

На правах рукописи



Торба Максим Сергеевич

**ИСТОЧНИК ИНТЕНСИВНОГО СУБМИЛЛИСЕКУНДНОГО
РАДИАЛЬНО СХОДЯЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С
МНОГОДУГОВЫМ СЕТОЧНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ**

2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор технических наук,
Воробьев Максим Сергеевич

Официальные оппоненты: **Семенов Александр Петрович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки “Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук”, г. Улан-Удэ;

Тюньков Андрей Владимирович, доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник ФГАОУ ВО “Томский университет систем управления и радиоэлектроники” (ТУСУР), г. Томск.

Ведущая организация: АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры имени Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «11» сентября 2026 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.115.02 (Д 003.031.01) при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) по адресу: 634055, г. Томск, пр-т Академический, 2/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института сильноточной электроники СО РАН и на официальном сайте:

https://hcei.tsc.ru/dissertations/kandidatskie-dissertatsii/2026/torba-maksim-sergeevich_diss/

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета,
доктор технических наук



Юшков Г.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время источники интенсивных электронных пучков большого сечения находят самое разнообразное научное и практическое применение благодаря их широкому диапазону параметров, высокой эффективности вклада энергии пучка в вещество, превышающей зачастую 90%, а также уникальным эффектам, происходящим в поверхности обрабатываемого материала, которые недостижимы при использовании иных способов энергетического воздействия. Пучки большого сечения – это электронные пучки, которые формируются с протяжённой эмиссионной поверхности, и в которых можно пренебречь влиянием тепловых скоростей электронов на распределение плотности тока пучка, что позволяет изменять или управлять конфигурацией таких электронных пучков, обеспечивая возможность генерации планарных, кольцевых, радиально сходящихся и расходящихся пучков и др. Под интенсивным электронным пучком понимается поток электронов с плотностью энергии достаточной для нагрева поверхностных слоёв различных материалов вплоть до их плавления и даже частичного испарения. Вне зависимости от способа генерации электронного пучка, такие источники, в том числе, могут использоваться для модификации поверхности различных металлических и металлокерамических материалов и изделий с целью улучшения их функциональных и эксплуатационных свойств (закалка, полировка, коррозионная стойкость и т.д.).

Источники электронов с сеточными плазменными катодами (СПК) занимают особую нишу благодаря ряду общеизвестных преимуществ как перед источниками с термоэмиссионным катодом (большему сроку службы, не критичности к вакуумным условиям, высокой энергетической эффективности), так и перед ускорителями на основе взрывоэмиссионных катодов (большей длительности импульсов, повышенному сроку службы, низкой неоднородности плотности тока пучка, большей частоте следования импульсов тока и способности генерировать электронные пучки в широком диапазоне параметров). СПК представляет собой электродную систему, в которой различными способами создается эмиссионная плазма, отбор частиц с границы которой осуществляется через ячейки мелкоструктурной металлической сетки. Мелкоструктурная сетка стабилизирует границу эмиссионной плазмы, обеспечивая слабую зависимость тока электронного пучка от ускоряющего напряжения. Слоевая/сеточная стабилизация границы эмиссионной плазмы — ключевая особенность СПК, которая реализуется за счет формирования приэлектродного (присеточного) слоя положительно заряженных частиц. Этот слой ограничивает уход электронов из плазмы, а его ширина определяется ее параметрами (потенциалом, концентрацией плазмы и температурой электронов).

Именно слоевая (в нашем случае в силу конструктивных особенностей плазменного катода, называемая «сеточная») стабилизация границы эмиссионной плазмы позволяет гибко и независимо управлять основными параметрами электронного пучка, такими как ток и энергия электронов, а импульсно-

периодическая генерация эмиссионной плазмы позволяет управлять длительностью и частотой следования импульсов, что крайне важно при проведении поисковых исследований по подбору оптимального режима облучения материалов. При этом сеточная стабилизация границы эмиссионной плазмы позволяет с удовлетворительной точностью динамически регулировать ток эмиссии, что позволяет управлять мощностью пучка даже в течение импульса субмиллисекундной длительности, что также крайне важно для использования электронного пучка при решении материаловедческих задач. Независимое малоинерционное управление основными параметрами пучка трудно реализуемо в источниках другого типа. Так, например, в системах на основе термокатодов такие параметры как частота следования или длительность импульсов часто ограничены физическими характеристиками эмиттера, например, тепловой инерцией катода, либо требуют дополнительного управляющего электрода, что затрудняет их независимую регулировку и/или усложняет конструкцию. Источники электронов на основе взрывной эмиссии с открытой границей плотной катодной плазмы не способны обеспечивать независимую регулировку всех основных параметров по принципу своего действия. Источники на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) для удобного управления параметрами электронного пучка требуют перестройки давления или использования вспомогательного разряда. При этом большинство таких систем, как и термокатодные источники, работает в непрерывном режиме, поскольку импульсный режим не обеспечивает плотности мощности и энергии пучка, требуемой для модификации металлической поверхности, а также неизбежно приводит к необходимости сканирования электронным пучком по поверхности обрабатываемой детали.

Отдельно стоит отметить источники с СПК на основе дугового разряда низкого давления, которые отличаются высокой энергетической эффективностью генерации эмиссионной плазмы (определяемой отношением мощности затрачиваемой на генерацию плазмы к мощности генерируемого электронного пучка) и позволяют получать интенсивные электронные пучки субмиллисекундной длительности. Однако использование в таких системах точечных источников плазмы приводит к необходимости принятия дополнительных мер по снижению локальных неоднородностей её концентрации, негативно влияющих на распределение плотности тока пучка по его сечению, зачастую провоцируя пробой ускоряющего промежутка, что в итоге сказывается на стабильности работы источника и ограничивает его дальнейшее использование.

Существенную долю разработанных и созданных источников электронов составляют источники с планарной геометрией ускоряющего промежутка. Такие источники находят широкое использование при решении обозначенных выше задач, однако имеют существенное технологическое ограничение, связанное со сложностью, а зачастую и невозможностью обработки поверхности изделий с геометрией, отличающейся от плоской (например, цилиндрической), что также приводит к необходимости сканирования по поверхности изделия электронным пучком в азимутальном направлении путем вращения изделия, и, в конечном итоге, служит причиной неудовлетворительного качества

обработки его поверхности и/или низкой производительности процесса. Это заставило исследователей задуматься о целесообразности разработки источников электронов, позволяющих генерировать интенсивные радиально сходящиеся пучки электронов, с катодами на основе различных типов эмиссии, каждый из которых имеет преимущества в своем диапазоне параметров, а также свои технологические особенности и ограничения. Это определяет актуальность обозначенной тематики и необходимость разработки альтернативных источников электронов с уникальными параметрами и технологическими возможностями.

Цель работы:

Разработка и создание источника электронов с сеточным плазменным катодом на основе многодугового разряда низкого давления, способного генерировать интенсивный радиально сходящийся электронный пучок субмиллисекундной длительности, позволяющий проводить модификацию поверхности металлических материалов и изделий цилиндрической формы с удовлетворительной неоднородностью плотности тока на обрабатываемом изделии (образце).

Для достижения цели были решены следующие основные задачи:

1. Разработка и создание экспериментального стенда источника электронов с СПК на основе многодугового разряда низкого давления, генерирующего интенсивный радиально сходящийся электронный пучок субмиллисекундной длительности;
2. Разработка и создание электродной системы и блоков электропитания СПК на основе многодугового разряда низкого давления;
3. Разработка и создание оригинального диагностического оборудования для проведения коллекторных измерений плотности тока радиально сходящегося пучка;
4. Поиск режимов генерации субмиллисекундного радиально-сходящегося электронного пучка с плотностью энергии достаточной для модификации поверхности металлических материалов и изделий с удовлетворительной неоднородностью;
5. Демонстрация возможности использования созданного источника электронов с СПК с целью модификации поверхности материалов и изделий цилиндрической формы.

Научная новизна:

1. В источнике электронов с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления определены стабильные режимы генерации радиально сходящегося электронного пучка с энергией до 700 Дж и плотностью энергии до 14 Дж/см² при длительности импульса до 500 мкс и удовлетворительной неоднородности ($\pm 10\%$) его плотности энергии на коллекторе диаметром 16 мм;
2. В источнике электронов с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления разработана и создана эмиссионная ячейка

для генерации радиально сходящегося электронного пучка в секторе 60° с током в ускоряющем промежутке до 100 А и длительностью 150 мкс при ускоряющем напряжении до 30 кВ, обеспечивающая энергию на коллекторе до 200 Дж при плотности энергии пучка до 30 Дж/см^2 , что позволяет проводить модификацию поверхности металлических изделий за один импульс тока пучка;

3. Продемонстрирован способ аксиальной самофокусировки радиально сходящегося электронного пучка с токами, значительно превышающими (до 10 раз) токи Чайлда-Ленгмюра для цилиндрического вакуумного диода за счёт компенсации объёмного заряда электронов пучка ионами нарабатываемой плазмы в ускоряющем промежутке.

Практическая значимость:

Разработан и создан источник электронов с СПК на основе дугового разряда низкого давления, позволяющий проводить модификацию поверхности цилиндрических металлических изделий с плотностью энергии пучка до 30 Дж/см^2 при ускоряющем напряжении до 50 кВ, длительности импульсов до 500 мкс и частоте их следования до 1 с^{-1} .

Используя созданный источник электронов, промоделированы и экспериментально реализованы режимы генерации пучка пригодные для модификации поверхности металлических изделий (на примере стержней диаметром от 10 до 30 мм из титана марки ВТ1-0 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т), которые позволяют увеличить микротвёрдость поверхности образца из титана с 1,8 ГПа до 4,7 ГПа и уменьшить шероховатость поверхности нержавеющей стали с 2 мкм до 0,4 мкм.

Методы исследования

Основным методом исследования в настоящей работе являлся физический эксперимент, в ходе которого осуществлялось:

1. Исследование вольт-амперных характеристик многодугового разряда низкого давления с полым анодом, а также зависимостей тока в ускоряющем промежутке от ускоряющего напряжения;

2. Аксиальное и азимутальное распределение плотности тока интенсивного радиально сходящегося электронного пучка субмиллисекундной длительности на коллекторе при различной величине ускоряющего напряжения и давления рабочего газа с использованием разработанной и созданной оригинальной системы коллекторных измерений;

3. Получение зондовых характеристик и оценка концентрации, потенциала и температуры электронов плазмы дугового разряда, а также измерения аксиального и азимутального распределения концентрации плазмы в зависимости от различной конфигурации полого анода с помощью оригинальной автоматизированной системы измерения;

4. Проведение численного моделирования генерации электронного пучка, позволившего реализовать в эксперименте устойчивые режимы генерации пучка в условиях его самофокусировки за счет нарабатываемой плазмы в ускоряющем промежутке;

5. Проведение механических (измерение микротвёрдости) испытаний и профилометрии (измерение шероховатости) поверхности образцов, облученных интенсивным радиально сходящимся электронным пучком субмиллисекундной длительности с целью определения оптимальных режимов облучения, позволяющих формировать поверхностный слой образца, отличающийся повышенной твердостью и сниженным значением шероховатости.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Для снижения азимутальной неоднородности плотности тока радиально сходящегося электронного пучка и повышения стабильности его генерации в источнике с многодуговым сеточным плазменным катодом электродная система выполняется в виде набора элементарных эмиссионных ячеек, позволяющих достичь удовлетворительной неоднородности плотности тока пучка менее $\pm 10\%$ и исключить взаимосвязь дуговых разрядов в условиях неоднородности наработки пучковой плазмы в ускоряющем промежутке, обусловленной различными процессами на коллекторе (дегазация, плавление, испарение и др.), возникающими локально и дестабилизирующими работу источника электронов.

2. С помощью элементарной эмиссионной ячейки сеточного плазменного катода на основе дугового разряда низкого давления обеспечивается генерация низкоэнергетического (до 30 кВ) радиально сходящегося электронного пучка в секторе 60° с током до 100 А, длительностью 150 мкс и плотностью энергии до 30 Дж/см², достигаемой на поверхности металлического стержня диаметром 16 мм.

3. С использованием разработанного и созданного прототипа источника электронов с сеточным плазменным катодом на основе многодугового разряда низкого давления обеспечена генерация радиально сходящегося электронного пучка субмиллисекундной длительности с уникальной совокупностью параметров: ускоряющее напряжение от 5 до 50 кВ, ток в ускоряющем промежутке от 20 до 150 А, длительность импульсов от 50 до 500 мкс, частота следования импульсов до 1 с⁻¹, плотность энергии электронного пучка от 2,5 до 30 Дж/см² (при диаметре коллектора 10 – 16 мм).

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Достоверность и обоснованность выводов по результатам исследований и положений, выносимых на защиту обусловлена их непротиворечивостью относительно существующих представлений о природе изучаемых явлений, и основана на применении современного технического и программного обеспечения для экспериментальной, численной и статистической обработки большого массива полученных в диссертации экспериментальных данных.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. 15-я Международная конференция «Газоразрядная плазма и ее применения» (15th International Conference on Gas Discharge Plasmas and Their Applications, GDP 2021 (5 – 10 сентября, 2021 г.)), г. Екатеринбург, Россия;
2. XII Всероссийская конференция по физической электронике, ФЭ – 2022 (19 – 22 октября, 2022 г.), г. Махачкала, Россия;
3. 10-я Международная конференция «Физика плазмы и плазменные технологии» (X International Conference Plasma Physics and Plasma Technology, PPPT – 10 (12 – 16 сентября, 2022 г.)), г. Минск, Беларусь;
4. 8-й и 9-й Международный конгресс «Потоки энергии и радиационные эффекты» (8th, 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE 2022 (2 – 8 октября, 2022 г.); EFRE 2024 (16 – 21 сентября, 2024 г.)), г. Томск, Россия;
5. Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР 2023» (17 – 19 мая, 2023 г.), г. Томск, Россия;
6. VII Международный Крейнделевский семинар «Плазменная эмиссионная электроника» (31 июля – 6 августа 2023 г.) с. Максимиха, Республика Бурятия, Россия;
7. V научно-технический Семинар по электронно-пучковому оборудованию и технологиям «ОБЬ-2024» (10 – 14 июня, 2024 г.), г. Новосибирск, Россия;
8. XXIX Международная конференция по ускорителям заряженных частиц (Russian Particle Accelerators Conference), RuPAC'25 (15 – 19 сентября 2025 г.), г. Санкт-Петербург, Россия;
9. 16-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», ВИТТ-2025 (22 – 25 сентября 2025 г.), г. Минск, Беларусь;
10. 17-я Международная конференция «Газоразрядная плазма и ее применения» (17th International Conference on Gas Discharge Plasmas and Their Applications), GDP 2025 (8 – 12 сентября, 2025 г.), г. Екатеринбург, Россия.

Публикации

Материалы диссертационной работы опубликованы в 10 работах в журналах, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук» или учитываемых в библиографических базах данных научного цитирования Web of Science и Scopus. Зарегистрирован 1 патент на изобретение.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в создании экспериментальной установки, выборе методик экспериментов, проведении исследований, анализе и обобщении их результатов. Автором самостоятельно сформулирована научная новизна полученных результатов, выдвинуты защищаемые научные положения, сделаны выводы и даны рекомендации по внедрению результатов работы для обработки цилиндрических изделий радиально сходящимся электронным пуч-

ком. Обсуждения задач исследований и методов их решения и результатов анализа экспериментальных данных проводились совместно с соавторами, фамилии которых указаны в опубликованных по теме диссертации работах. Активное участие в проведении расчётов принимал Гришков А.А. при непосредственном участии соискателя. Постановка задач осуществлялась совместно с научным руководителем д.т.н. М.С. Воробьёвым и регулярными консультациями д.т.н., проф. Н.Н. Коваля.

Диссертационная работа выполнялась в Институте сильноточной электроники СО РАН, в лаборатории плазменной эмиссионной электроники. Исследования по тематике диссертации проводились в рамках следующих проектов: проект РНФ №23-29-00939 (2023-2024) – руководитель проекта; проект РНФ № 20-79-10015 (2020-2023); проект РНФ № 25-19-00745 (2025-2027); проект РНФ № 26-19-00927 (2026-2028); государственное задание № FWRM-2021-0006 (0291-2021-0006).

Автор диссертационной работы был удостоен стипендии Президента Российской Федерации для аспирантов и адъюнктов, проводящих научные исследования в рамках реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации (2024-2025).

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем работы составляет 153 страницы. В работе насчитывается 59 рисунков, 1 таблица и 130 наименований в списке литературы.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, обозначены цель и задачи работы, приведены защищаемые научные положения, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проведен сравнительный анализ источников электронов на основе различного типа эмиссии (термоэлектронная эмиссия, взрывная электронная эмиссия, ионно-электронная эмиссия, источники электронов с плазменным катодом). Продемонстрированы преимущества источников с СПК перед остальными типами источников, а также необходимость генерации интенсивных радиально сходящихся субмиллисекундных электронных пучков и перспективность их применения в области обработки металлических изделий цилиндрической формы. Рассмотрены различные системы электропитания СПК. Сделаны выводы о перспективности и способах дальнейшего совершенствования источников электронов с СПК. По итогам анализа сформулированы задачи исследования.

Во второй главе представлено подробное описание экспериментального стенда источника электронов с СПК, способного генерировать интенсивный радиально сходящийся пучок субмиллисекундной длительности, приведена конструкция электродной системы СПК, многодуговых плазмогенераторов. Рассмотрены разработанные и созданные источники электропитания и управления многодуговым разрядом. Описаны методики и техника эксперимента с

представлением принципиальных электрических и конструкционных схем систем измерения. Рассмотрены особенности измерения параметров плазмы зондовым методом, проведения коллекторных измерений интенсивного радиально сходящегося электронного пучка субмиллисекундной длительности с помощью специально разработанной и созданной системы, позволяющей оценить степень его азимутальной неоднородности.

Все эксперименты проводились на созданном экспериментальном стенде источника электронов с СПК, схема которого представлена на рисунке 1.

Конструкция источника включает в себя вакуумную камеру 10, которая находится под потенциалом «земли», и СПК, который представляет собой коаксиальные цилиндры, выполненные из нержавеющей стали и имеющие одинаковую длину – 320 мм. Внутренний цилиндр диаметром 220 мм выполняет функцию основного анода и имеет радиально симметричное окно (вырез), перекрытое мелкоструктурной сеткой 3, которая разделяет разрядный 1 и ускоряющий 2 промежутки. Внешний цилиндр диаметром 460 мм выполняет функцию вспомогательного полого анода 4, который подключен через сопротивление R_{ha} к основному аноду для переключения тока дугового разряда в область эмиссионной сетки и повышения эффективности извлечения электронов из СПК в ускоряющий промежуток.

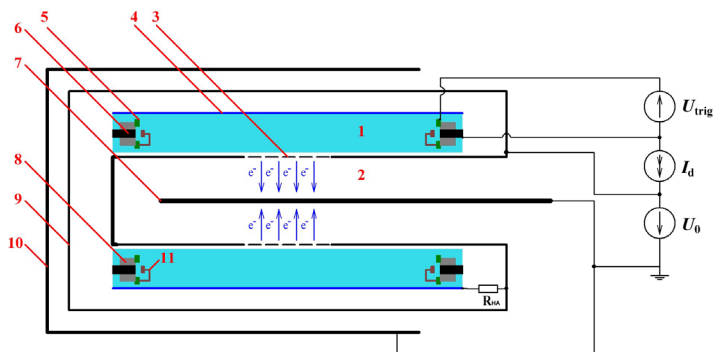


Рисунок 1 – Схема источника электронов с СПК: 1 – эмиссионная плазма, 2 – ускоряющий промежуток, 3 – мелкоструктурная эмиссионная сетка, 4 – полый анод, 5 – поджигающий электрод, 6 – катод, 7 – коллектор, 8 – диэлектрик, 9 – корпус плазменного эмиттера, 10 – вакуумная камера, 11 – перераспределяющий электрод

Через ячейки мелкоструктурной сетки 3, размеры которой составляли $0,14 \times 0,14$ мм или $0,4 \times 0,4$ мм, осуществляется отбор электронов. Для проведения исследований предельных режимов генерации электронного пучка ширина эмиссионного окна варьировалась в диапазоне 5–15 см.

При создании плазмогенераторов было отдано предпочтение дуговому разряду открытого типа (без контрагирования) с иницированием катодного

пятна пробоем по поверхности диэлектрика. Выбор дуги открытого типа обусловлен простой и надежной конструкцией, а также слабой зависимостью параметров разряда от напуска рабочего газа по сравнению с контрагированным дуговым разрядом, который при большой длительности импульса (уровня сотен микросекунд) или амплитуде тока дугового разряда (уровня сотен ампер) может приводить к обрывам тока разряда при нехватке рабочего газа в канале контрагирования. Для обеспечения требуемой однородности распределения концентрации эмиссионной плазмы как в аксиальном, так и азимутальном направлениях, удовлетворяющей требованиям, которые предъявляются к однородности генерируемых электронных пучков, на торцах эмиттера было размещено 6 плазмогенераторов (по 3 с каждой стороны), разнесенные по азимуту на угол 60 градусов относительно друг друга. При использовании семижильного высоковольтного кабеля КПВ-300 шесть его жил подключены к катодам 6 и один к основному аноду, под потенциалом которого находятся эмиссионная сетка 3 и внутренняя стенка плазменного эмиттера. В качестве рабочего газа использовался аргон. Для равномерной подачи аргона в СПК организована распределенная система подачи газа, в которой все катоды имеют аксиальное отверстие 1 мм, через которые осуществляется напуск газа по трубкам одинаковой длины. Вследствие ограниченного количества токоведущих жил в высоковольтном кабеле КПВ-300, подача импульса поджига на каждый плазмогенератор происходит через катодные провода и общий анод разряда с помощью источника U_{trig} , а поддержание тока разряда обеспечивается источником I_d . Каждый поджигающий электрод 5 подключен к основному аноду через сопротивление 15 Ом. Таким образом, сначала генерируется высоковольтный импульс поджига, происходит пробой по поверхности диэлектрика 8, инициирующий катодное пятно на поверхности катода 6, что способствует последующему зажиганию дугового разряда с длительностью импульса, которая задается системой электропитания СПК. Для диффузного горения дуги напротив каждого катода устанавливается перераспределяющий электрод 11, электрически соединенный с поджигающим электродом 5. Отбор электронов из эмиссионной плазмы и их ускорение до коллектора осуществляются через ячейки эмиссионной сетки под действием постоянного ускоряющего напряжения величиной до 50 кВ, приложенного между СПК и коллектором 7.

Источник электропитания СПК состоит из двух основных блоков: блока управления и силового блока, включающего в себя источник питания поджига и источник питания дугового разряда. Источник предназначен для питания многодугового разряда с напряжением горения до 150 В и током до 250 А. В условиях стабильного срабатывания всех плазмогенераторов источник питания СПК формирует выходной импульс с напряжением холостого хода 600 ± 30 В на каждой вторичной обмотке двухобмоточных дросселей. Длительность фронта импульса тока многодугового разряда до 10 мкс, среза – до 10 мкс, длительность импульса – от 10 до 500 мкс. Основным преимуществом разработанной системы электропитания является то, что помимо обеспечения независимости выходного напряжения холостого хода от тока дугового разряда,

последовательное включение первичных обмоток дросселей позволяет обеспечить напряжение на каждой вторичной обмотке дросселей от 600 В до 3500 В, повышая стабильность срабатывания плазмогенераторов и позволяя минимизировать разброс их времени срабатывания, который в разработанной и созданной схеме составлял не более 10 мкс.

В третьей главе описаны процессы генерации эмиссионной плазмы при использовании многодугового разряда низкого давления в источнике электронов с СПК. Характерные ВАХ разряда для различного давления рабочего газа (аргона) представлены на рисунке 2.

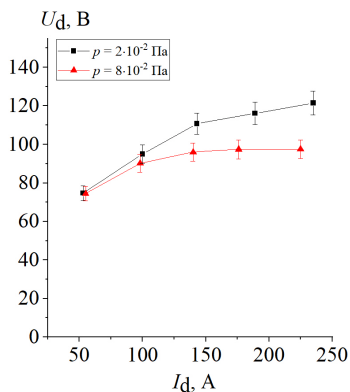


Рисунок 2 – ВАХ дугового разряда низкого давления при разных давлениях рабочего газа

пропорциональному росту концентрации плазмы n_e с $3,8 \times 10^{10}$ до $8,1 \times 10^{10}$ см⁻³, что обусловлено увеличением эмиссии электронов с катодов многодугового разряда, приводящей к росту частоты ионизаций в пространстве СПК. Представленная на рисунке 4 зависимость демонстрирует развитие плазмы дугового разряда в объёме и заметный рост концентрации электронов в плазме дугового разряда до длительности импульса разряда $t=60$ мкс, после чего рост становится незначительным, что связано с расширением плазмы и заполнением ею объема СПК.

Измерения показали, что азимутальная неоднородность эмиссионной плазмы составила $\approx 10\%$, а аксиальная – $\approx 40\%$. Стоит отметить, что экспериментально полученное значение аксиальной неоднородности не может быть использовано для удовлетворительной обработки поверхности протяженных изделий и требует улучшения.

После определения ВАХ разряда были проведены эксперименты по измерению параметров плазмы, генерируемой дуговым разрядом низкого давления. Измерение параметров плазмы при различных токах дугового разряда (рисунок 3) и в различные моменты измерения в течение импульса тока разряда (рисунок 4) длительностью 100 мкс проводилось в сечении СПК, проходящем через середину эмиссионной щели. Повышение тока дугового разряда приводит к росту концентрации плазмы во всем рабочем диапазоне давлений. Так, например, при $p = 5 \times 10^{-2}$ Па, увеличение тока разряда с 50 А до 120 А приводит к про-

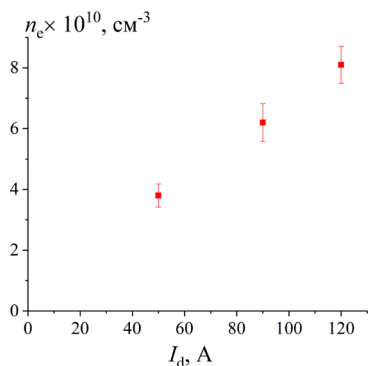


Рисунок 3 – Зависимость концентрации плазмы дугового разряда от тока разряда при $p = 5 \times 10^{-2}$ Па

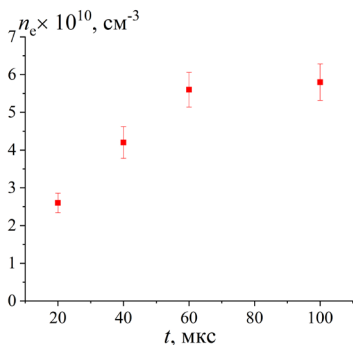


Рисунок 4 – Зависимость концентрации плазмы дугового разряда от момента ее измерения в течение импульса тока дугового разряда при $I_d = 80$ А, $p = 5 \times 10^{-2}$ Па

При обработке изделий цилиндрической или другой более сложной формы азимутальная неоднородность является основным параметром, однако аксиальная неоднородность также является важным параметром пучка. В исследуемом источнике азимутальная неоднородность составила около 10%, что является приемлемым результатом для проведения модификации поверхности материалов, однако аксиальная неоднородность около 40% не может гарантировать качественную обработку протяженных деталей, что можно технологически устранить за счет протягивания изделия через ось источника электронов.

Для снижения аксиальной неоднородности радиально сходящегося электронного пучка было необходимо произвести модернизацию плазменного эмиттера (рисунок 5): расстояние от эмиссионной области до плазмогенераторов было уменьшено с 14 до 8 см, все плазмогенераторы были установлены на одну сторону СПК с разнесением на угол 60 градусов по азимуту относительно друг друга, а ширина эмиссионной области была сокращена с 15 до 5 см. В результате модернизации удалось снизить аксиальную неоднородность распределения концентрации плазмы дугового разряда до $\pm 10\%$, сохранив значение азимутальной неоднородности на уровне $\pm 10\%$.

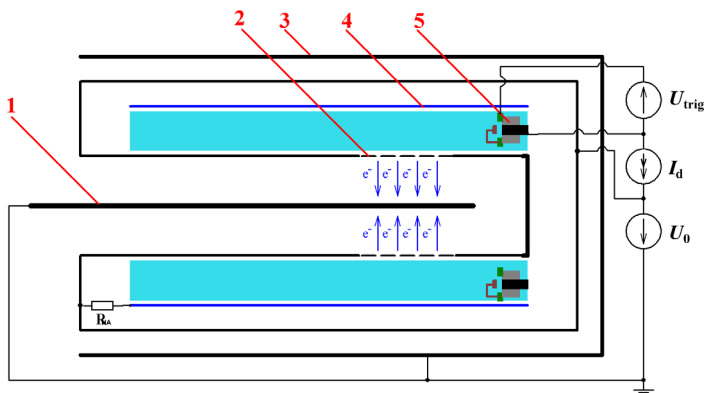


Рисунок 5 – Принципиальная схема источника: 1 – коллектор, 2 – эмиссионная сетка, 3 – вакуумная камера, 4 – полый анод, 5 – плазмогенератор

Четвертая глава посвящена генерации радиально сходящегося электронного пучка и его характеристикам в зависимости от различных условий генерации.

Для оценки необходимого размера ячейки эмиссионной сетки был проведён расчёт ширины приэлектродного слоя l , который можно считать ионным. Его величина в отсутствие ускоряющего напряжения может быть оценена из равенства плотностей ионного тока на анод, определяемого соотношением Бома и законом Чайдла – Ленгмюра. Взяв значения концентрации ($n = 8,1 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$) и потенциала плазмы ($\varphi = 110 \text{ В}$), полученные в ходе проведения зондовых измерений, значение приэлектродного слоя составило $l \approx 0,6 \text{ мм}$. Полученное значение позволяет оценить требуемую геометрию эмиссионной сетки: размер ячейки должен быть не более чем две ширины приэлектродного слоя, что исключает эмиссию электронов с открытой плазменной поверхности, чаще всего приводящей к неустойчивостям генерации эмиссионной плазмы и электронного пучка.

При проведении предварительных экспериментов по генерации электронного пучка, отличающихся размером ячейки эмиссионной сетки было сразу отмечено, что размер ячейки сетки влияет на стабильность работы источника электронов и аксиальную неоднородность плотности энергии электронного пучка на коллекторе. При прочих равных условиях, в случае использования сетки с размером ячейки $0,4 \times 0,4 \text{ мм}$, работа источника отличалась неустойчивостью генерации пучка, большим количеством электрических пробоев ускоряющего промежутка, невозможностью получения токов пучка, достаточных для обеспечения требуемой плотности энергии на коллекторе и высокой аксиальной неоднородностью плотности энергии пучка, что выражалось в виде локальных оплавлений поверхности коллектора в проекции апертуры эмиссионного окна.

Такой характер распределения плотности тока пучка на коллекторе позволил сделать предположение о нарушении работы СПК и эффективности генерации эмиссионной плазмы, заполняющей пространство полого анода, в условиях отбора из него электронов, а именно о нарушении неоднородности концентрации эмиссионной плазмы, измеренной до начала экспериментов с наличием ускоряющего напряжения. Подобное нарушение может быть связано с уходом быстрых электронов с краёв эмиссионной области из-за проникновения электрического поля из ускоряющего промежутка в область генерации разряда. Поскольку энергия быстрых электронов достаточна для ионизации, то их уход из СПК приводит к снижению эффективности генерации эмиссионной плазмы. Другими словами, «эффект полого анода», основанный на осцилляции быстрых электронов в пространстве СПК и повышении за счет этого степени ионизации генерируемой плазмы, нарушается.

Из представленных на Рисунке 6 зависимостей видно, что ток в ускоряющем промежутке I_0 слабо зависит от напряжения U_0 . Несмотря на то, что в данных экспериментах использовалась эмиссионная сетка со сравнительно крупным размером ячейки ($0,4 \times 0,4$ мм), при токе разряда $I_d = 150$ А максимальная величина тока I_0 не превышала $I_0 = 50$ А. Из анализа полученных зависимостей был сделан вывод, что при появлении ускоряющего напряжения условия плазмообразования нарушаются и существенно отличаются от случая, когда ускоряющее напряжение отсутствует. Это может быть связано с тем, что наличие ускоряющего напряжения и сформированного им электрического поля от коллектора к эмиссионной сетке приводит к отбору из СПК электронов, энергии которых еще достаточно для ионизации рабочего газа, существенно уменьшая длину их пути в пространстве полого анода СПК. В этом случае «эффект полого анода», основанный на осцилляциях быстрых электронов и длинах свободного пробега быстрых электронов (составляющим при указанных рабочих давлениях ~ 10 м), не запускается, и увеличение извлекаемого тока при увеличении ускоряющего напряжения практически не наблюдается.

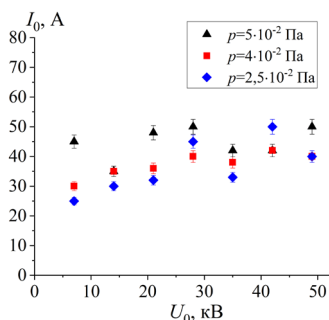


Рисунок 6 – Зависимость тока в ускоряющем промежутке I_0 от ускоряющего напряжения U_0 при различных давлениях рабочего газа. $I_d = 150$ А, $t = 50$ мкс, размер ячейки сетки – $0,4 \times 0,4$ мм, ширина эмиссионной области 15 см

при увеличении ускоряющего напряжения практически не наблюдается.

На рисунке 7 представлена зависимость тока в ускоряющем промежутке от ускоряющего напряжения при различных давлениях рабочего газа при использовании эмиссионной сетки с размером ячейки $0,14 \times 0,14$ мм. Представленный график демонстрирует значительный рост тока в

ускоряющем промежутке близкий к величине тока разряда I_d . Такое существенное расхождение токов генерируемого электронного пучка может быть связано с механизмом запуска «эффекта полого анода», наблюдаемого в отсутствие ускоряющего напряжения, то есть в условиях, позволяющих провести измерения параметров эмиссионной плазмы.

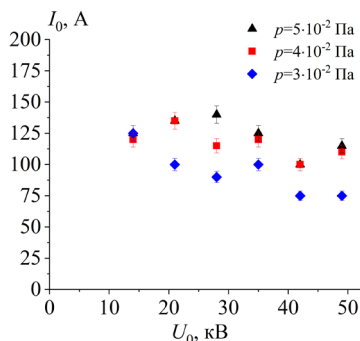


Рисунок 7 – Зависимость тока в ускоряющем промежутке от ускоряющего напряжения. Ток разряда $I_d = 150$ А, длительность импульса $t = 50$ мкс, ячейка сетки $0,14 \times 0,14$ мм, ширина эмиссионной области 15 см.

Неоднородность распределения плотности тока пучка по его сечению является одним из наиболее важных параметров для всех источников электронов, которые используются в технологиях для воздействия на материалы. Для измерения неоднородности плотности тока интенсивного радиально сходящегося электронного пучка большого сечения, генерируемого в источнике с СПК на основе дугового разряда низкого давления, использовался специально созданный секционированный коллектор из нержавеющей стали. Он представляет собой трубку, на конце которой через керамическую вставку закреплены четыре пластины из нержавеющей стали, изолированные друг от друга.

На рисунке 8 представлены результаты коллекторных измерений при давлении рабочего газа $p = 4 \times 10^{-2}$ Па, токе пучка $I_0 = 20$ А при длительности импульса $t = 100$ мкс, из которых видно, что на одну из пластин секционированного коллектора замыкается в несколько раз больше тока, чем на другие пластины.

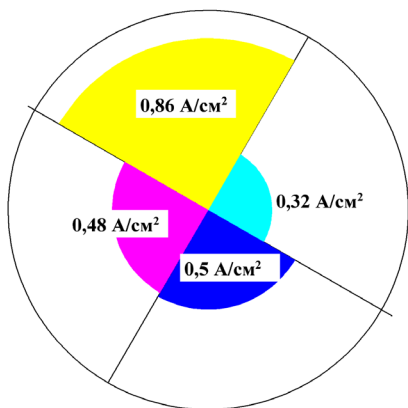


Рисунок 8 – Результаты коллекторных измерений при $p = 4 \times 10^{-2}$ Па,
 $I_0 = 20$ А, $t = 100$ мкс

После обработки полученных данных была рассчитана неоднородность плотности тока пучка, которая составила $\pm 60\%$. Полученный электронный пучок со столь высокой неоднородностью не может быть использован для решения задач по обработке поверхности цилиндрических изделий и требует новых подходов, ориентированных на снижение неоднородности. В ходе проведённых экспериментов было сделано предположение, что локальное замыкание тока пучка на одну из секций коллектора вызвано появлением

дестабилизирующих эффектов, инициируемых с поверхности коллектора и связанных с плавлением коллектора и ионизацией испаряемого материала.

Для того, чтобы проверить достоверность выдвинутого предположения конструкция СПК была модернизирована, и вместо цельнометаллического полого анода был установлен секционированный полый анод, конструкция которого позволяет ограничить область горения дугового разряда для каждого плазмогенератора, исключая возможность влияния дуговых разрядов друг на друга (рисунок 9). В такой конфигурации различные процессы (дегазация, плавление, испарение и др.), локально возникающие на коллекторе и дестабилизирующие работу источника электронов, не могут влиять на те участки эмиссионной границы плазмы, которые находятся вне телесного угла участка коллектора, на котором развиваются данные дестабилизирующие процессы.

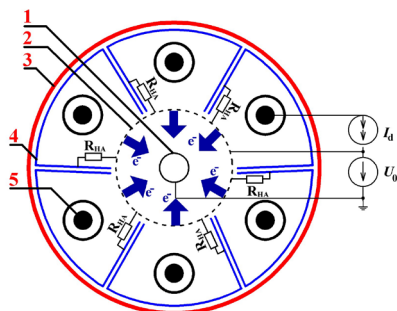


Рисунок 9 – Принципиальная схема модернизированного плазменного катода

Повторно проведённые коллекторные измерения (рисунок 10), а также эксперименты с получением автографа пучка на поверхности цельнометаллического коллектора из нержавеющей стали при тех же параметрах системы (рисунок 11) показали, что сеточный плазменный катод с секционированным полым анодом позволяет снизить азимутальную неод-

нородность распределения плотности тока радиально сходящегося электронного пучка с 60% до 10%. Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют об уменьшении влияния дестабилизирующих процессов на неоднородность плотности интенсивного радиально сходящегося электронного пучка, связанных с плавлением и испарением коллектора в процессе его облучения.

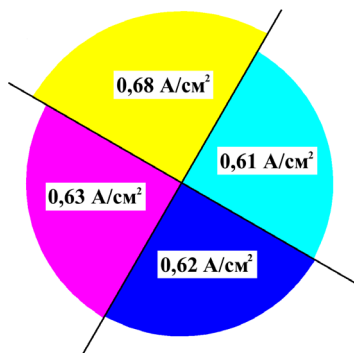


Рисунок 10 – Распределение плотности тока пучка с секционированным полым анодом. Параметры: $p = 4 \times 10^{-2}$ Па, $I_0 = 20$ А, $t = 100$ мкс, $U_0 = 30$ кВ, $E_{уд} = 2,5$ Дж/см², ширина эмиссионной области 5 см



Рисунок 11 – Фото коллектора после обработки с использованием секционированного полого анода. Параметры: $p = 4 \times 10^{-2}$ Па, $I_0 = 20$ А, $t = 100$ мкс, $U_0 = 30$ кВ, $E_{уд} = 2,5$ Дж/см², $N = 100$ имп., ширина эмиссионной области 5 см

Таким образом подтверждена принципиальная возможность генерации радиально сходящегося электронного пучка с удовлетворительной неоднородностью достаточной для обработки металлических изделий за десятки импульсов тока пучка с плотностью энергии до 14 Дж/см².

Поскольку максимально достигнутая плотность энергии радиально сходящегося электронного пучка в секторе коллектора 360° ограничена возможностями системы электропитания СПК, то остаётся интерес к возможностям исследуемой системы для обработки металлических изделий за один импульс тока пучка. Для исследования предельных режимов работы исследуемой системы была проведена специальная серия экспериментов, суть которых заключалась в увеличении тока разряда в одной секции полого анода в 6 раз (до 150 А) путём подключения всех шести выходов индуктивного источника электропитания многодугового разряда к одному из плазмогенераторов.

На рисунке 12 представлена осциллограмма тока в ускоряющем промежутке радиально сходящегося электронного пучка, генерируемый в секторе 60° от одной секции СПК. Видно, что ток в ускоряющем промежутке со временем возрастает, достигая за $t = 150$ мкс значений порядка $I_0 = 90$ А. Принципиально важно то, что длительность импульса составляет 150 мкс, в течение

которых сохраняется высокий уровень тока пучка. Данный результат напрямую свидетельствует о возможности эффективного энергоклада в обрабатываемый материал. При ускоряющем напряжении десятки киловольт (~ 30 кВ) и токе пучка порядка 65 А мгновенная мощность в ускоряющем промежутке достигает мегаваттного уровня (~ 2 МВт).

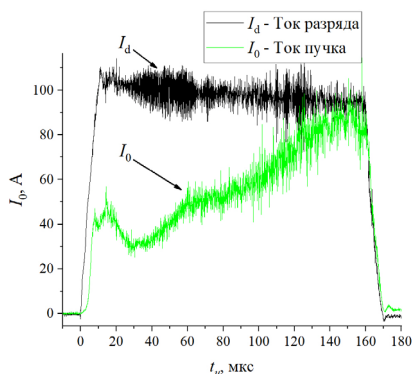


Рисунок 12 – Характерная осциллограмма тока разряда и тока в ускоряющем промежутке при работе одной секции полого анода при ускоряющем напряжении 30 кВ, $p = 5 \times 10^{-2}$ Па

сционированной радиально сходящейся системе возможно формирование стабильного интенсивного электронного пучка субмиллисекундной длительности, обеспечивающего высокий удельный энергоклад, необходимый для эффективной импульсной обработки поверхности металлических материалов и изделий.

В ходе проведения экспериментов по обработке металлических материалов и изделий цилиндрической формы интенсивным радиально сходящимся электронным пучком большого сечения были определены основные режимы их обработки: ток разряда $I_d = 150$ А, ускоряющее напряжение $U_0 = 40\text{--}50$ кВ, длительность импульса $t = 150\text{--}200$ мкс и частота следования импульсов $f = 1$ Гц. Выбранные режимы генерации позволяют эффективно производить обработку поверхности цилиндрических изделий из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и титана марки ВТ1-0 диаметром 10–16 мм с удовлетворительной азимутальной и аксиальной неоднородностью плотности тока пучка ($\pm 10\%$).

После обработки радиально сходящимся электронным пучком наблюдалось увеличение микротвёрдости модифицированного слоя титана ВТ1-0 в 2,6 раза относительно исходного состояния. Одновременно шероховатость поверхности титана снизилась с 6,6 до 3 мкм, а стали 12Х18Н10Т — с 2 до 0,4 мкм, что обусловлено быстрым нагревом поверхностного слоя образца выше

При такой модернизации экспериментального стенда энергия электронного пучка составила ≈ 200 Дж, что при площади облучения $\approx 6,7$ см² позволяет достичь плотности энергии электронного пучка ≈ 30 Дж/см². Такой уровень энергоклада является достаточным для реализации многих технологических процессов обработки поверхности (плавления, модификации структуры и упрочнения) в течении одного импульса длительно-стью $t = 150$ мкс.

Представленные экспериментальные данные демонстрируют ключевой результат: в сек-

температуры плавления, в результате которого произошла полировка поверхности. Данный результат, и является удовлетворительным для решения ряда научных и технологических задач.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Разработан и создан источник электронов с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления, обеспечивающий формирование радиально сходящегося электронного пучка с энергией до 50 кэВ и током до 150 А при длительности импульса до 500 мкс и с плотностью энергии до 14 Дж/см². Подтверждена возможность стабильного получения однородной эмиссионной плазмы в данной конструкции, что является ключевым условием стабильного формирования и генерации интенсивного радиально сходящегося электронного пучка в секторе 360°.

2. Разработан оригинальный источник электропитания для СПК на основе многодугового разряда низкого давления на основе индуктивных накопителей энергии, обеспечивающий стабильную генерацию разряда амплитудой до 250 А, длительностью импульса до 500 мкс и частотой следования до 1 Гц. Использование данного источника электропитания позволило существенно повысить стабильность зажигания многодугового разряда (за счет возможности увеличения напряжения холостого хода до 3500 В), увеличить КПД передачи энергии в нагрузку (≈78%) и повысить управляемость пучка, обеспечивая независимое регулирование его параметров (амплитуды и длительности импульса тока дугового разряда) по оптоволоконным каналам связи.

3. Проведены комплексные измерения параметров плазмы многодугового разряда низкого давления с использованием одиночного зонда Ленгмюра и разработанных оригинальных методов автоматизированной диагностики, что обеспечило возможность оперативного получения и обработки параметров плазмы с большим объемом выборки.

4. Проведена модернизация СПК, заключающаяся в установке плазмогенераторов на один из его торцов, разнесении их на угол 60°, уменьшении ширины эмиссионной области до 50 мм и сокращении расстояния до начала эмиссионной области до 80 мм, что позволило снизить аксиальную неоднородность плазмы с ≈40% до ≈10%, сохранив азимутальную неоднородность на уровне ≈10% в отсутствие внешнего ускоряющего электрического поля.

5. Экспериментально показано, что в источнике электронов с сеточным плазменным катодом на основе многодугового разряда уменьшение размера ячейки эмиссионной сетки с 0,4×0,4 мм до 0,14×0,14 мм обеспечивает кратный рост тока в ускоряющей промежутке и формирование радиально сходящегося электронного пучка с аксиальной неоднородностью не хуже ±10%.

6. Секционирование полого анода СПК на основе многодугового разряда низкого давления позволяет снизить азимутальную неоднородность плотности тока радиально сходящегося электронного пучка до 10% за счёт ограничения влияния электронно-пучковых процессов на коллекторе (таких как десорбция, плавление и испарение), возникающих на нем локально и дестабилизирующих работу электронного источника, на отбор электронов с участков плазменной

границы, лежащих вне телесного угла участка коллектора, на котором развиваются данные дестабилизирующие процессы. Данные экспериментов подтвердили эффективность предложенной секционированной конструкции СПК для повышения стабильности параметров интенсивного радиально сходящегося электронного пучка и снижения неоднородности его распределения, обеспечивая возможность использования разработанного и созданного источника электронов в научных и технологических целях.

7. Проведена электронно-пучковая обработка стержней диаметром 16 мм из титана марки ВТ1–0 и стали 12Х18Н10Т радиально сходящимся субмиллисекундным электронным пучком с током до 25 А при ускоряющем напряжении до 50 кВ и длительности импульса до 150 мкс, в результате которой удалось повысить микротвердость поверхности титановых стержней в 2,6 раза с 1800 (± 100) МПа до 4700 (± 300) МПа и снизить ее шероховатость с 6,6 мкм до 3 мкм, а также снизить шероховатость поверхности образца из нержавеющей стали с 2 мкм до 0,4 мкм за счет оплавления и полировки.

8. Предложен новый подход к генерации радиально сходящегося электронного пучка с энергией до 50 кэВ и током до 100 А при длительности импульса до 150 мкс и с плотностью энергии до 30 Дж/см² в системе источника электронов с СПК на основе многодугового разряда низкого давления, заключающийся в использовании элементарных эмиссионных ячеек, каждая из которых может обеспечивать плотность энергии пучка на коллекторе достаточную для модификации поверхности различных металлических материалов и достижения удовлетворительной неоднородности плотности энергии за счет разнесения элементарных ячеек в пространстве как в азимутальном, так и аксиальном направлении, что крайне важно при электронно-пучковой обработке цилиндрических изделий большой протяженности (~1 м и более).

Созданный источник интенсивного радиально сходящегося электронного пучка может быть использован в различных областях науки и техники: для модификации поверхностных слоёв протяжённых цилиндрических изделий, электронно-пучковой полировки их поверхности, моделирования экстремальных энергетических воздействий на различные материалы и изделия, генерации СВЧ-излучения и др.

Полученные результаты могут служить **практическими рекомендациями** для решения прикладных задач по увеличению износостойкости поверхности наиболее ответственных деталей машин, пар трения, узлов и инструмента атомной, авиакосмической и нефтегазовой отраслей и смежных областей, а также на инструментальных участках машиностроительных производств.

Перспективы дальнейшего развития представленной тематики связаны с созданием более мощных источников электронов с радиально сходящимися пучками, обеспечивающих увеличение плотности энергии для обработки материалов и изделий за один импульс для различной геометрии обрабатываемых изделий. Также перспективным направлением является дальнейшая оптимизация конструкции элементарной ячейки многодугового сеточного плазменного катода с целью снижения неоднородности плотности тока пучка и

дальнейшего повышения стабильности его генерации. Дополнительное развитие может быть связано с расширением областей применения радиально сходящихся электронных пучков, включая задачи модификации поверхности, генерации СВЧ-излучения и плазменных технологий.

В заключении автор искренне благодарит д.т.н. М.С. Воробьёва, под руководством которого была выполнена диссертационная работа. Автор признателен д.т.н., проф. Н.Н. Ковалю, к.т.н. С.Ю. Дорошкевичу, А.А. Гришкову за полезные дискуссии и помощь в проведении экспериментов. Автор выражает благодарность всем сотрудникам лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН за всестороннюю поддержку и рекомендации по теме диссертации.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Vorobyov, M. S. Spatiotemporal Dynamics of a Low-Pressure Arc and a Generated Beam in an Electron Source with a Grid Plasma Emitter / M.S. Vorobyov, P. V. Moskvina, V. I. Shin, **M.S. Torba** [et al.] // High Temperature. – 2022. – Vol. 60, No. 4. – P. 438-445. – DOI 10.1134/s0018151x22040162.

2. Картавцов, Р.А. Метод оценки коэффициента извлечения электронов и коэффициента ионно-электронной эмиссии из сеточного плазменного катода / Р.А. Картавцов, М.А. Мокеев, М.С. Воробьев, **М.С. Торба** [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 2025. – Т. 51, № 4. – С. 15-18. – DOI 10.61011/PJTF.2025.04.59836.20104.

3. Москвин, П.В. Динамика извлечения электронов из сеточного плазменного катода на основе дугового разряда низкого давления / П.В. Москвин, М.С. Воробьёв, А.А. Гришков, **М.С. Торба** [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 2023. – Т. 49. – № 11. – С. 43-46.

4. Девятков, В.Н. Электронный источник с многодуговым плазменным катодом для генерации модулированного пучка субмиллисекундной длительности / В.Н. Девятков, М.А. Мокеев, М.С. Воробьёв, **М.С. Торба** [и др.] // Письма в ЖТФ, – 2024, – Т. 50(19), – с. 25–28.

5. **Torba, M.S.** Multiarc Plasma Electron Emitter for Generating a Radially Convergent Beam / **M.S. Torba**, S.Yu. Doroshkevich, M.S. Vorobiev, A.A. Grishkov, N.N. Koval, R.A. Kartavtsov, M.A. Mokeev, D.A. Shpanov // Instruments and Experimental Techniques. – 2025. – Vol. 68, no. 1. – P. 78–85. – DOI 10.1134/S0020441225700253.

6. **Torba M.S.** Electron source with a radially converging beam and a multiarc plasma cathode / **M.S. Torba**, S.Yu. Doroshkevich, M.S. Vorobyov, N.N. Koval, V.V. Ezhov, S.A. Sulakshin, R.A. Kartavtsov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2023. – Vol. 87, no. S2. – P. S318–S323.

7. Воробьев, М.С. Отрицательная обратная связь по току в ускоряющем промежутке в источниках электронов с плазменным катодом / М.С. Воробьев, П.В. Москвин, В.И. Шин, **М.С. Торба** [и др.] // Журнал технической физики. – 2022. – Т. 92, № 6. – С. 883–888. – DOI 10.21883/JTF.2022.06.52519.14-22.

8. **Торба, М.С.** Пространственная фокусировка радиально сходящегося электронного пучка в источнике на основе многодугового сеточного плазменного эмиттера / **М.С. Торба**, А.А. Гришков, С.Ю. Дорошкевич [и др.] // Proceedings of 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation. Tomsk: TPU Publishing House, – 2024. – p. 799–802

9. **Torba, M.S.** Space focusing of a radially converged electron beam in source based on a multi-arc grid plasma emitter / **M.S. Torba**, A.A. Grishkov, S.Yu. Doroshkevich [et al.] // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. – 2024. – 88 (Suppl 5).

10. Устройство для генерации однородного радиально сходящегося электронного пучка в источнике с сеточным плазменным катодом / **М.С. Торба**, С.Ю. Дорошкевич, А.А. Гришков [и др.] // Патент на изобретение 2854352 С1, 29.12.2025. Заявка № 2025110528 от 23.04.2025.