

На правах рукописи



Москвин Павел Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ
ИНТЕНСИВНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПУЧКОВ
В ИСТОЧНИКАХ ЭЛЕКТРОНОВ С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ
НА ОСНОВЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ**

Специальность 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 Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН).

Научный
руководитель:

Воробьёв Максим Сергеевич,
доктор технических наук.

Официальные
оппоненты:

Бурдовицин Виктор Алексеевич,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР), профессор кафедры физики, г. Томск;

Мартенс Владимир Яковлевич,
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет» (ФГАОУ ВО СКФУ), профессор кафедры экспериментальной физики, г. Ставрополь.

Ведущая
организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН), г. Новосибирск.

Защита состоится 11 сентября 2026 г. в 14 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 по адресу: 634055, г. Томск, пр. 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/moskvin-pavel-vladimirovich/>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

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



Г.Ю. Юшков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Источники интенсивных электронных пучков используют для исследований воздействия концентрированных потоков энергии на неорганические материалы, в частности для постоянного или импульсного нагрева и плавления поверхности сталей и сплавов с целью улучшения её свойств. Пучки электронов имеют сравнительно невысокий коэффициент отражения даже от полированной металлической поверхности, составляющий от единиц до десятков процентов и зависящий, прежде всего, от атомного номера бомбардируемого металла. При этом, импульсные источники электронов обеспечивают высокие скорости нагрева поверхности металлических и металлокерамических изделий $\sim 10^8$ К/с, что выгодно отличает их от стационарных пучков с точки зрения эффектов модификации этой поверхности.

Отдельное место занимают источники электронов с плазменными катодами, с помощью которых было неоднократно продемонстрировано, что электронно-пучковое воздействие на металлические и металлокерамические материалы позволяет улучшить трибологические, прочностные и эксплуатационные свойства изделий: уменьшить шероховатость поверхности, снизить коэффициент сухого трения и скорость износа, увеличить микротвердость поверхности, коррозионную стойкость, усталостную долговечность. Контролируемое изменение свойств поверхности изделия без необходимости модификации его объема и создание таким образом новых материалов является энерго- и ресурсосберегающим подходом, что соответствует приоритетам Стратегии научно-технологического развития РФ в части перехода к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, новым материалам и способам конструирования. При этом воздействие интенсивным пучком электронов может применяться как самостоятельная технология улучшения материалов, так и в совокупности с другими технологиями. Кратное улучшение свойств в ходе многостадийной технологической обработки обеспечивает растущий интерес к данной тематике с перспективой внедрения в производство получаемых научных результатов.

Промышленное применение любого оборудования, в том числе источника электронов накладывает особые требования на воспроизводимость результата и стабильность работы. Импульсные источники электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с сеточной/слоевой стабилизацией границы эмиссионной плазмы и плазменным анодом с открытой границей плазмы не являются исключением. Однако, отличаясь уникальным диапазоном параметров генерируемого электронного пучка и уникальными технологическими возможностями, такие источники демонстрируют удовлетворительную повторяемость параметров пучка только в установившихся режимах работы, которые, как правило, реализуются после предварительной тренировки ускоряющего промежутка. Длительность тренировки тем больше, чем ближе параметры пучка к предельным значениям, ограниченным электриче-

ским пробоем ускоряющего промежутка. Обработка поверхности изделий значительной площади электронным пучком подразумевает перемещение области воздействия и перерывы в работе источника электронов для позиционирования, выполнения иных технологических операций, что тоже провоцирует возникновение пробоев. В свою очередь, непредсказуемое появление и развитие пробоя в любой момент импульса генерации пучка может приводить к неконтролируемому изменению свойств обрабатываемой поверхности, что ограничивает внедрение импульсных плазменных источников электронов для модификации поверхности материалов и изделий на производстве. Так, повышение стабильности генерации электронного пучка и увеличение электрической прочности ускоряющего промежутка, заключающиеся в снижении количества/вероятности его электрических пробоев, является необходимым условием развития электронно-пучковых методов обработки материалов.

В настоящей работе под стабильностью генерации пучков электронов будем понимать долю импульсов, сгенерированных без возникновения электрических пробоев ускоряющего промежутка источника электронов от общего числа импульсов.

Цель работы состояла в поиске методов повышения стабильности генерации широкоапертурного (десятки-сотни см²) электронного пучка в импульсных источниках с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления со стабилизированной катодной и открытой анодной поверхностью плазмы для уменьшения доли от общего числа импульсов с неконтролируемыми параметрами и расширения предельных параметров источника электронов.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработать метод ослабления негативного влияния динамики радиального распределения плотности тока плазменного катода на стабильность работы источника электронов;
2. Разработать метод ослабления влияния коллекторной плазмы на стабильность работы источника электронов;
3. Разработать способ создания плазменного анода до начала генерации электронного пучка для повышения его стабильности на начальной стадии формирования.

Научная новизна

1. Выявлено существенное различие в распределении плотности анодного тока в осесимметричной разрядной ячейке плазменного эмиттера электронов на основе дугового разряда низкого давления на начальном этапе формирования разряда и в установившемся режиме его горения.
2. Предложен и реализован способ оценки коэффициента извлечения электронов из плазменного катода при наличии тока ионов в ускоряющем промежутке, основанный на анализе срезов импульсов тока разряда и тока ускоряющего промежутка. Метод не требует определения эффективного коэффициента вторичной эмиссии с поверхности эмиссионного электрода.

3. Предложено решение, обеспечивающее увеличение доли импульсов, сгенерированных без возникновения электрических пробоев ускоряющего промежутка источника электронов от общего числа импульсов плазменного источника на основе дугового разряда низкого давления, заключающееся в отклонении электронного пучка (на 90 градусов) от оси источника электронов и увеличении длины трубы дрейфа пучка.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Предложенные и применённые в диссертационной работе способы повышения стабильности генерации интенсивного электронного пучка по отделимости и в сочетании применимы для любого импульсного источника электронов с сеточным плазменным катодом и плазменным анодом с открытой границей плазмы с оговоренными ограничениями эффективности способа, зависящим от условий генерации пучка.

2. Для источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы создан генератор плазмы в скрещённых электрическом и магнитном полях для формирования вспомогательного плазменного анода, расширяющий диапазон рабочих давлений источника и кратно увеличивающий долю импульсов, сгенерированных без возникновения электрических пробоев ускоряющего промежутка.

3. Результаты диссертационной работы могут быть использованы для модификации поверхности изделий с целью улучшения ее функциональных и/или эксплуатационных характеристик, недостижимых или сложно реализуемых с использованием альтернативных способов модификации поверхности.

4. Полученные в диссертационной работе экспериментальные данные могут быть использованы для теоретических расчётов процессов генерации и транспортировки пучков электронов.

Методология и методы исследования

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

1. Измерение параметров катодной и анодной плазмы источника электронов зондовыми методами с использованием плоского, накаливаемого и двойного зондов;

2. Осциллографирование токов основных цепей источника электронов и напряжений на электродах источника электронов, определение доли импульсов, в которых возникают пробои ускоряющего промежутка от общего числа импульсов и времени возникновения пробоя от начала импульса в зависимости от условий генерации и транспортировки пучка;

3. Измерение распределения плотности энергии пучка электронов калориметрическим методом;

4. Регистрация радиального распределения тока на анод разрядной ячейки плазменного катода и его динамики.

Оценка частоты возникновения пробоев ускоряющего промежутка источника электронов проводилась путем статистического анализа осциллограмм

токов основных электрических цепей, в ходе которого производился расчёт доверительных интервалов по методу Уилсона.

Научные положения, выносимые на защиту

1. В импульсном источнике электронов с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда и плазменным анодом увеличение фронта тока разряда до времени установления стационарного распределения плотности его тока обеспечивает кратное снижение частоты возникновения пробоев ускоряющего промежутка электронного источника. Например, при воздействии импульсным электронным пучком амплитудой 200 А, длительностью импульса 100 мкс при ускоряющем напряжении 17 кВ и давлении рабочего газа – аргона 40 мПа на поверхность стали 12Х18Н10Т увеличение фронта тока разряда с 1,5 мкс до 30 мкс обеспечивает снижение доли импульсов, в которых возникают пробои ускоряющего промежутка, с 25% до 8%.

2. Увеличение расстояния от высоковольтного эмиссионного электрода до мишени либо использование системы поворота электронного пучка в источнике с сеточным плазменным катодом и плазменным анодом с открытой границей плазмы позволяюткратно повысить амплитуду тока пучка электронов и его энергию в стабильном режиме работы, а также увеличить долю импульсов, сгенерированных без возникновения электрических пробоев ускоряющего промежутка источника электронов.

3. Предварительная генерация плазмы в пространстве дрейфа источника электронов с сеточным плазменным катодом и плазменным анодом с концентрацией на порядок меньшей концентрации плазмы, генерируемой самим электронным пучком,кратно снижает долю импульсов, в которых возникают пробои ускоряющего промежутка от общего числа импульсов. В частности, генерация плазмы с концентрацией $\sim 10^{11}$ см⁻³ за 1 мс до генерации интенсивного электронного пучка при воздействии на молибденовую мишень с током в ускоряющем промежутке амплитудой 400 А, длительностью импульса 15 мкс, ускоряющем напряжении 14 кВ и давлении аргона 65 мПа снижает частоту возникновения пробоев с примерно 20% до 2%.

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, а также применением 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: Международном конгрессе по энергетическим потокам и радиационным эффектам (EFRE-2014, EFRE-2016, EFRE-2018, EFRE-2020, EFRE-2022) (г. Томск, Россия, 2014, 2016, 2018, 2020, 2022), Международном Крейнделевском семинаре «Плазменная эмиссионная электроника» (г. Улан-Удэ, Россия, 2015), Всероссийской научной школе для молодежи «Проблемы и приложения электроразрядной обработки

в индустрии наносистем и наноматериалов» (г. Петрозаводск, Россия, 2009), Всероссийской (с международным участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы» (ФНТП-2020) (г. Казань, Россия, 2020), Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ГУСУР» (г. Томск, Россия, 2019), научно-техническом семинаре по электронно-пучковому оборудованию и технологиям «Обь-2024» (г. Новосибирск, Россия, 2024), Международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применения» (г. Томск, Россия, 2015, 2019; г. Екатеринбург, Россия, 2021).

Публикации

Результаты исследований автора, относящиеся к теме диссертации, изложены в 12 работах, из которых 4 – статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, индексируемых в Web of Science и Scopus (из них 1 статья в журнале, входящем в 1-й квартиль); 4 публикации – в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций; 2 статьи – в иных научных журналах; 2 патента.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в модернизации экспериментальной установки для проведения экспериментов, выборе их методик, проведении исследований, анализе и обобщении их результатов. Постановка цели и задач осуществлялась научным руководителем д.т.н. М.С. Воробьёвым с регулярными консультациями проф., д.т.н. Н.Н. Коваля при участии автора работы. Автором самостоятельно выдвинуты защищаемые научные положения, сделаны выводы и совместно с научным руководителем даны рекомендации по дальнейшим направлениям исследований. Обсуждения задач исследований, методов их решения и результатов анализа экспериментальных данных проводились совместно с соавторами, фамилии которых указаны в опубликованных по теме диссертации работах.

Внедрение результатов и предложения по их использованию

Предполагается использовать полученные результаты для повышения стабильности генерации электронного пучка с воспроизводимыми параметрами, пригодными для его использования как в научных, так и технологических целях для решения прикладных задач по увеличению износостойкости пар трения, узлов машин и механизмов для предприятий нефтегазовой, авиакосмической, энергетической, атомной, медицинской отраслей и смежных областей, а также на инструментальных участках машиностроительных производств за счёт улучшения физико-механических и эксплуатационных свойств поверхности, модифицированной электронным пучком.

Разработанные в результате выполнения работы технические решения защищены патентами РФ. Источники электронов с улучшенными в ходе выполнения работы характеристиками были использованы для обработки изделий из стали 20 с целью увеличения микротвёрдости поверхности и уменьшения параметра износа, а также для финишной полировки внешней и внутренней поверхности коронарных стентов, что подтверждено актом внедрения.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 117 страниц. В работе насчитывается 63 рисунка, 13 таблиц и 97 наименований в списке литературы.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

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

Первая глава «*Методы и подходы увеличения основных параметров источников электронов с плазменным катодом*» носит обзорный характер и посвящена анализу литературных данных, связанных с применением источников электронов, методам и подходам, направленным на расширение диапазона параметров генерируемых пучков. В качестве ключевых этапов развития источников электронов выделено применение плазменных катодов, использование плазменного анода, транспортировки пучков в плазме и в ведущем магнитном поле. Рассмотрены преимущества дугового плазменного катода с сеточной стабилизацией границы плазмы. Сделан вывод о перспективности источников электронов на основе катодов такого типа, обеспечивающих токи субкилоамперного уровня, широкоапертурных (десятки-сотни см²) интенсивных (с плотностью энергии, достаточной для плавления металлов) электронных пучков субмиллисекундной длительности. Рассмотрены основные процессы, дестабилизирующие работу источников электронов, пути их подавления. Определены основные направления исследований и задачи, ориентированные на повышение стабильности генерации и расширение диапазона параметров генерируемого в таких системах интенсивного электронного пучка.

Вторая глава «*Методика эксперимента*» посвящена описанию экспериментальных стендов, представлено описание источника электронов «СОЛО», схема которого приведена на рисунке 1. Описаны методики и техника эксперимента с представлением схем созданных систем измерения и электропитания плазменного катода. Рассмотрены особенности измерения параметров катодной и анодной плазмы зондовым методом, проведения калориметрии электронного пучка, измерения распределения его плотности энергии и распределения тока по сечению плазменного катода.

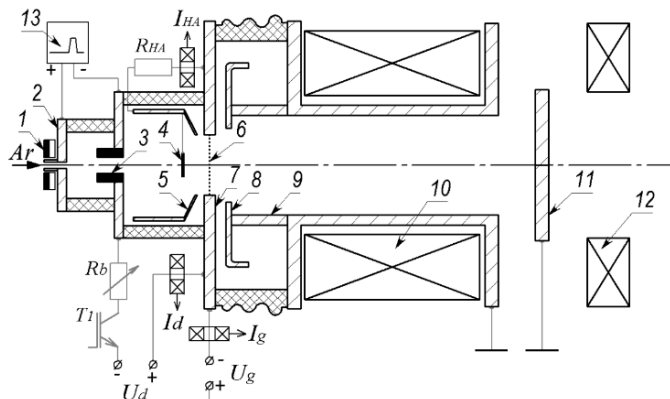


Рисунок 1 – Схема источника электронов: 1 – постоянные магниты, 2 – анод вспомогательного разряда, 3 – трубчатый катод, 4 – перераспределяющий электрод, 5 – анодная вставка, 6 – эмиссионная сетка, 7 – ускоряющий электрод, 8 – извлекающий электрод, 9 – труба дрейфа, 10 – «верхняя» катушка магнитного поля, 11 – коллектор, 12 – «нижняя» катушка магнитного поля, 13 – источник питания вспомогательного разряда

Импульсный дуговой разряд, формирующий плазменный катод, зажегся между катодом 3 и анодами 4, 5, 6. Электроны извлекали из катодной плазмы через эмиссионное отверстие, диаметром 40 мм, перекрытое сеткой с ячейкой $0,3 \times 0,3$ или $0,18 \times 0,18$ мм (с геометрической прозрачностью 50% и 45% соответственно) под действием постоянного ускоряющего потенциала, приложенного между электродами 7 и 8. Пучок транспортировался до коллектора 11 или calorиметра на расстояние (30–80) см в ведущем магнитном поле (17,5–100) мТл. Рабочий газ – аргон, напускали через поджигающую разрядную ячейку, образованную электродами 2, 3 до давления в вакуумной камере $p_{Ar} = (6–90)$ мПа. В результате ионизации газа пучком электронов создавалась анодная плазма, компенсирующая объёмный заряд пучка. В исследованиях ток разряда плазменного катода I_d изменяли в пределах (15–400) А, длительность импульса $\tau = (15–250)$ мкс, ускоряющее напряжение $U_g = (0,3–25)$ кэВ. При $I_d = 50$ А концентрация анодной пучковой плазмы составляла $\sim 2 \times 10^{12}$ см⁻³.

Третья глава «Характеристики дугового разряда низкого давления и эмиссионной плазмы в плазменном катоде» посвящена исследованию плазменного катода (ПК) источника электронов: представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) в разных условиях работы, приведены результаты измерения параметров плазмы при извлечении электронов и в его отсутствии, исследована динамика радиального распределения тока дугового разряда ПК, а также исследовано влияние концентрации анодной пучковой плазмы и потока ускоренных ионов в область катодной разрядной ячейки на потенциал катодной плазмы в зависимости от условий генерации.

Установлено, что ВАХ разряда ПК имеет слаборастущий характер – изменение тока разряда в диапазоне (100–400) А приводит к увеличению напряжения горения с 55 до 74 В и с 50 до 58 В при давлении 30 и 70 мПа, соответственно. Радиальное распределение плотности тока разряда в плоскости сетки имеет колоколообразный характер. В первые микросекунды горения разряда ток преимущественно замыкается по оси ПК. В отсутствие перераспределяющего электрода 4 плотность тока разряда на оси ПК в первые микросекунды горения кратно превосходит стационарное значение (рисунок 2), устанавливающееся в течение (10–50) мкс в зависимости от магнитного поля. Аналогичный характер имеет распределение плотности энергии пучка электронов в плоскости коллектора (рисунок 3). Установившееся значение плотности электронного тока насыщения на оси ПК при $I_d=100$ А, $p_{Ar}=40$ мПа, в области ПК $B_1=50$ мТл достигает 50 А/см².

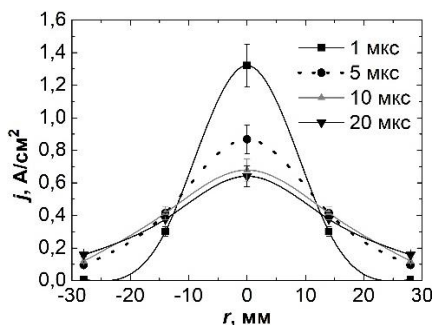


Рисунок 2 – Распределение плотности тока разряда в плоскости сетки для $p_{Ar}=80$ мПа, $B_1=20$ мТл, $I_d=55$ А в разные моменты времени

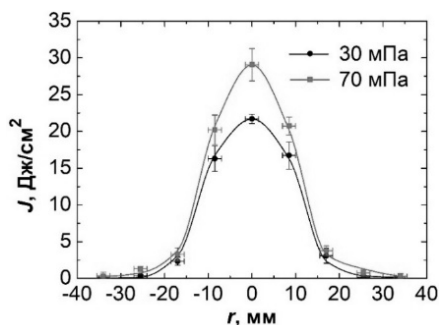


Рисунок 3 – Радиальное распределение плотности энергии пучка электронов на коллекторе для $I_d = 100$ А, $U_g = 14$ кВ, $\tau = 100$ мкс

Было показано, что изменение рабочего давления в диапазоне от 40 до 90 мПа не вызывает заметного изменения напряжения горения разряда, если из него не извлекают электроны. Однако при подаче ускоряющего напряжения межэлектродное напряжение разрядной ячейки U_d уменьшается, что особенно заметно при повышенном давлении (рисунок 4а). Потенциал катодной плазмы относительно сетки ϕ увеличивается (рисунок 4б), при этом катодное падение потенциала в широком диапазоне параметров остается (50–60) В, что делает величину U_d значимым диагностическим параметром.

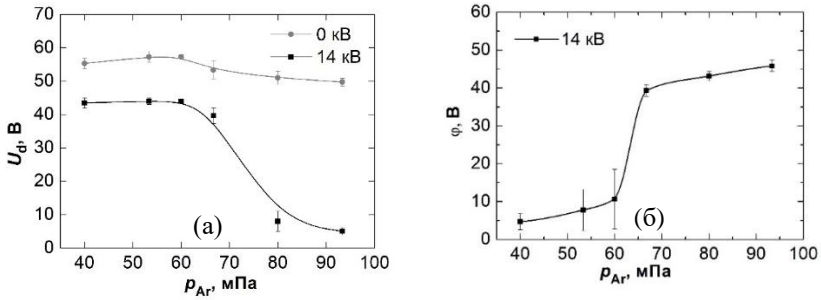


Рисунок 4 – Зависимость напряжения на разрядном промежутке ПК (а) и потенциала плазмы (б) от давления рабочего газа для катода с эмиссионной сеткой $0,18 \times 0,18$ мм, $I_d=100$ А

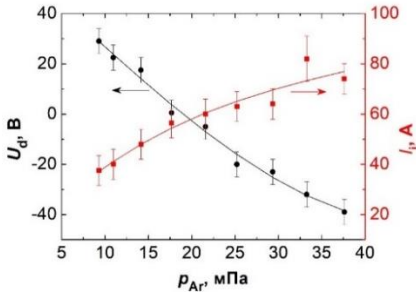


Рисунок 5 – Изменение ионного тока с границы анодной плазмы в зависимости от давления рабочего газа и соответствующее напряжение на разрядном промежутке. Сетка $0,3 \times 0,3$ мм, $I_d=100$ А, $U_g=10$ кВ

Определены сочетания параметров, при котором U_d заметно не изменялось с появлением эмиссии электронов из плазменного катода – это мелкая эмиссионная сетка, например, $0,18 \times 0,18$ мм, относительно низкое давление, например, 12,5 мПа. Применение более крупной сетки – $0,3 \times 0,3$ мм могло приводить к изменению полярности U_d (рисунок 5). Уменьшение U_d и соответствующее увеличение ϕ было сопряжено с увеличением концентрации анодной плазмы и соответствующим ростом тока ускоренных ионов с её границы. Последний можно оценить согласно формуле:

$$I_i = \frac{E_g - E_b}{U_g \tau},$$

где E_g – интеграл произведения тока и напряжения ускоряющего промежутка; E_b – измеренная на коллекторе энергия; U_g – напряжение на ускоряющем промежутке; τ – длительность импульса.

Отмечено, что автосмещение потенциала коллектора, которое возникает, если в его цепь установить небольшой, менее 1 Ом, резистор, или из-за контактов и длинных шин заземления коллектора, приводит к отражению от коллектора части плазменных электронов и, при их достаточной энергии, увеличению концентрации анодной плазмы, что приводит к существенному увеличению потенциала катодной плазмы при неизменном рабочем давлении. Например, если использовали сетку $0,3 \times 0,3$ мм, для $I_d=100$ А, $p_{Ar}=65$ мПа, $U_g=6$ кВ при добавлении сопротивления в цепь коллектора 0,2 Ом потенциал катодной плазмы увеличивался с 30 до 60 В.

Показано, что потенциал катодной плазмы в условиях извлечения электронов возрастает до стационарного значения в течение (10–30) мкс от начала импульса тока разряда ПК. Высокий потенциал катодной плазмы – 50 В и более может провоцировать образование катодных пятен на эмиссионном электроде или сетке со стороны ПК. Неконтролируемое увеличение тока эмиссии приводит к пробую ускоряющего промежутка. Превышение плотности тока эмиссии электронов в первые микросекунды существования разряда ПК над стационарным значением может вызывать нарушение условий сеточной стабилизации границы катодной плазмы, что является фактором, дестабилизирующим работу плазменного источника электронов и повышающим вероятность пробоя ускоряющего промежутка.

Четвёртая глава «Способы повышения стабильности генерации интенсивного электронного пучка» посвящена исследованиям, направленным на подавление влияния переходных процессов в ПК, коллекторной плазмы, загрязнений эмиссионной сетки, транспортировки в условиях начальной стадии формирования пучка на частоту возникновения пробоев ускоряющего промежутка источника электронов «СОЛО» и параметры его стабильной работы.

В исследовании перед импульсом тока разряда ПК, длительностью 100 мкс добавили участок длительностью 30 мкс с относительно медленным нарастанием тока, благодаря чему средняя скорость нарастания I_g уменьшилась с 9 до 65 А/мкс (рисунок 6).

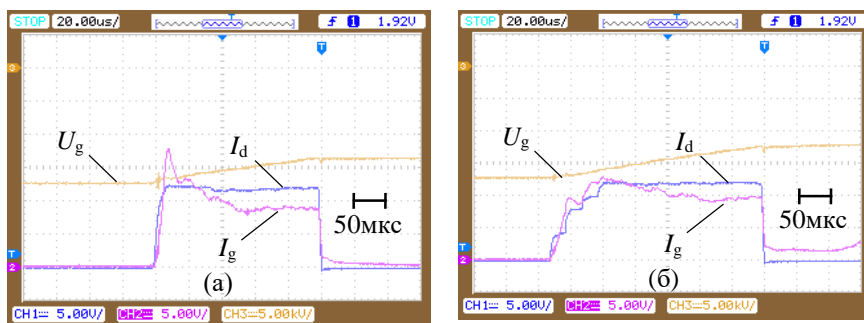


Рисунок 6 – Характерные осциллограммы цепей источника электронов в обычном режиме (а) и с участком медленного нарастания тока (б). $U_{g0}=17$ кВ, $p=37$ МПа.

Синий – I_d , 100 А/кл., маджента – I_g , 100 А/кл., коричневый – U_g , 5 кВ/кл

В приведённых на рисунке 6 режимах воздействовали на массивную мишень из стали 12Х18Н10Т, генерировали по 600 импульсов воздействия, следующих с частотой 0,3 Гц в пакетах по 100 импульсов для каждой области воздействия. На мишени было выбрано 12 непересекающихся областей обработки, внутри которых положение пучка не изменяли. Несмотря на то, что энергия в цепи ускоряющего промежутка увеличилась с ~300 до ~400 Дж, доля импульсов с пробоями уменьшилась с 0,21–0,28 до 0,06–0,11.

В следующем эксперименте для уменьшения влияния коллекторной плазмы и паров мишени увеличили длину канала транспортировки пучка с 30

до 80 см, затем изготовили систему транспортировки длиной 80 см в виде четверти тора с радиусом кривизны 50 см, исключаящую прямую видимость мишени. Конфигурацию магнитного поля подбирали так, чтобы сохранить диаметр пучка электронов в плоскости коллектора и добиться схожего поля в области ПК. Как в поворотной, так и в удлиненной магнитной системе удалось добиться транспортировки без заметных потерь пучка электронов и без существенных искажений его радиального распределения при токах выше 100 А.

В работе условились считать предельными режимы электронно-пучкового воздействия такие, при которых электрической пробой ускоряющего промежутка после его тренировки возникает с вероятностью около 0,5. Незначительное, на (10–15)%, увеличение мощности пучка относительно предельного режима приводило к увеличению вероятности пробоя до 1. Характерные осциллограммы предельных режимов в условиях плавления мишени содержали всплеск тока ускоряющего промежутка в отсутствие тока разряда (рисунок 7). Это неуправляемое изменение тока I_g повторяется от импульса к импульсу с некоторой разницей по амплитуде, является крайне нежелательным. Всплеск соответствует приходу коллекторной плазмы к высоковольтному ускоряющему электроду со скоростью $\sim 6 \times 10^3$ м/с. Применение поворотной системы позволило существенно уменьшить амплитуду всплеска в предельном режиме (рисунок 7в).

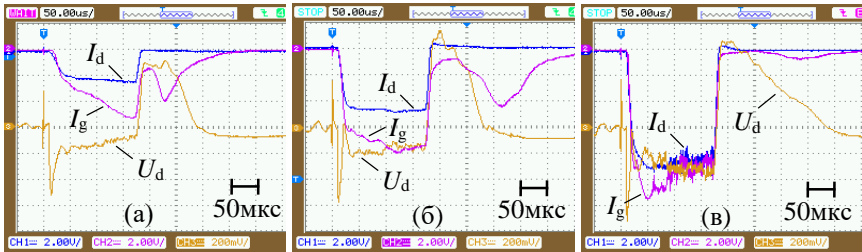


Рисунок 7 – Характерные осциллограммы основных цепей источника электронов в предельном режиме: (а) для канала транспортировки 30 см, (б) – 80 см, (в) – 80 см с поворотом. $\tau=150$ мкс, $U_g=20$ кВ, $p_{Ar}=45$ мПа, алюминиевая мишень.

Масштаб по вертикали: $I_d - 40$ А/кл., $I_g - 40$ А/кл., $U_d - 40$ В/кл

В диапазоне параметров источника электронов $p_{Ar}=(25-45)$ мПа, $U_g=(14-20)$ кВ, $\tau=(50-150)$ мкс максимальный ток в цепи ускоряющего промежутка I_{gm} , достигаемый в предельном режиме при использовании удлиненной до 80 см системе в 1,5–2,7 раза больше, чем в исходной 30 см геометрии (таблица 1). Энергия за импульс в цепи ускоряющего промежутка увеличилась в 1,1–2,0 раза (таблица 2). Поворот удлиненного канала транспортировки позволил увеличить максимальный ток в 1,4–2,3 раза при относительно высоком ускоряющем напряжении (20 кВ) и длинном импульсе (150 мкс). В исследуемых режимах максимальная расчетная мощность пучка электронов в течение импульса на алюминиевом коллекторе была достигнута в удлиненной системе при давлении $p_{Ar}=25$ мПа, $\tau=50$ мкс, $U_g=20$ кВ, $I_{gm}=400$ А, и составила 5,2 МВт

(в ускоряющем промежутке 6,8 МВт). Поворотная система показала результат на 10% ниже. Тем не менее только внедрение поворотной системы позволило подавить вторичный неуправляемый импульс, возникающий из-за влияния коллекторной плазмы. Ионный ток в ускоряющем промежутке учитывали согласно формуле:

$$I_i = \frac{I_g - I_d \alpha}{\gamma(U_g) + 1},$$

где I_g – ток в ускоряющем промежутке в i -й точке осциллограммы; I_d – ток разряда; U_g – напряжение в ускоряющем промежутке; α – коэффициент извлечения, определённый как 0,55; γ – эффективный коэффициент вторичной эмиссии.

Таблица 1 – Максимальный ток в цепи ускоряющего промежутка

p_{Ar} , мПа	U_g , кВ	τ , мкс	Исх. $I_{гпр}$, А	Удл. $I_{гпр}$, А	Пов. $I_{гпр}$, А	Удл./Исх.	Пов./Удл.	Пов./Исх.
25	14	50	195	360	365	1,8	1,0	1,9
25	14	150	130	330	290	2,5	0,9	2,2
25	20	50	150	400	340	2,7	0,9	2,3
25	20	150	90	140	315	1,6	2,3	3,5
45	14	50	210	320	315	1,5	1,0	1,5
45	14	150	130	255	230	2,0	0,9	1,8
45	20	50	170	290	240	1,7	0,8	1,4
45	20	150	105	155	220	1,5	1,4	2,1

Таблица 2 – Энергия за импульс в цепи ускоряющего промежутка в предельных режимах работы источника электронов

p_{Ar} , мПа	U_g , кВ	τ , мкс	Исх. E_g , Дж	Удл. E_g , Дж	Пов. E_g , Дж	Удл./Исх.	Пов./Удл.	Пов./Исх.
25	14	50	170	235	245	1,4	1,0	1,4
25	14	150	280	490	420	1,8	0,9	1,5
25	20	50	215	400	350	1,9	0,9	1,6
25	20	150	300	605	740	2,0	1,2	2,5
45	14	50	220	250	230	1,1	0,9	1,0
45	14	150	300	440	365	1,5	0,8	1,2
45	20	50	285	380	285	1,3	0,8	1,0
45	20	150	330	565	565	1,7	1,0	1,7

Благодаря внедрению поворотной системы транспортировки удалось провести обработку алюминия без возникновения пробоев высоковольтного ускоряющего промежутка в течение ~200 импульсов воздействия по алюминию в режиме $I_d=150$ А, $\tau=250$ мкс, $U_g=20$ кВ, $p_{Ar}=25$ мПа, магнитное поле в области плазменного катода составляло 30 мТл, в области коллектора – 50 мТл, после предварительной тренировки на молибденовом коллекторе с током $I_d=250$ А. Расчетная энергия пучка за импульс составляла 530 Дж, максимальная за импульс мощность воздействия – 2,3 МВт. По оценкам распределение плотности энергии имело колоколообразную форму шириной около 2,6 см с энергией в центральной области около 65 Дж/см². Стоит отметить, что длительность импульса полученного беспробойного режима в 5 раз превосходит максимальную для предельного режима в исходной геометрии.

В следующем исследовании для улучшения условий транспортировки пучка электронов на начальной стадии его формирования и для ионной очистки эмиссионной сетки был создан источник дополнительной анодной плазмы (рисунок 8). Изначально разряд с током (5–15) мА при напряжении до 5 кВ зажигается в зазоре между катодами-магнитопроводами 8 и кольцевым анодом 9, затем переключается на коллектор 12, выступающий в роли анода, и горит с регулируемым током I_p до 20 А при напряжении (320–350) В. Магнитное поле в зазоре направлено встречно ведущему полю источника электронов. Полный катод 10 облегчает переключение разряда на коллектор, катод-отражатель 6 создаёт дополнительный канал замыкания тока, диафрагмирует часть высоковольтного ускоряющего электрода.

Источник создаёт в пространстве дрейфа плазму с концентрацией $5,5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ при $I_p=6 \text{ А}$, при $I_p=12,5 \text{ А}$ – около $9 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$, при $I_p=20 \text{ А}$ – $1,7 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ для $p_{Ar}=20 \text{ мПа}$, $U_g=5 \text{ кВ}$, внешнего магнитного поля 30 мТл. Концентрация дополнительной плазмы незначительно увеличивалась с ростом рабочего давления до 60 мПа: при $I_p=12,5 \text{ А}$ – до $1,1 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$, и уменьшается с ростом ускоряющего напряжения: $9 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ до $5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ при увеличении напряжения с 5 до 10 кВ для давления 20 мПа.

Источник плазмы включали за 1 мс до генерации пучка электронов на 1,3 мс. Таким образом он оставался включенным в течение всего импульса тока пучка.

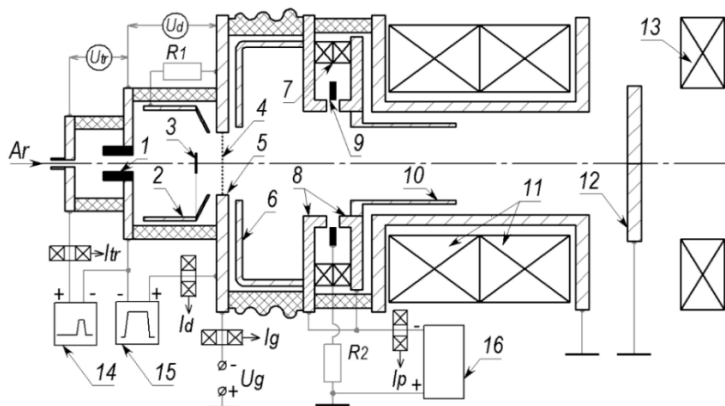


Рисунок 8 – Схема источника электронов с разрядной ячейкой дополнительного плазменного анода: 1 – катод, 2 – анодная вставка, 3 – перераспределяющий электрод, 4 – эмиссионная сетка, 5 – ускоряющий электрод, 6 – катод-отражатель, 7 – постоянные магниты, 8 – катоды-магнитопроводы, 9 – анод разрядной ячейки генератора плазмы, 10 – полный катод, 11 – «верхние» соленоиды магнитного поля, 12 – коллектор, 13 – «нижний» соленоид магнитного поля, 14 – блок питания поджигающего разряда, 15 – блок питания разряда плазменного катода, 16 – блок питания генератора дополнительной анодной плазмы

Установлено, что разработанная разрядная система для генерации анодной плазмы облегчает инициирование разряда плазменного катода. Например, при давлении 7,2 мПа, токе разряда плазменного катода 100 А, когда напряжение

холостого хода источника питания катодного разряда достигало 600 В, и магнитном поле в области генерации 40 мТл, пропуски зажигания разряда составили не более 5%, тогда как без анодного разряда при таких параметрах зажигание разряда плазменного катода не происходило.

С понижением давления рабочего газа до 16 мПа можно заметить появление высокочастотных колебаний тока пучка (тока в ускоряющем промежутке) в первые 10 мкс его формирования (рисунок 9).

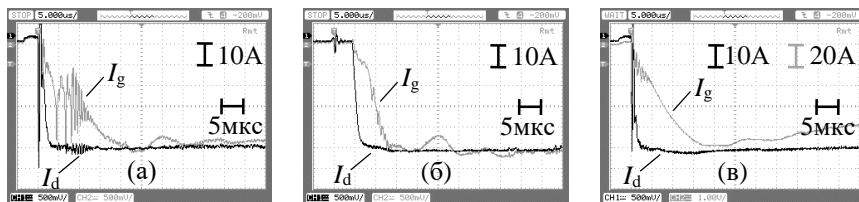


Рисунок 9 – Характерные осциллограммы тока основного разряда I_d и тока в ускоряющем промежутке I_g источника электронов, демонстрирующие влияние анодного разряда. $U_g=10$ кВ, (а) – без вспомогательного разряда, $p_{Ar}=16$ мПа, (б) – $I_p=2$ А, $p_{Ar}=16$ мПа, (в) – без вспомогательного разряда, $p_{Ar}=42$ мПа

Несмотря на то, что концентрация пучковой анодной плазмы в установившемся режиме более чем на порядок превосходит концентрацию разрядной плазмы дополнительного анода, наличие последней позволяет подавить высокочастотные колебания на фронте тока пучка или уменьшить их амплитуду. Данный эффект не связан с локальным увеличением давления рабочего газа при работе системы формирования плазменного анода, т.к. увеличение давления неизбежно приводит к росту концентрации плазмы в области эмиссионного электрода и, как следствие, к увеличению тока в цепи ускоряющего промежутка, что не наблюдается в данном случае. Например, увеличение рабочего давления до 42 мПа не привело к полному подавлению шума тока ускоряющего промежутка, сам ток при этом вырос вдвое (рисунок 9в). Высокочастотные колебания тока ускоряющего промежутка можно связать с недостаточной компенсацией пространственного заряда пучка электронов на начальной стадии генерации.

При давлении (25–30) мПа высокочастотные колебания наблюдаются при $I_d=240$ А и выше. Их наличие ухудшает электромагнитную совместимость источника электронов и измерительного оборудования, особенно систем контактного измерения параметров плазмы. Применение разработанной системы формирования дополнительной анодной плазмы позволило уменьшить давление, при котором колебания тока в ускоряющем промежутке отсутствуют. Например, при $U_g=15$ кВ, $I_d=240$ А, магнитном поле 30 мТл колебания наблюдаются при давлении ниже 33 мПа. Генератор дополнительной плазмы при его работе с током 2 А позволяет работать без высокочастотных колебаний при давлении от 19 мПа, а при токе 15 А – от 12 мПа.

В работе сравнивается доля импульсов, в которых возникали пробой ускоряющего промежутка от общего числа импульсов и время возникновения пробоя при наличии дополнительного плазменного анода и в его отсутствие. Во втором случае, все электроды разрядной ячейки плазменного анода были заземлены, кольцевой анод – через резистор 50 Ом. Коллектором служил молибденовый цилиндр диаметром 70 мм, толщиной 12 мм. Параметры генерации пучка выбраны $I_d=400$ А, $U_g=14$ кВ, $\tau=50$ мкс, $f=0,3$ Гц, давление 20 мПа или 65 мПа.

Для определения доля импульсов, в которых возникали пробой ускоряющего промежутка от общего числа импульсов, источник электронов был предварительно оттренирован примерно 1000 импульсами при давлении 20 мПа без включения ячейки плазменного анода. Затем выполнено от 2 до 6 серий по 100 импульсов для каждого I_p с чередованием его величины. Определялось количество пробоев в первые 15 мкс и за весь импульс длительностью 50 мкс. Результаты приведены в таблице 3. Перед определением доли импульсов с пробоями при 65 мПа выполнена тренировка источника электронов 5000 импульсами в указанном давлении.

Таблица 3 – Доля импульсов с пробоем ускоряющего промежутка

Ток разряда анода I_p , А	Давление аргона и длительность импульса			
	20 мПа, 15 мкс	20 мПа, 50 мкс	65 мПа, 15 мкс	65 мПа, 50 мкс
0	20% (0,15–0,26)	34% (0,27–0,40)	19% (0,16–0,22)	28% (0,25–0,32)
1,25	-	-	22% (0,19–0,25)	43% (0,39–0,47)
12,5	13% (0,09–0,18)	40% (0,33–0,47)	3% (0,01–0,05)	44% (0,39–0,50)

Таким образом, для источника электронов с плазменным катодом создан генератор дополнительной анодной плазмы оригинальной конструкции. Результатом использования генератора дополнительной анодной плазмы с током разряда 12,5 А является снижение доли импульсов, в которых возникали пробой ускоряющего промежутка в первые 15 мкс импульса тока пучка примерно с 20% до 13% и до 3% при $p_{Ar}=20$ мПа и 65 мПа соответственно (таблица 3). Данные справедливы для частоты следования импульсов (0,3–1) Гц.

Показано, что при увеличении длительности импульса до 50 мкс доля импульсов с пробоями возрастает с 34% и 28% до примерно 40%. Это связано с тем, что во время импульса тока пучка на электроды генератора плазмы подается электрическое смещение. Ток, протекающий в цепи генератора плазмы, превышает ток дугообразования, поэтому существует вероятность образования катодных пятен на электродах, находящихся под отрицательным относительно плазмы потенциалом. Катодное пятно вблизи эмиссионного электрода в свою очередь провоцирует пробой ускоряющего промежутка. Таким обра-

зом, целесообразно заземлить электродную систему генератора плазмы дополнительного анода во время прохождения импульса тока пучка. В представленном варианте система эффективна для уменьшения доли импульсов с пробоями при коротких импульсах длительностью около 15 мкс.

Установлено – увеличение частоты следования импульсов с 1 Гц до 2 Гц приводит к увеличению доли импульсов, в которых возникали пробои ускоряющего промежутка от общего числа импульсов. В частности, при давлении 65 мПа и указанных выше параметрах генерации пучка электронов – с 28% до 40%, что может быть связано с недостаточным временем для отвода энергии пучка от мишени и ее интегральным нагревом при многочисленном электронно-пучковом воздействии.

Таким образом, разработанная система генерации дополнительной анодной плазмы существенно улучшает характеристики источника электронов с плазменным катодом. Установлено, что наличие анодной плазмы облегчает иницирование основного разряда (пропуски зажигания снижаются до 5% в условиях, когда без неё зажигание не происходило) и эффективно подавляет высокочастотные колебания тока пучка на начальной стадии формирования. При этом минимальное рабочее давление «бесшумного» режима снижается на (20–50)% при токе анодного разряда 2 А и дополнительно на (15–20)% при увеличении тока до 15 А.

Применение генератора анодной плазмы с током 12,5 А значительно уменьшает долю импульсов, в которых возникают пробои ускоряющего промежутка от общего числа импульсов: в первые 15 мкс импульса их доля снижается с 20% до 13% при давлении 20 мПа и с 19% до 3% – при давлении 65 мПа.

В качестве примера практического использования источника электронов для улучшения свойств поверхности материалов в главе проведено алитирование стали 20 путём электронно-пучкового воздействия на систему «пленка (1–5) мкм Al / подложка (сталь 20)», выполненное с целью дальнейшего азотирования. Во всех исследованных режимах воздействия (таблица 4) увеличилась микротвёрдость поверхности стали относительно исходной без напыления с $HV_{1,0}=2,6$ ГПа до (3,1–4,7) ГПа; наибольшая – для плёнки 5 мкм после воздействия с длительностью 50 мкс. Алюминий наблюдали на глубине (50–160) мкм.

Таблица 4 – Режимы электронно-пучкового воздействия

Условное обозначение режима	I_d , А	U_{g0} , кВ	τ , мкс	B_1 , мТл	B_2 , мТл	E_s , Дж/см ²	W_s , МВт/см ²	p_{Ar} , мПа	n
50 мкс	200	25	50	58	100	23	0,46	25	3
100 мкс	200	22	100	60	80	30	0,3	25	3
200 мкс	200	19	200	65	80	40	0,22	25	3

В таблице 4 используются следующие обозначения: B_1 – магнитное поле в области плазменного катода, B_2 – магнитное поле в области образца, E_S – плотность энергии, приносимая пучком электронов за один импульс воздействия, W_S – плотность мощности пучка электронов, n – количество импульсов воздействия.

Отмечается, что микротвёрдость поверхности образцов без покрытия, подвергнутых воздействию в режимах «50 мкс» и «200 мкс» составила 4,6 ГПа и 4,7 ГПа соответственно.

Модифицированная в режиме 1 мкм Al + «50 мкс» поверхность обладала увеличенной износостойкостью (снижен параметр износа с 3,2 до $1,4 \times 10^{-6}$ мм³/Нм) при близком (0,44) коэффициенте трения.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации:

1. Показано, что в осесимметричной разрядной ячейке плазменного эмиттера на основе дугового разряда плотность тока на анод в его центральной части на первой микросекунде горения разряда можеткратно превышать стационарное значение, устанавливающееся после 10-й – 50-й микросекунды. Например, в разрядной ячейке длиной 84 мм диаметром 86 мм плазменного эмиттера с катодом в форме канала диаметром 8 мм длиной 50 мм при токе разряда 60 А плотность тока в центральной части анода с первой по 20-ю микросекунду горения разряда уменьшается с 1,3 А/см² до 0,64 А/см².

2. Установлено, что в плазменном источнике электронов концентрация анодной пучковой плазмы и поток ионов с её границы, проникающий через ячейки эмиссионной сетки в плазменный эмиттер, существенно влияет на потенциал катодной плазмы. Например, увеличение концентрации анодной плазмы путем организации несимметричного отражательного разряда в пространстве транспортировки электронного пучка, а, следовательно, плотности ионного тока с её границы, в случае использования эмиссионной сетки с ячейкой (0,3×0,3) мм приводит к увеличению потенциала плазмы относительно анода с 30 до 60 В при токе плазменного катода 100 А и давлении аргона в вакуумной камере 67 мПа.

3. Реализованы три эффективных способа повышения стабильности генерации широкоапертурных импульсных пучков в источниках электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления: увеличение длительности фронта тока разряда плазменного катода, увеличение длины канала транспортировки пучка и его поворот, создание дополнительной анодной плазмы перед генерацией пучка электронов.

4. Магнитная система транспортировки пучка электронов в форме четверти тора позволяет кардинально ослабить влияние коллекторной плазмы на источник электронов. При прочих равных условиях поворот канала транспортировки эффективнее прямого канала увеличивает максимальные параметры, если длительность импульса или ускоряющее напряжение выше.

Транспортировка электронного пучка с поворотом траектории на 90° позволяет до 2,3 раз повысить максимальный ток в ускоряющем промежутке (со

140 А до 315 А) и до 1,2 раз увеличить энергию, переносимую в цепи ускоряющего промежутка (со 605 Дж до 740 Дж), относительно системы транспортировки без поворота той же длины 80 см при обработке алюминия импульсами длительностью 150 мкс с ускоряющим напряжением 20 кВ при давлении 25 мПа. Механизм улучшения связан с подавлением неконтролируемого вторичного импульса тока (амплитуда снижается более чем на порядок) и уменьшением количества паров материала мишени, достигающих эмиссионного электрода. Поворотную систему транспортировки наиболее целесообразно применять в режимах с длинными импульсами (150 мкс и более) при высоком ускоряющем напряжении (20 кВ).

5. Снижение скорости роста тока в цепи ускоряющего промежутка с 65 А/мкс до 9 А/мкс за счёт формирования участка плавного нарастания тока разряда плазменного катода позволило уменьшить долю импульсов, в которых возникают пробой ускоряющего промежутка от общего числа импульсов с 25% до 8%. Эффект связан с подавлением всплеска тока на фронте импульса и уменьшением плотности тока эмиссии на оси источника, обусловленного переходными процессами в плазменном катоде. Данный метод наиболее целесообразен для источников электронов с длительностью импульса от 100 мкс, где фронт тока порядка 20 мкс является приемлемым и не оказывает существенного влияния на технологический процесс.

6. Создан генератор дополнительной анодной плазмы, использование которого снижает долю импульсов с пробоями ускоряющего промежутка в первые 15 мкс импульса с 20% до 13% при давлении 20 мПа и с 19% до 3% при давлении 65 мПа (ток анодного разряда 12,5 А, $I_d = 400$ А, $U_g = 14$ кВ). Дополнительно устройство облегчает инициирование разряда плазменного катода, подавляет высокочастотные колебания тока пучка и позволяет снизить минимальное рабочее давление на (20–50)%. Эффект обусловлен ионным травлением и очисткой поверхности эмиссионного электрода, влиянием поступающих в разрядную ячейку плазменного катода ионов, а также улучшением компенсации пространственного заряда пучка на начальной стадии формирования.

Представленные способы могут служить **практическими рекомендациями** для уменьшения вероятности пробоя ускоряющего промежутка, расширения диапазона рабочих параметров – снижения рабочего давления, увеличения мощности и энергии генерируемого пучка, а также улучшения управляемости током эмиссии в любом источнике электронов с сеточным плазменным катодом и плазменным анодом с открытой границей плазмы.

Реализация указанных способов открывает новые перспективы для обработки материалов. Например, удалось выполнить алитирование поверхности стали путём воздействия пучка электронов на систему «пленка (Al) / подложка (сталь 20)» с управляемыми воспроизводимыми параметрами практически без пробоев ускоряющего промежутка. Уменьшение вероятности пробоя ускоряющего промежутка делает возможным внедрение источников электронов в реальный производственный цикл, например, для полировки изделий, созданных

методами аддитивного производства или изделий медицинского назначения, таких, как коронарные стенты.

Перспективы дальнейшего развития тематики связаны с теоретическими и экспериментальными исследованиями транспортировки пучка электронов в плазме в криволинейной магнитной системе транспортировки.

Работы по тематике диссертации поддержаны: грантом РФФ № 25-49-10018 (2026-2028) – основной исполнитель; грантом № СП-3423.2019.1 (2019-2020) – руководитель; грантом РФФ № 20-79-10015, № 20-79-10015П (2020-2025) – основной исполнитель; проектом РФФИ № 20-21-00111 Росатом (2020-2022) – исполнитель; проектом РФФИ № 18-42-703010 р_мол_а (2018-2019) – исполнитель; проектом РФФИ № 13-08-00416 А (2018-2019) – исполнитель.

В заключении автор искренне благодарит д.т.н. М.С. Воробьева, под руководством которого была выполнена диссертационная работа. Автор признателен д.т.н., проф. Н.Н. Ковалю, В.Н. Девяткову, С.В. Григорьеву, А.Д. Тересову, С.С. Ковальскому, к.т.н. И.В. Лопатину за полезные дискуссии и помощь в проведении экспериментов, д.ф.-м.н. Т.В. Коваль за помощь в теоретических оценках. Автор выражает благодарность всем сотрудникам лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН за всестороннюю поддержку и рекомендации по теме диссертационной работы.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Moskvín, P. V. Electron beam generation in an arc plasma source with an auxiliary anode plasma / **P. V. Moskvín**, V. N. Devyatkov, M. S. Vorobyov [et al.] // *Vacuum*. — 2021. — Vol. 191. — P. 110338.

2. Shin, V. I. Increasing the Electrical Strength of the Accelerating Gap in an Electron Source with a Plasma Cathode / V. I. Shin, **P. V. Moskvín**, M. S. Vorobyev [et al.] // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2021. – Vol. 64, No. 2. – P. 234-240.

3. 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. Moskvín**, V. I. Shin [et al.] // *High Temperature*. – 2022. – Vol. 60, No. 4. – P. 438-445.

4. Shin, V. I. Latitude and amplitude modulation of the beam current for controlling its power during a submillisecond pulse / V. I. Shin, M. S. Vorobyov, **P. V. Moskvín** [et al.] // *Russian Physics Journal*. — 2023. — Vol. 65, No. 11. — P. 1979–1988.

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

6. Гончаренко, И. М. Алитирование поверхностей конструкционных среднеуглеродистых сталей в вакууме PVD методами / И. М. Гончаренко, **П. В. Москвин**, С. В. Работкин [и др.] // *Известия вузов. Физика*. — 2023. — Т. 66, № 1 (782). — С. 22–29.

7. Григорьев, С. В. Исследование генерации и транспортировки субмиллисекундного электронного пучка, формируемого в диоде с плазменным катодом с сеточной стабилизацией плазменной границы и плазменным анодом с открытой подвижной границей / С. В. Григорьев, В. Т. Астрелин, И. В. Кандауров, ... **П. В. Москвин** [и др.] // Плазменная эмиссионная электроника : труды Международного Крейнделевского семинара, Улан Удэ, 25–30 июня 2012 г. — 2012. — С. 81–86.

8. Moskvina, P. V. Plasma source for auxiliary anode plasma generation in the electron source with grid plasma cathode / **P. V. Moskvina**, V. N. Devyatkov, I. V. Lopatin, M. S. Vorobyov // Journal of Physics: Conference Series : the proceeding 14th International Conference «Gas Discharge Plasmas and Their Applications», Tomsk, 15–21 сентября 2019 года / Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. — 2019. — Vol. 1393. — P. 012049.

9. Shin, V. I. Energy density distribution of a modulated electron beam in a source with a plasma cathode based on a low pressure arc / V. I. Shin, M. S. Vorobyov, **P. V. Moskvina** [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2064, No. 1. — P. 012066.

10. Шин, В. И. Генерация электронного пучка с управляемой в течение импульса субмиллисекундной длительности мощностью / В. И. Шин, М. С. Воробьев, **П. В. Москвин** [и др.] // Быстрозакалённые материалы и покрытия : материалы XVIII Международной научно-технической конференции, Москва, 19–20 октября 2021 года. — Москва : Пробел-2000, 2021. — С. 372.

11. Патент № 2746265 С1 Российская Федерация, МПК H05H 15/00, H01J 37/00, H01J 37/06. Способ генерации электронного пучка для электронно-пучковой обработки поверхности металлических материалов : № 2020137779 : заявл. 18.11.2020 : опубл. 12.04.2021 / Воробьев М. С., Коваль Т. В., Коваль Н. Н., ... **Москвин П. В.** [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук. — Бюл. № 11.

12. Патент № 2780805 С1 Российская Федерация, МПК H01J 37/06, H05H 1/24. Способ генерации электронного пучка для источников электронов с плазменными эмиттерами и анодной плазмой : № 2021139178 : заявл. 27.12.2021 : опубл. 04.10.2022 / Воробьев М. С., **Москвин П. В.**, Шин В. И. [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук. — Бюл. № 28.