

На правах рукописи



Дагри Эброем Жозель-Эрик

**ФОРВАКУУМНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК
НЕПРЕРЫВНОГО ЛЕНТОЧНОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ
С РАСШИРЕННЫМ ДИАПАЗОНОМ РАБОЧИХ ДАВЛЕНИЙ**

1.3.5 – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Томск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР).

Научный
руководитель: **Климов Александр Сергеевич** доктор технических наук, доцент, профессор кафедры физики ФГАОУ ВО Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск.

Официальные
оппоненты: **Каменецких Александр Сергеевич**
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории пучков частиц ФГБУН Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Амиров Владислав Харисович

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-конструкторского отдела ФГБУН Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Ведущая
организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Защита состоится 16 сентября 2026 г. в 17 ч 00 мин на заседании диссертационного совета 24.2.415.03 на базе Федерального государственного автономного 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 автономного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146, а также на официальном сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/80o4b4ld>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.В. Казаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Плазменные методы обработки находят широкое применение в различных отраслях современной промышленности – от микроэлектроники и медицины до сельского хозяйства для очистки и травления различных материалов, азотирования, стерилизации и обеззараживания поверхности полых изделий и листовых материалов, семян и продуктов питания и т.д. Формирование плазмы обычно осуществляется с помощью разрядов различных частотных диапазонов, а также посредством ионизации нейтрального газа потоком ускоренных электронов, что приводит к образованию так называемой «пучковой плазмы». Характеристики такой плазмы во многом зависят от плотности тока пучка, давления и типа газа, находящегося в вакуумной камере. Даже при относительно низкой плотности пучка (менее 10 мА/см^2) при давлении газа более 1 Па плотность формируемой пучковой плазмы оказывается на порядки выше плотности электронов самого пучка, что может быть с успехом использовано для контролируемого формирования плотной плазмы. При понижении давления до 0,01 Па и плотности тока пучка более 100 мА/см^2 формируются условия для коллективного взаимодействия электронов пучка с создаваемой им плазмой с образованием пучковой неустойчивости и зажиганием пучково-плазменного разряда (ППР). Рост параметров плазмы в несколько раз делает такой разряд привлекательным для использования в плазмохимических реакциях, однако требует соблюдения специфических условий для устойчивого поддержания плазмы ППР. В любом случае пучковая плазма обладает низкими значениями температуры электронов и потенциалом плазмы, что позволяет использовать ее в качестве источника низкоэнергетических ионов с возможностью регулирования их энергии в широком диапазоне значений. А использование для технологических целей источников большого сечения позволяет создавать пучковую плазму с площадью поверхности в несколько квадратных метров.

Диапазон давлений менее 0,01 Па успешно освоен так называемыми традиционными источниками широкоапертурных электронных и ионных пучков и плотность формируемой плазмы при таких давлениях может превышать 10^{18} м^{-3} . Форвакуумная область давлений 1-5 Па освоена форвакуумными плазменными ленточными электронными источниками. Концентрация пучковой плазмы, достигаемая в этой области давлений, составляет порядка 10^{16} - 10^{17} м^{-3} в зависимости от типа используемого для ее генерации электронного пучка – непрерывного либо импульсного. В тоже время пограничная область 0,1-1 Па наиболее привлекательна для плазмохимических технологий микро- и нанoeлектроники и в ней возможны как режимы формирования ППР, так и пучковой плазмы с высокой концентрацией и относительно низкой температурой электронов плазмы.

Переход форвакуумных плазменных источников ленточных электронных пучков в область пониженных давлений представляется более естественным, поскольку задача обеспечения электрической прочности ускоряющего промежутка таких источников в полной мере решена для области бо-

лее высоких давлений, где процессы ионизации газа в области ускорения электронов играют критическую роль. В тоже время переход в область давлений 0,1–1 Па для форвакуумных источников требует обеспечения условий стабильного зажигания и горения разряда с полым катодом. Решение этой проблемы за счет создания перепада давлений на протяженной эмиссионной щели источника не представляется возможным, однако видится в использовании в электродной конфигурации источника систем, обеспечивающих дополнительную инжекцию в разрядный промежуток ускоренных потоков заряженных частиц и плазмы.

Однородность концентрации пучковой плазмы, формируемой ленточными источниками с протяженным полым катодом, определяется, в том числе, и однородностью самого электронного пучка. В форвакуумной области давлений на эту однородность существенное влияние оказывает «обратный» ионный поток. Величина тока ионов, поступающих обратно в полый катод может составлять до 20% от тока электронного пучка и оказывать значительное влияние на процессы ионизации газа в катодной полости, тепловую нагрузку на эмиссионный электрод источника, а также и на величину извлекаемого электронного тока и однородность распределения его плотности. В области давлений 0,1–1 Па влияние обратного ионного потока детально не исследовано, однако требуется для понимания условия формирования однородного электронного пучка.

Цель работы состояла в проведении комплекса исследований, связанных с дальнейшим развитием форвакуумного плазменного источника ленточного пучка электронов и направленных на расширение области его рабочих давлений до 0,1 Па.

Основные задачи настоящей работы заключались в:

- исследовании в области давлений 0,1–10 Па особенностей инициирования тлеющего разряда в двухступенчатой разрядной системе с протяженными цилиндрическими катодами основного и вспомогательного разрядов;
- исследовании влияния эмиссии электронов из плазмы в расширенном диапазоне давлений на формирование ленточного электронного пучка с однородным распределением плотности тока;
- демонстрации возможности применения ленточного электронного пучка, генерируемого форвакуумным плазменным источником, для создания пучковой плазмы в диапазоне давлений 0,1–10 Па и использования ее для плазменной модификации полимеров.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Для тлеющего разряда с протяженным цилиндрическим полым катодом определены условия стабильного инициирования и поддержания разряда в расширенном диапазоне форвакуумной области давлений 0,1–10 Па.
2. Исследованы процессы формирования ускоренного электронного пучка с неоднородностью не более 10% как в области низких (0,1 Па) так и высоких (10 Па) давлений.
3. Определены режимы генерации пучково-плазменного разряда в широкой области давлений работы форвакуумного плазменного электронного

источника. Изучено влияние пучково-плазменной обработки на параметры и поверхностные свойства полимеров.

Научная и практическая значимость работы:

1. Впервые детально исследованы физические механизмы, обеспечивающие стабильное функционирование форвакуумного плазменного источника непрерывного ленточного электронного пучка при снижении рабочего давления до 0,1 Па. Полученные результаты существенно дополняют теоретические представления о процессах, протекающих в разрядной системе данного типа в расширенном диапазоне давлений.

2. Разработан и создан форвакуумный плазменный источник непрерывного ленточного пучка электронов, функционирующий в расширенном диапазоне рабочих давлений 0,1–10 Па обеспечивающий генерацию пучка сечением $20 \times 2 \text{ см}^2$, энергией электронов до 5 кэВ и плотностью тока до 10 мА/см^2 , при ее равномерности 90%.

3. Результаты работы могут быть использованы в электроразрядных устройствах, функционирующих в области пониженных рабочих давлений форвакуумного диапазона (плазменных ионных источниках, генераторах низкотемпературной плазмы).

Методология и методы исследования.

Основной методический подход, используемый при выполнении диссертационной работы, заключается в сочетании экспериментальных исследований с численным моделированием. Для решения поставленных задач были использованы следующие многократно апробированные экспериментальные методики: зондовая и оптическая диагностики параметров плазмы; оптическая микроскопия; растровая электронная микроскопия и энергодисперсионный анализ.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Расширение рабочего диапазона давлений форвакуумного плазменного источника непрерывного ленточного пучка электронов в область пониженных давлений вплоть до 0,1 Па обеспечивается двухступенчатой разрядной системой, состоящей из основного разряда с протяженным полым катодом и установленными на боковых торцах полого катода вспомогательных полукатодных разрядных систем. При функционировании электронного источника в этой области давлений стабильное инициирование и поддержание разряда обеспечивает поток заряженных частиц из вспомогательных разрядных систем.

2. В форвакуумном плазменном источнике непрерывного ленточного пучка электронов в диапазоне давлений 0,1–10 Па нарушение однородности распределения плотности тока пучка вызвано термомеханической деформацией эмиссионного электрода под действием обратного потока ионов, мощность которого возрастает на порядок при повышении давления от 0,1 до 10 Па. Управление тепловыми и деформационными характеристиками эмиссионного электрода путем перехода от сплошной эмиссионной щели к системе с серией отверстий позволяет зафиксировать эмиссионную сетку и снизить неоднородность распределения плотности тока электронного пучка

до 10% при сохранении 85% полного тока пучка.

3. Созданный форвакуумный плазменный источник непрерывного ленточного пучка электронов обеспечивает в расширенном диапазоне рабочих давлений 0,1–10 Па генерацию пучка сечением 20×2 см, энергией электронов до 5 кэВ и плотностью тока до 10 мА/см^2 , при ее равномерности 90%. Достигнутые параметры электронного пучка позволяют использовать данный источник электронов в качестве генератора протяженной однородной пучковой плазмы для модификации поверхностных свойств различных материалов, в плазмохимических процессах и других технологических применениях.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждаются 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 форвакуумного плазменного электронного источника ленточного электронного пучка функционирующего в широком диапазоне давлений для генерации пучковой плазмы и обработки материалов.

Материалы диссертационной работы опубликованы в 5 статьях в российских и международных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. Результаты исследований по диссертационной работе также опубликованы в виде 8 полнотекстовых докладов в сборниках международных и Всероссийских конференций.

Апробация результатов. Результаты работы докладывались и обсуждались на международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применение» (г. Томск, 2023 гг.); VII международном Крейнделевском семинаре «Плазменная эмиссионная электроника» Республика Бурятия (г. Улан-Удэ, 2023 г.), Конгрессе по энергетическим потокам и радиационным эффектам (г. Томск, 2022, 2024 гг.); международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2023-2026 гг.); международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (г. Томск, 2022-2026 гг.); международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (г. Томск, 2022-2025 гг.).

Внедрение результатов работы. Материалы научно-исследовательской работы внедрены в учебный процесс на кафедре физики ТУСУР (г. Томск) в виде курса лекций и практических занятий для подготовки аспирантов по направлению 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи по специализации «Вакуумная и плазменная электроника». Результаты диссертации использованы при выполнении НИР «Генерация ленточных электронных пучков в системах с плазменным катодом в промежуточной области давлений 0,1-1 Па», грант РНФ 24-29-00358, 2024–2025 гг. (акт внедрения).

Конструкция и основные элементы разработанного источника электро-

нов защищены патентом РФ на полезную модель № 222392 «Форвакуумный плазменный источник ленточного пучка электронов, функционирующий в широком диапазоне рабочих давлений».

Личный вклад автора

Все результаты, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, получены автором лично. Автором совместно с Ю.А. Бурачевским сконструирован и создан источник ленточного электронного пучка с двухступенчатой разрядной системой, собран зонд для измерения распределения плотности тока пучка, оснастка для пучково-плазменной обработки материалов. Автором совместно с научным руководителем 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 участие принимал А.А. Зенин. Соавторы, принимавшие участие в отдельных направлениях исследований, указаны в списке основных публикаций по теме диссертации.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложения. Диссертация изложена на 111 страницах, содержит 92 рисунка и 3 таблицы. Список литературы включает 98 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 «Формирование широкоапертурных электронных пучков плазменными источниками с полым катодом» носит обзорный характер и посвящена анализу современных подходов к формированию широкоапертурных и ленточных электронных пучков. Рассмотрены два основных подхода к созданию пучков большого сечения: с использованием эмиттеров малой площади и последующим расширением пучка, а также с применением протяженных плазменных катодов, форма и размеры которых соответствуют требуемому сечению пучка. Показаны преимущества плазменных катодов по сравнению с термокатодными и взрывоэмиссионными системами, включая высокий ресурс работы, способность функционировать в агрессивных газовых средах и независимость параметров пучка от состояния эмиттера.

Проанализированы достоинства и недостатки разрядных систем различных типов: дуговых, тлеющих, с самонакаливаемым полым катодом, а также гибридных систем, сочетающих электронный пучок с ВЧ-разрядом. Особое внимание уделено методам внешней инжекции электронов из вспомогательных разрядных систем для стабилизации горения основного разряда

при низких давлениях. Рассмотрены схемы с использованием тлеющего, отражательного и дугового вспомогательных разрядов, проанализировано их влияние на однородность эмиссионной плазмы. Показано, что основным недостатком дуговых систем является высокая тепловая нагрузка на сетчатые электроды и загрязнение плазмы продуктами эрозии катода, тогда как тлеющий разряд обеспечивает более стабильные и воспроизводимые параметры.

Проведенный анализ показал, что существующие форвакуумные плазменные источники ленточных электронных пучков уверенно работают в диапазоне давлений 5–50 Па, однако их функционирование при более низких давлениях (0,1–1 Па) ограничено проблемами зажигания и устойчивого горения разряда с протяженным полым катодом. Отмечено, что однородность ленточного пучка в значительной степени определяется обратным ионным потоком, величина которого может достигать 20% от тока пучка, однако его влияние в области пониженных давлений детально не исследовано. Рассмотрены методы коррекции неоднородности распределения плотности тока пучка, включая оптимизацию геометрии эмиссионного электрода, использование многоапертурных систем и масок с переменной прозрачностью, а также управление составом рабочего газа и применение аксиального магнитного поля.

Отмечена перспективность использования пучковой плазмы, генерируемой ленточными электронными пучками, для модификации поверхностных свойств полимеров благодаря низкой температуре электронов (1–5 эВ) и возможности независимого управления плотностью потока ионов и радикалов. Показано, что гибридные плазменные системы, сочетающие электронный пучок с ВЧ-разрядом, обладают высокой эффективностью, но значительно сложнее в реализации. На основе проведенного обзора сформулированы задачи исследований, направленные на расширение рабочего диапазона давлений форвакуумного плазменного источника в область пониженных значений (до 0,1 Па) с обеспечением высокой однородности ленточного электронного пучка и его применения для генерации пучковой плазмы и обработки материалов.

Вторая глава «Техника и методика эксперимента» посвящена описанию экспериментальных методик и оборудования, а также приведены схемы и фотографии экспериментальной установки и разработанного форвакуумного плазменного источника электронов с двухступенчатой разрядной системой, рисунок 1. Основная разрядная система источника содержит протяженный полый катод и плоский анод с эмиссионным окном переменной конфигурации. На торцах основного катода установлены два вспомогательных полых катода, обеспечивающих инжекцию электронов в основную катодную полость через отверстия диаметром 0,7–2 мм.

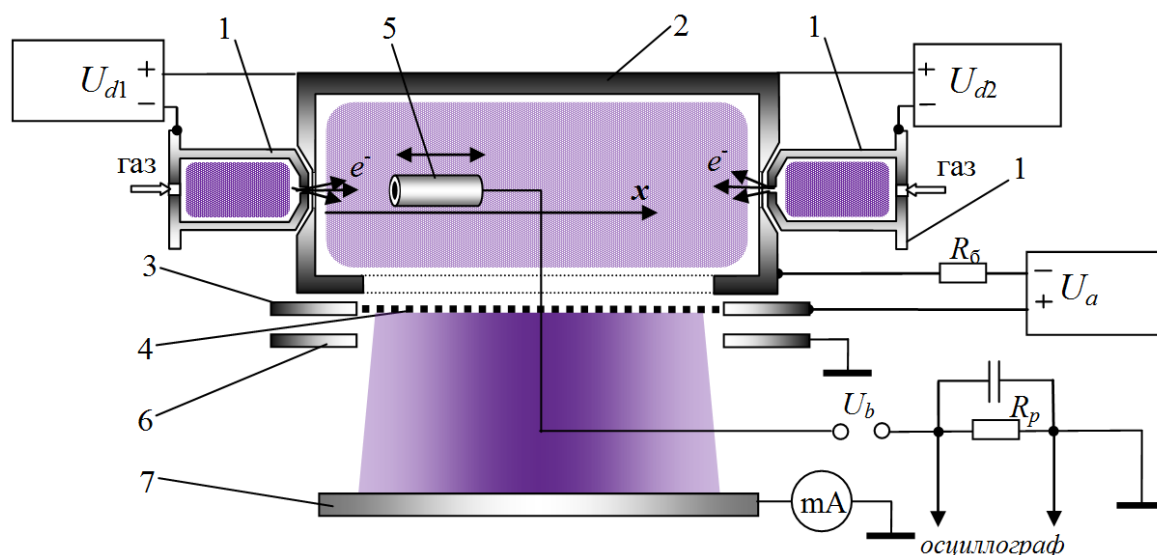


Рисунок 1 – Схема источника электронов с двухступенчатой разрядной системой: 1 – полый катод вспомогательного разряда, 2 – полый катод основного разряда, 3 – анод основного разряда, 4 – эмиссионная сетка, 5 – малый коллектор тока, 6 – экстрактор, 7 – коллектор.

Параметры разработанного источника ленточного электронного пучка представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры форвакуумного плазменного электронного ленточного источника с двухступенчатой разрядной системой

Параметр	Значение
Ток пучка, мА	10 – 450
Поперечное сечение пучка, мм ²	(10–20)×200
Энергия электронов пучка, кэВ	1–10
Режим работы	непрерывный
Рабочий газ	гелий, воздух, аргон
Давление газа в вакуумной камере, Па	0,1 – 50
Расстояние до мишени, см	5–30
Неоднородность в поперечном направлении, %	не более 15

Для диагностики параметров плазмы использованы одиночный и двойной зонды Ленгмюра, подвижный коллектор для измерения распределения плотности тока электронного пучка, многосеточный энергоанализатор для определения энергетического спектра ионов, а также инфракрасный пирометр и термопары для контроля температуры эмиссионного электрода.

В третьей главе «Формирование ленточного электронного пучка в форвакуумной области давлений» представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований, направленных на формирование непрерывного ленточного электронного пучка в расширенном диапазоне давлений

0,1–10 Па.

Экспериментально установлено, что при давлении ниже 1 Па зажигание основного разряда между протяженным полым катодом и плоским анодом без использования дополнительных источников заряженных частиц требует напряжения, превышающего 10 кВ (рисунок 2), что ограничено электрической прочностью разрядного промежутка.

Для решения этой проблемы разработана двухступенчатая разрядная система, в которой на торцах основного полого катода установлены два вспомогательных разряда с полым катодом (рисунок 1). Измерения подвижным коллектором, расположенным внутри катодной полости, показали, что поток электронов (рисунок 3) из вспомогательных разрядов через соединительные отверстия диаметром 0,7–1,7 мм создает в катодной полости начальную ионизацию, достаточную для инициирования основного разряда.

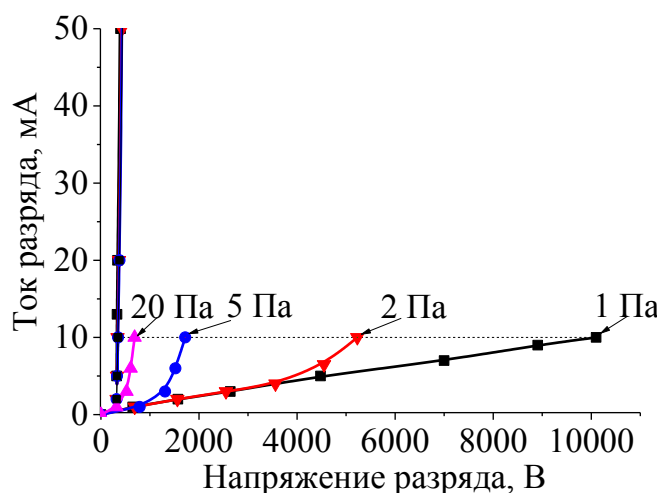


Рисунок 2 – ВАХ основного разряда при работе на воздухе

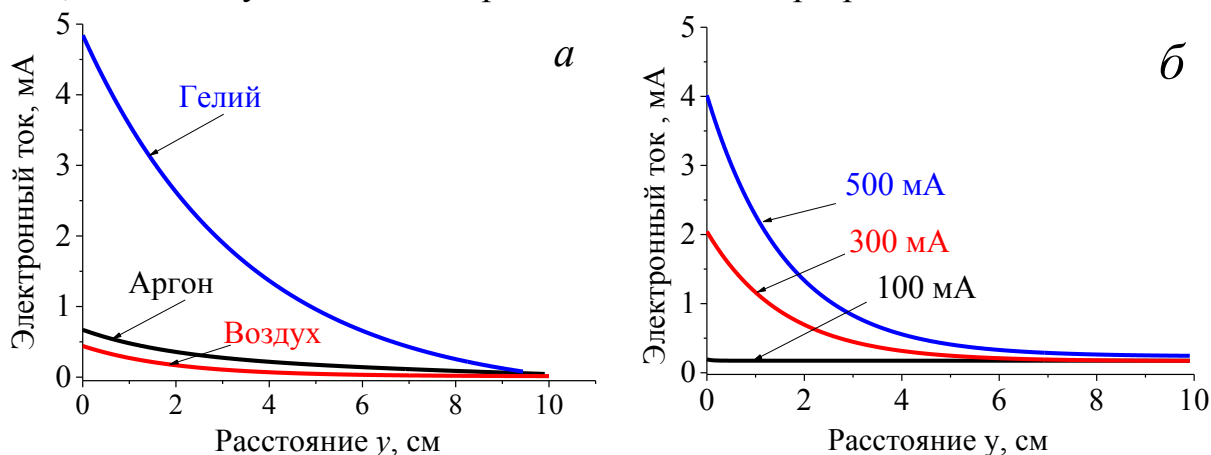


Рисунок 3 – Зависимость тока электронов в полый катод основного разряда из вспомогательного разряда для разных газов – а, и для воздуха при разных токах вспомогательных разрядов – б. Давление 0,1 Па

В результате напряжение зажигания снижается до 1–4 кВ в зависимости от рода газа и давления (рисунок 4).

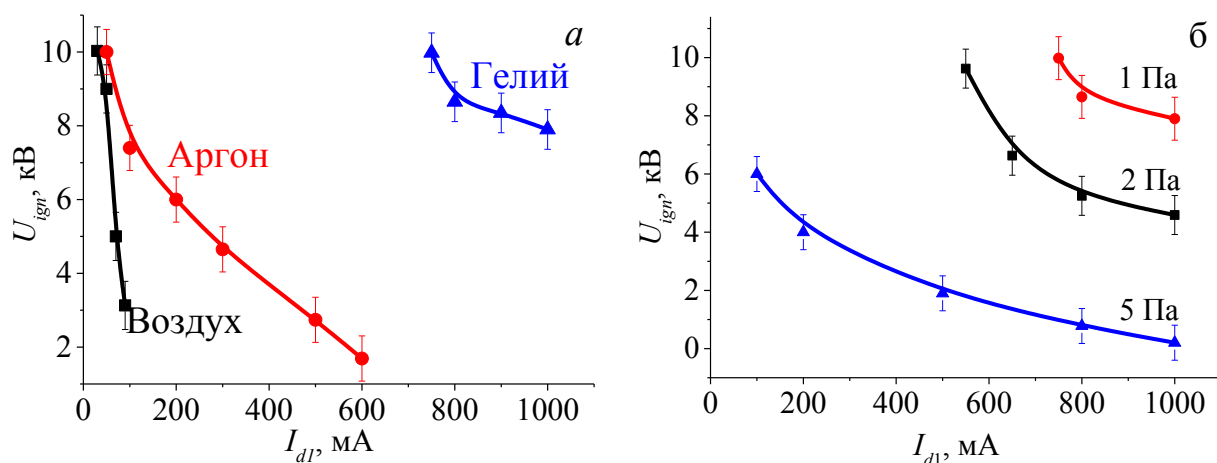


Рисунок 4 – Зависимость напряжения зажигания основного разряда от тока вспомогательных разрядов: *а* – для различных газов при давлении 1 Па, *б* – для гелия при давлении 1 – 1 Па, 2 – 2 Па, 3 – 5 Па

Наиболее высокие напряжения зажигания зафиксированы для гелия, наиболее низкие – для воздуха и аргона. После зажигания основной разряд переходит в несамостоятельный режим, его напряжение горения снижается до 30–300 В и может регулироваться током вспомогательных разрядов, причем влияние вспомогательных разрядов наиболее существенно при токах основного разряда более 300 мА (рисунок 5).

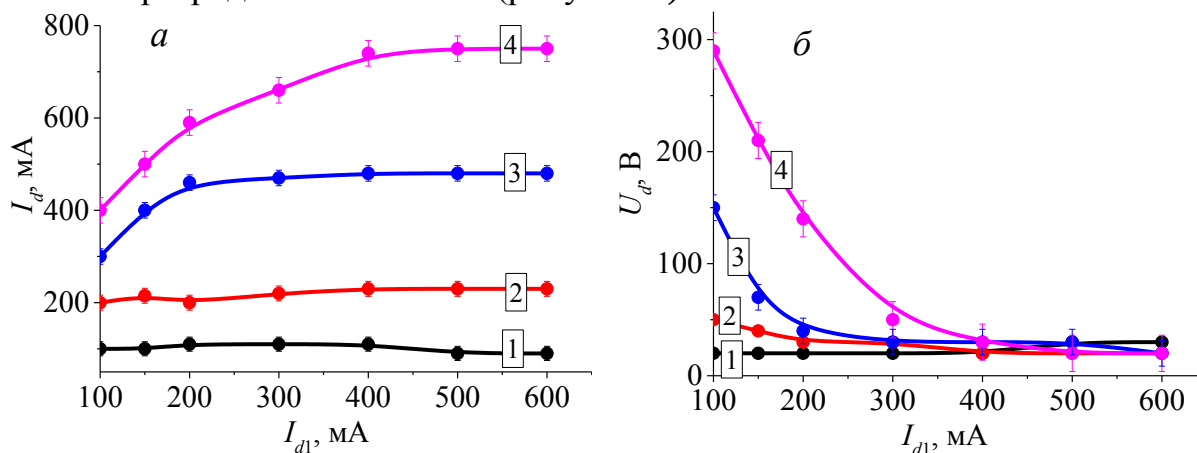


Рисунок 5 – Зависимость тока I_d – *а* и напряжения горения U_d – *б* основного разряда от тока вспомогательных разрядов I_{d1} . Давление 2 Па, воздух. Ток основного разряда: 1 – 100 мА, 2 – 200 мА, 3 – 300 мА, 4 – 400 мА

Таким образом, двухступенчатая конфигурация разрядной системы обеспечивает стабильное инициирование и горение разряда при давлении вплоть до 0,1 Па.

На рисунке 6 показаны вольтамперные характеристики источника при работе в форвакуумной области давлений и при давлениях рабочих газов 0,1 Па. Вид зависимостей с характерным участком насыщения свидетельствует о генерации электронного пучка.

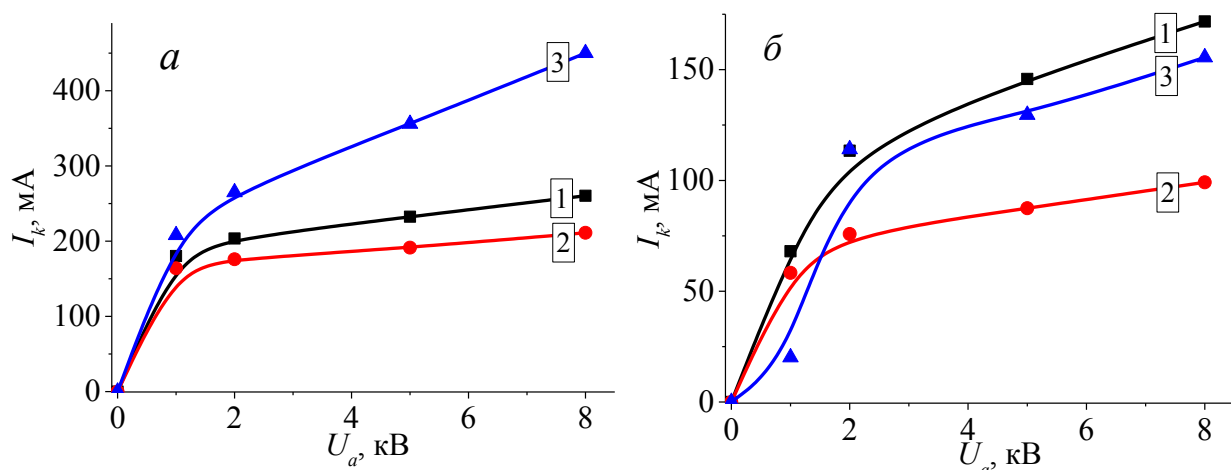


Рисунок 6 – Вольтамперная характеристика источника. Ток разряда 1,2 мА. Давление, *a* – 0,1 Па, *б* – 10 Па. Рабочий газ: 1 – воздух, 2 – аргон, 3 – гелий

При формировании ленточного электронного пучка ключевой проблемой является обеспечение однородного распределения плотности тока по протяженному размеру пучка. Исследования показали, что при использовании эмиссионного электрода с одним протяженным отверстием (22×1 см), перекрытым мелкоструктурной металлической сеткой, в распределении плотности тока наблюдаются устойчивые локальные максимумы – «струи», положение которых не зависит от параметров разряда, но определяется расстоянием до источника и временем работы. Фотографии пучка, полученные при давлениях 0,1 и 10 Па, наглядно демонстрируют эти неоднородности (рисунок 7).

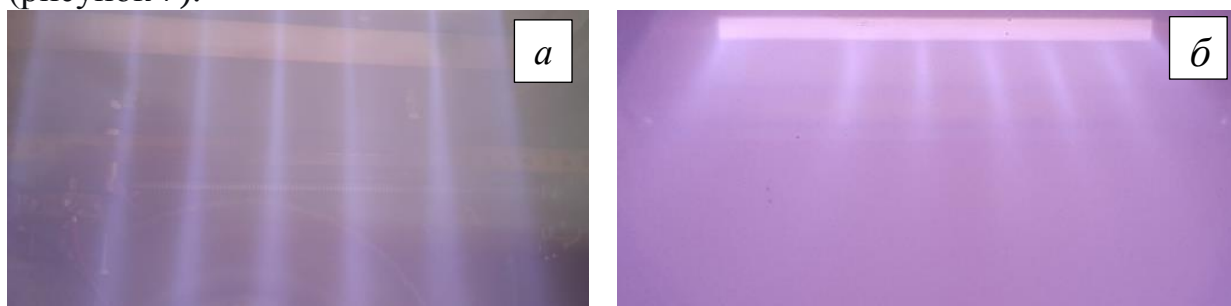


Рисунок 7 – Фотография электронного пучка при различных давлениях: *a* – 0,1 Па, *б* – 10 Па. Ток основного разряда 1,2 А. Ускоряющее напряжение – 3 кВ. Рабочий газ – аргон

Анализ теплового режима эмиссионного электрода выявил, что основным источником нагрева является обратный поток ионов из ускоряющего промежутка, мощность которого возрастает с 5 Вт при 0,1 Па до 50 Вт при 10 Па.

Численное моделирование методом конечных элементов позволило рассчитать температурные поля и термические деформации эмиссионной пластины. Установлено, что фиксация пластины в точках крепления приводит к возникновению до восьми локальных максимумов смещения сетки, что согласуется с экспериментально наблюдаемой картиной неоднородностей.

При этом выявлена важная закономерность: конфигурация с одним протяженным отверстием обеспечивает минимальный нагрев (менее 100 °С), но максимальное термическое расширение (до 0,3 мм), приводящее к значительной деформации сетки, рисунок 9. Напротив, многоапертурные конфигурации (серия отверстий 2 и 3, рисунок 8 а) нагреваются сильнее за счет увеличенной площади контакта с плазмой, однако термические расширения в них более равномерны, что снижает градиенты напряжений и минимизирует деформацию сетки (рисунок 9).

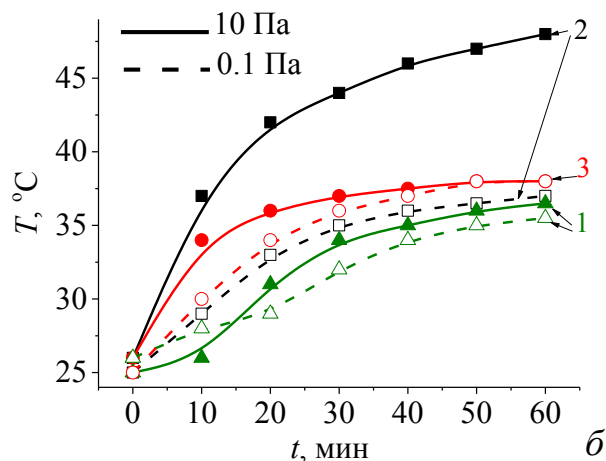


Рисунок 8 – Внешний вид вставок в анод – а и измеренное значение температуры в средней части вставки при работе в течение 30 минут при токе разряда 300 мА – б. Конфигурация вставок: 1 – с протяженным отверстием $220 \times 10 \text{ мм}^2$, 2 – с серией из 25 отверстий диаметром 8 мм, 3 – с серией из 32 протяженных отверстий длиной 9 мм и шириной 6 мм

Наилучший баланс между нагревом и деформацией обеспечивает конфигурация №3 (серия прямоугольных отверстий $9 \times 6 \text{ мм}$), для которой расчетное значение термического расширения составляет 0,12–0,15 мм при температуре 105 °С, что в 1,5–2 раза меньше, чем у исходной конструкции.

Экспериментальные измерения при использовании многоапертурного электрода показали, что также снижается неоднородность распределения плотности тока пучка до 10 % при незначительной (около 15 %) потере полного эмиссионного тока (рисунок 10).

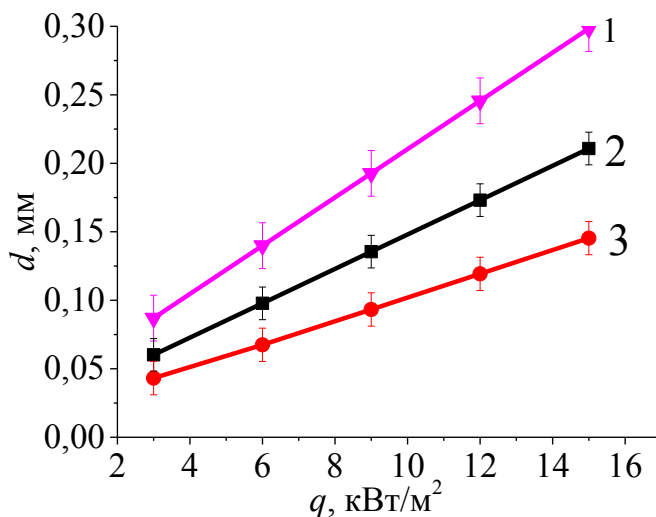


Рисунок 9 – Расчетная зависимость максимального термического расширения от плотности теплового потока для разных геометрий отверстий №1-3 (рисунок 8) в эмиссионном электроде

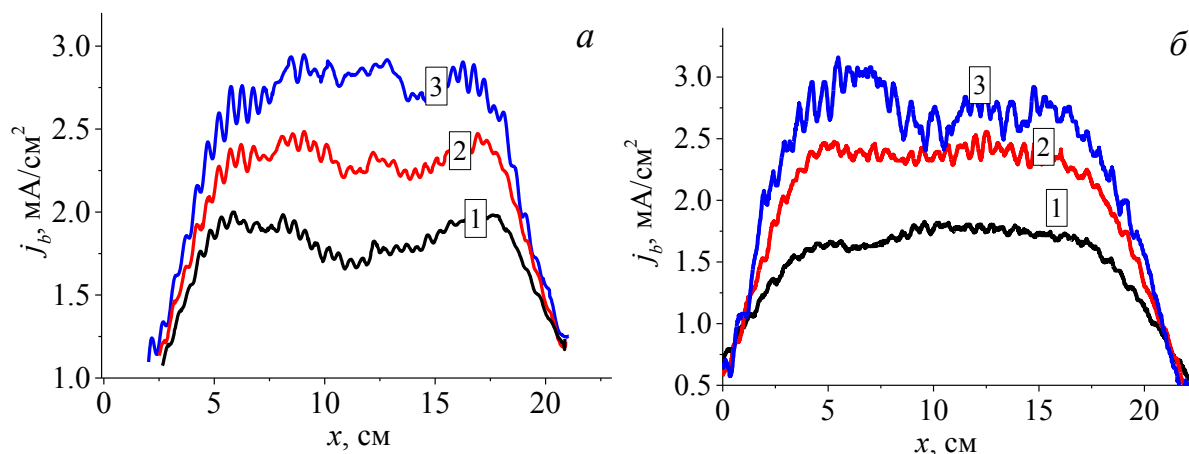


Рисунок 10 – Распределение плотности тока пучка при использовании многоапертурной системы для различных ускоряющих напряжений и давления: *a* – 0,1 Па, *б* – 10 Па. Ток основного разряда 1,2 А. Ускоряющее напряжение: 1 – 1 кВ, 2 – 2 кВ, 3 – 5 кВ. Рабочий газ аргон

При этом с ростом ускоряющего напряжения от 1 до 5 кВ не наблюдается значительного усиления неоднородностей. Полученные результаты демонстрируют, что замена протяженного эмиссионного отверстия на серию дискретных апертур, несмотря на некоторое увеличение нагрева, является эффективным способом повышения однородности ленточного электронного пучка в форвакуумной области давлений за счет снижения термомеханических деформаций эмиссионного электрода.

В четвертой главе «Пучково-плазменная обработка полимеров в форвакуумной области давлений» представлены результаты использования разработанного форвакуумного плазменного источника электронов для генерации пучковой плазмы и модификации поверхностных свойств полипропилена. При транспортировке ленточного электронного пучка с энергией 2 кэВ и током до 200 мА в вакуумной камере при давлениях 0,1–10 Па происходит ударная ионизация нейтрального газа, формирующая пучковую плазму. С помощью двойного зонда Ленгмюра измерены концентрация и температура электронов плазмы. Установлено, что концентрация плазмы возрастает с увеличением давления и тока пучка, достигая значений порядка 10^{15} м^{-3} при 10 Па. Температура электронов при этом снижается от 1,2 эВ при 0,1 Па до 0,2 эВ при 10 Па. На рисунке 11 представлены зависимости концентрации (*a*) и температуры (*б*) пучковой плазмы от давления для аргона и воздуха.

Обработка полипропилена в пучковой плазме проводилась в атмосфере аргона и воздуха при давлении 0,1–10 Па в течение 10 минут. Температура образцов в процессе обработки не превышала 80 °С. Исходный краевой угол смачивания для полипропилена составлял 90–95°. На рисунке 11 представлена зависимость краевого угла от давления после обработки в аргоне (кривая 1) и воздухе (кривая 2).

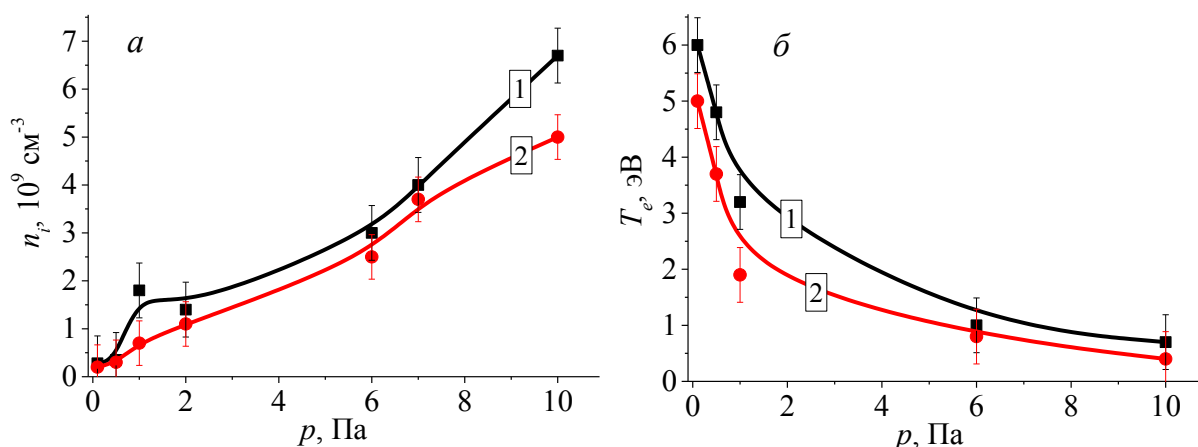


Рисунок 11 – Зависимость концентрации – а и температуры – б пучковой плазмы от давления для аргона – 1, и воздуха – 2

Установлено, что существенное снижение смачиваемости наблюдается при обработке при давлениях выше 5 Па: после обработки в воздушной плазме угол снижается до 35° , в аргоновой – до 50° , рисунок 12. Более высокая эффективность воздушной плазмы объясняется окислением поверхности активными частицами кислорода с образованием полярных кислородсодержащих групп. При низких давлениях (0,1–1 Па) обработка практически не изменяет смачиваемости. Для интенсификации воздействия при низких давлениях на держатель подложек подавалось отрицательное смещение (-20 В относительно земли), а на коллектор электронного пучка – положительное смещение ($+60 \text{ В}$).

Такая конфигурация повышает разность потенциалов между плазмой и подложкой, обеспечивая дополнительное ускорение ионов. В результате обработка при 0,1 Па со смещением позволила достичь снижения краевого угла до значений, сопоставимых с обработкой при 5 Па без смещения. Методом 3D-профилометрии установлено увеличение шероховатости поверхности полипропилена: параметр R_a возрастает с $0,018 \pm 0,004 \text{ мкм}$ до $0,099 \pm 0,005 \text{ мкм}$. Исследование стабильности модифицированного состояния во времени показало, что эффект снижения краевого угла частично деградирует в течение 2–3 недель после обработки. На рисунке 13 представлена зависимость краевого угла от времени для аргона и воздуха при давлениях 0,1 Па и 10 Па.

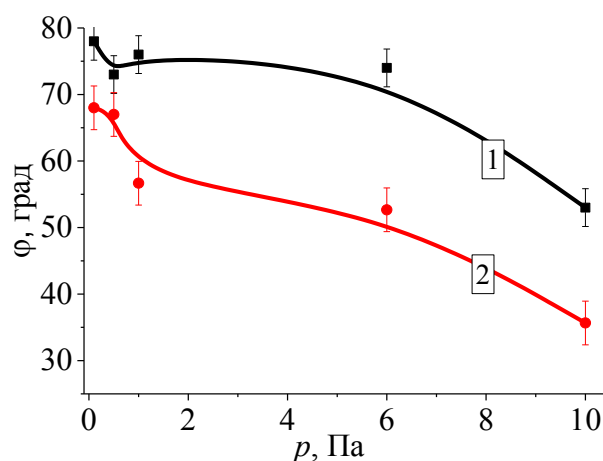


Рисунок 12 – Зависимость контактного угла смачивания поверхности полипропилена после обработки в аргоне – 1 и воздухе – 2

Образцы, обработанные в воздушной плазме, демонстрируют более стабильный результат по сравнению с аргоновой обработкой, что объясняется формированием на поверхности более плотного слоя сшитых и окисленных структур.

Таким образом, созданный форвакуумный плазменный источник ленточного электронного пучка успешно применен для генерации пучковой плазмы и ионно-плазменной модификации полимеров в расширенном диапазоне давлений 0,1–10 Па. Показана принципиальная возможность управления смачиваемостью поверхности полипропилена как за счет выбора рабочего газа и давления, так и посредством подачи электрического смещения на держатель подложки.

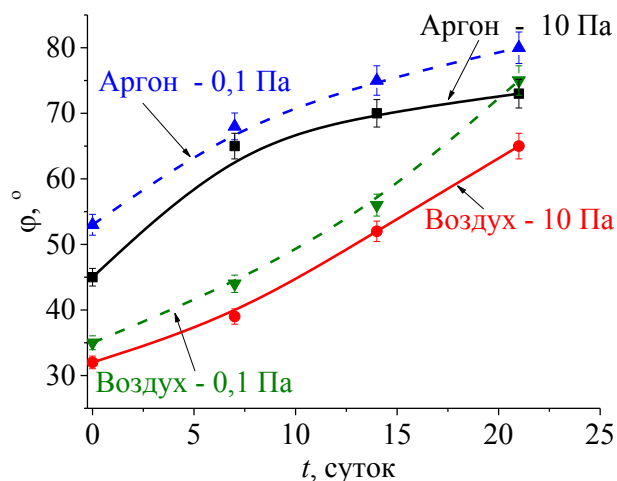


Рисунок 13 – Зависимость краевого угла смачиваемости от времени с момента обработки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

Экспериментально доказано, что применение двухступенчатой разрядной системы, состоящей из основного разряда с протяженным полым катодом и двух торцевых вспомогательных полокатодных разрядов, позволяет снизить напряжение зажигания основного разряда с >10 кВ до 1–4 кВ и обеспечить его стабильное горение при давлении вплоть до 0,1 Па. Показано, что поток заряженных частиц из вспомогательных разрядов является критическим для инициирования разряда в этой области давлений.

Установлено, что ключевым фактором, нарушающим однородность, является термомеханическая деформация эмиссионной сетки, вызванная обратным ионным потоком, мощность которого возрастает с 5 Вт при 0,1 Па до 50 Вт при 10 Па. На основе численного моделирования и экспериментальных данных предложена и реализована многоапертурная система извлечения (отверстия 10 мм вместо сплошной щели), которая позволила снизить неоднородность распределения плотности тока пучка до 10% при сравнительно небольшой (15%) потере полного тока.

Созданный источник успешно применен для генерации пучковой плазмы (концентрация до 10^{15} м^{-3} , $T_e = 0,2\text{--}1,2$ эВ) и ионно-плазменной обработки полимеров (полипропилен). Показано, что обработка в воздушной плазме при давлении 5–10 Па позволяет снизить краевой угол смачивания с $90\text{--}95^\circ$ до 35° без подачи смещения, а при давлении 0,1 Па — до сопоставимых значений при подаче отрицательного смещения (-20 В) на подложку. Установ-

лена частичная обратимость эффекта во времени, причем обработка в воздушной плазме обеспечивает более стабильный результат.

Полученные результаты вносят существенный вклад в понимание физических процессов инициирования и поддержания тлеющего разряда с протяженным полым катодом в диапазоне давлений 0,1–10 Па. Разработанный и созданный источник электронов (защищен патентом РФ № 222392) может быть использован в плазмохимических установках, генераторах низкотемпературной плазмы и для модификации материалов. Результаты внедрены в учебный процесс ТУСУР и в рамках совместных исследовательских программ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, соответствующих требованиям ВАК РФ, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science:

1. Ленточный источник электронного пучка, функционирующий в широком диапазоне давлений / А. С. Климов, И. Ю. Бакеев, **Ж. Э. Дагри** [и др.] // Materials. Technologies. Design. – 2023. – Vol. 5, No 3(13). – P. 28-34.

2. Fore-Vacuum Ribbon Beam Plasma Electron Source Based on a Two-Stage Discharge System / A.S. Klimov, I. Yu. Bakeev, **J. E. Dagri**, E. M. Oks, A. A. Zenin // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2024. – Vol. 88. – No. 4. – P. 631-636.

2. Extending the Operating Pressure Range of a Forevacuum-Pressure Plasma-Cathode Ribbon Electron Beam Source / A. S. Klimov, I. Yu. Bakeev, **J. E. Dagri**, A. V. Dolgova, E. M. Oks, A. A. Zenin // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2024. – Vol. 52. – No. 7. – P. 2786-2791.

3. Forevacuum plasma-cathode electron source for generation of a ribbon beam over a wide pressure range / A. S. Klimov, I. Yu. Bakeev, Yu. A. Burachevsky, **J. E. Dagri** [et al.] // Review of Scientific Instruments. – 2023. – Vol. 94, – No. 7. – P. 073505.

4. Ленточный источник электронного пучка, функционирующий в широком диапазоне давлений / А. С. Климов, И. Ю. Бакеев, **Ж. Э. Дагри** [и др.] // Materials. Technologies. Design. – 2023. – Vol. 5, No 3(13). – P. 28-34.

5. Ribbon electron beam for generation of beam plasma and beam-plasma treatment of polymers in the pressure range of 0.1–10 Pa / A. S. Klimov, **J. E. Dagri**, A. V. Dolgova, A. A. Zenin // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Vol. 89. – No. 2. – P. S294-S301.

Статья, принятая к печати в рецензируемом научном журнале, соответствующем требованиям ВАК РФ, индексируемом в международных базах данных Scopus и Web of Science:

6. Thermal Regime of the Emission Electrode in a Forevacuum Plasma Source of a Continuous Ribbon Electron Beam / A.S. Klimov, I.Yu. Bakeev, A.A.

Zenin, J. E. **Dagri** // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2025060987 *Принята к публикации.*

Патент:

7. Патент на полезную модель № 222392 Российской Федерации, МПК H01J 15/00. Форвакуумный плазменный источник ленточного электронного пучка, функционирующий в широком диапазоне давлений.: № 2023124426: заявл. 22.09.2023: опубл. 22.12.2023 / Климов А.С., Зенин А.А., Бакеев И.Ю., **Дагри Э.Ж.**; заявитель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники – 5 с.: ил.

Публикации в сборниках статей и трудах конференций:

8. Форвакуумный плазменный электронный источник с двухступенчатой разрядной системой / А. С. Климов, И. Ю. Бакеев, А. А. Зенин, **Ж. Э. Дагри**, Е. М. Окс // Плазменная эмиссионная электроника: труды VII международного Крейнделевского семинара. – 2023. – С. 308

9. О распределении концентрации эмиссионной плазмы в форвакуумном плазменном электронном источнике с двухкатодной разрядной системой / **Ж. Э. Дагри**, Е. А. Егоров, А. С. Климов // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2022. – № 1-1. – С. 216-218.

10. О влиянии режимов горения дополнительных разрядов на однородность плотности тока источника ленточного электронного пучка / **Ж. Э. Дагри**, Т. В. Якобчук // Перспективы развития фундаментальных наук: – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. – С. 169-171.

11. Влияние тока вспомогательных катодов на параметры разряда форвакуумного плазменного электронного источника / **Ж. Э. Дагри**, А. С. Климов // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2024. – № 1-1. – С. 219-221.

12. Исследование параметров плазмы в ленточном источнике электронов с двухступенчатой разрядной системой / **Ж. Э. Дагри**, А. С. Климов, Т. В. Якобчук // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2023. – № 1-1. – С. 253-255.

13. Инициирование тлеющего разряда в форвакуумном источнике электронов с двухступенчатой разрядной системой / **Ж. Э. Дагри**, А. С. Климов, Т. В. Якобчук // Перспективы развития фундаментальных наук: – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. – С. 30-32.

14. Влияние разряда на нагрев эмиссионного электрода форвакуумного плазменного источника ленточного пучка электронов / **Ж. Э. Дагри**, А. В. Долгова // Перспективы развития фундаментальных наук : Сборник научных

трудов XXII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2025. – С. 36-38.

15. Исследование зависимости эмиссионных свойств пучковой плазмы от режимов работы плазменного источника электронов / **Ж. Э. Дагри**, А. В. Долгова // Перспективы развития фундаментальных наук: Сборник научных трудов XXIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2026.