

На правах рукописи



Баксеев Илья Юрьевич

**ГЕНЕРАЦИЯ ФОРВАКУУМНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ  
ЭЛЕКТРОНОВ СФОКУСИРОВАННЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ ПУЧКОВ  
ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

01.04.04 – Физическая электроника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

ТОМСК – 2019

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

Научный руководитель:

**Окс Ефим Михайлович**

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

**Егоров Иван Сергеевич**

кандидат технических наук, научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий», Инженерная школа новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета

**Семенов Александр Петрович**

доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией физического материаловедения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

Ведущая организация:

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

Защита состоится 18 сентября 2019 г. в 13 ч. 00 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://postgraduate.tusur.ru/urls/1jahtkns>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Ю.П. Акулиничев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Плазменные источники электронов, ввиду отсутствия в конструкции накаливаемых деталей, выгодно отличаются от аналогичных устройств с твердотельным электронным эмиттером способностью сохранять работоспособность при повышенных давлениях рабочего газа и в присутствии химически агрессивных сред. В особенности это свойство становится необходимым в таких востребованных в настоящее время технологических применениях, как электронно-лучевая сварка, плавка, испарение и осаждение покрытий, наплавка и послойный синтез изделий сложной формы из порошкового материала, так как проведение таких технологических операций, как правило, сопровождается обильным газовыделением.

Традиционно работоспособность плазмообразующего разряда в плазменных источниках электронов обеспечивается напуском рабочего газа в катодную полость и повышением эффективности ионизации газа в скрещенных электрическом и магнитном полях. Обеспечение же электрической прочности ускоряющего промежутка достигается благодаря перепаду давлений между разрядной областью и областью ускоряющего промежутка и распространения пучка. При этом, несмотря на высокую температуру плазменных электронов по сравнению с термокатодными пушками, благодаря высокой эмиссионной способности разрядной плазмы плазменные источники обеспечивают сравнимую с ними яркость и плотность мощности электронного пучка вплоть до  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>.

Активно развиваемые в последнее время так называемые форвакуумные плазменные источники электронов, функционирующие в области давлений от единиц до сотни паскалей, позволяют существенно упростить вакуумное оборудование благодаря сокращению ступеней откачки и способности данных источников работать в изобарическом режиме, т.е. в отсутствие перепада давления между разрядной областью и ускоряющим промежутком. Принципиальной особенностью генерации электронных пучков в форвакуумной области давлений является возможность непосредственной электронно-лучевой обработки диэлектрических материалов (керамика, стекло и др.) без использования дополнительного оборудования для снятия заряда с обрабатываемой поверхности диэлектрика. Такая возможность применения форвакуумных плазменных источников электронов была продемонстрирована ранее на примерах испарения керамики и нанесения покрытий, резки керамики и стекла, соединение керамик и керамики с металлом посредством электронно-лучевой сварки и пайки, импульсной модификации поверхности керамических и полимерных материалов.

Задача формирования сфокусированных электронных пучков плазменными источниками в форвакуумной области давлений для прецизионной обработки диэлектриков, в первую очередь, осложнена процессами рассеяния электронов на молекулах рабочего газа. Именно по этой причине на момент начала данной работы минимальный диаметр сфокусированного электронного пучка составлял 0,6 мм, а плотность мощности электронного пучка не превышала  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Расширение области применения форвакуумных плазменных источни-

ков электронов в сторону локальной обработки диэлектриков требует как уменьшения диаметра электронного пучка, так и повышения его плотности мощности. Процессы генерации и фокусировки электронных пучков при более низких давлениях достаточно хорошо изучены. Однако использование в форвакуумном источнике изобарической разрядной системы с полым катодом без магнитного поля, а также процессы взаимодействия электронного потока с рабочим газом и наличие обратного ионного потока в ускоряющем промежутке имеют свои отличительные особенности. Поэтому проблема дальнейшего повышения удельных параметров электронного пучка, генерируемого плазменным источником в форвакуумной области давлений, представляется актуальной.

**Цель работы** заключалась в экспериментальном исследовании и численном моделировании процессов эмиссии, формирования и магнитной фокусировки непрерывного электронного пучка, генерируемого форвакуумным плазменным источником, направленных на повышение его удельных параметров.

**Основные задачи** настоящей работы заключались в:

- определении условий, обеспечивающих повышение плотности эмиссионной плазмы на оси разрядной системы с полым катодом в форвакуумном источнике электронов;
- исследовании влияния конфигурации и размеров эмиссионного электрода, ускоряющего электрода, а также параметров магнитной фокусирующей системы на процессы генерации и фокусировки электронного пучка в форвакуумной области давлений;
- поиске методов и технических решений, обеспечивающих повышение плотности мощности электронного пучка, генерируемого плазменным источником в форвакуумной области давлений при магнитной фокусировке;
- демонстрации возможности применения сфокусированного электронного пучка, генерируемого форвакуумным плазменным источником, для обработки высокотемпературных диэлектриков.

**Научная новизна** работы заключается в том, что для форвакуумных плазменных источников электронов впервые:

1. Определены условия, обеспечивающие максимальную плотность эмиссионной плазмы на оси разрядной системы с полым катодом в отсутствие перепада давления между разрядной областью и областью ускорения электронного пучка, что обеспечивает повышение плотности эмиссионного тока через центральный эмиссионный канал в эмиссионном электроде до  $10 \text{ А/см}^2$ .
2. Определена роль и степень влияния геометрии эмиссионных каналов, конфигурации ускоряющего промежутка, а также фокусирующей магнитной системы на удельные параметры электронного пучка при давлениях рабочего газа 10-30 Па.

3. Предложены оригинальные технические решения, обеспечивающие повышение плотности мощности электронного пучка плазменного источника с магнитной фокусировкой в области повышенных давлений форвакуумного диапазона, до уровня  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>.

**Научная и практическая значимость** работы заключается в следующем:

1. Результаты проведенных исследований вносят существенный вклад в понимание физических процессов генерации сфокусированных электронных пучков плазменными источниками с полым катодом, функционирующими в области повышенных давлений газа форвакуумного диапазона. Определены условия, позволяющие улучшить магнитную фокусировку электронного пучка и, тем самым, повысить его удельные параметры.

2. Создан опытный образец форвакуумного плазменного источника электронов с двойной магнитной фокусирующей системой, обеспечивающий при давлениях рабочего газа вплоть до 30 Па генерацию электронного пучка с плотностью мощности  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>.

3. Продемонстрирована возможность применения форвакуумного источника сфокусированного электронного пучка для селективного электронно-лучевого спекания керамических порошков, а также прецизионной резки высокотемпературных диэлектрических материалов на глубину до нескольких сантиметров.

4. Результаты работы могут быть использованы в других плазменно-эмиссионных приборах, функционирующих в области повышенных давлений форвакуумного диапазона давлений и имеющих аналогичные разрядные и эмиссионные системы.

**Методология и методы исследования.** Основной методический подход, используемый при выполнении диссертационной работы, заключается в использовании сочетания экспериментальных исследований с численным моделированием. Для решения поставленных задач были использованы следующие многократно апробированные экспериментальные методики:

- осциллография токов и напряжений;
- зондовая диагностика параметров плазмы;
- растровая электронная микроскопия и энергодисперсионный анализ.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. В форвакуумном плазменном источнике электронов на основе разряда с полым катодом, функционирующем в изобарическом режиме, повышение плотности эмиссионной плазмы на оси разрядной системы обеспечивается сжатием положительного столба разряда в результате перекрытия торца протяженной катодной полости электродом с относительно малым отверстием. Максимальная плотность эмиссионной плазмы при сохранении условий стабильного инициирования и горения разряда с полым катодом достигается оптимизацией

геометрии катодной полости, обеспечивающей в случае отбора электронов из одиночного эмиссионного отверстия плотность тока эмиссии электронов из плазмы до  $10 \text{ А/см}^2$ .

2. В форвакуумном плазменном источнике электронов наименьший диаметр электронного пучка обеспечивается при отборе электронов через одиночный эмиссионный канал. Поскольку увеличение диаметра одиночного канала ограничено условиями слоевой стабилизации плазменной границы, повышение тока пучка возможно при использовании в источнике нескольких эмиссионных каналов. Несмотря на увеличение в этом случае минимального диаметра сфокусированного электронного пучка, плотность мощности пучка для одиночного и нескольких эмиссионных каналов достигает рекордной для форвакуумных источников электронов величины уровня  $10^6 \text{ Вт/см}^2$ .

3. Эффективная магнитная фокусировка ускоренного электронного пучка форвакуумного плазменного источника электронов достигается в результате использования двойной магнитной фокусирующей системы, обеспечивающей уменьшение сферических аберраций. При этом одна из магнитных линз располагается непосредственно за системой извлечения и ускорения электронов, другая – вблизи коллектора электронного пучка. При ускоряющем напряжении 30 кВ и токе пучка до 50 мА минимальный диаметр электронного пучка составляет 0,4 мм. Достигнутые параметры электронного пучка обеспечивают возможность применения форвакуумных плазменных источников электронов для электронно-лучевой обработки высокотемпературных диэлектриков на глубину до нескольких сантиметров.

**Достоверность и обоснованность** результатов диссертационной работы подтверждается систематическим характером исследований, использованием независимых экспериментальных методик, соответствием экспериментальных результатов с численными оценками, а также практической реализацией научных положений и выводов при создании и применении форвакуумного источника непрерывного сфокусированного пучка.

**Материалы диссертационной работы опубликованы** в 4 статьях в российских изданиях, входящих в Перечень ВАК рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, а также учитываемых в этом перечне 3 статья в зарубежных изданиях, индексируемых в базах данных научного цитирования Web of Science и Scopus. Результаты исследований по диссертационной работе также опубликованы в виде 17 полнотекстовых докладов в сборниках конференций Международного и Всероссийского уровней, 5 из которых опубликованы в изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus. По результатам работы получен 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель, 3 свидетельства о государственной регистрации программы на ЭВМ.

**Апробация результатов.** Результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях:

Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2016, 2017, 2018 гг.); Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2016» (г. Томск, 2016, 2017, 2018 гг.); Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (г. Томск, 2016, 2017, 2018 гг.); VI Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий» (г. Москва, 2016 г.); International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2016, EFRE-2018) (г. Томск, 2016, 2018 гг.); XIII Международная конференция «Газоразрядная плазма и ее применение» (г. Новосибирск, 2017 г.); Двадцать четвертая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-24 (г. Томск, 2018 г.); VI Международный Крейнделевский семинар «Плазменная эмиссионная электроника» (г. Улан-Удэ, 2018 г.).

**Личный вклад автора.** Все результаты, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, получены автором лично. Автором совместно с Ю.А. Бурачевским сконструирована и собрана экспериментальная установка и макет форвакуумного источника электронов. Автором лично определены задачи, решаемые в работе, выбраны методики эксперимента и произведен анализ полученных в ходе экспериментов результатов. В постановке отдельных задач исследований и обсуждении результатов анализа экспериментальных данных активное участие принимали научный руководитель Е.М. Окс, а также В.А. Бурдовицин и А.С. Климов. Все эксперименты проводились автором самостоятельно. Автором самостоятельно разработаны модели, представленные в работе, и на их основе произведены расчеты. Автором самостоятельно были выдвинуты защищаемые научные положения, сделаны выводы и составлены рекомендации, на основании которых произведена модернизация конструкции форвакуумного источника сфокусированного непрерывного пучка, применяемого для обработки диэлектрических материалов.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 130 страниц машинописного текста, содержащего 111 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 108 источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**Первая глава** *“Генерация сфокусированных электронных пучков источниками с плазменными эмиттерами”* носит обзорный характер и посвящена анализу известных из литературы сведений об особенностях формирования электронных пучков малого сечения источниками, принцип работы которых основан на отборе электронов из плазмы тлеющего разряда с полым катодом. В главе рассмотрены способы повышения плотности эмиссионной плазмы в источниках электронов на основе разряда с полым катодом различных конфигураций, нацеленные на повышение эмиссионного тока в плазменных источниках с одиночным эмиссионным каналом. Рассмотрены особенности магнитной фокусировки электронного пучка, проявляющиеся при эмиссии электронов с подвижной плазменной границы в источниках, функционирующих в условиях среднего и высокого вакуума. Приведены последние достижения в области получения сфокусированных электронных пучков, генерируемых форвакуумными плазменными источниками электронов, в том числе, сформулированы условия, ограничивающие процессы эффективной фокусировки пучка в области повышенных давлений. Отмечено, что на момент начала выполнения настоящей диссертационной работы максимальная плотность мощности электронного пучка и минимальный диаметр сфокусированного пучка составляли  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup> и 0,6 мм соответственно. Представлены результаты применения сфокусированных электронных пучков, генерируемых форвакуумными плазменными источниками для обработки непроводящих высокотемпературных диэлектриков в таких технологических операциях как плавка, сварка, резка керамики, а также пайка керамики с металлом. Показано, что повышение удельной плотности мощности электронного пучка форвакуумных плазменных источников до уровня  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, позволило бы применять такие устройства для более широкого круга технологических задач. В заключение главы сформулированы задачи исследований.

**Вторая глава** *“Техника и методика эксперимента”* посвящена описанию экспериментальных методик и оборудования, используемых для генерации и исследования электронных пучков в форвакуумной области давлений. Описан экспериментальный макет плазменного эмиттера электронов на основе разряда с полым катодом с одиночным эмиссионным каналом, специально созданный для генерации непрерывных сфокусированных электронных пучков в форвакуумной области давлений (Рис. 1). Представлено описание оборудования, созданного для диагностики параметров плазмы (концентрации  $n$  и температуры  $T_e$ ) в полем катоде форвакуумного источника и таких параметров электронного

пучка, как ток пучка  $I_b$  и диаметр поперечного сечения  $d_b$ . Описаны процедуры измерения и обработки профиля поперечного сечения электронного пучка и зондового сигнала.

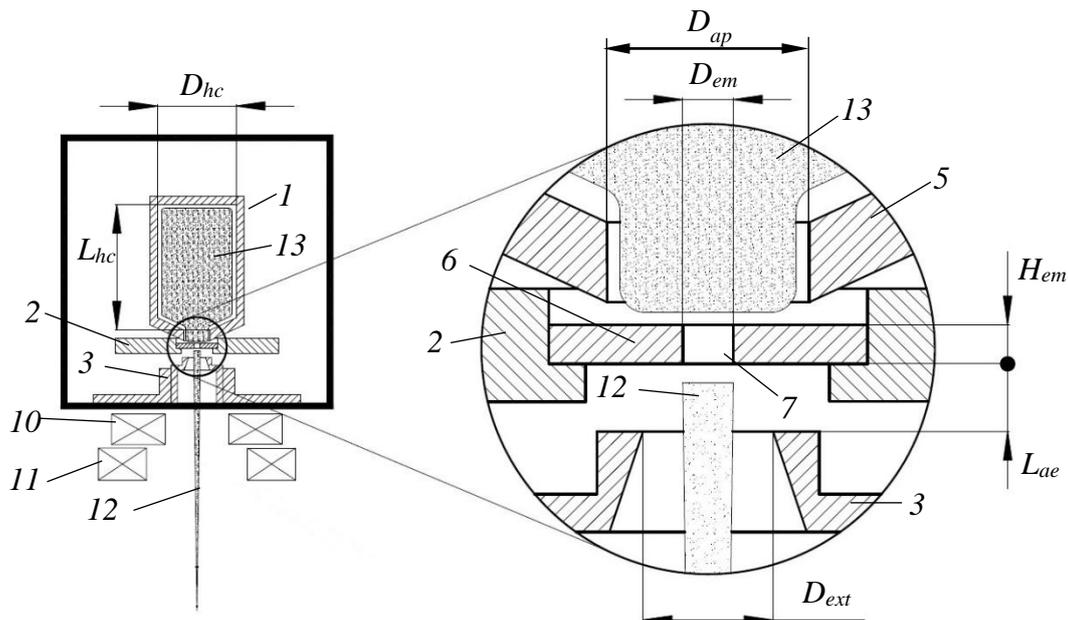


Рисунок 1 – Схема форвакуумного плазменного источника электронов: 1 – полый катод; 2 – плоский анод; 3 – экстрактор; 5 – сменная вставка в катод; 6 – танталовый эмиссионный электрод; 7 – эмиссионный канал; 10 – одиночная магнитная линза; 11 – отклоняющая магнитная система; 12 – электронный пучок; 13 – газоразрядная плазма

В третьей главе “*Эмиссия и формирование электронных пучков, генерируемых форвакуумным плазменным источником*” представлены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования процессов эмиссии и магнитной фокусировки электронных пучков, генерируемых плазменными источниками с одиночным и множеством эмиссионных каналов в форвакуумной области давлений. Поставленная в диссертационной работе цель, заключающаяся в повышении удельных параметров сфокусированного электронного пучка, решалась повышением плотности эмиссионной плазмы на оси разрядной системы и улучшением условий магнитной фокусировки ускоренного электронного пучка в результате оптимизации основных функциональных узлов источника (эмиссионного канала, узла ускорения электронного пучка, конфигурации магнитной фокусирующей системы).

Показано, что в случае отбора электронов из плазмы тлеющего разряда с полым катодом через одиночный эмиссионный канал в результате оптимизации геометрии катодной полости (рис. 2) плотность тока эмиссии электронов достигает рекордной для форвакуумных источников величины  $10 \text{ А/см}^2$  (рис. 3).

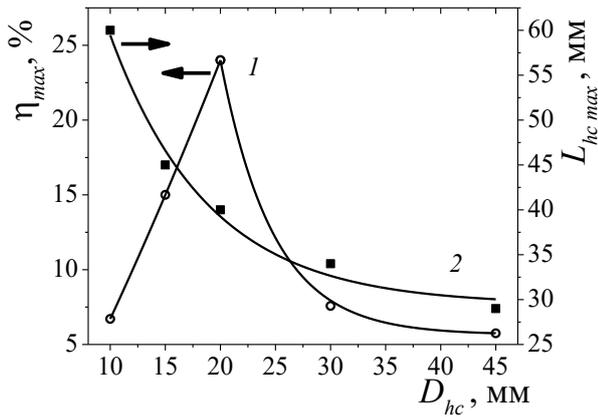


Рисунок 2 – Зависимости максимальной эффективности извлечения электронов  $\eta_{max}$  и протяженности катодной полости  $L_{hc\ max}$ , при которой обеспечивается  $\eta_{max}$ , от диаметра катодной полости  $D_{hc}$  (давление рабочего газа  $p = 30$  Па, ускоряющее напряжение  $U_a = 20$  кВ, размеры эмиссионного канала  $D_{em} = 1$  мм и  $H_{em} = 1$  мм): 1 -  $\eta_{max} = f(D_{hc})$ ; 2 -  $L_{hc\ max} = f(D_{hc})$

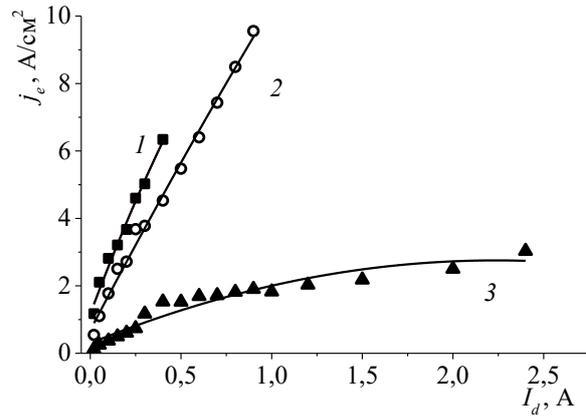


Рисунок 3 – Зависимость плотности эмиссионного тока  $j_e$  от тока разряда  $I_d$  для различных значений диаметра  $D_{hc}$  и протяженности  $H_{hc}$  полого катода при диаметре эмиссионного канала  $D_{em} = 1.5$  мм (давление рабочего газа  $p = 30$  Па, ускоряющее напряжение  $U_a = 20$  кВ): 1 -  $D_{hc} = 20$  мм,  $L_{hc} = 50$  мм; 2 -  $D_{hc} = 20$  мм,  $L_{hc} = 40$  мм; 3 -  $D_{hc} = 45$  мм,  $L_{hc} = 120$  мм

Обнаружено, что плотность эмиссионного тока  $j_{em}$ , а, следовательно, и плотность тока сфокусированного пучка на коллекторе  $j_b$ , рассчитываемая исходя из измеренных значений тока пучка  $I_b$  и его диаметра  $d_b$ , монотонно растет на начальном участке зависимости  $j_b$  от отношения диаметра эмиссионного канала  $D_{em}$  к его длине  $H_{em}$  (рис. 4). Однако, при дальнейшем увеличении  $(D_{em}/H_{em})$  зависимость  $j_b(D_{em}/H_{em})$  оказывается немонотонной. Для каждой длины эмиссионного канала  $H_{em}$  после превышения определенного значения диаметра канала  $D_{em}$  наблюдается значительный рост диаметра электронного пучка  $d_b$  приводящий к падению плотности тока пучка  $j_b$  (рис. 4 правая ветвь). При этом по мере уменьшения  $H_{em}$  максимальное значение плотности тока пучка  $j_b$  растет, а максимум зависимости  $j_b(D_{em}/H_{em})$  смещается в сторону больших значений  $(D_{em}/H_{em})$  (рис. 4).

Также установлено, что существенное увеличение плотности тока пучка  $j_b$  обеспечивается оптимизацией геометрии ускоряющего промежутка, которая заключается в сокращении протяженности ускоряющего промежутка  $L_{ae}$  и уменьшении диаметра отверстия  $D_{ext}$  в экстракторе (рис. 5).

Проведенная оптимизация геометрии ускоряющего промежутка также обеспечила снижение тока «паразитного» высоковольтного тлеющего разряда, возникающего в ускоряющем промежутке и пространстве дрейфа электронного пучка и влияющего на электрическую прочность ускоряющего промежутка источника электронов. Вызванное этим повышение электрической прочности ускоряющего промежутка способствовало увеличению ускоряющего напряжения до  $U_a = 30$  кВ, что наряду с одновременной оптимизацией геометрии функ-

циональных узлов форвакуумного источника позволило повысить плотность мощности острогофокусированного электронного пучка, генерируемого форвакуумным источником при эмиссии из одиночного канала, вплоть до  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> (рис. 6).

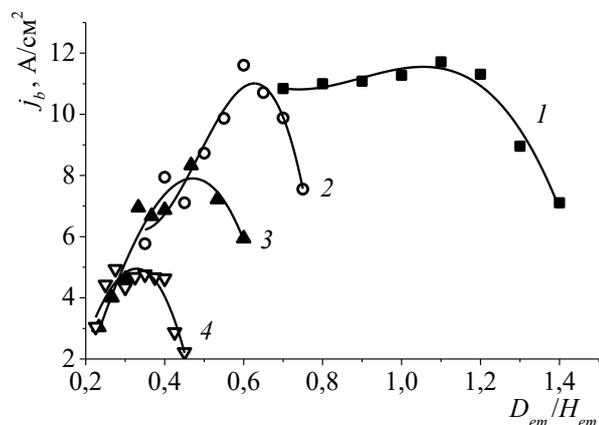


Рисунок 4 – Зависимости тока пучка на коллекторе  $j_b$  от отношения размеров эмиссионного канала  $D_{em} / H_{em}$  для различных протяженностей эмиссионного канала  $H_{em}$  (ускоряющее напряжение  $U_a = 20$  кВ, ток разряда  $I_d = 1,5$  А; давление  $p = 30$  Па): 1 –  $H_{em} = 1$  мм; 2 –  $H_{em} = 2$  мм; 3 –  $H_{em} = 3$  мм; 4 –  $H_{em} = 4$  мм

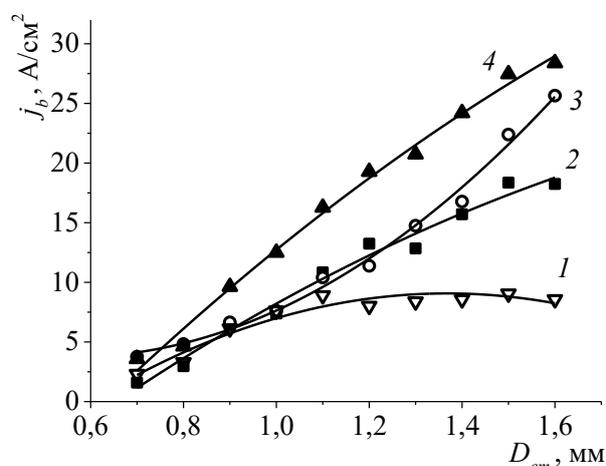


Рисунок 5 – Зависимости плотности тока электронного пучка  $j_b$  от диаметра эмиссионного канала  $D_{em}$  для различных протяженностей ускоряющего промежутка  $L_{ae}$  и значений диаметра отверстия в экстракторе  $D_{ext}$  (давление  $p = 30$  Па; протяженность эмиссионного канала  $H_{em} = 2$  мм; ускоряющее напряжение  $U_a = 30$  кВ; ток разряда  $I_d = 2,4$  А): 1 –  $L_{ae} = 13$  мм,  $D_{ext} = 15$  мм; 2 –  $L_{ae} = 7$  мм,  $D_{ext} = 15$  мм; 3 –  $L_{ae} = 7$  мм,  $D_{ext} = 8$  мм; 4 –  $L_{ae} = 7$  мм,  $D_{ext} = 4$  мм

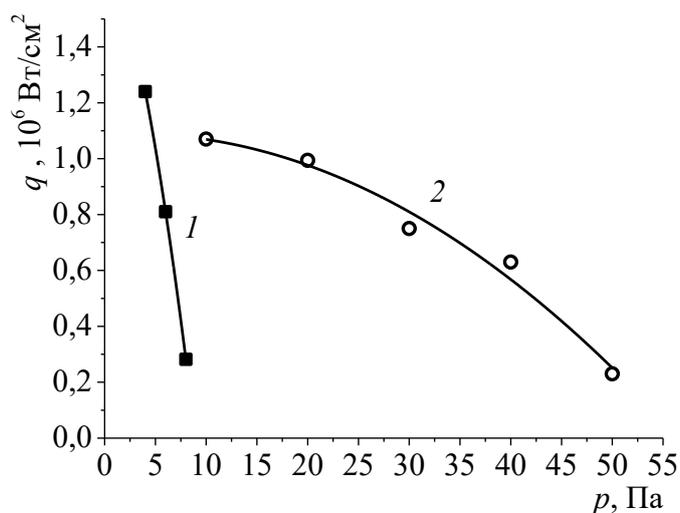


Рисунок 6 – Зависимости максимальной плотности мощности  $q$  электронного пучка от давления  $p$  газа (протяженность эмиссионного канала  $H_{em} = 2$  мм; ускоряющее напряжение  $U_a = 30$  кВ; ток разряда  $I_d = 2,4$  А): 1 – воздух; 2 – гелий

Обнаружено, что максимальная плотность мощности пучка монотонно падает при увеличении давления рабочего газа (рис. 6). При этом крутизна зависимости  $q(p)$  определяется родом газа и минимальна для гелия.

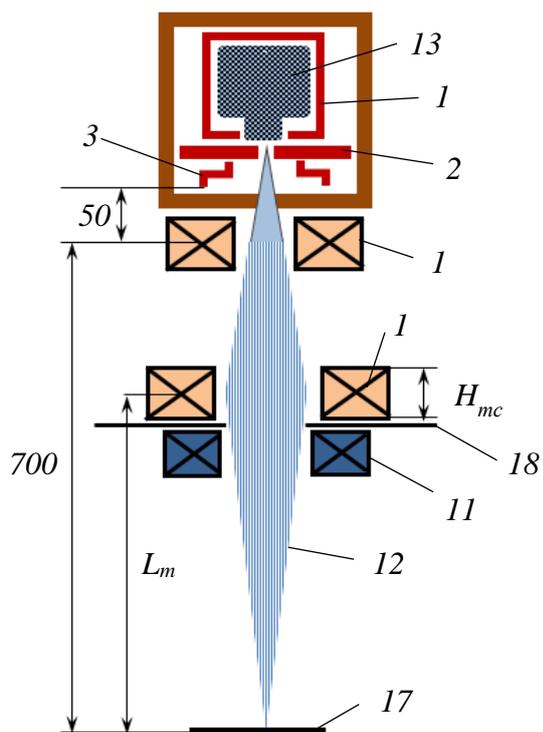


Рисунок 7 – Схема форвакуумного источника электронов с двойной фокусирующей системой: 1 – полый катод; 2 – плоский анод; 3 – экстрактор; 11 – отклоняющая магнитная система; 12 – электронный пучок; 13 – газоразрядная плазма; 15 – дополнительная фокусирующая катушка; 16 – основная фокусирующая катушка; 17 – плоскость коллектора; 18 – магнитный экран

различных режимов генерации пучка (рис. 9). При малом диаметре эмиссионного канала (рис. 9 кр. 1) обеспечивается минимальный диаметр электронного пучка  $d_b = 0,15$  мм при относительно небольшой его плотности мощности  $q = 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>; при наибольшем диаметре канала (рис. 9 кр. 3) достигается максимальная плотность мощности электронного пучка  $q = 1,3 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, но минимальный диаметр пучка повышается до  $d_b = 0,4$  мм.

Установлено, что использование двойной магнитной фокусирующей системы позволяет производить эффективную фокусировку электронного пучка, сформированного при отборе электронов из плазмы через несколько эмиссионных каналов, близко расположенных друг к другу (рис. 10). Целесообразность использования многоканальной эмиссионной системы обусловлена стремлением повысить эффективность извлечения электронов, поскольку увеличение диаметра одиночного канала ограничено условиями слоевой стабилизации плазменной границы. Так при использовании пяти

Установлено, что использование двойной магнитной фокусирующей системы (рис. 7) приводит к улучшению условий фокусировки электронного пучка по сравнению со случаем, когда фокусировка производится лишь одной катушкой, расположенной непосредственно на выходе электронного пучка из источника. Об этом свидетельствует тот факт, что по мере уменьшения индукции магнитного поля  $B_{ac}$  дополнительной фокусирующей катушки, и соответствующем увеличении индукции магнитного поля основной фокусирующей катушки, необходимого для сохранения положения фокальной плоскости, диаметр пучка  $d_b$  монотонно уменьшается (рис. 8). При этом наилучшая фокусировка обеспечивается при использовании основной фокусирующей катушки в броне наименьшей высоты  $H_{mc}$ , расположенной как можно ближе к плоскости коллектора. В зависимости от условий эмиссии электронов из плазмы, определяемых соотношением между толщиной приэлектродного слоя и диаметром эмиссионного канала, возможна реализация

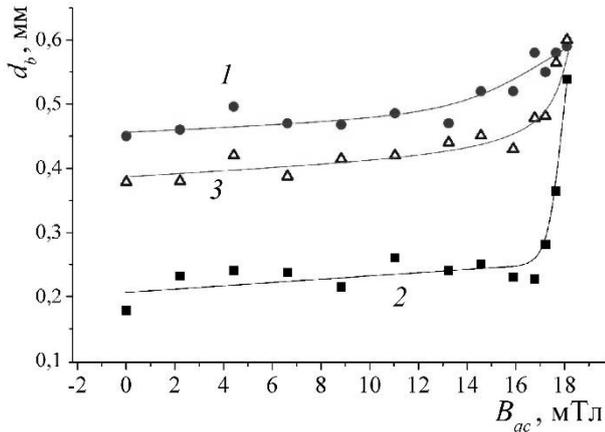


Рисунок 8 – Зависимость диаметра пучка  $d_b$  от индукции  $B_{ac}$  магнитного поля дополнительной фокусирующей катушки для различных положений основной фокусирующей катушки ( $L_{mc}$ ) и высоты основной катушки ( $H_{mc}$ ) (диаметр эмиссионного канала  $D_{em} = 1$  мм; протяженность эмиссионного канала  $H_{em} = 2$  мм; ускоряющее напряжение  $U_a = 30$  кВ; давление рабочего газа  $p = 30$  Па): 1 –  $L_{mc} = 500$  мм;  $H_{mc} = 30$  мм; 2 –  $L_{mc} = 250$  мм;  $H_{mc} = 30$  мм; 3 –  $L_{mc} = 250$  мм;  $H_{mc} = 120$  мм



Рисунок 10 – Изображение электронного пучка, формируемого из пяти индивидуальных эмиссионных каналов и фокусируемого двойной фокусирующей системой

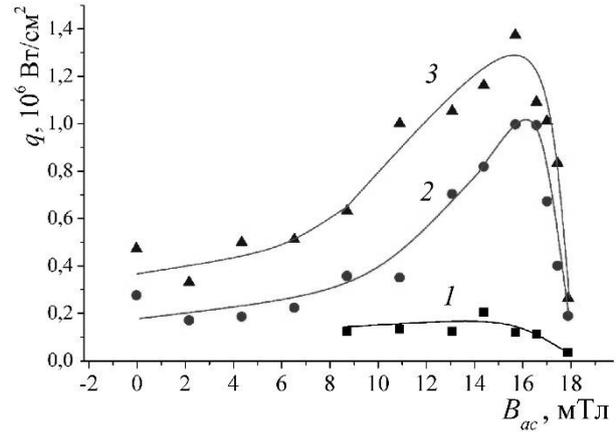


Рисунок 9 – Зависимость плотности мощности пучка  $q$  от индукции  $B_{ac}$  магнитного поля дополнительной фокусирующей катушки для различных диаметров эмиссионного канала  $D_{em}$  (расстояние основная катушка-коллектор  $L_{mc} = 250$  мм; толщина основной катушки  $H_{mc} = 30$  мм; ускоряющее напряжение  $U_a = 30$  кВ; давление рабочего газа  $p = 30$  Па): 1 –  $D_{em} = 0,6$  мм; 2 –  $D_{em} = 1,0$  мм; 3 –  $D_{em} = 1,5$  мм.

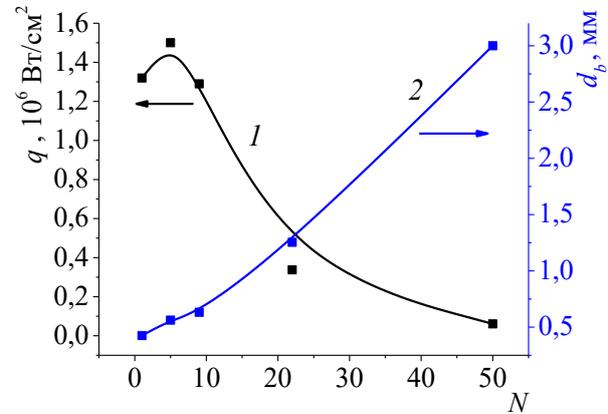


Рисунок 11 – Зависимость плотности мощности пучка  $q$  и диаметра пучка  $d_b$  от количества  $N$  эмиссионных каналов ( $H_{mc} = 30$  мм;  $L_{mc} = 250$  мм,  $D_{em} = 1,5$  мм,  $B_{ac} = 15,5$  мТл,  $B_{mc} = 10$  мТл)

эмиссионных каналов эффективность извлечения электронов достигает 24 %, в то время как она не превышает 12 % для систем с одиночным каналом. Диаметр сфокусированного пучка  $d_b$  возрастает по мере увеличения количества каналов  $N$  (рис. 11 кр. 2), что преимущественно обусловлено необходимостью соответствующего увеличения диаметра отверстия в экстракторе. Именно поэтому, с

увеличением количества элементарных эмиссионных каналов плотность мощности электронного пучка сначала повышается до  $q = 1,5 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> при  $N=5$ , а затем при дальнейшем увеличении  $N$  резко снижается (рис. 11 кр.1).

Таким образом, несмотря на увеличение диаметра электронного пучка при использовании многоканальной эмиссионной системы, плотность мощности пучка для одиночного или нескольких эмиссионных каналов достигает рекордной для форвакуумных плазменных источников электронов величины уровня  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>.

**В четвертой главе “Форвакуумный плазменный источник сфокусированного электронного пучка”** описаны конструктивные особенности модернизированного на основании проведенных исследований форвакуумного плазменного источника сфокусированных пучков электронов, представлены его параметры и характеристики, а также приведены примеры возможных применений источника электронов такого типа.

Конструкция и внешний вид форвакуумного плазменного источника электронов с двойной фокусирующей системой, предназначенного для генерации сфокусированных непрерывных пучков, представлены на рис. 12. Модернизация конструкции форвакуумного плазменного источника сфокусированного электронного пучка осуществлялась, главным образом, с целью повышения плотности мощности пучка и уменьшения его диаметра, обеспечивающих возможность реализации ряда принципиально новых применений. Изменения в конструкции заключались в оптимизации ключевых размеров всех основных узлов форвакуумного источника, определенных в результате исследований, представленных в третьей главе. Рабочие параметры модернизированного источника представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Рабочие параметры форвакуумного плазменного источника сфокусированного электронного пучка

Напряжение разряда	300-500 В		
Ток разряда	До 1 А		
Ускоряющее напряжение	До 30 кВ		
Рабочее давление	Гелий: 10-50 Па	Воздух: 4-8 Па	
Электропитание фокусирующих катушек	Постоянный ток до 0,5 А напряжением до 50 В		
Электропитание отклоняющей магнитной системы	Управляющий сигнал током до 1 А и напряжением до 10 В с максимальной скоростью изменения сигнала 10 А/с.		
Параметры электронного пучка при диаметре канала $D_{em} = 1,5$ мм	Ток пучка до 55 мА (Эффективность извлечения до 25 %)	Диаметр пучка 0,4 мм и более	Плотность мощности до $1,3 \cdot 10^6$ Вт/см <sup>2</sup>

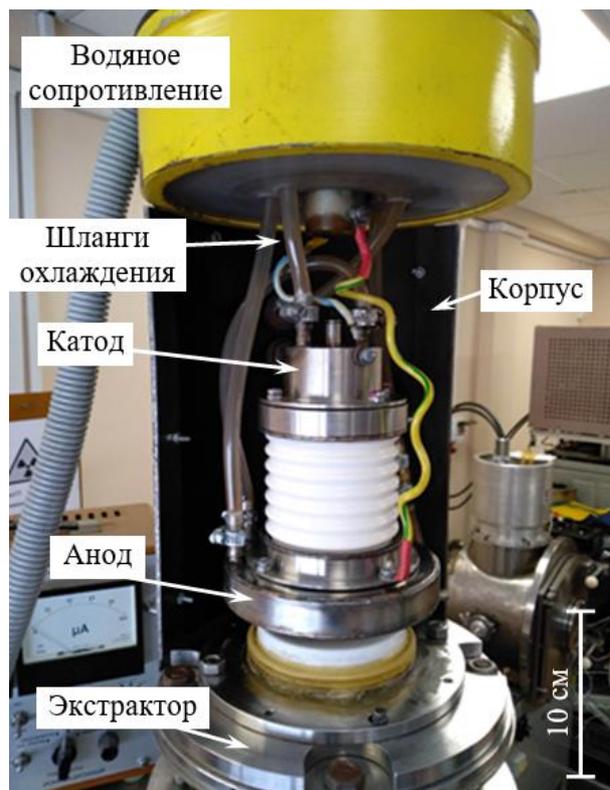
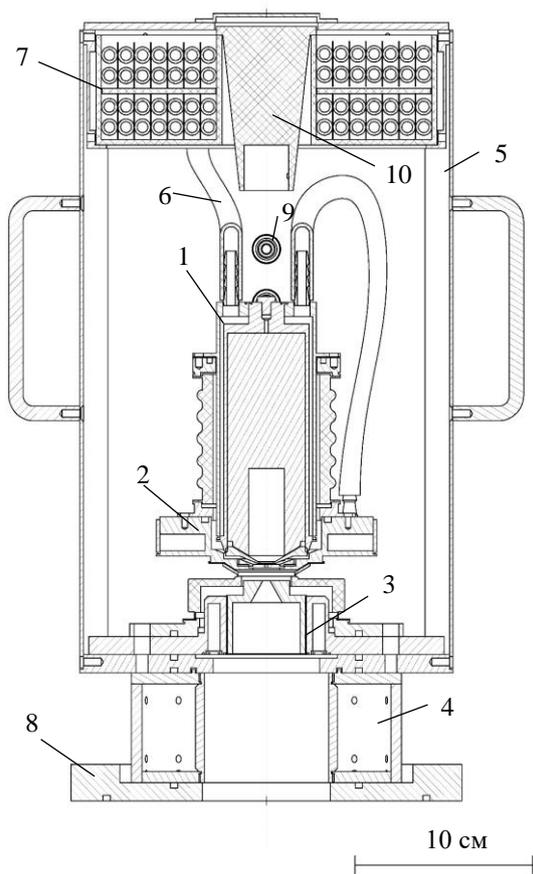


Рисунок 12 – Форвакуумный плазменный источник сфокусированного непрерывного пучка электронов: 1 – катод; 2 – анод; 3 – экстрактор; 4 – корпус фокусирующей катушки; 5 – защитный корпус; 6 – шланги водяного охлаждения, 7 – водяное сопротивление; 8 – фланец-основание; 9 – штуцеры для подключения водяного охлаждения; 10 – изолятор, предназначенный для подключения кабелей электропитания

Достигнутые значения плотности мощности электронного пучка обусловили возможность использования источника электронов для прецизионной электронно-лучевой обработки (плавки, сварки, размерной обработки) непроводящих материалов: кварцевого стекла и керамики. Плотность мощности пучка порядка  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> обеспечивает эффективную резку отверстий в кварцевом стекле глубиной вплоть до нескольких сантиметров (рис. 13). В это же время применение форвакуумного плазменного источника электронов с автоматизированной системой развертки пучка позволяет производить фрезеровку высокотемпературных диэлектриков по сложному контуру (рис. 13).

Показана возможность использования сфокусированного электронного пучка для послойного селективного спекания керамического порошка и, таким образом, создания объемных керамических деталей сложной формы. Полученные результаты свидетельствуют о прочном спекании слоев керамического порошка на основе  $Al_2O_3$  с подложкой (рис. 14). При этом, несмотря на пористую структуру керамики, прочностные механические свойства спеченных образцов являются достаточными для ряда технологических применений.

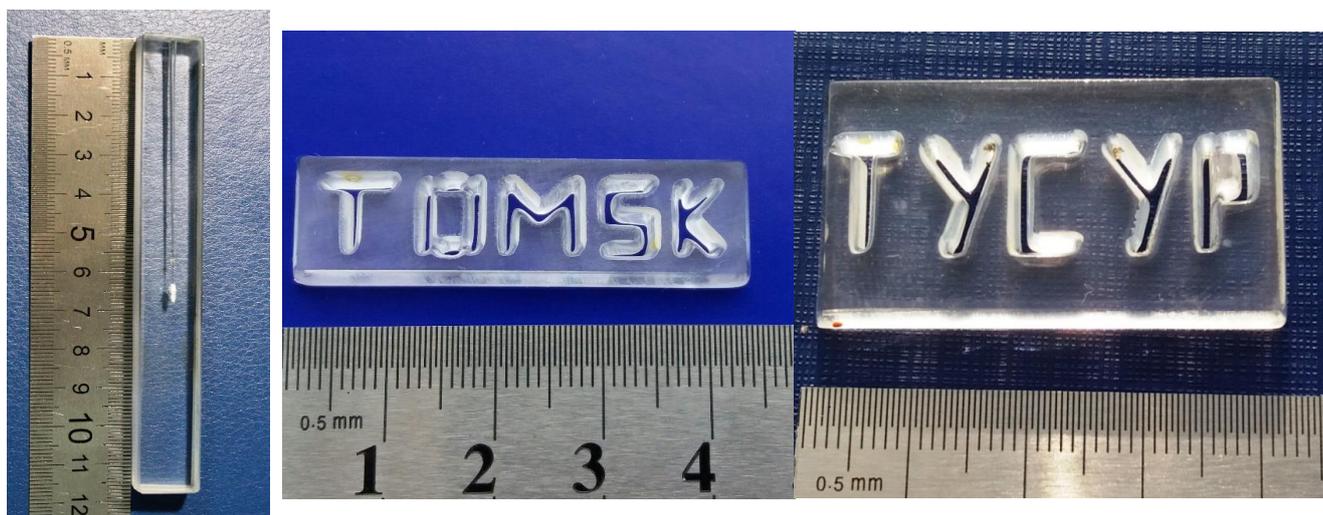


Рисунок 13 – Примеры электронно-лучевой резки на большую глубину (слева) и электронно-лучевой фрезеровки кварцевого стекла по сложному контуру

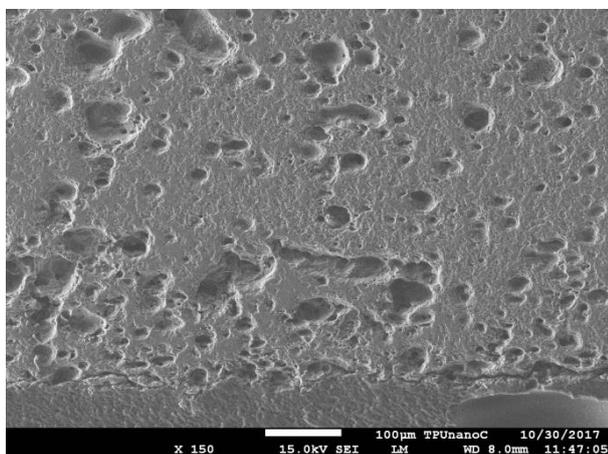


Рисунок 14 – Изображение структуры среза первого (нижнего) слоя спеченного порошка  $Al_2O_3$  на подложке

протяженной катодной полости электродом с относительно малым отверстием, с другой – оптимизацией геометрии катодной полости. При достигаемой в этом случае максимальной плотности эмиссионной плазмы и сохранении условий стабильного инициирования и горения разряда с полым катодом отбор электронов из плазмы через одиночный эмиссионный канал обеспечивает плотность тока эмиссии до  $10 \text{ A/cm}^2$ .

2. Повышение плотности мощности электронного пучка, генерируемого форвакуумным плазменным источником электронов с магнитной фокусировкой, обеспечивается повышением ускоряющего напряжения до 30 кВ с одновременной оптимизацией функциональных узлов источника. Оптимизация размеров эмиссионного канала, геометрии ускоряющего промежутка и фокусирующей системы, направленная на улучшение условий магнитной фокусировки, позволила значительно уменьшить диаметр электронного пучка и повысить плотность мощности пучка в кроссовере. В зависимости от условий эмиссии электронов из плазмы, определяемых соотношением между толщиной приэлек-

**В заключении** изложены основные результаты работы, заключающиеся в следующем:

1. В форвакуумном плазменном источнике электронов на основе разряда с полым катодом, функционирующем в изобарическом режиме работы, повышение плотности эмиссионной плазмы на оси разрядной системы обеспечивается одновременным выполнением двух условий. С одной стороны, повышение плотности плазмы достигается сжатием положительного столба разряда в результате перекрытия торца

тродного слоя и диаметра эмиссионного канала, возможна реализация двух различных режимов генерации пучка. В первом режиме обеспечивается минимальный диаметр электронного пучка  $d_b = 0,13$  мм при относительно небольшой его плотности мощности  $q = 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>; во втором достигается максимальная плотность мощности электронного пучка  $q = 1,3 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, но минимальный диаметр пучка повышается до  $d_b = 0,4$  мм.

3. В форвакуумном плазменном источнике электронов наименьший диаметр электронного пучка обеспечивается при отборе электронов через одиночный эмиссионный канал. Поскольку увеличение диаметра одиночного канала, в конечном счете, ограничено условиями слоевой стабилизации плазменной границы, то дальнейшее повышение тока пучка возможно при увеличении в источнике количества эмиссионных каналов. Несмотря на увеличение диаметра электронного пучка при использовании нескольких эмиссионных каналов, как для одиночного, так и для нескольких каналов возможна реализация условий, при которых обеспечивается рекордная для форвакуумных источников электронов плотность мощности уровня  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>.

4. Создан опытный образец форвакуумного плазменного источника с двойной фокусирующей системой, допускающей эффективную фокусировку электронного пучка в результате уменьшения сферических aberrаций. Электронный источник обеспечивает генерацию непрерывного сфокусированного электронного пучка с энергией электронов до 30 кВ и плотностью мощности пучка  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>.

5. Продемонстрирована возможность применения форвакуумного источника с достигнутыми в настоящей работе параметрами для перфорации и фрезерования таких высокотемпературных диэлектриков, как кварцевое стекло и керамика. Параметры электронного пучка и время электронно-лучевой обработки позволяют в широких пределах управлять размерами создаваемых в диэлектрике отверстий. При этом максимальная глубина, на которую осуществляется резка диэлектрика, растет при увеличении плотности мощности пучка и может достигать нескольких сантиметров.

6. Продемонстрирована принципиальная возможность послойного электронно-лучевого спекания керамического порошка в форвакуумной области давлений, что может использоваться для послойного синтеза керамических изделий сложной формы. Перспективность использования для послойного синтеза керамики форвакуумного источника связана с тем, что процесс построения изделия происходит одновременно со спеканием керамического порошка до конечного состояния, что исключает необходимость постобработки изделия в печи для отжига.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. О возможности прецизионной электронно-лучевой обработки протяженных диэлектрических изделий плазменным источником электронов в форвакууме / И.Ю. Бакеев, А.А. Зенин, А.С. Климов, Е.М. Окс // Прикладная физика. – 2017. - №3. – С. 26-30.
2. О распределении тепловых полей при электронно-лучевой обработке кварцевого стекла плазменным источником электронов / И.Ю. Бакеев, А.А. Зенин, А.С. Климов, Е.М. Окс // Прикладная физика. – 2018. – Т.21, № 2.
3. Generation of high power density electron beams by a forevacuum-pressure plasma-cathode electron source / I. Bakeev, A. Klimov, E. Oks, A. Zenin // Plasma Sources Science and Technology. – 2018. – Vol. 27. – Issue 7. –P. 075002.
4. Double-coil magnetic focusing of the electron beam generated by a plasma-cathode electron source / I.Yu. Bakeev, A.S. Klimov, E.M. Oks, A.A. Zenin // Rev. Sci. Instrum. – 2019. – Vol. 90. – P. 023302.
5. Forevacuum plasma source of continuous electron beam / A.S. Klimov, I.Yu. Bakeev, E.M. Oks, A.A. Zenin // Laser and Particle Beams. – 2019. (<https://doi.org/10.1017/S0263034619000375>)
6. Composition of the gas atmosphere during the electron beam interaction with the alumina powder in the forevacuum pressure range / I.Yu. Bakeev, A.A. Zenin, Tyun'kov A.V., A.S. Klimov // Доклады ТУСУРа. – 2016 – Том 19, № 4. – С. 13-16.
7. Бакеев И. Ю. Влияние формы ускоряющего электрода в форвакуумном плазменном источнике на предельные параметры фокусировки электронного пучка / И. Ю. Бакеев, А. С. Климов // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 47–50.

### Статьи в сборниках, индексируемых в базах Scopus и Web of Science:

8. The possibilities of dimensional electron-beam processing as applied to selective sintering of oxide ceramics in the forevacuum pressure range / I.Yu. Bakeev, E.S. Dvilis, A.S. Klimov, E.M. Oks, A.A. Zenin // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2017. – No. 945. – P. 012016
9. Generation of an electron beam by the forevacuum plasma source with a single emission channel / I.Yu. Bakeev, A.S. Klimov, E.M. Oks, A.A. Zenin // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – No. 1115. – P. 032001
10. Narrow-aperture electron beam in the forevacuum pressure range as a tool for dimensional processing of silica glass / A. Zenin, A. Klimov, I. Bakeev // MATEC Web of Conferences. – 2018. – No. 143. – P. 03006
11. Electron-beam synthesis of graded metal-ceramic materials in the forevacuum pressure range / A.S. Klimov, I.Yu. Bakeev, A.A. Zenin // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – No. 1115. – P. 032037
12. Forevacuum Plasma Electron Source for Dielectric Surface Treatment / A.Zenin, I. Bakeev, Y. Burachevsky, A. Klimov, E. Oks, Y. Yushkov //2018 20th International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE). – IEEE, 2018. – С. 43-45.

### **Статьи в сборниках трудов конференций, индексируемых в РИНЦ:**

13. Bakeev I.Yu. Electron-beam Sintering in the Forevacuum Pressure Range of Zirconia and Alumina Powders without Pressing // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XII Международной научно-практической конференции (16–18 ноября 2016 г.): в 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2016. – С. 206-208.

14. Бакеев И.Ю. Фокусировка электронного пучка, генерируемого плазменным источником в форвакуумной области давлений / И.Ю. Бакеев, А.А. Зенин // Современные проблемы физики и технологий. VI-я Международная молодежная научная школа-конференция (21 апреля 2017 г.): Тезисы докладов. Часть 1. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. – С. 296А-296Б.

15. Бакеев И.Ю. Применение двойной фокусирующей катушки для получения остросфокусированного пучка электронов в диапазоне давлений 10-30 Па / И.Ю. Бакеев, А.А. Зенин // Прогрессивные технологии и процессы: Сборник научных статей 4-й Международной молодежной научно-технической конференции (21-22 сентября 2017 г.). – Курск: Из-во «Университетская книга», 2017. – С. 21-25.

16. Бакеев И.Ю. Влияние формы катодной полости на эффективность извлечения электронного пучка через одиночный эмиссионный канал в форвакуумной области давлений // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 16–18 мая 2018 г.: в 3 частях. – Томск: В-Спектр, 2018 – Ч. 2. – С.79-82.

17. Ким В.С. Параметры электронного пучка, генерируемого через одиночный эмиссионный канал плазменного источника в форвакуумной области давлений / В.С. Ким, И.Ю. Бакеев // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 16–18 мая 2018 г.: в 3 частях. – Томск: В-Спектр, 2018 – Ч. 2. – С.82-85.

### **Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:**

18. Патент РФ на изобретение № 2627796 «Способ послойного электронно-лучевого спекания изделий из керамического порошка», Бакеев И.Ю., Бурачевский Ю.А., Бурдовицин В.А., Зенин А.А., Климов А.С., Окс Е.М., 2017.

19. Патент РФ на полезную модель № 183652 «Приспособление для электронно-лучевой сварки труб из стекла», Бакеев И.Ю., Бурдовицин В.А., Зенин А.А., Климов А.С., Окс Е.М., Фролова В.П., 2018.

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615917 «Определение параметров плазмы по зондовой характеристике», Бакеев И.Ю., Климов А.С., Андрейчик А.П., Зенин А.А., 2016.

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017661102 «Расчет диаметра электронного пучка по осциллограмме», Бакеев И.Ю., Зенин А.А., Медовник А.В., 2017.

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661019 «Расчет распространения плазмы в эмиссионном канале форвакуумного источника электронов», Климов А.С., Бакеев И.Ю., Юшков Ю.Г., 2018.