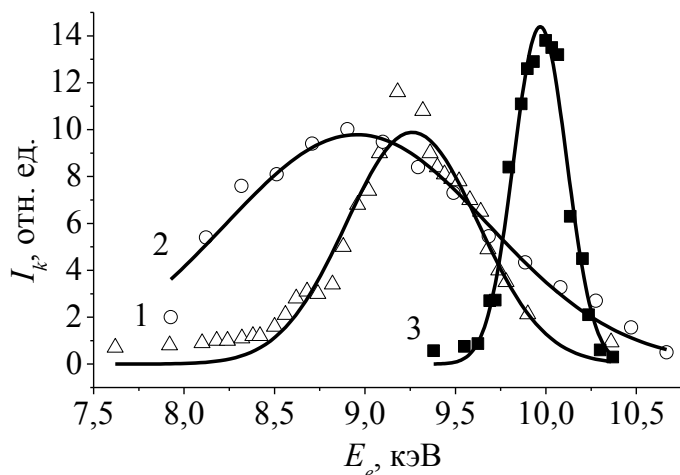


Рисунок 8 – Распределения электронов пучка по энергиям, ускоряющее напряжение 10 кВ, ток коллектора – 30 мА: 1 – 16 Па воздух, $z = 90$ мм; 2 – 16 Па воздух, $z = 170$ мм; 3 – 10^{-2} Па, $z = 170$ мм, калибровочный.

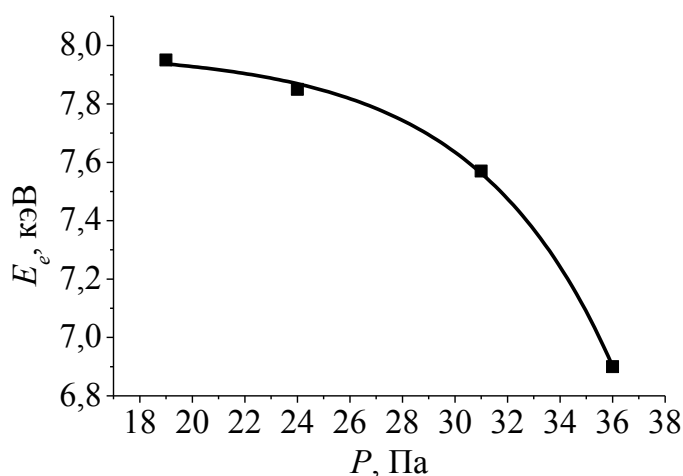


Рисунок 9 – Положение максимума энергетического спектра электронов пучка как функция давления, ускоряющее напряжение 9 кВ, $z = 170$ мм. Рабочий газ – гелий.

Значительное уширение электронного пучка при повышении давления обуславливает области применения электронного пучка. При давлениях рабочего газа, превышающих 30 - 50 Па, формируемый электронным источником пучок может быть эффективно использован для генерации объемной плазмы. Для прецизионной же обработки материалов требуются электронные пучки с диаметром менее 1 мм. Для получения таких пучков при использовании плазменного катода применяется эмиссия из одиночного отверстия. Однако в форвакуумной области давлений эмиссия из одиночного отверстия малого диаметра помимо достижения субмиллиметрового значения диаметра электронного пучка приводит к негативному эффекту, а именно к снижению стабильности горения разряда – частота погасания разряда значительно увеличивается по сравнению со случаем эмиссии из нескольких отверстий того же диаметра.

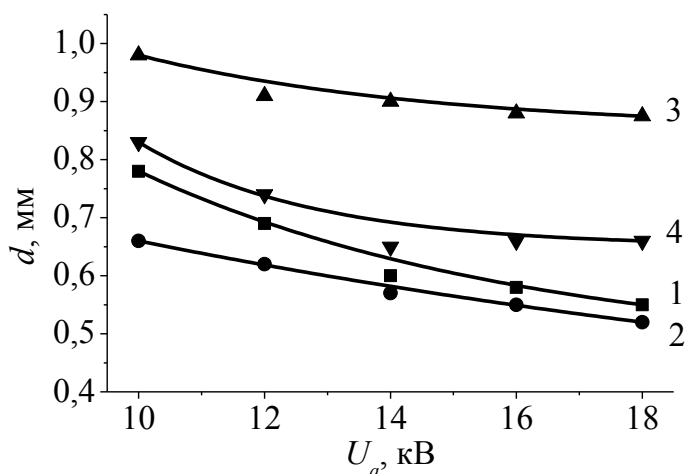


Рисунок 10 – Зависимость диаметра пучка от ускоряющего напряжения: 1 – 5 мА 10 Па, 2 – 15 мА 10 Па, 3 – 5 мА 30 Па, 4 – 15 мА 30 Па.

Решением является использование для выравнивания давления между вакуумной камерой и разрядным промежутком перфорированного электрода с одним эмиссионным отверстием в центре и дополнительными отверстиями меньшего диаметра на периферии. Через них осуществляется откачка разрядного промежутка. При этом, несмотря на более высокие давления, как видно из результатов экспериментов, представленных на рис. 10, даже в этих условиях форвакуумный плазменный источник электронов обеспечивает возможность фокусировки электронных пучков до субмиллиметровых размеров. При этом плотность мощности электронного пучка в кроссовере достигает 10^5 Вт/см².

Таким образом диапазон давлений 10-20 Па наиболее привлекателен для формирования форвакуумным плазменным источником сфокусированных пучков с субмиллиметровым диаметром и плотностью мощности до 10^5 Вт/см². Достигнутые для сфокусированного пучка параметры по его удельной мощности обеспечивают возможность прецизионной электронно-лучевой обработки непроводящих материалов, в том числе высокотемпературной оксидной керамики.

Вторая глава посвящена вопросам формирования ленточных электронных пучков с повышенной плотностью тока в форвакуумной области давлений. В главе описаны способы повышения плотности эмиссионной плазмы, а также неоднородности, возникающие в разряде с протяженным полым катодом. Показано, что в форвакуумной области давлений повышение плотности тока ленточного электронного пучка возможно за счет уменьшения ширины выходной апертуры катодной полости 1, рис. 11. Однако такое повышение ограничено возникновением неоднородности в распределении плотности эмиссионной плазмы, приводящей к локальному повышению концентрации плазмы вблизи апертуры катодной полости, рис. 12.

Основными параметрами, влияющими на существование неоднородности, оказались ширина выходной апертуры катодной полости, разрядный ток и давление газа. Причем размер апертуры, при достижении которого появляется неоднородность, определяется в первую очередь величиной разрядного тока.

Предполагаемой причиной такого поведения является самооткачка разрядного промежутка за счет распыления материала полого катода, приводящая к понижению давления. Исходно зафиксированного разрядного напряжения в этом случае уже становится недостаточно для стабильного горения разряда. Решением является использование для выравнивания давления между вакуумной камерой и разрядным промежутком перфорированного электрода с одним эмиссионным отверстием в центре и дополнительными отверстиями меньшего диаметра на периферии.

Указанная неоднородность возникает при превышении отношения площади стенок полости к площади выходной апертуры определенного значения, зависящего от давления и разрядного тока. Анализ экспериментов позволил предложить следующий механизм образования неоднородности: при малых разрядных токах и, следовательно, низких концентрациях плазмы протяженность катодного слоя, отделяющего плазму от стенок катода, становится сравнимой с шириной выходной апертуры катодной полости. Случайное изменение концентрации или потенциала плазмы приводит к уменьшению протяженности катодного слоя, локальному снижению потенциального барьера для электронов, что вызывает рост электронного тока в этой области и, как следствие, повышение интенсивности ионизационных процессов и концентрации плазмы. Дальнейший рост концентрации приводит к уменьшению протяженности катодного слоя. Процесс развивается лавинообразно и заканчивается формированием локальной области, обеспечивающей прохождение практически всего электронного тока. Повышение тока разряда приводит к возрастанию концентрации плазмы и за пределами неоднородности, что вызывает уменьшение протяженности катодного слоя вдоль всей апертуры полости и, следовательно, изменение характера распределения концентрации плазмы по длине полости.

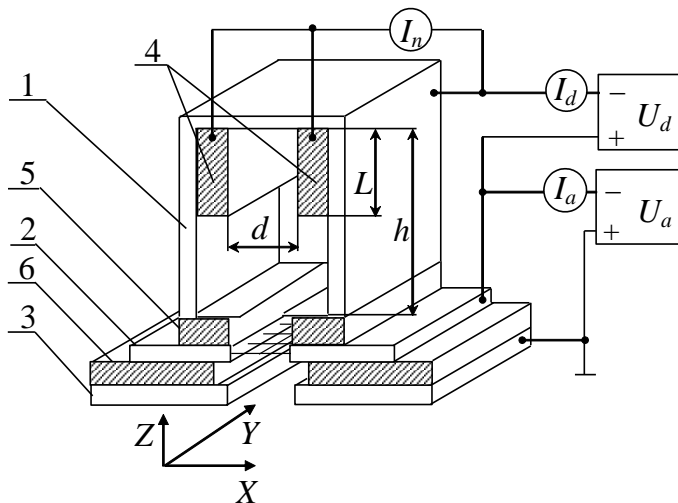


Рисунок 11 – Схема экспериментального макета источника ленточного электронного пучка: 1 – полный катод; 2 – анод; 3 – ускоряющий электрод; 4 – медные вкладыши; 5, 6 – изоляторы.

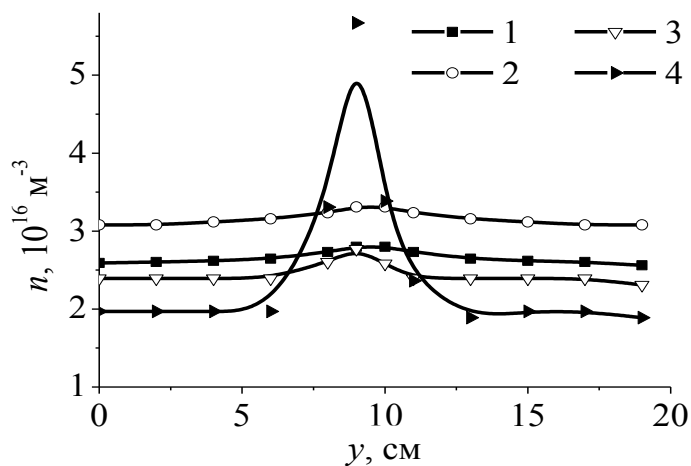


Рисунок 12 – Распределение концентрации плазмы в апертуре катодной полости для разных значений ее ширины: 1 – 13 мм; 2 – 11 мм; 3 – 9 мм; 4 – 8 мм. Ток разряда 800 мА, давление 6 Па.

за счет увеличения разрядного тока, уменьшение объема катодной полости, а также повышение концентрации плазмы в непосредственной близости к выходной апертуре за счет расположения протяженного дополнительного анода. В случае дополнительного анода повышение однородности возможно только при

Ослабление описанного типа неоднородности может быть осуществлено за счет формирования условий, когда ширина апертуры катодной полости будет превышать протяженность катодного слоя. К таким условиям относится повышение концентрации плазмы

условии, что весь разрядный ток замыкается на него. Эффективность извлечения и однородность при этом находятся в обратной зависимости. Пониженное значение неоднородности – порядка 10% – возможно только при эффективности извлечения в 10–20%, и наоборот – повышение эффективности за счет уменьшения тока, приходящегося на дополнительный анод, способствует возникновению неустойчивостей и неоднородностей.

Повышение концентрации эмиссионной плазмы при сохранении ее одно-

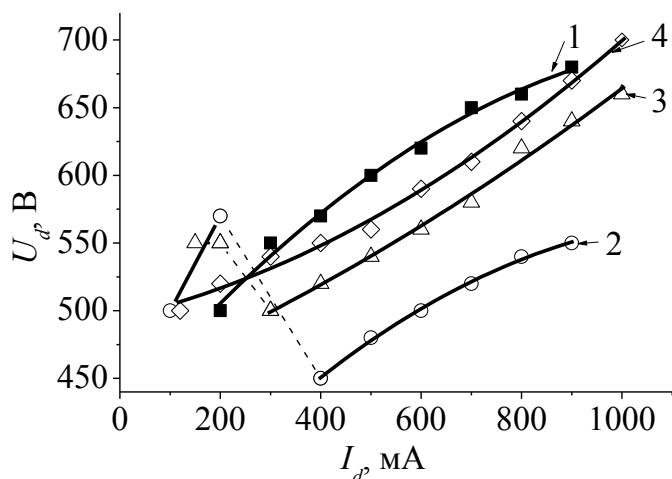


Рисунок 13 – ВАХ разряда для полостей с различной шириной d узкой части, мм: 1 – 40; 2 – 12; 3 – 14; 4 – 16. Давление рабочего газа (воздуха) 7 Па.

родного распределения вдоль протяженного размера катодной полости рассмотрено в разделе 2.2. Показано, что использование неоднородной по сечению катодной полости (рис. 11) приводит к значительным изменениям в характеристиках разряда, а также в величине плотности эмиссионного тока. Для составной полости на вольт-амперной характеристике наблюдается участок скачкообразного уменьшения напряжения горения с одновременным ростом тока разряда (рис. 13, кривые 2-3).

Значение порогового тока, при котором наблюдается скачкообразный переход к пониженному напряжению горения, определяется размером d узкой части полости и давлением газа. При определенных значениях d этот переход может быть слабо выраженным либо отсутствовать (рис. 13, кривая 4). Повышение давления, равно как и увеличение размера узкой части, приводило к снижению порогового тока.

Измерение соотношения между токами, приходящимися на разные части катодной полости, показало, что до переключения разряд горит в основной в широкой части полости, в момент переключения происходит трансформация разряда, и большая доля тока приходится уже на узкую часть.

Измерение распределения концентрации плазмы в поперечном сечении полости на различных расстояниях от выходной апертуры катодной полости показало, что в однородной полости вид распределения представляет собой плато вне зависимости от расстояния z (рис. 14, кривая 3). Для составной же полости вид пространственных распределений концентрации существенно зависит от расстояния до границы раздела полостей, а также разрядного тока. Для токов, меньших пороговых, распределение концентрации по форме такое же, как и для однородной полости. Повышение разрядного тока приводит к появлению в распределении максимума, наиболее отчетливо проявляющегося в непосредственной близости к границе раздела полостей. Ширина максимума совпадает с шириной узкой части полости (рис. 15, кривая 2), а высота уменьшается при удалении от границы раздела двух частей. Значения концентрации в мак-

сумме превышают аналогичные величины для однородной полости в 1,5–2 раза при том же токе разряда и зависят от длины и ширины узкой части полости.

Измерения концентрации и потенциала плазмы термоэмиссионным зондом вдоль оси z в срединной плоскости катодной полости показали значительный рост концентрации и спад потенциала по мере углубления в узкую часть полости. При этом не удалось обнаружить локального скачка потенциала, который характерен для образования двойного электростатического слоя на границе сужения полости.

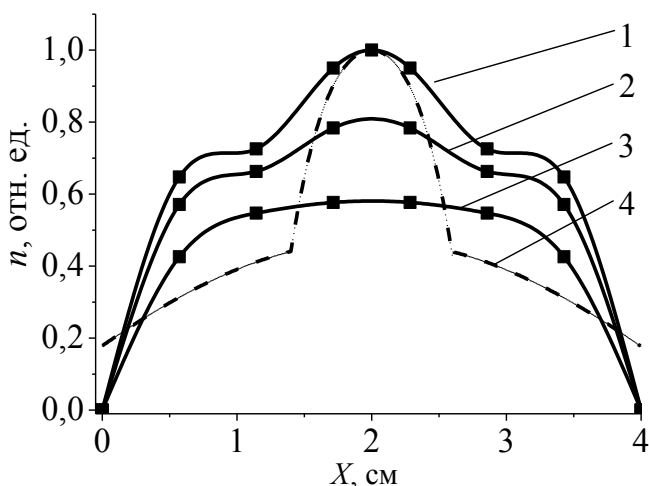


Рисунок 14 – Распределение концентрации плазмы в однородной катодной полости (3), и в составной (1, 2) на расстояниях z от границы раздела секций: 1 – 0 см, 2 – 1 см. Кривая 4 – расчет. Ток разряда 0,8 А, $d = 16$ мм, давление 8 Па.

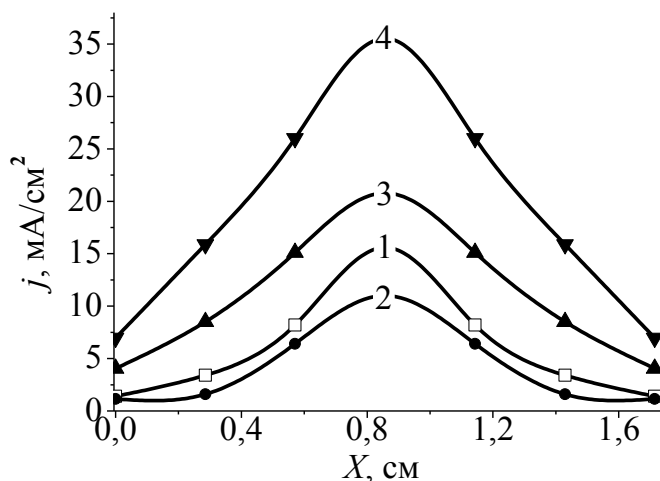


Рисунок 15 – Распределение плотности тока пучка. Ток разряда 100 мА (1, 2) и 800 мА (3, 4) для однородной (1, 3) и составной (2, 4) полости с размером $d = 16$ мм. Давление 6 Па, ускоряющее напряжение 2 кВ.

Расчет пространственного распределения параметров плазмы произведен путем решения уравнений непрерывности и баланса заряженных частиц с учетом как диффузионной, так и дрейфовой составляющей токов. Взаимодействие секций полости учтено поступлением электронов из узкой секции в широкую и противоположным потоком ионов. Результат решения иллюстрируется кривой 4 (рис. 14), совпадающей по форме с экспериментальными зависимостями. Это может служить дополнительным свидетельством правильности представлений о процессах в составной катодной полости.

Повышение плотности плазмы естественным образом способствует повышению плотности эмиссионного тока, рис. 15. Достигнутое повышение плотности тока никак не сказалось на появлении неоднородностей вдоль протяженного размера катодной полости.

Зависимость параметров разряда от геометрии катодной полости находит свое объяснение в рамках следующей модели. При малых значениях разрядного тока, а следовательно, и концентрации плазмы в катодной полости величина катодного слоя сравнима с размером узкой части полости. Плазма тлеющего разряда в этом случае существует только в широкой ее части. Подобное наблюдается в источниках на основе отражательного разряда с полым катодом,

величина катодного слоя сравнима с размером узкой части полости. Плазма тлеющего разряда в этом случае существует только в широкой ее части. Подобное наблюдается в источниках на основе отражательного разряда с полым катодом,

когда концентрации плазмы недостаточно для раскрытия катодного слоя и проникновения плазмы разряда в полый катод. Однако в данном случае нерабочим участком является часть катодной полости. Увеличение разрядного тока позволяет достичь момента, при котором происходит разрыв катодного слоя и плазма проникает в узкую часть полости. Условие проникновения записывается в виде

$$\frac{d}{2} > l_c = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_0^2 U_c^3}{en^2 k T_e}}, \quad (1)$$

где d – ширина узкой части катодной полости, м;

l_c – протяженность катодного слоя, м;

n и T_e – концентрация и электронная температура плазмы, м^{-3} и К;

U_c – катодное падение потенциала, В.

Подставляя полученные в измерениях параметры плазмы и разряда для порогового тока, получаем $l_c \approx 5$ мм, что в целом удовлетворяет условию (1). Снижение напряжения горения при достижении разрядным током определенной величины, а также скачкообразное повышение тока в составной катодной полости свидетельствуют о возникновении условий более эффективной ионизации газа в этом случае. Результат оказывается несколько неожиданным, если отметить, что в случае, когда вся полость имеет одинаковую ширину, равную ширине узкой части, в рабочем диапазоне давлений разряд в стабильной форме поддерживать не удастся из-за возникновения неустойчивых неоднородностей распределения плазмы по длине полости. К тому же при использовании составной полости практически весь разрядный ток переключается на стенки узкой части, что означает более выгодное существование разряда именно в узкой части. Повышение концентрации плазмы можно объяснить, если сравнить длины

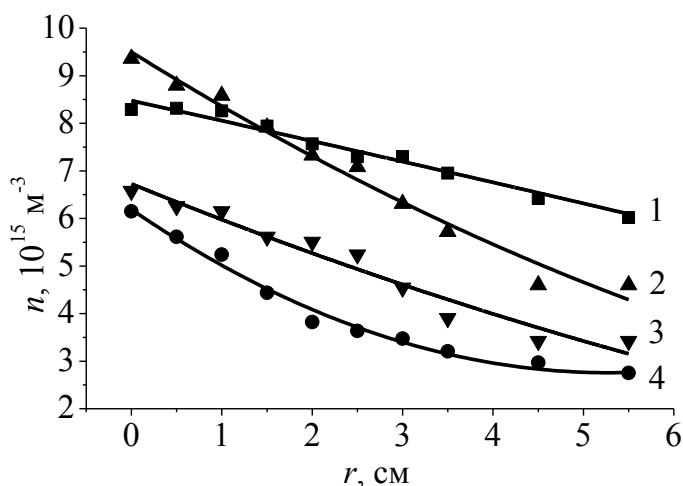


Рисунок 16 – Радиальное распределение пучковой плазмы на расстоянии 30 см от экстрактора электронного источника, давление 20 Па: 1 – воздух; 2 – кислород; 3 – гелий; 4 – аргон.

λ свободного пробега γ -электронов с шириной полости. Для давлений 3–10 Па, используемых в экспериментах, длина свободного пробега λ составляет единицы см, т.е. при ширине полости 40 мм осцилляции электронов могут быть ослаблены и, следовательно, эффект полого катода не проявляется в полной мере. Сужение полости до $\sim 1,5$ см обеспечивает, по видимому, условия для более эффективной осцилляции, при которой возможны образования ионно-электронных пар в катодном слое. Поскольку при сужении всей катодной полости указанных эффектов не наблюдается, и даже наоборот,

при уменьшении ширины нарушается равномерность горения разряда, на что указывалось выше, следовательно, именно совмещение двух частей с раз-

личной шириной приводит к повышению устойчивости разряда и эффективной ионизации.

В третьей главе рассмотрены процессы генерации низкотемпературной плазмы электронным пучком в области его транспортировки.

Показано, что при генерации пучковой плазмы за счет ионизации газа острорасфокусированным электронным пучком наибольшая концентрация пучковой плазмы наблюдается в приосевой области, что связано с радиальным распределением плотности тока пучка, которое наиболее точно аппроксимируется распределением Гаусса, т.е. наибольшая плотность тока – на оси пучка. Измерения радиального распределения концентрации плазмы для различного рода

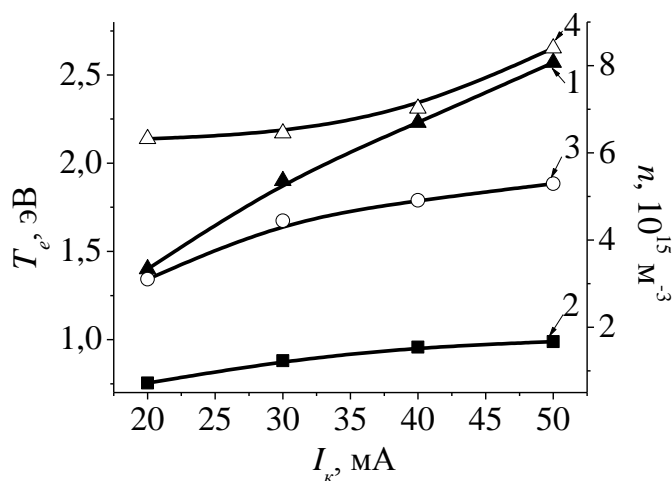


Рисунок 17 – Зависимость температуры электронов T_e (1, 2) и концентрации плазмы n (3, 4) от тока пучка I_b . Давление: 1, 3 – 30 Па; 2, 4 – 120 Па; гелий.

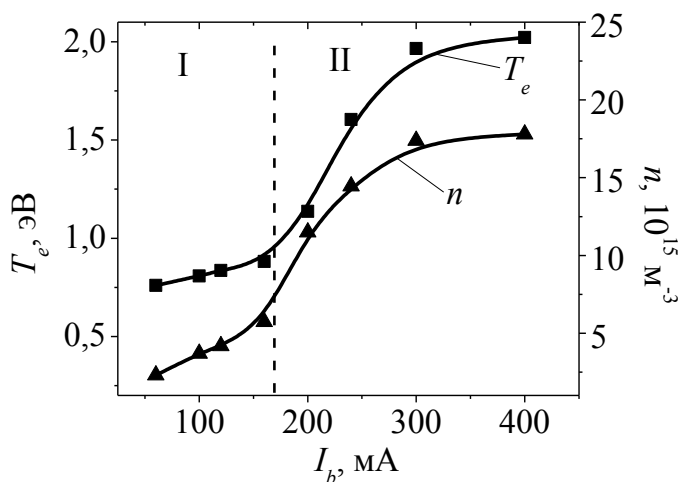


Рисунок 18 – Зависимость температуры электронов 1 и концентрации пучковой плазмы 2 от тока пучка. Давление 7 Па.

с площадью в сотни кв. см. Как правило, для удержания плазмы используется слабое продольное магнитное поле. Для целого ряда применений присутствие магнитного поля нежелательно или даже неприемлемо. Кроме этого, возможное проникновение рассеянного магнитного поля из области транспортировки в

рабочих газов, представленные на рис. 16, подтверждают данное предположение. Концентрация пучковой плазмы спадает к периферии электронного пучка, при этом область существования плазмы во много раз превышает диаметр пучка, равный в данных экспериментах 4–5 мм, что позволяет создавать плазменные образования достаточно большого объема.

Как показали эксперименты, повышение тока пучка способствует увеличению концентрации и температуры электронов пучковой плазмы, в то же время повышение давления приводит к росту концентрации и уменьшению электронной температуры (рис. 17).

Рост концентрации пучковой плазмы с повышением тока пучка связан с повышением частоты ионизации газа за счет прохождения через него большего числа электронов пучка. Известным достоинством ленточного электронного пучка является способность создавать пучковую плазму типа «плазменного листа»

ускоряющий промежуток может оказать влияние на снижение его электрической прочности.

Отмеченные обстоятельства стимулировали постановку специальных исследований, направленных на изучение особенностей формирования протяженных плазменных образований, генерируемых форвакуумным плазменным источником ленточного электронного пучка в системе транспортировки пучка без

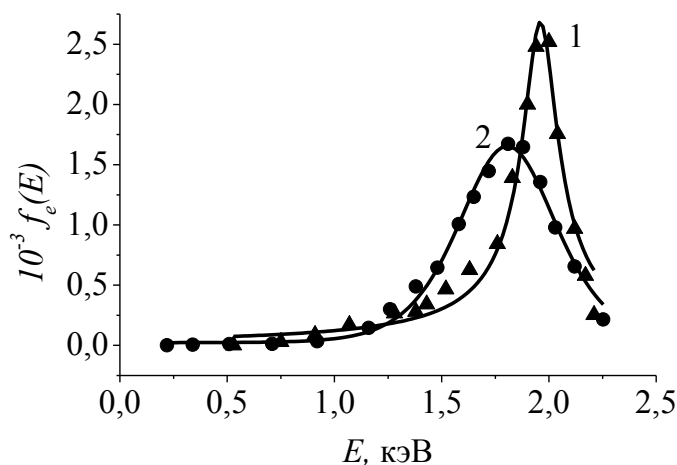


Рисунок 19 – Функция распределения электронов по энергиям для различных расстояний от экстрактора электронного источника: 1 – 20 см, 2 – 45 см. Ток пучка 200 мА, давление 7 Па.

пучка для различных расстояний от экстрактора, приведена на рис. 19. Видно, что по мере распространения электронного пучка энергетический спектр электронов пучка заметно деформируется.

Вблизи электронного источника релаксации пучка не происходит, и вид функции распределения для этого случая (рис. 19, кривая 1) свидетельствует о том, что практически все электроны пучка движутся с начальной энергией ~ 2 кэВ, участвуя только в парных столкновениях. Удаление от плоскости ввода электронного пучка в газ приводит к заметному уширению энергетического спектра (рис. 19, кривая 2), что свидетельствует о частичной релаксации пучка. Варьирование давления газа в указанных пределах принципиально не изменяло полученных экспериментальных зависимостей, но влияло на пороговые значения тока пучка, при которых наблюдались характерные переходы на этих зависимостях. При этом пороговое значение тока изменялось пропорционально давлению. Аналогичная тенденция наблюдалась при относительно небольших изменениях величины ускоряющего напряжения.

В **четвертой главе** описаны конструкции форвакуумных плазменных электронных источников, позволяющих получать электронные пучки различной конфигурации. Конструкции всех разработанных электронных источников содержат полой катод, плоский анод и ускоряющий электрод. Эмиссионное окно выполнено в аноде, для стабилизации плазменной границы используется либо мелкоструктурная сетка из тугоплавкого металла, либо перфорированный электрод с одним или несколькими отверстиями.

магнитного поля. Как показали эксперименты, при транспортировке ленточного электронного пучка в форвакуумной области давлений даже без сопровождающего магнитного поля возможно зажигание пучково-плазменного разряда, характеризующегося повышенным значением концентрации и температуры плазменных электронов, рис. 18. Зажигание ППР носит пороговый характер и визуально проявляется в усилении свечения пучковой плазмы. Функция распределения ускоренных электронов по энергиям, измеренная в области транспортировки

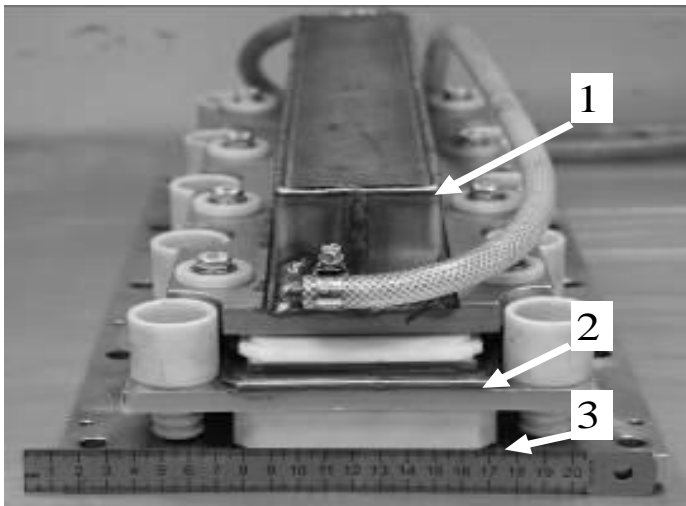


Рисунок 20 – Внешний вид источника электронов: 1 – протяженный полый катод; 2 – анод; 3 – ускоряющий электрод.

Таблица 1 – Эксплуатационные параметры источника ленточного электронного пучка.

Режим работы	непрерывный
Ток разряда	до 1 А
Ускоряющее напряжение	до 10 кВ
Ток пучка	до 800 мА
Размеры пучка в поперечном сечении	100×4 мм ²
Максимально достигаемая мощность электронного пучка	5 кВт
Плотность тока	до 200 мА/см ²
Рабочий газ	остаточная атмосфера, гелий, воздух, метан, аргон, кислород
Давление рабочего газа	5 – 15 Па

Изменение геометрии осуществлялось размещением в ускоряющем промежутке металлических вставок 5 (рис. 21), электрически соединенных с ускоряющим электродом. Варьируемыми параметрами были выбраны: поперечный размер h окна в ускоряющем электроде и протяженность l ускоряющего промежутка (рис. 21). Наряду с экспериментальными исследованиями проводился

В разделе 4.1 описываются исследования, направленные на повышение плотности тока ленточного электронного пучка, а также результаты модернизации геометрии ускоряющего промежутка источника с целью получения слаборасходящегося электронного пучка в отсутствие транспортирующего магнитного поля. Повышения тока электронного пучка удалось достичь путем сокращения длины и одновременного сужения щелевидной апертуры катодной полости. Повышение концентрации эмиссионной плазмы при неизменном разрядном токе в данном случае обеспечивается за счет уменьшения площади электродов разрядной системы. При токе разряда, не превышающем одного ампера, удалось повысить плотность тока в пучке до 200 мА/см², что в несколько раз превышает ранее достигнутый уровень. На основе проведенных исследований создана конструкция, рис. 20, обеспечившая рекордные параметры ленточного электронного пучка, таблица 1.

В отсутствие транспортирующего магнитного поля формирование слабо расходящегося ленточного электронного пучка обеспечивается оптимизацией геометрии электродов ускоряющего промежутка.

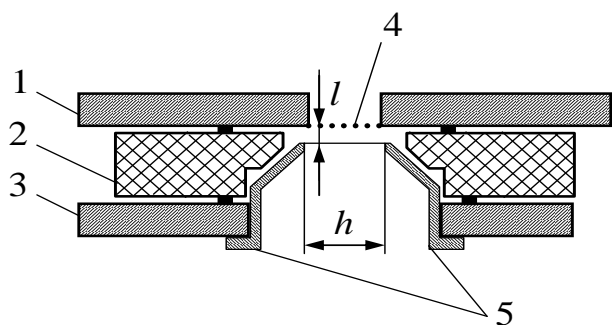


Рисунок 21 – Схема ускоряющего промежутка источника ленточного электронного пучка: 1 – анод; 2 – изолятор; 3 – экстрактор; 4 – металлическая сетка; 5 – металлические вставки.

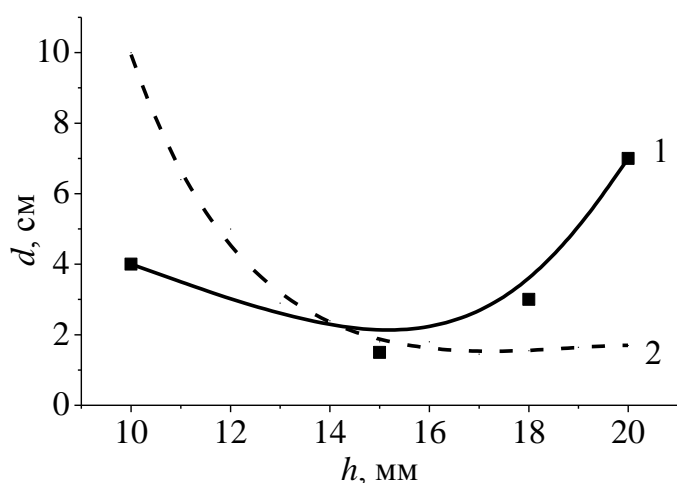


Рисунок 22 – Зависимость поперечного размера пучка d от расстояния между экстракторными пластинами h при фиксированном расстоянии $l = 4$ мм; 1 – эксперимент; 2 – расчет.

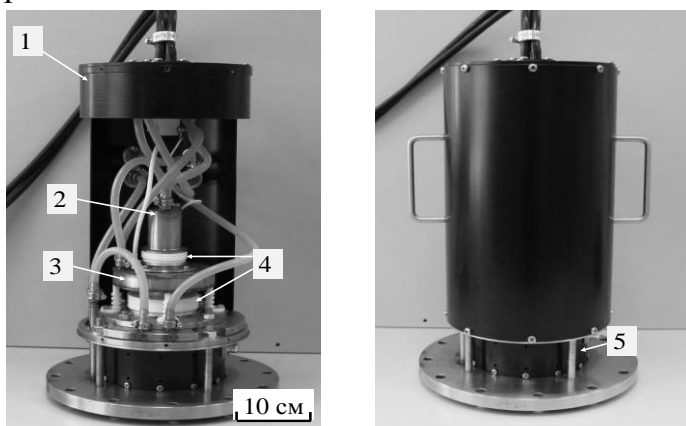


Рисунок 23 – Внешний вид форвакуумного плазменного источника электронов. 1 – Водяное сопротивление, 2 – полый катод, 3 – анод, 4 – высоковольтные изоляторы, 5 – система фокусировки.

модельный расчет траекторий электронов, эмитированных источником при различных вариантах геометрии ускоряющего промежутка.

Результаты экспериментов и модельные расчеты показали возможность получения слаборасходящегося ленточного пучка. Так, для получения пучка с поперечным размером около 15 мм (при ширине эмиссионного окна в аноде 10 мм) на расстоянии 20 см от экстрактора источника необходимо обеспечить расстояние между экстракторными пластинами h в диапазоне 15–17 мм, а расстояние между анодом и экстрактором l – в диапазоне 2–4 мм. При необходимости создания более широкого пучка диапазоны изменения l и h также расширяются, рис. 22.

В разделе 4.2 представлена конструкция и основные параметры источника электронов на основе разряда с цилиндрическим полым катодом. Проведенные исследования позволили создать электронный источник, способный формировать электронный пучок при давлениях вплоть до 100 Па. Внешний вид разработанного источника электронов представлен на рис. 23. Основные рабочие параметры форвакуумного плазменного источника электронов с модернизированной геометрией ускоряющего промежутка приведены в таблице 2.

В разделе 4.3 представлены результаты исследования возможности электронно-лучевого воздействия на изолированные мишени. Показано, что при облучении электронным пучком изолирован-

ной мишени в форвакуумной области давлений величина потенциала, до которого заряжается мишень, существенно ниже ускоряющего напряжения, рис. 24.

Таблица 2 – Основные параметры источника цилиндрического пучка электронов

Режим работы	Непрерывный
Ток разряда	0,1–1 А
Ускоряющее напряжение	5–15 кВ
Ток пучка	20–200 мА
Диаметр пучка	0,5–10 мм
Максимально достигаемая мощность электронного пучка	8 кВт
Плотность тока	500 мА/см ²
Рабочие газы	Воздух, гелий, аргон, кислород, азот, углеводороды
Давление газа	20–30 Па – оптимальное, 100 Па – максимальное

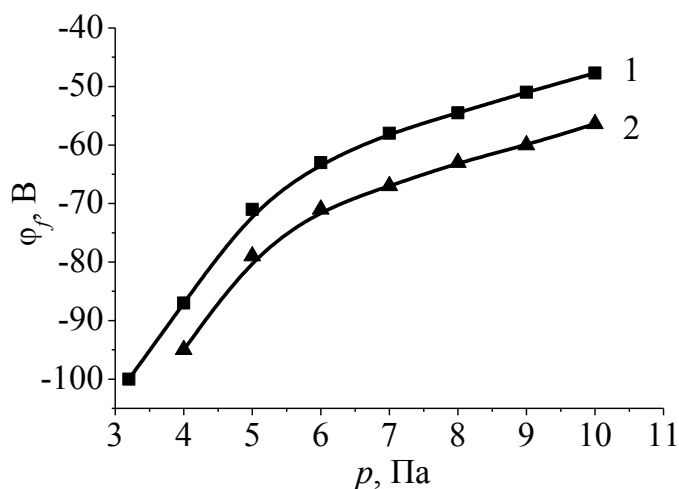


Рисунок 24 – Зависимость потенциала изолированной мишени ϕ_f от давления p для токов пучка I_b : 1 – 380 мА, 2 – 550 мА. Ускоряющее напряжение 3 кВ.

Указанные результаты однозначно свидетельствуют о принципиальной возможности в этих условиях электронно-лучевой обработки изолированных мишеней и непроводящих диэлектриков.

Пятая глава посвящена описанию применений разработанных плазменных электронных источников. Уникальная особенность электронных источников, генерирующих пучки в условиях форвакуума, состоит в возможности непосредственной обработки диэлектрических материалов. Как было показано в предыдущем разделе, облучение непроводящих мишеней в форвакууме не со-

Основными факторами, влияющими на величину потенциала мишени, являются давление рабочего газа, ускоряющее напряжение, ток пучка, а также площадь мишени. Повышение давления, снижение тока пучка и энергии электронов пучка, а также увеличение площади мишени способствуют уменьшению отрицательного потенциала.

Снятие отрицательного заряда с изолированной мишени происходит за счет ионов из пучковой плазмы, образованной при ионизации газа электронами пучка на пути его транспортировки. В случае, когда диаметр электронного пучка меньше размеров облучаемой мишени, дополнительным источником ионов может являться также плазма разряда, зажигающегося между изолированной мишенью и заземленными стенками вакуумной камеры. Зажигание разряда сопровождается ростом концентрации плазмы вблизи мишени и, соответственно, снижением абсолютной величины потенциала. Величина потенциала на порядок меньше значения ускоряющего напряжения, что не может существенным образом сказаться на торможении или отклонении электронного пучка.

проводится значительным ростом отрицательного потенциала на их поверхности. Резонно предположить, что и при облучении диэлектриков также не будет значительного накопления отрицательного заряда.

Раздел 5.1 посвящен вопросам электронно-лучевой сварки керамических материалов, в частности, алюмооксидной керамики. Показано, что для повышения эффективности процесса сварки необходимо использование по меньшей мере двух электронных пучков: один – широкий – используется для подогрева свариваемой области, второй – с меньшим диаметром – направляется на область стыка свариваемых деталей и служит непосредственно для сварки.

Необходимость такого разогрева была обусловлена стремлением избежать растрескивания керамики. Результат сварки представлен на рис. 25.

Режимы сварки одного из типов алюмооксидной керамики представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Режимы сварки керамики ВК94-1.

ВК94-1	Ток пучка, А /напряжение, кВ	Время, мин	Ток фокусировки луча, мА	Скорость перемещения луча по шву, мм/с
Прогрев	0,4/(3-5)	10	0,08	2
Сварка	0,4/6	3	0,12	0,95
Охлаждение	0,4/(6-2)	30	0,09	1,5

Измерения прочности на излом на разрывной машине 2167 Р-50 показали, что для керамики ВК94-1 прочность сваренных образцов составляет (66 ± 5) МПа, в то время как для исходного материала эта величина равнялась (136 ± 11) МПа. Разрушение происходило, как правило, по границе между переплавленной областью и исходным материалом. Электронно-лучевая сварка трубчатых деталей позволяла получать соединения, остающиеся герметичными вплоть до 10^{-3} Па, что свидетельствует о вакуумной плотности сварного соединения.

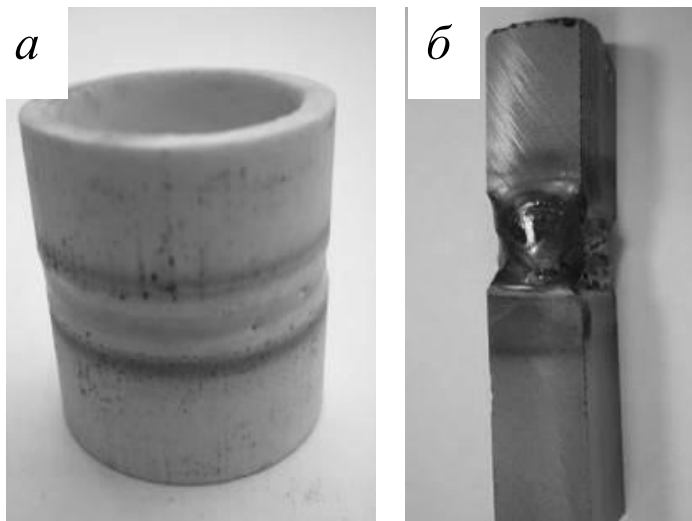


Рисунок 25 – Результат электронно-лучевой сварки: а – трубки из керамики ВК94-1, б – кремний.

Помимо сварки керамических материалов, разработанные источники применимы для создания вакуумноплотных соединений металла с керамикой. В качестве примера приведена пайка одного из наиболее распространенных типов технической керамики – ВК94-1 с титаном с использованием алюминия в качестве материала припоя. Успешность такого подхода обусловлена хорошей смачиваемостью алюминием как керамики, так и титана. На рис. 26 представлен результат электронно-лучевой пайки.

Исследование полученных металлокерамических соединений методами растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа

выявили, что структура переходной зоны алюминий-керамика более резкая по сравнению с зоной алюминий-титан, что может свидетельствовать о частичном растворении титана в алюминии. При испытаниях на термоциклирование четыре из шести испытываемых образцов сохранили свою герметичность, а в двух образцах появилась течь. Прочность на разрыв полученного соединения составила 8-20 МПа в зависимости от времени экспозиции при максимальной мощности пучка, причем разрыв происходил по алюминию.

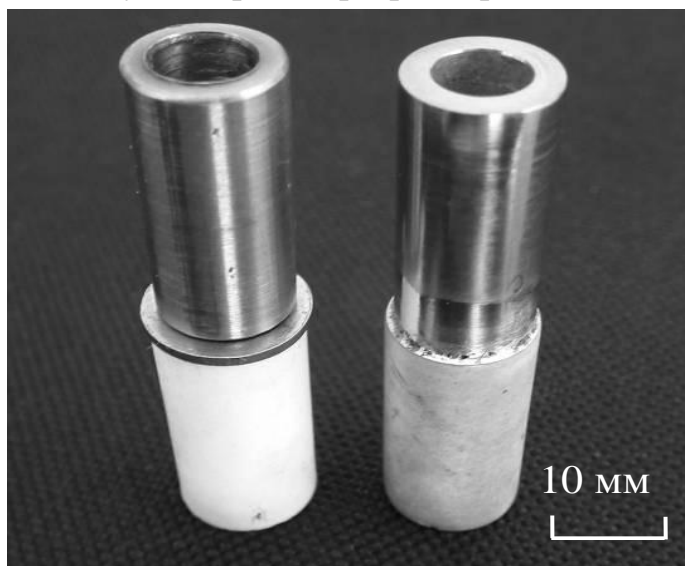


Рисунок 26 – Образцы до (слева) и после (справа) пайки: сверху титан ВТ-5, внизу керамика ВК94-1.

Особенностью данной технологии является тот факт, что для получения качественного соединения не требуется нагревать свариваемые изделия до экстремально высоких температур, для образования качественного соединения достаточно прогреть детали до температуры плавления алюминия (660°C). Отсутствие сильного нагрева соединяемых деталей позволяет свести к минимуму механические напряжения, возникающие как в керамике, так и в металле.

Другим успешным применением форвакуумных плазменных электронных пучков является спекание керамических материалов. Эксперименты по электронно-лучевому спеканию проводились с образцами, изготовленными из нанопорошка диоксида циркония, стабилизированного в высокотемпературной модификации добавкой оксида иттрия (TZ-3YS, TOSOH, Япония). Образцы подвергались предварительному прессованию при давлении 240-800 МПа. Показано, что при одностороннем облучении керамические компакты деформируются (становятся вогнутыми) вследствие более интенсивной усадки с облучаемой стороны за счет значительного температурного градиента, достигающего 400°C при толщине образца 3 мм.

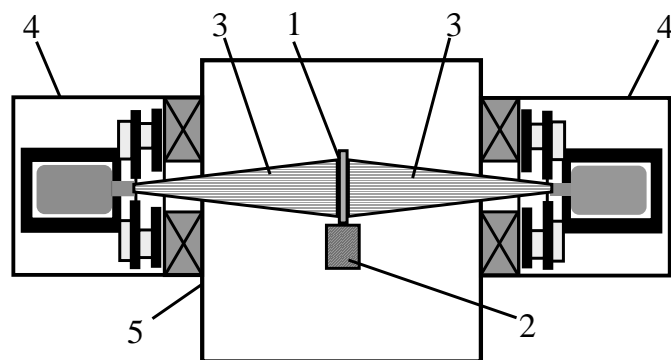


Рисунок 27 – Схема эксперимента по электронно-лучевому спеканию керамики. 1 – эмиссионная плазма, 2 – фокусирующая система, 3 – электронный пучок, 4 – спекаемый образец, 5 – вакуумная камера, 6 – держатель образца.

С целью обеспечения однородности нагрева компакта был предложен способ спекания, заключающийся в одновременном двустороннем облучении компакта, рис. 27, а также различные варианты держателя компактов.

Образцы керамики YSZ после спекания методом ЭЛС имеют

среднюю плотность 95% от теоретического значения (максимальное значение плотности достигло 97,3%). После ЭЛС поверхность образцов керамики из диоксида циркония ровная, глянцевая. При этом ЭЛС в максимальных режимах облучения образцов, озвученных в процессе прессования при максимальном значении мощности, позволило дополнительно уменьшить средний размер поверхностных зерен с 2,4 мкм до 0,7 мкм.

Электронно-лучевое облучение керамических материалов также имеет некоторые особенности. По мере нагрева спекаемого керамического образца появляется заметная электропроводность, что при заземленном держателе образца обеспечивает стекание заряда, вносимого электронным пучком. При достижении достаточно высоких температур не исключена и термоэлектронная эмиссия с поверхности керамики. Проведенные эксперименты с керамикой на основе карбида кремния при одностороннем электронно-лучевом облучении показали, что зависимость измеряемого в цепи держателя тока I через спекаемый керамический образец немонотонным образом зависит от температуры T его поверхности, рис. 28.

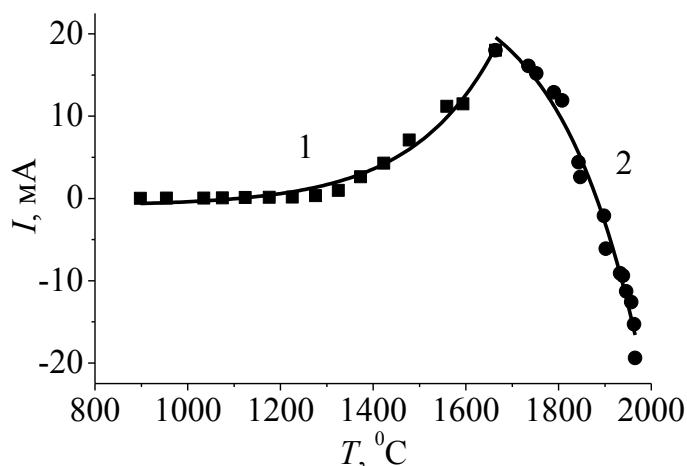


Рисунок 28 – Зависимость тока в цепи держателя образца от температуры.

Явно выделяются два участка зависимости. В начальной области первого участка при $T \leq 1300^\circ\text{C}$ ток через образец практически равен нулю. Дальнейшее повышение температуры вызывает появление тока в цепи держателя образца и его заметный рост. Скорее всего, наблюдаемый рост тока связан с возрастанием электрической проводимости спекаемой керамики. Второй участок кривой (рис. 28) соответствует температурам свыше 1650°C . С ростом T ток уменьшается и при дальнейшем увеличении температуры изменяет знак. Наиболее вероятной причиной наблюдаемой на втором участке зависимости тока через керамический образец от температуры является термоэлектронная эмиссия с поверхности образца. О тепловой природе тока свидетельствует достаточно медленный (в течение 4 – 5 секунд) спад тока через образец после выключения электронного пучка. Аргументом в пользу термоэлектронной эмиссии служит линейный характер зависимости $\ln(I/T^2)$ от $1/T$. Рассчитанное из эксперимента значение работы выхода (2,6 эВ) близко к табличному для монокристаллического карбида кремния (2,9 эВ). Приведенные результаты дают основания к утверждению о влиянии электропроводности и термоэлектронной эмиссии на процессы компенсации заряда при облучении диэлектрических материалов электронным пучком.

В заключении изложены основные результаты работы:

1. Показано, что на предельное рабочее давление форвакуумных плазменных источников электронов существенное влияние оказывает ток высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) в ускоряющем промежутке, рассеяние электронного пучка на остаточном газе и нарушение электрической прочности ускоряющего промежутка. Эти факторы, в свою очередь, зависят от конфигурации электронного пучка, его параметров, величины магнитного поля в области транспортировки, а также рода рабочего газа. Определено ключевое влияние тока высоковольтного тлеющего разряда, возникающего в ускоряющем промежутке электронного источника, на возможность повышения предельного рабочего давления. Предложены конструктивные решения, обеспечившие снижение тока ВТР и позволившие повысить предельное рабочее давление электронного источника до рекордных 160 Па при работе на гелии и до 100 Па на воздухе.

2. Определены условия возникновения локальной неоднородности концентрации плазмы вблизи апертуры протяженной катодной полости. Указанная неоднородность возникает при превышении отношением площади стенок полости к площади выходной апертуры определенного значения, зависящего от давления и разрядного тока. Повышенное значение концентрации приводит к локальному уменьшению протяженности катодного слоя, перекрывающего выходную апертуру катодной полости, и в случае эмиссии – к извлечению практически всего тока пучка из указанной области. Ослабление неоднородности может быть осуществлено за счет формирования условий, когда протяженность катодного слоя становится меньше ширины апертуры катодной полости. К таким условиям относятся повышение концентрации плазмы за счет увеличения разрядного тока, уменьшение объема катодной полости, а также повышение концентрации плазмы в непосредственной близости к выходной апертуре за счет расположения дополнительного протяженного дополнительного анода.

3. Определены особенности формирования в форвакуумной области давлений ленточного электронного пучка с повышенной плотностью тока. Показано, что наиболее оптимальным способом повышения плотности эмиссионного тока является использование катодной полости с различной шириной в поперечном сечении. Такая конструкция позволяет повысить концентрацию эмиссионной плазмы без нарушения однородности вдоль ее протяженного размера. Повышенное значение концентрации приводит к возрастанию в 1,5–2 раза плотности эмиссионного тока с сохранением однородности в его распределении.

4. Проведены исследования процессов образования пучковой плазмы, формируемой форвакуумным плазменным источником ленточного электронного пучка в условиях его транспортировки без сопровождающего магнитного поля. Определены условия зажигания в области транспортировки пучка пучково-плазменного разряда, позволяющего формировать плазменное образование типа «плазменного листа» с концентрацией порядка $\sim 10^{16} \text{ м}^{-3}$ и температурой электронов 1 – 2,5 эВ. Достигнутые значения параметров и размеры плазмы позволяют использовать ее в технологиях поверхностной модификации плоских протяженных изделий.

5. Показано, что в форвакуумной области давлений возможна генерация электронных пучков с рекордными параметрами как цилиндрической, так и ленточной конфигурации в зависимости от геометрии разрядной и эмиссионной систем. На основе исследований созданы плазменные источники электронов на основе разряда с полым катодом для генерации электронных пучков различной конфигурации в широком диапазоне рабочих давлений – от 5 до 100 Па. Источник ленточного электронного пучка обеспечивает генерацию пучка с поперечным сечением $100 \times 4 \text{ мм}^2$, плотностью тока 200 мА/см^2 , энергией до 10 кэВ и неоднородностью распределения плотности тока по сечению пучка, не превышающей 15%. Источник сфокусированного электронного пучка создает пучок с минимальным диаметром от 0,5 мм и плотностью мощности до 10^5 Вт/см^2 .

6. Геометрия электродов ускоряющего промежутка решающим образом влияет на формирование электронных пучков в форвакуумной области давлений. Для генерации ленточных электронных пучков в отсутствие транспортирующего магнитного поля необходимо минимизировать расстояние между анодом и экстрактором ускоряющего промежутка, а ширину выходного окна в экстракторе установить в 1,5 раза больше ширины выходной щели в протяженном аноде. При формировании сфокусированного пучка дополнительным фактором, обеспечивающим фокусировку пучка, является кривизна эмиссионного электрода. Выпуклый в сторону катода эмиссионный электрод за счет изменения направления траекторий элементарных лучей, эмитируемых каждым эмиссионным отверстием в перфорированном электроде, позволяет получить сходящийся электронный пучок.

7. Показано, что в форвакуумной области давлений частичная нейтрализация заряда, приносимого электронами пучка на облучаемую поверхность изолированной мишени, происходит за счет ионов из плазмы, генерируемой электронным пучком по мере его распространения в вакуумной камере. Величина потенциала зависит от параметров электронного пучка, размеров облучаемой мишени и давления в вакуумной камере. Повышение давления, увеличение площади мишени по сравнению с площадью сечения электронного пучка, уменьшение тока и энергии электронов пучка приводят к снижению величины отрицательного потенциала.

8. Продемонстрирована возможность эффективного использования разработанных электронных источников для обработки диэлектрических (в частности, керамических) материалов. Определены режимы работы источника при его использовании в технологиях сварки керамики, соединения керамики с металлом, спекания керамических материалов, испарения и нанесения керамических покрытий.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Входящие в перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ

1. Электронно-лучевое испарение керамики в форвакуумном диапазоне давлений / А. С. Климов, А. А. Зенин, Е. М. Окс, М. В. Шандриков, Ю. Г. Юшков // Прикладная физика. – 2016. – № 3. – С. 40–44.

2. Тюньков, А. В. Мониторинг масс-зарядового состава пучковой плазмы модернизированным квадрупольным анализатором в форвакуумной области давлений / А. В. Тюньков, Ю. Г. Юшков, А. С. Климов // Прикладная физика. – 2016. – № 1. – С. 96–99.
3. Особенности фокусировки электронного пучка плазменного источника в форвакуумном диапазоне давлений / А. А. Зенин, И.Ю. Бакеев, Ю.А. Бурачевский, А.С. Климов, Е.М. Окс // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, № 13. – С. 104–110.
4. Формирование ленточного электронного пучка форвакуумным плазменным источником электронов / А. С. Климов, В. А. Бурдовицин, А. А. Гришков, Е. М. Окс, А. А. Зенин, Ю. Г. Юшков // Прикладная физика. – 2015. – № 1. – С. 35–39.
5. Особенности зарядовой нейтрализации карбида кремния при спекании электронным пучком в форвакуумной области давлений / А. С. Климов, В. А. Бурдовицин, А. А. Зенин, Е. М. Окс, О. Л. Хасанов, Э. С. Двилис, А. О. Хасанов // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41, № 15. – С. 69–74.
6. Особенности формирования сфокусированного пучка электронов форвакуумным плазменным источником при повышенных давлениях / Е. М. Окс, Ю.А. Бурачевский, В.А. Бурдовицин, А.А. Гришков, А.А. Зенин, А.С. Климов // Успехи прикладной физики. – 2013. – Т. 1, № 1. – С. 60–64.
7. Генерация стационарных электронных пучков форвакуумным плазменным источником в области давлений 100 Па / А. А. Зенин, А. С.Климов, В. А. Бурдовицин, Е.М. Окс // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39, № 10. – С. 9–14.
8. Расширение рабочего диапазона форвакуумных плазменных источников электронов в область более высоких давлений / В.А. Бурдовицин, А.К. Гореев, А.С. Климов, А.А. Зенин, Е.М. Окс // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, № 8. – С. 62–66.
9. Электронно-лучевая сварка керамики с металлом с использованием форвакуумного плазменного источника электронов / А. К. Гореев, В. А. Бурдовицин, А.С. Климов, Е. М. Окс // Перспективные материалы. – 2012. – №3. – С. 77–80.
10. Особенности плавления керамики под воздействием электронного пучка / Е.В. Скробов, В.А. Бурдовицин, А.К. Гореев, А.С. Климов, Е.М. Окс // Физика и химия обработки материалов. – 2011. – № 5. – С. 10–14.
11. Электронно-лучевая обработка керамики / А. В. Медовник, В. А. Бурдовицин, А. С. Климов, Е. М. Окс // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – № 3. – С. 39–44.
12. Бурдовицин, В. А. О возможности электронно-лучевой обработки диэлектриков плазменным источником электронов в форвакуумной области давлений / В. А. Бурдовицин, А. С. Климов, Е. М. Окс // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35, № 11. – С. 61–66.
13. Использование разряда с неоднородным протяженным полым катодом для повышения плотности тока в форвакуумном плазменном источнике ленточного пучка электронов / А. С. Климов, Ю. А. Бурачевский, В. А. Бурдовицин, Е. М. Окс // Журнал технической физики – 2008. – Т. 78, № 4. – С. 43–46.

14. Климов, А. С. Локализация плазмы в протяженном полом катоде плазменного источника ленточного электронного пучка в форвакуумной области давлений / А.С. Климов, В. А. Бурдовицин, Е. М. Окс // Известия ВУЗов. Физика. – 2007. – № 6. – С. 3–10.

15. Бурдовицин В. А. Локализация плазмы в протяженном полом катоде плазменного источника ленточного электронного пучка / В. А. Бурдовицин, А. С. Климов, Е. М. Окс // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76, № 10 – С. 62–65.

16. Electron beam treatment of non-conducting materials by a fore-pump-pressure plasma-cathode electron beam source / V. A. Burdovitsin, A. S. Klimov, A. V. Medovnik, E. M. Oks // Plasma Sources Sci. Technol. – 2010. – № 19. – P. 055003.

17. Electron Beam Sintering of Zirconia Ceramics / V. Burdovitsin, E. Dvilis, A. Zenin, A. Klimov, E. Oks, V. Sokolov, A. Kachaev, O. Khasanov // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 872. – P. 150–156.

18. Золотухин, Д. Б. Параметры плазмы, создаваемой электронным пучком в форвакууме / Д. Б. Золотухин, А. С. Климов, А. А. Зенин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – № 4 (30). – С. 79–82.

19. Зенин, А. А. Электронно-лучевая пайка алюмооксидной керамики с металлом с применением форвакуумного плазменного источника электронов / А. А. Зенин, А. С. Климов // Доклады томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники – 2013. – Т. 2, № 1(27). – С. 10–13.

20. Казаков, А. В. Электронно-лучевой синтез диоксидциркониевой керамики / А. В. Казаков, А. С. Климов, А. А. Зенин // Доклады томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – Т. 2 – 2(26). – С. 186–189.

21. Саврук, Е. В. Модификация поверхности Mn-Zn-феррита пучком низкоэнергетических электронов / Е. В. Саврук, С. В. Смирнов, А. С. Климов // Доклады томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – Т. 2, 2(26). – С. 172–174.

22. Климов, А. С. Особенности функционирования плазменного электронного источника при повышенных давлениях / А. С. Климов, А. С. Жигалкина, В. А. Бурдовицин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 2 (24). – С. 157–160.

23. Климов, А. С. Тлеющий разряд с неоднородным полым катодом для форвакуумных плазменных источников электронов / А. С. Климов, Ю. А. Бурачевский, И. С. Жирков // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2008. – № 2 (18). – С. 53–58.

Статьи в сборниках статей и трудов конференций:

23. Особенности генерации плазмы ленточным электронным пучком в форвакуумном диапазоне давлений / А. С. Климов, А. А. Зенин, Е. М. Окс, Ю. Г. Юшков // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, №9/2. – С. 161–166.

24. Формирование сфокусированного электронного пучка плазменным источником в форвакуумном диапазоне давлений / И. Ю. Бакеев, Ю. А. Бурачев-

ский, А. А. Зенин, Д. Б. Золотухин, А. С. Климов, Е. М. Окс // Известия ВУЗов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 9/2 – С. 44–49.

25. Мониторинг масс-зарядового состава пучковой плазмы при давлении до 10 Па / Д. Б. Золотухин, А. С. Климов, К. П. Савкин, А. В. Тюньков, Ю. Г. Юшков // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – №9/3. – С. 106–110.

26. Климов, А. С. Особенности формирования и транспортировки ленточного электронного пучка в форвакуумном диапазоне давлений / А. С. Климов, Е. М. Окс // Плазменная эмиссионная электроника. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН. – 2015. – С. 81–84.

27. Electron beam sintering of ceramics / A. S. Klimov [et al.] // Electrotechnica & Electronica. – 2014. – Vol. 49, № 5-6. – P. 315–318.

28. Климов, А. С. Форвакуумный плазменный источник ленточного электронного пучка с повышенной плотностью тока на основе разряда с протяженным полым катодом / А. С. Климов, В. А. Бурдовицин, Е. М. Окс // Труды III международного крейделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника». – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2009. – С. 105–111.

29. Особенности транспортировки электронного пучка, генерируемого плазменным источником в форвакуумной области давлений / А. А. Зенин [и др.] // Известия ВУЗов. Физика. – 2014. – Т. 57, № 3/3. – С. 136–140.

30. Климов, А. С. Тепловые процессы при спекании керамики с использованием плазменного электронного источника / А. С. Климов, А. А. Зенин, А. С. Жигалкина // Изв. вузов. Физика. – 2014. – №3/3. – С. 176–181.

31. Sintering of Alumina Ceramics Using Plasma Electron Source / A. A. Zenin [et al.] // Изв. ВУЗов. Физика. – 2012. – №12/3. – С. 216–219.

32. Features of functioning plasma electron source based on discharge with hollow cathode at high pressure / A. A. Zenin [и др.] // Известия ВУЗов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 12/3. – С. 220–222.

33. Electron beam treatment of ceramics / E. Oks [et al.] // Beam Technologies and Laser Application: Proceedings of the six international scientific and technical conference. Saint-Petersburg: Publishing house SPbSPU, 2009. – P. 249–254.

34. Электронный пучок в форвакууме – инструмент для обработки керамики / Е. М. Окс [и др.] // Beam Technologies and Laser Application: Proceedings of the seven international scientific and technical conference. – SPb.: Publishing house SPbSPU, 2013. – P. 287–293.

35. Ribbon beam generation by plasma cathode electron source / V. A. Burdovitsin [et al.] // Electrotechnica & Electronica. – 2009. – Vol. 44, № 5-6. – P. 198–200.

36. Electron beam processing of dielectrics by fore-pump plasma cathode electron source / V. A. Burdovitsin [et al.] // Electrotechnica & Electronica. – 2009. – Vol. 44, № 5-6. – P. 195–197.

Патенты, свидетельства о регистрации программного продукта:

37. Патент РФ №2434726. Способ электронно-лучевой сварки керамических деталей / Бурдовицин В. А., Климов А. С., Окс Е. М., Медовник А. опубли. 27.11.2011, Бюл. № 33.

38. Патент РФ №116734. Газоразрядный электронный источник / Бурдовицин В. А., Гореев А. К., Зенин А. А., Климов А. С., Окс Е. М. опубл. 27.05.2012, Бюл. № 15. – 3 с.: ил.

39. Патент РФ №2516532. Способ спекания изделий из диэлектрической керамики / Бурдовицин В.А., Зенин А. А., Климов А.С., Окс Е.М. опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14.

40. Патент РФ №2515722. Способ изготовления трубчатого соединения алюмооксидной керамики с металлом / Бурдовицин В. А., Зенин А. А., Климов А. С., Окс Е. М. опубл. 27.12.2013, Бюл. № 36.

41. Патент РФ №148124. Держатель образцов для электронно-лучевого спекания непроводящей керамики / Климов А.С., Зенин А.А., Окс Е.М. опубл. 27.11.2014, Бюл. № 33.

42. Патент РФ №156057. Форвакуумный плазменный электронный источник ленточного пучка / Климов А.С., Бурдовицин В.А., Зенин А.А., Окс Е.М. опубл. 27.10.2015 Бюл. № 30.

43. Патент РФ №158153. Приспособление для размещения спекаемых компаков / Климов А.С., Зенин А.А., Окс Е.М. опубл. 20.12.2015, Бюл. № 35.

44. Патент РФ №159299. Приспособление для размещения спекаемого компакта / Климов А. С., Зенин А. А., Окс Е. М. опубл. 10.02.2016, Бюл. № 4.