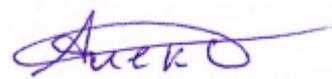


УДК 537.533

На правах рукописи



Медовник Александр Владимирович

**ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ
ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ШИРОКОАПЕРТУРНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПУЧКОВ
В ФОРВАКУУМНОЙ ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ**

1.3.5 – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2022

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

Научный консультант: **Окс Ефим Михайлович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск

Официальные оппоненты: **Бурдаков Александр Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор, советник дирекции, главный научный сотрудник лаборатории №10 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Рябчиков Александр Ильич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией высокоинтенсивной имплантации ионов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Семёнов Александр Петрович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории физического материаловедения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Улан-Удэ

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН), г. Екатеринбург.

Защита состоится 30 ноября 2022 г. в 11 ч 00 мин на заседании диссертационного совета 24.2.415.03 в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте ТУСУРа:

<https://postgraduate.tusur.ru/urls/k4rf19z7>

Автореферат разослан «29» августа 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук



Казаков А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Широкоапертурные импульсные электронные пучки (или пучки большого сечения) находят применение для модификации поверхностных свойств протяженных изделий большой площади, обеспечивая повышение твердости, коррозионной стойкости и снижение коэффициента трения, также придания поверхности иных свойств. Такие пучки получают с использованием источников электронов на основе различных эмиссионных систем, включая источники с термокатодом, электронные источники на основе высоковольтного тлеющего разряда, а также плазменные источники электронов. Для целого ряда применений, связанных с интенсивным газоотделением в процессе электронно-лучевой обработки, использование источников электронов с плазменным катодом предпочтительнее. По принципу работы импульсные плазменные источники электронов можно разделить на устройства с открытой подвижной плазменной эмиссионной поверхностью и устройства на основе квазистационарных систем тлеющего и дугового разрядов со стабилизированной плазменной границей. Генерация электронных пучков при отборе электронов с открытой плазменной поверхности обеспечивает максимальные параметры электронного пучка, но она ограничена по длительности на уровне единиц микросекунд. При фиксации положения эмиссионной плазмы параметры электронного пучка ниже, но в этом случае обеспечивается генерация электронных пучков в более широком диапазоне длительностей импульсов (от единиц микросекунд до десятков миллисекунд), что, в конечном счете, обеспечивает большие возможности для технологических применений импульсных электронных пучков большого сечения.

Если обработка широкоапертурными импульсными электронными пучками поверхности проводящих материалов достаточно давно известна и находит применение, то в процессе электронно-лучевой модификации электрически непроводящих материалов (керамики, полимеры, стекла) возникают определенные сложности. Это связано с зарядкой обрабатываемой поверхности электронным пучком, что приводит к торможению электронов вплоть до полного отражения электронного пучка. Нейтрализация заряда требует принятия специальных мер, которые усложняют процесс электронно-лучевой обработки и снижают его эффективность.

Форвакуумные плазменные источники электронов, обеспечивающие эффективную генерацию электронных пучков в области повышенных давлений форвакуумного диапазона (1–100 Па), представляют собой одно из направлений современного развития плазменной эмиссионной электроники. Такие источники обладают всеми известными преимуществами традиционных плазменных источников электронов. Вместе с тем образующаяся в области транспортировки электронного пучка плазма обеспечивает эффективную нейтрализацию зарядки поверхности электронным пучком диэлектрической мишени. Это делает возможным использование форвакуумных плазменных источников электронов для

непосредственной электронно-лучевой обработки диэлектрических материалов.

На момент начала данной работы развитие форвакуумных плазменных источников электронов было направлено на создание и использование непрерывных сфокусированных и ленточных пучков электронов, эмитированных из плазмы тлеющего разряда с полым катодом. Вопросы о возможности генерации в форвакуумной области давлений широкоапертурных импульсных электронных пучков, в том числе на основе эмиссии электронов из плазмы дугового разряда с катодным пятном, оставались открытыми. Интерес к решению данной задачи обусловлен возможностью реализации электронно-лучевой модификации протяженных диэлектрических изделий большой площади. В связи с вышеизложенным тематика диссертационной работы представляется актуальной.

Цели и задачи диссертационной работы

Цель работы состояла в проведении комплексных исследований особенностей процессов инициирования и горения в форвакуумной области давлений импульсных тлеющего и дугового разрядов, обеспечивающих отбор электронов с развитой эмиссионной поверхности плазмы, формирования, таким образом широкоапертурных электронных пучков, создания на основе этих исследований форвакуумных плазменных источников импульсных электронных пучков большого сечения и использования таких пучков для поверхностной обработки протяженных изделий из диэлектрических материалов.

Для достижения цели были решены следующие **задачи**:

- изучены в широком диапазоне давлений форвакуумного диапазона физические особенности процессов инициирования и горения импульсных систем тлеющего разряда с полым катодом и катодной дуги, а также генерации в таких разрядных системах однородной плазмы с развитой эмиссионной поверхностью;
- исследованы в форвакуумной области давлений эмиссионные свойства плазмы тлеющего разряда и катодной дуги, а также особенности формирования и транспортировки в таких условиях импульсных электронных пучков большого сечения;
- разработаны экспериментальные макеты форвакуумных плазменных источников широкоапертурных импульсных электронных пучков, исследованы характеристики этих устройств и определены максимальные параметры пучков;
- продемонстрирована возможность использования разработанных форвакуумных плазменных источников широкоапертурных импульсных электронных пучков для непосредственной электронно-лучевой модификации поверхностных свойств диэлектрических изделий.

Научная новизна

1. Выявлены особенности стабильного инициирования в форвакуумной области давлений импульсных систем тлеющего разряда с полым катодом и катодной дуги, изучены параметры и характеристики таких разрядных систем и определены условия формирования на их основе развитой эмиссионной

поверхности плазмы с высокой однородностью параметров, обеспечивающей эффективную генерацию широкоапертурных импульсных электронных пучков.

2. Определена степень влияния в форвакуумном диапазоне давлений обратного ионного потока из областей формирования и транспортировки широкоапертурного импульсного электронного пучка на условия инициирования и горения разряда, процессы эмиссии электронов из плазмы и формирования электронного пучка, а также на предельные параметры пучка.

3. Выявлены основные физические механизмы, обеспечивающие процесс нейтрализации отрицательного заряда, наведенного широкоапертурным импульсным электронным пучком, при облучении диэлектрических объектов.

Научная и практическая значимость работы

1. Решена важная научно-техническая проблема, состоящая в создании форвакуумных плазменных источников широкоапертурных импульсных электронных источников на основе тлеющего разряда с полым катодом и катодной дуги с параметрами электронного пучка, достаточными для эффективной электронно-лучевой модификации поверхностных свойств диэлектрических материалов.

2. Существенно расширены возможности электронно-лучевых технологий за счет возможности осуществления эффективной обработки диэлектрических изделий большой площади.

3. Выявленные закономерности инициирования и горения плазмообразующих разрядов, эмиссии электронов, формирования и транспортировки импульсного электронного пучка могут быть использованы в других устройствах, имеющих аналогичные принципы работы и функционирующих как в области повышенных давлений, так и в других диапазонах давлений.

Методология и методы исследования

Основным методом, применяемым в диссертационной работе, является метод экспериментального исследования. Для измерения параметров плазмы и электронного пучка применялись как широко известные и многократно апробированные экспериментальные методы и подходы, так и специально разработанные оригинальные методики измерения ключевых параметров в импульсном режиме и с учетом особенностей повышенных давлений рабочего газа. Использовались также теоретические оценки и методы численного моделирования физических процессов.

Положения, выносимые на защиту

1. В форвакуумной области давлений генерация широкоапертурных импульсных электронных пучков микро-миллисекундного диапазона длительностей с использованием плазменных источников электронов может быть реализована в результате сочетания постоянного ускоряющего напряжения и импульсных систем для генерации эмиссионной плазмы на основе тлеющего разряда с полым катодом или катодной дуги. Форвакуумные плазменные источники электронов на основе тлеющего разряда обеспечивают получение электронных пучков со стабильными параметрами и с высокой равномерностью плотности тока,

тогда как для достижения более высоких удельных и интегральных параметров электронных пучков, а также большей длительности импульса в источниках такого типа необходимо применение дуговых разрядных систем. Выбор для генерации плазмы тлеющего или дугового разряда определяется требованиями к параметрам электронного пучка и условиями его применения, но в обоих случаях форвакуумные плазменные источники широкоапертурных импульсных электронных пучков обеспечивают возможность эффективной электронно-лучевой модификации поверхностных свойств диэлектрических и других материалов.

2. В форвакуумных плазменных источниках широкоапертурных импульсных электронных пучков на основе катодной дуги в течение импульса тока разряда может реализоваться переход режима функционирования катодного пятна первого рода к катодному пятну второго рода, проявляющийся в понижении напряжения горения дуги, превышении в ионном составе плазмы доли металлического компонента над газовым и изменении характера эрозионных следов на поверхности катода. Трансформация режимов катодного пятна в одном импульсе тока дуги негативно отражается на стабильности эмиссионных параметров разрядной плазмы, но она может быть исключена выбором оптимального давления рабочего газа, амплитуды и длительности тока дуги.

3. В форвакуумных плазменных источниках широкоапертурных импульсных электронных пучков повышение давления газа и (или) увеличение ускоряющего напряжения приводят к снижению напряжения зажигания и горения разряда, сокращению времени запаздывания зажигания разряда и длительности фронта импульса, к увеличению эффективности извлечения электронов из плазмы. Оба этих фактора стимулируют возрастание обратного ионного потока из пучковой плазмы, оказывающего существенное влияние на процессы генерации электронных пучков плазменными источниками в области повышенных давлений. При этом в большей степени обратный ионный поток оказывает влияние на условия функционирования и параметры форвакуумного плазменного электронного источника на основе тлеющего разряда с полым катодом.

4. Неоднородность распределения плотности тока по сечению пучка импульсного форвакуумного плазменного источника электронов обусловлена как традиционными для плазменных источников электронов факторами – радиальной неравномерностью распределения концентрации разрядной плазмы и нарушением плоскопараллельности конфигурации эмиссионного и ускоряющего электродов, так и влиянием обратного потока ионов, локальная пространственная неоднородность которого приводит из-за положительной обратной связи с процессами эмиссии электронов из плазмы к многократному усилению неравномерности плотности тока электронного пучка. В системах на основе тлеющего разряда с полым катодом обратный ионный поток существенно усиливает неоднородность радиального распределения плотности эмиссионной плазмы, тогда как для дуговых плазменных источников с точечной генерацией плазмы обратный ионный поток в меньшей степени влияет на равномерность распределения плотности тока электронного пучка. При увеличении тока пучка на его равномерность также оказывает влияние собственное магнитное поле тока

пучка, приводящее в условиях компенсации пространственного заряда ускоренных электронов к сжатию пучка в процессе его транспортировки.

5. В форвакуумной области давлений компенсация отрицательного заряда сильноточного импульсного электронного пучка, привносимого на электрически изолированную поверхность мишени, обеспечивается ионным потоком из пучковой плазмы, а также ионами несамостоятельного разряда, возникающего между отрицательно заряженной мишенью и заземленными стенками вакуумной камеры. Абсолютное значение величины установившегося отрицательного потенциала изолированной мишени в несколько раз выше по сравнению со случаем воздействия на мишень относительно слаботочного непрерывного пучка электронов, но тем не менее его величина остаётся намного меньше потенциала ускоряющего электрода электронного источника, определяющего энергию электронного пучка. Отмеченные обстоятельства делают возможным эффективную электронно-лучевую модификацию широкоапертурным импульсным электронным пучком поверхностных свойств протяженных диэлектрических образцов.

6. Форвакуумные плазменные источники широкоапертурных импульсных электронных пучков в рабочем диапазоне давлений от единиц до 30 Па, ускоряющем напряжении до 15 кВ и частоте повторения импульсов до 50 имп./с при использовании для генерации эмиссионной плазмы тлеющего разряда с полым катодом обеспечивают при длительностях импульса до 1 мс ток пучка до 120 А, плотность энергии пучка в импульсе до 10 Дж/см², неравномерность распределения плотности тока по сечению пучка не более 10%. Дальнейшее повышение параметров электронного пучка ограничено переходом тлеющего разряда в дуговой режим горения. Использование в электронном источнике катодной дуги делает возможным повышение тока электронного пучка до 170 А, плотности тока пучка до 15 А/см², длительности импульса до 20 мс и плотности энергии пучка в импульсе до 60 Дж/см². Однако при этом повышается нестабильность и уровень шумов тока пучка, а также возрастает до 15–20% неравномерность распределения плотности тока. Достигнутые параметры электронных пучков являются рекордными для данной области давлений.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждаются систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных методик, удовлетворительным согласованием теоретических оценок, результатов численного моделирования и экспериментальных результатов, непротиворечивостью полученных данных и выводов с результатами исследований, проведенных ранее, публикацией результатов в ведущих российских и зарубежных научных изданиях.

Апробация результатов работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на 26-м, 27-м и 28-м Международных симпозиумах по разряду и электрической изоляции в вакууме (ISDEIV – International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum) (Индия, Мумбаи, 2014 г.; Китай, Сучжоу, 2016 г.; Германия,

Грайфсвальд, 2018 г.); на 6-й и 7-й Международных конференциях «Лучевые технологии и применение лазеров» (BTLA – Beam technologies and laser application) (Россия, Санкт-Петербург, 2009, 2012 гг.); на 9-й, 10-й и 11-й Международных конференциях по модификации материалов пучками частиц и потоками плазмы (СММ – International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows) (Россия, Томск, 2008, 2010, 2012 гг.); на 13-й и 14-й Международных конференциях «Газоразрядная плазма и ее применение» (GDP – International Conference «Gas Discharge Plasmas and Their Applications») (Россия, Новосибирск, 2017 г.; Россия, Томск, 2019 г.); на Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (ЭССУ) (Россия, Томск, ежегодно с 2007 по 2019 г.).

Личный вклад автора

Личный вклад автора настоящей диссертационной работы состоит в постановке цели и задач исследований, планировании и проведении большей части экспериментов, анализе полученных результатов, разработке конструкторских решений созданных импульсных источников электронов. В постановке отдельных задач исследований и обсуждении результатов активное участие принимали Е.М. Окс и В.А. Бурдовицин. Эксперименты по генерации и применению импульсных электронных пучков плазменным источником на основе тлеющего разряда и катодной дуги проводились совместно с Ю.Г. Юшковым и А.В. Казаковым. Соавторы, принимавшие участие в отдельных направлениях исследований, указаны в списке основных публикаций по теме диссертации. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

Публикации

Материалы диссертационной работы опубликованы в 28 статьях, в журналах, входящих в списки рецензируемых российских и зарубежных научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, в том числе в 20 статьях в журналах, входящих в реферативные базы данных Web of Science и Scopus, в 10 текстах докладов в трудах международных и всероссийских научных и научно-практических конференций и семинаров. По результатам работы получено 6 патентов РФ на изобретения и полезные модели и 4 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ. Результаты работы легли в основу поддержанной грантом РФФИ монографии «Форвакуумные плазменные источники электронов» и монографии «Применение форвакуумных плазменных источников электронов для обработки диэлектриков».

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения, содержит 299 страниц текста, 220 иллюстраций, 10 таблиц. Список цитируемой литературы включает 265 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава «Генерация низкоэнергетических широкоапертурных импульсных электронных пучков в системах с плазменным катодом» носит обзорный характер. В ней рассмотрены импульсные плазменные источники широкоапертурных электронных пучков, функционирующих при различных давлениях. Описаны разрядные системы таких источников, особенности эмиссии электронов с протяженной плазменной поверхности и формирования широкоапертурных электронных пучков. Особое внимание уделено описанию форвакуумных плазменных источников электронов, функционирующих в непрерывном режиме. Рассмотрены особенности зажигания и горения разряда в форвакууме, эмиссии и формирования электронных пучков, в том числе широкоапертурных (ленточной конфигурации), описаны конструкции форвакуумных источников электронов и их применение. В конце главы сделаны выводы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава «Разрядные системы для генерации широкоапертурных импульсных электронных пучков в системах с плазменным катодом в форвакуумной области давлений» посвящена исследованию функционирования тлеющего разряда с полым катодом и дугового разряда с катодным пятном в форвакуумном плазменном источнике электронов (рисунок 1). Описаны конструкции их разрядных систем и приведены схемы электропитания разрядов.

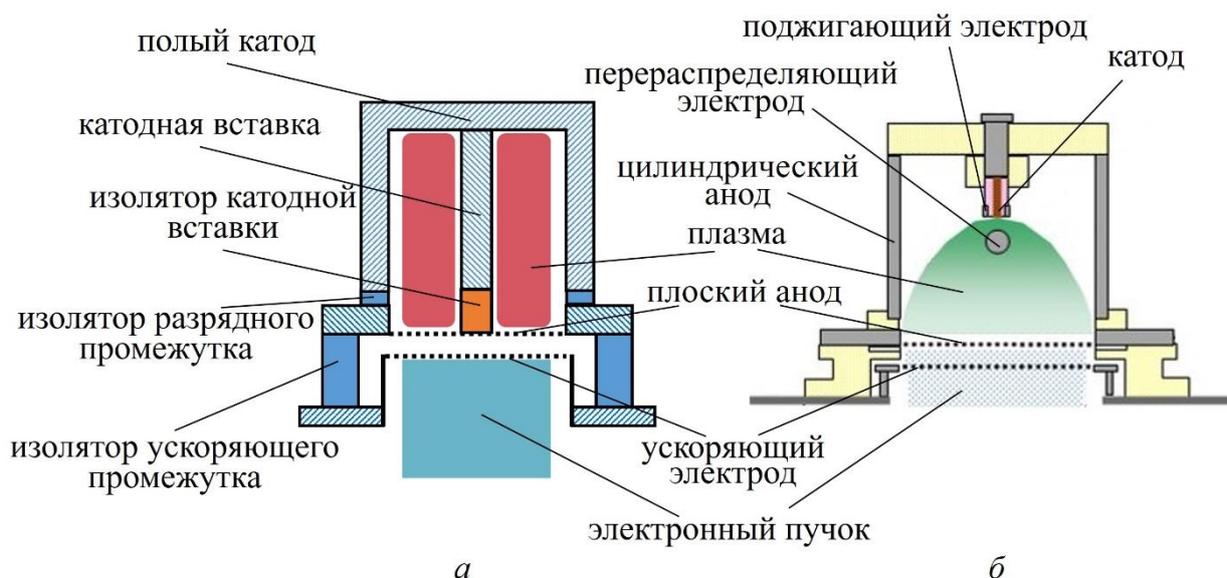


Рисунок 1 – Форвакуумный плазменный источник импульсных пучков электронов на основе тлеющего разряда с полым катодом (а) и дугового разряда с катодным пятном (б)

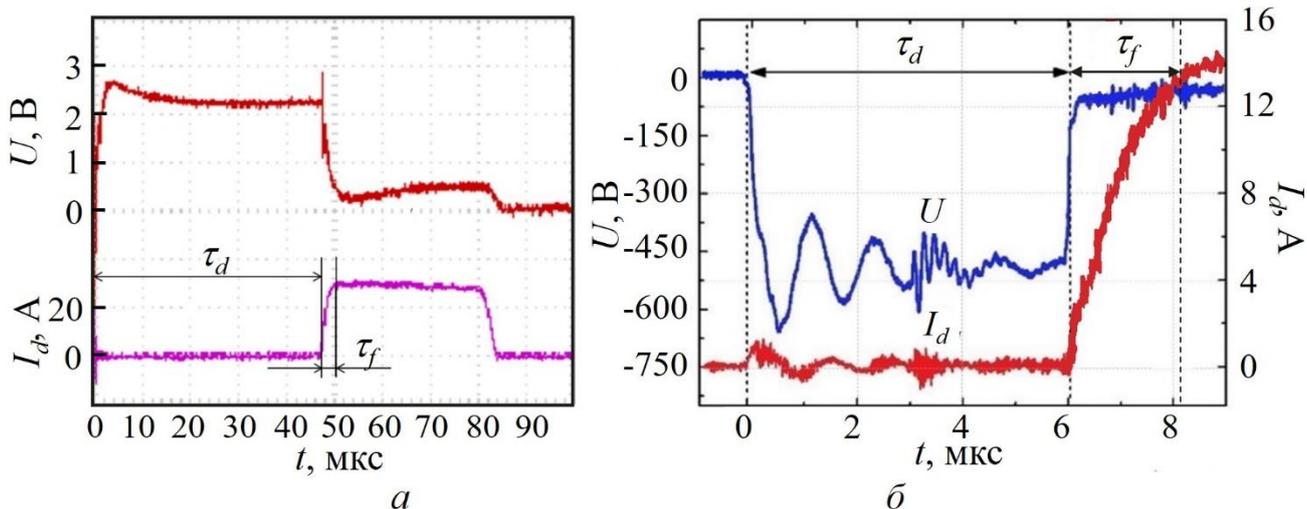


Рисунок 2 – Типичные осциллограммы импульсов напряжения на промежутке катод–анод источника электронов на основе тлеющего разряда с полым катодом (а) и дугового разряда с катодным пятном (б)

Приведены результаты исследований особенностей зажигания импульсных тлеющего разряда с полым катодом и дугового разряда с катодным пятном в форвакуумной области давлений. Показано что, при приложении импульса напряжения к разрядному промежутку форвакуумного плазменного источника электронов зажигание основного разряда (тлеющего или дугового) происходит с некоторой задержкой (рисунок 2). Наряду с ожидаемым снижением времени задержки τ_d при увеличении амплитуды импульса напряжения U_0 на промежутке катод – анод и (или) повышении давления p в вакуумной камере (рисунки 3, 4), как показали эксперименты, на время τ_d оказывает также влияние величина напряжения на ускоряющем промежутке U_a (рисунок 3).

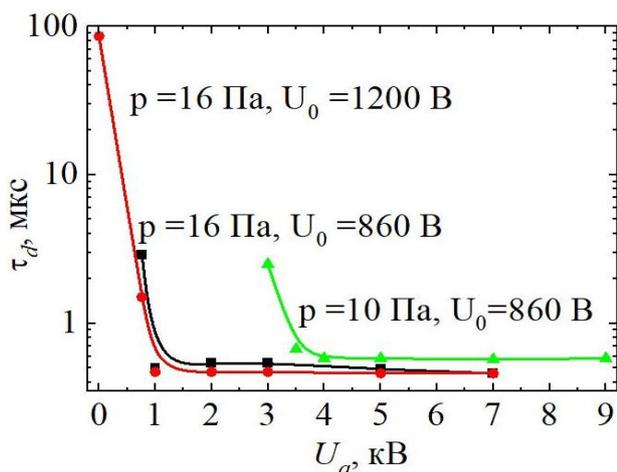


Рисунок 3 – Зависимость времени запаздывания зажигания τ_d тлеющего разряда с полым катодом от ускоряющего напряжения U_a при различном давлении p и напряжений U_0

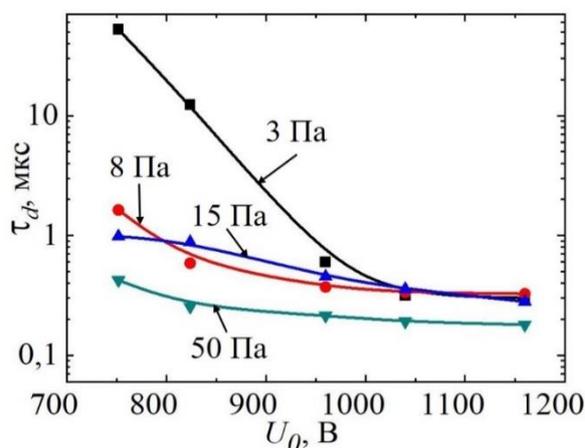


Рисунок 4 – Зависимость времени запаздывания зажигания τ_d дугового разряда с катодным пятном от напряжения U_0 при различном давлении p

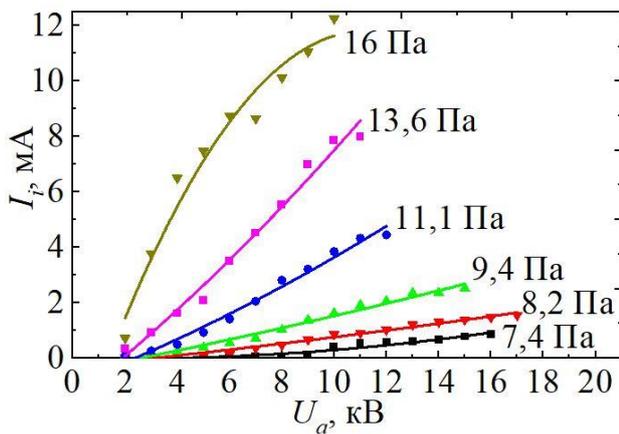


Рисунок 5 – Зависимость обратного тока ионов I_i от ускоряющего напряжения U_a при различном давлении p

в форвакуумной области давлений уже при ускоряющем напряжении в несколько киловольт. Повышение ускоряющего напряжения приводит к росту тока ВТР, что в свою очередь обуславливает возрастание обратного ионного потока (рисунок 5). Заметная доля этих ускоренных ионов проникает через эмиссионную сетку в разрядный промежуток плазменного источника, создавая в нем дополнительные электроны, и тем самым ускоряя процесс формирования разрядной плазмы. Кроме того, величина обратного ионного потока влияет на время нарастания тока до максимального значения τ_f (рисунок 2) плазмообразующих тлеющего и дугового разрядов, и уменьшается с ростом давления газа и тока разряда. При этом в большей степени обратный ионный поток оказывает влияние на условия зажигания тлеющего разряда с полым катодом.

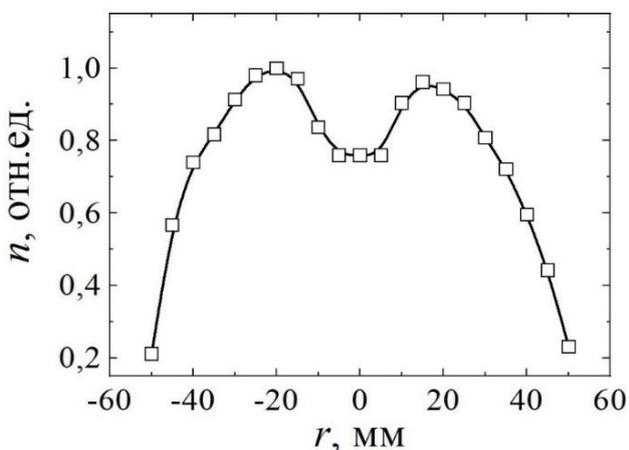


Рисунок 6 – Концентрация плазмы вблизи эмиссионной поверхности

позволила получить распределение концентрации эмиссионной плазмы с неоднородностью, не превышающей 10%. Экспериментально найденная оптимальная длина катодной вставки оказалась равной 65 мм, что составляет 90% от высоты катодной полости. Соответствующее распределение плотности тока представлено на рисунке 30а.

Проведенные параллельно измерения ионного тока из ускоряющего промежутка на эмиссионный электрод (анод) показали возрастание этого тока как с увеличением U_a , так и с повышением давления p (рисунок 5). Это дало основания объяснить наблюдаемые зависимости (рисунки 3, 4) в форвакуумном плазменном источнике электронов в рамках представлений об иницирующей роли ионов из ускоряющего промежутка, генерируемых в «паразитном» слаботочном высоковольтном тлеющем разряде (ВТР), возникающем

Одним из ключевых параметров широкоапертурных пучков электронов является равномерность распределения плотности тока по сечению, которая зависит, прежде всего, от распределения концентрации плазмы в области эмиссионной границы. Радиальное распределение концентрации эмиссионной плазмы в источнике электронов на основе тлеющего разряда с полым катодом (рисунок 6) имеет симметричный вид, но при этом равномерность по сечению является невысокой. Оптимизация катодной вставки (рисунок 1а)

Показано, что для источника электронов на основе катодной дуги в форвакуумном диапазоне давлений основным источником заряженных частиц, так же как в области низких давлений (10^{-5} – 10^{-1} Па), является катодное пятно. При этом, исследование влияния давления p рабочего газа на параметры плазмы дугового разряда показало, что в прикатодной области ($h_k=10$ мм) изменение давления p , как и ожидалось, практически не влияет на профиль радиального распределения и концентрацию n (плотность) плазмы (рисунок 7).

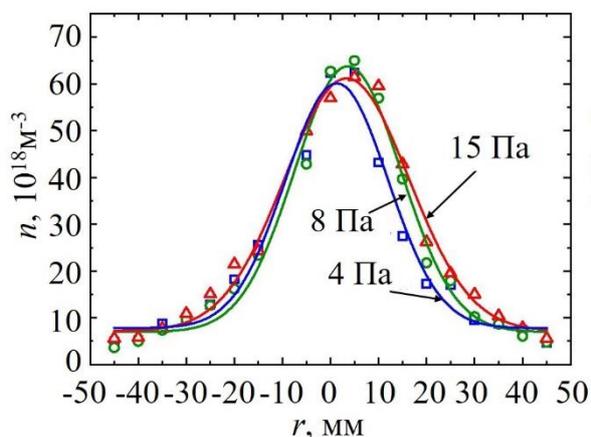


Рисунок 7 – Радиальные распределения концентрации n разрядной плазмы в прикатодной области при различном давлении рабочего газа p

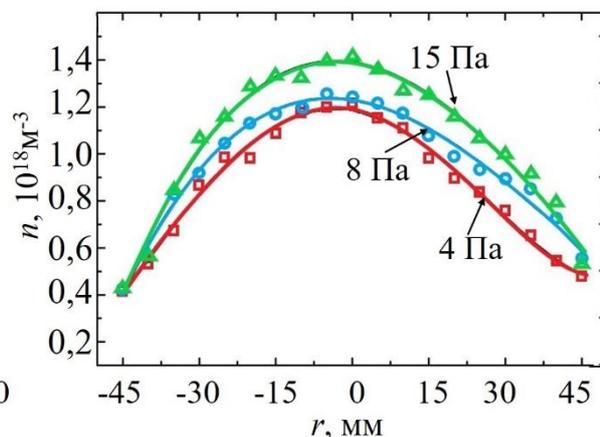


Рисунок 8 – Радиальные распределения концентрации n разрядной плазмы в области эмиссионной сетки при различном давлении рабочего газа p

Однако в области отбора электронов на значительном удалении от катодного пятна рост давления p рабочего газа приводит к заметному увеличению плотности эмиссионной плазмы (рисунок 8). Наблюдаемый при увеличении давления p рабочего газа рост плотности плазмы в области эмиссии, находящейся на значительном удалении от катодного пятна, обусловлен эффективной ионизацией рабочего газа, концентрация частиц которого в форвакууме на порядки выше, чем в традиционных системах. По мере роста разрядного тока I_d степень влияния давления p рабочего газа на плотность плазмы в области эмиссии снижается.

Использование перераспределяющего электрода в разрядном промежутке (рисунок 1б) не только позволяет значительно улучшить равномерность распределения концентрации разрядной плазмы в области эмиссионной сетки, но и усиливает влияние давления рабочего газа p на плотность эмиссионной плазмы (рисунок 9).

Установлено, что изменение давления p рабочего газа оказывает существенное влияние на горение дугового разряда. При $p \geq 10$ Па в течение импульса при практически прямоугольной форме импульса тока I_d дугового разряда на осциллограмме напряжения U_d горения дуги отчетливо проявляются два режима (стадии) горения разряда, которые отличаются напряжением горения U_d (рисунок 10).

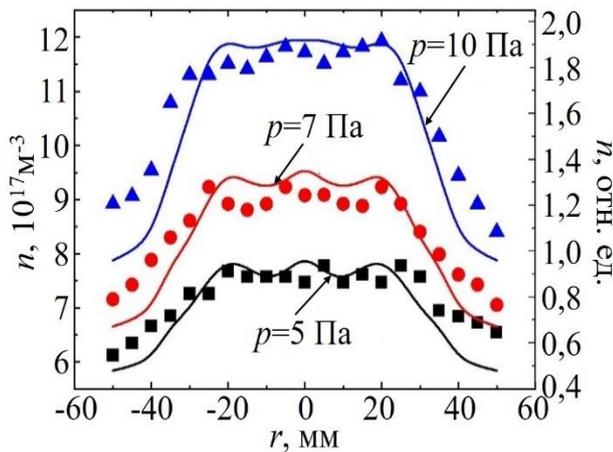


Рисунок 9 – Радиальные распределения концентрации n разрядной плазмы в области эмиссионной сетки при различном давлении рабочего газа p (с перераспределяющим электродом)

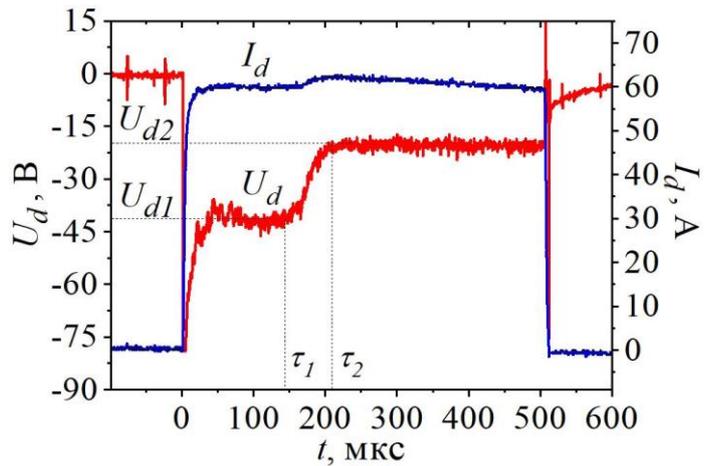


Рисунок 10 – Типичные осциллограммы импульсов тока I_d разряда и напряжения U_d горения дугового разряда при $p=30$ Па, $I_d=60$ А. Рабочий газ – воздух

Первая (начальная) стадия характеризуется более высоким напряжением горения U_{d1} , а переход ко второй стадии сопровождается заметным падением напряжения U_{d2} . Длительность первой стадии τ_1 и время от начала импульса до момента перехода ко второй стадии τ_2 имеют зависимость как от давления газа p , так и от тока разряда I_d (рисунок 11). Время перехода от первой стадии ко второй $\Delta\tau$ ($\Delta\tau=\tau_2-\tau_1$) заметно увеличивается с ростом давления p рабочего газа, в то время как при изменении тока I_d разряда остается практически неизменным. Регулировкой параметров можно исключить переход между стадиями и реализовать функционирование дугового разряда только в одном режиме.

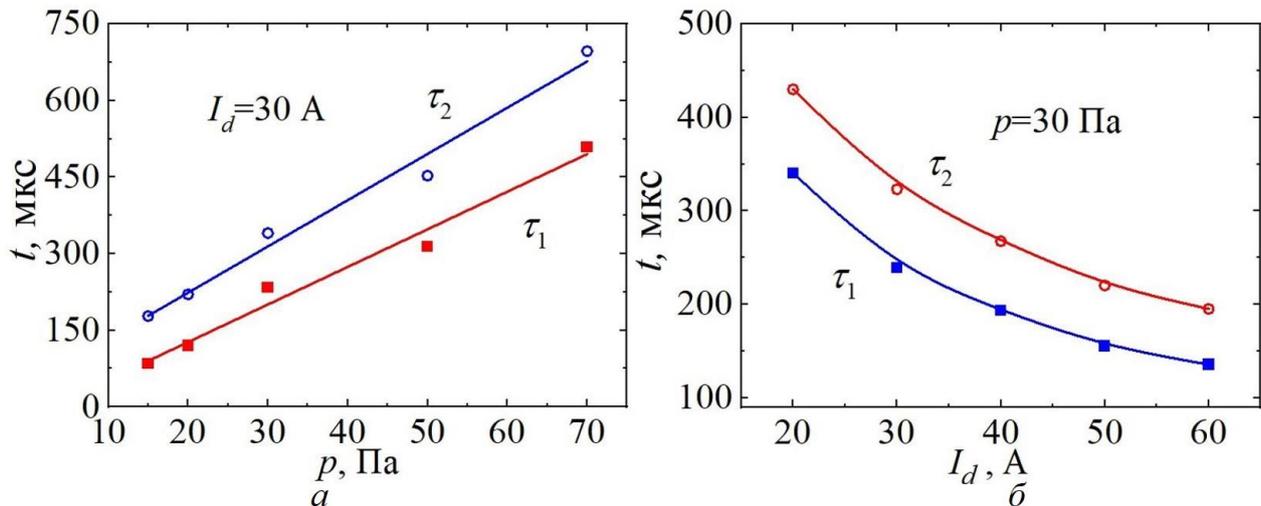


Рисунок 11 – Зависимости длительностей времен τ_1 и τ_2 от: a – давления рабочего газа p ; b – тока разряда I_d . $\nu=10$ Гц, рабочий газ – воздух

Проведенные исследования рабочей поверхности катода показали, что при реализации первого режима горения, на поверхности катода образуется

загрязняющая пленка 1 (темная область), а автограф катодного пятна 2 (светлая область) занимает сравнительно большую площадь (рисунок 12). Пленка на поверхности катода, вероятно, возникает в результате адсорбции газовых атомов и молекул в период между импульсами. Во втором режиме горения, поверхность катода 3 остается «чистой», а след 4 от катодного пятна занимает значительно меньшую площадь и имеет большую глубину, чем в 1-м режиме.

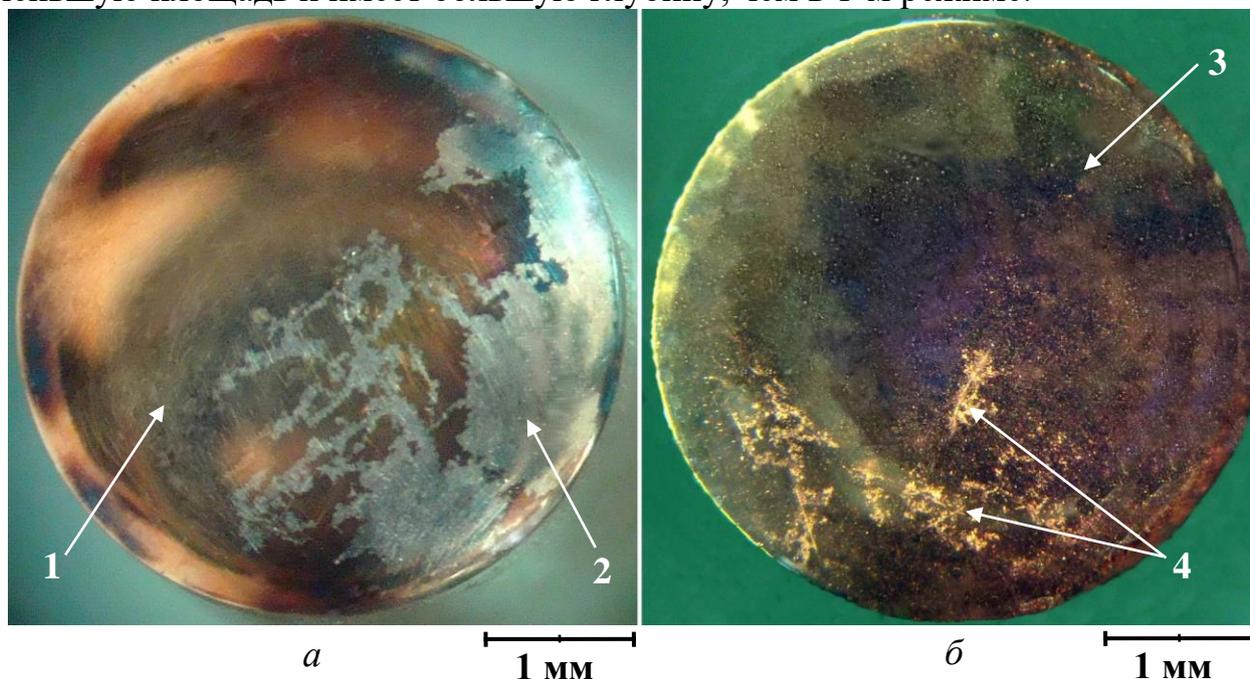


Рисунок 12 – Автографы катодных пятен: *a* – $p=50$ Па; *б* – $p=4$ Па. Ток разряда $I_d=60$ А, $\tau_{ii}=200$ мкс, рабочий газ – воздух

Разная степень изменения поверхности катода, вероятно, обусловлена тем, что при горении дугового разряда в 1-й стадии на катоде существуют преимущественно катодные пятна 1-го рода, которые возникают на загрязненных поверхностях, быстро перемещаются по поверхности электрода и вызывают малую эрозию материала катода. Соответственно, при горении дуги во 2-й стадии, основным источником плазмы являются катодные пятна 2-го рода, которые возникают только на чистой металлической поверхности, сравнительно медленно перемещаются и вызывают значительную эрозию материала катода. Наблюдаемый в течение импульса тока дуги переход из одного режима горения дугового разряда в другой, по-видимому, связан с процессами десорбции газа с поверхности катода и трансформацией катодных пятен 1-го рода в пятна 2-го рода. При этом первая стадия горения дугового разряда обусловлена функционированием катодного пятна на «загрязненной» поверхности катода. Поэтому первая стадия связана с формированием на поверхности катода пятен первого и, возможно, частично второго рода, тогда как во второй стадии горения дуги на поверхности электрода существуют преимущественно пятна 2-го рода. В то же время сравнительно большая величина напряжения горения дуги на первой стадии горения разряда, когда десорбция газа с поверхности катода существенна, не согласуется с литературными данным, где указывается, что для пятен 1-го рода характерно более

низкое напряжение горения. Более детальное изучение этого вопроса привело к заключению о том, что величина и знак изменения напряжения при переходе от одного режима горения дуги к другому, связаны с условиями эксперимента, главным образом, с геометрией разрядного промежутка и параметрами дугового разряда. Кроме того, на напряжение горения дуги могут оказывать влияние процессы ионизации рабочего газа, концентрация частиц которого в форвакуумном диапазоне значительно выше, чем в традиционных системах.

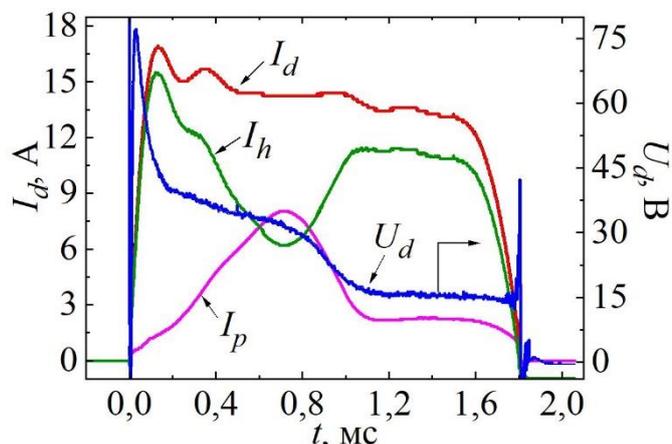


Рисунок 13 – Осциллограммы напряжения U_d горения и тока I_d дугового разряда, тока I_h на полуугольную часть и тока I_p на плоскую часть анода

Исследования распределения тока между элементами разрядного промежутка (рисунок 13) показали, что в условиях, когда дуговой разряд функционирует во второй стадии (с малым напряжением горения), большая часть (может достигать 80%) тока разряда протекает через полуугольную часть анода. Когда реализуется первая стадия горения (с большим напряжением горения), наблюдается значительный рост тока I_p , протекающего через плоскую часть анода, при этом рост тока I_p на плоскую часть анода происходит в течение всей

первой стадии горения разряда. Время t_{max} , за которое ток на плоскую часть анода от начала импульса достигает своего максимального значения I_{p-max} , увеличивается с ростом давления рабочего газа и уменьшается при увеличении разрядного тока (рисунок 14), при этом I_{p-max} пропорционально увеличивается с ростом разрядного тока и давления газа.

Исследования масс-зарядового состава ионов плазмы дугового разряда в

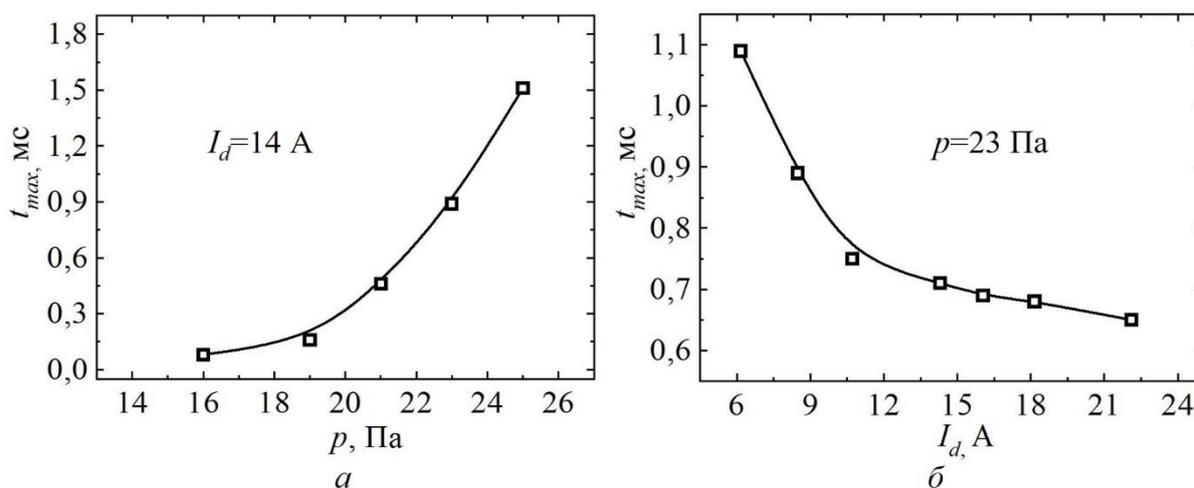


Рисунок 14 – Зависимость времени t_{max} от давления рабочего газа (а) и тока I_d разряда (б)

форвакуумном диапазоне давлений (рисунок 15) показали, что в области отбора электронов наряду с ионами материала катода присутствует значительная часть

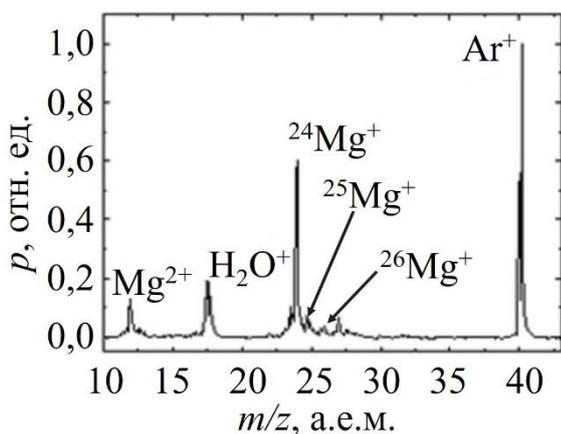


Рисунок 15 – Масс-спектры ионов плазмы дугового разряда. Материал катода: магний, рабочий газ – аргон

ионов рабочего газа. При этом, увеличение давления рабочего газа и/или уменьшение тока разряда приводит к существенному росту доли ионов рабочего газа (рисунок 16), которая может достигать величины 80% и более.

Электрометрические исследования масс-зарядового состава ионов в плазме импульсной дуги, функционирующей в форвакуумной области давлений, хорошо согласуются с результатами измерений этой плазмы оптическими методами.

Согласно литературным данным в диапазоне давлений $p = 10^{-2} - 10^{-1}$ Па увеличение частоты ν следования импульсов тока дуги

приводит к уменьшению доли газовых ионов в плазме, что объясняется более интенсивной десорбцией газа с поверхности катода. Однако, как показали эксперименты, в форвакууме варьирование частотой следования импульсов тока дуги в диапазоне $\nu = 0,2 - 25$ Гц практически не влияло ни на времена τ_1 и τ_2 , ни на состав плазмы дугового разряда.

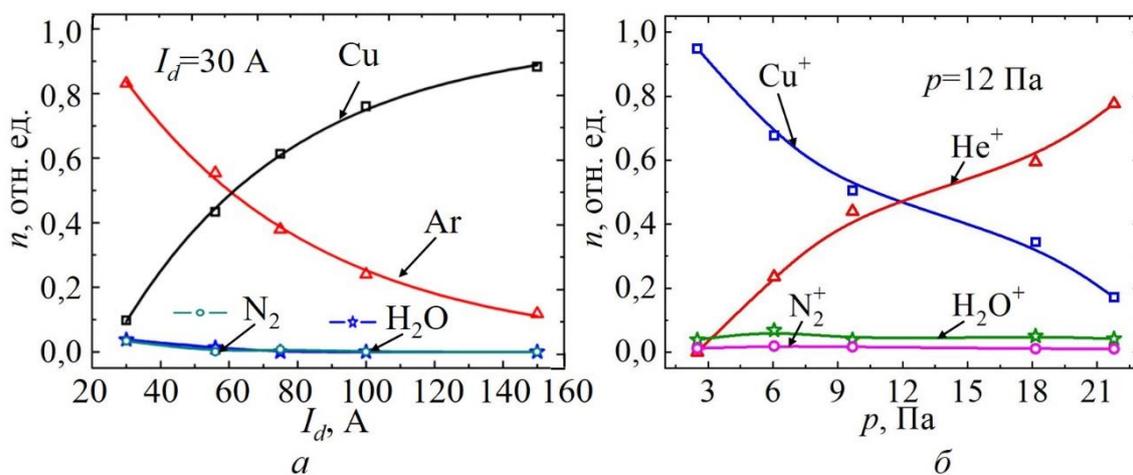


Рисунок 16 – Зависимость концентрации ионов от тока разряда (а) давления газа (б). Материал катода: медь, рабочий газ – азот

В этой же главе представлены характеристики и параметры источника на основе тлеющего разряда с полым катодом. Приведены результаты исследований влияния геометрии разрядной системы и внешних условий горения разряда с полым катодом на предельные значения тока разряда без перехода в дуговой режим горения. В заключении главы делается вывод о том, что достигнутый уровень параметров плазмы разрядных систем плазменных эмиттеров на основе тлеющего разряда с полым катодом и катодной дуги достаточен для эффективного использования разрядов данных типов в форвакуумных плазменных источниках широкоапертурных импульсных электронных пучков.

Третья глава «Эмиссия, формирование и транспортировка широкоапертурных импульсных электронных пучков в форвакуумной области давлений» содержит результаты исследований, направленных на получение в форвакуумной области давлений широкоапертурных импульсных электронных пучков микро-миллисекундного диапазона длительностей.

Для работы плазменного источника электронов давление газа является ключевым внешним параметром, который влияет как на параметры разряда и плазмы, так и на условия формирования, ускорения и транспортировки электронного пучка. Для форвакуумной области давлений зависимость параметров электронного пучка от давления газа может заметно усиливаться в результате влияния обратного потока ионов из плазмы, образованной в области ускорения и транспортировки электронного пучка. Как показали эксперименты (рисунок 17), в форвакуумной области давлений величина обратного тока ионов I_i может достигать 10% от тока электронного пучка. Это намного больше, чем в плазменных источниках электронов, функционирующих в традиционной области давлений ($10^{-2} - 10^{-1}$ Па). Величина обратного ионного потока слабо зависит от ускоряющего напряжения, но возрастает с повышением давления (рисунок 18) и зависит от рода газа (таблица 1).

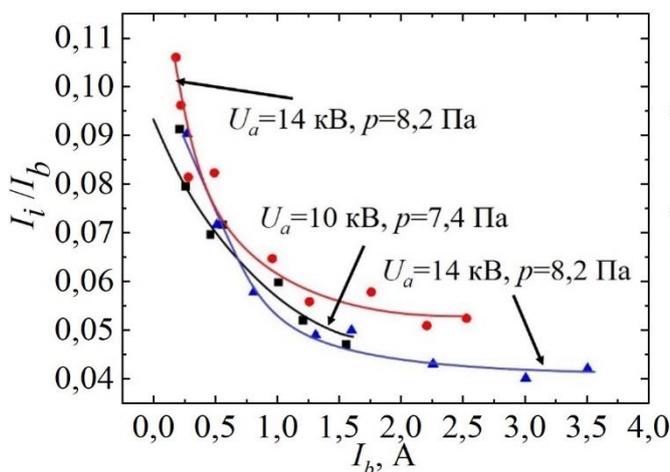


Рисунок 17 – Отношение ионного тока к току электронного пучка в зависимости от тока электронного пучка

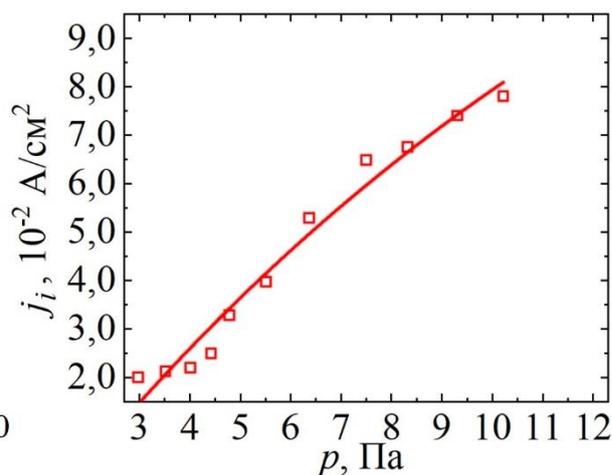


Рисунок 18 – Зависимость плотности тока обратного ионного потока j_i от давления газа p . $I_e=30$ А, $U_a=9$ кВ, $\tau_u=200$ мкс, рабочий газ – воздух

Таблица 1 – Плотность тока j_i обратного ионного потока. $I_e=30$ А, $U_a=9$ кВ, $\tau_u=200$ мкс

Давление, Па	Род газа	j_i , мА/см ²
8	Воздух	65,1
	Аг	116
	Не	25,6
5	Воздух	35,3
	Аг	57,1
	Не	17,2

Характерные осциллограммы импульсов токов разряда I_d , и эмиссии электронов I_e при различных давлениях газа представлены на рисунке 19. Форма импульса тока разряда оставалась неизменной при всех давлениях (рисунок 19, кривая 1), тогда как для импульса тока эмиссии (рисунок 19, кривые 2–6) характерно

возрастание амплитуды и увеличение крутизны переднего фронта с повышением давления. При этом, эффективность извлечения электронов (отношение I_e/I_d), возрастая с повышением давления газа, практически не зависит от тока разряда (рисунок 20).

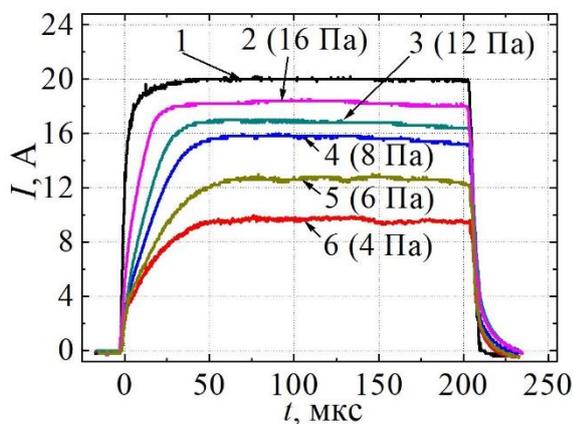


Рисунок 19 – Осциллограммы тока разряда I_d (1), и тока эмиссии электронов I_e (2–6) при различных давлениях газа p . Ускоряющее напряжение $U_a = 9$ кВ

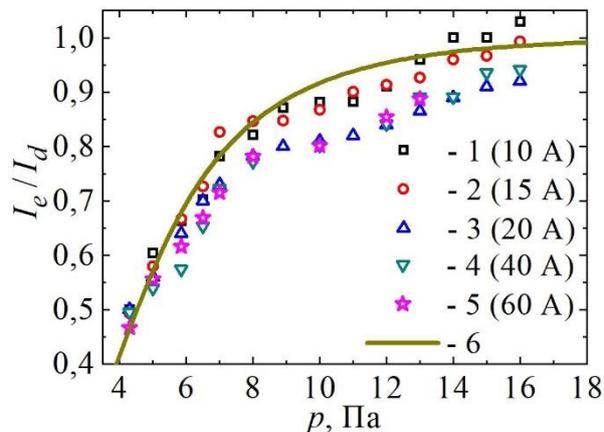


Рисунок 20 – Экспериментальные (1–5) и расчетная (6) зависимости эффективности извлечения электронов I_e/I_d от давления рабочего газа p при различных токах разряда I_d . Ускоряющее напряжение $U_a = 9$ кВ

Наблюдаемые в эксперименте зависимости могут быть объяснены с помощью так называемого эффекта «переключения тока в плазменном катоде». Такой эффект реализуется при создании в разрядной системе плазменного электронного источника условий для повышения потенциала анодной плазмы и, соответственно, возрастания потенциального барьера для электронов, уходящих из плазмы на анод. Поскольку в области эмиссионного отверстия плазменного катода потенциальный барьер для электронов снят электрическим полем ускоряющего промежутка, то снижение электронного компонента разрядного тока на анод стимулирует соответствующее возрастание тока эмиссии электронов из плазмы. Составление модели по выше изложенным принципам позволило получить формулу для расчета тока эмиссии I_e :

$$I_e = I_{e0} + j_{ch} \cdot [1 - \exp(-\alpha \cdot p \cdot I_e \cdot F(t))] \cdot S_e, \quad (1)$$

где I_{e0} – эмиссионный ток при минимальном давлении газа; j_{ch} – плотность хаотического тока электронов в плазме; S_e – площадь эмиссионной поверхности плазмы.

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{2 \cdot v_i}{R} \cdot t\right), \quad \alpha = \frac{e \cdot \eta \cdot \sigma_i \cdot L \cdot R^3}{8 \cdot k^2 \cdot T_g \cdot v_i \cdot V \cdot \epsilon_0 \cdot T_e},$$

где $v_i = \sqrt{\frac{2kT_e}{M_i}}$ – скорость ионов на границе невозмущенная плазма – анодный слой; M_i – масса иона; R – радиус полого анода; e – заряд электронов; η – доля ионов;

σ_i – сечение ионизации электронным пучком; L – характерная протяженность слоя; k – постоянная Больцмана; T_g – температура газа; V – объем анодной полости; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; T_e – температура электронов в плазме.

При достаточно больших временах t (~ 25 мкс) ток эмиссии I_e перестает зависеть от времени и достигает насыщения. Из (1) следует, что в стационарном случае ток эмиссии электронов увеличивается с ростом давления. При соответствующем выборе параметра η расчетная кривая достаточно хорошо согласуется с экспериментальной зависимостью I_e/I_d от p (рисунок 20, кривая б). Следует отметить, что в источниках электронов с плазменным катодом максимальная величина тока I_e эмиссии всегда ограничена величиной тока разряда. Выражение (1) также описывает и начальный участок (фронт импульса), и показывает, что скорость нарастания тока увеличивается с давлением газа в микросекундном масштабе времени, но при этом время выхода тока эмиссии на «плато» остается больше времени формирования разрядной плазмы, что также наблюдается в эксперименте (рисунок 19).

Увеличение давления также приводит к снижению величины стабильного (максимального) тока эмиссии электронов и, соответственно, уменьшению тока I_b электронного пучка (рисунок 21). Наряду с давлением на величину стабильного тока электронного пучка ожидаемо оказывает влияние род рабочего газа. Увеличение длительности импульса также снижает максимальный ток эмиссии (рисунок 22).

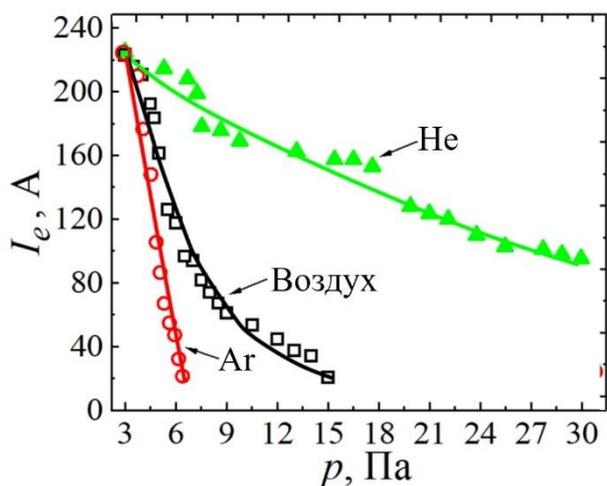


Рисунок 21 – Зависимость максимального тока эмиссии I_e от давления p для различных газов

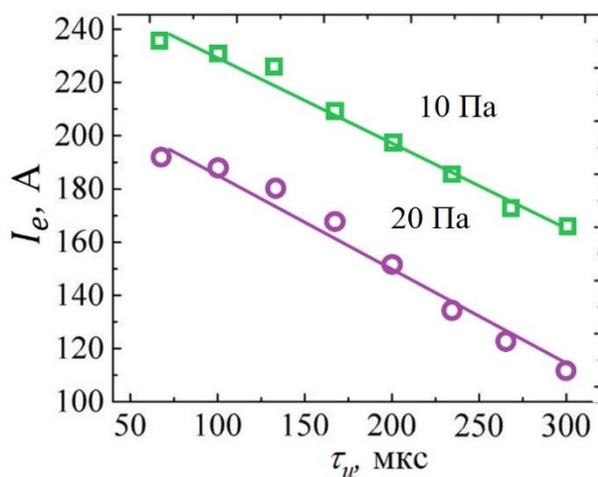


Рисунок 22 – Зависимость максимального тока I_e эмиссии от длительности импульса. $U_a=9$ кВ, газ – гелий

Изменение ускоряющего напряжения U_a (5–15 кВ) в широком диапазоне длительностей импульса, токов эмиссии и давлений газа не оказывает существенного влияния на предельные параметры электронного источника, что в совокупности с другими полученными экспериментальными данными свидетельствует о доминирующей роли межэлектродного типа пробоя для широкоапертурных импульсных форвакуумных источников электронов.

Полученные экспериментальные зависимости могут быть объяснены зарядкой обратным ионным потоком диэлектрических включений на эмиссионном электроде, которая приводит к образованию катодного пятна и развитию пробоя ускоряющего промежутка. Влияние длительности импульса на формирование катодного пятна может быть объяснено усилением результирующей напряженности электрического поля за счет увеличения напряженности в диэлектрическом включении на поверхности металла:

$$E_r = (E_0 + E_i) \cdot \beta, \quad (2)$$

где E_0 – напряженность электрического поля, созданная постоянным высоковольтным источником ускоряющего напряжения; β – коэффициент усиления поля; $E_i = \frac{j_i \tau_{ii}}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}$ – напряженность электрического поля в диэлектрическом включении (пленке), обусловленная обратным ионным потоком; ε – диэлектрическая проницаемость пленки; j_i – плотность ионного тока; τ_{ii} – длительность импульса.

Увеличение давления p при неизменном токе I_e эмиссии и длительности импульса электронов приводит к росту плотности тока j_i ионов (рисунок 18), а следовательно, к увеличению напряженности электрического поля в диэлектрическом включении. Для нивелирования этого эффекта необходимо уменьшать ток эмиссии (рисунок 21). Рост длительности импульса компенсируется снижением величины стабильного тока эмиссии и/или давления газа (рисунок 22). Отличие в стабильных токах эмиссии для различных газов обусловлено разными плотностями j_i обратных ионных токов (таблица 1).

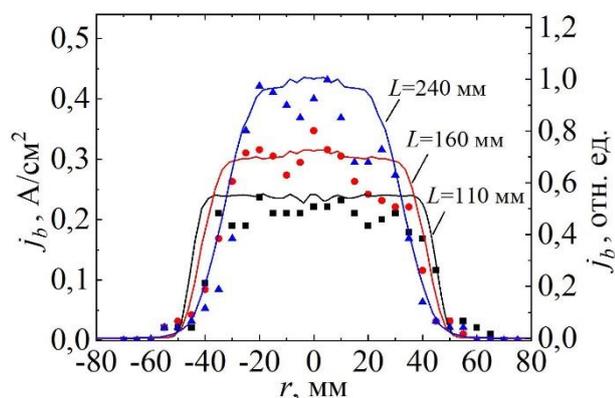


Рисунок 23 – Радиальные распределения плотности тока пучка j_b на разных расстояниях от экстрактора

вблизи эмиссионной границы, оказывается необходимым, но не достаточным условием для получения однородного по сечению электронного пучка. Так, по мере распространения в пространстве дрейфа электронный пучок сжимается, что приводит к ухудшению его однородности (рисунок 23). Увеличение тока пучка и/или давления газа (рисунок 24) также приводит к сжатию электронного пучка.

Одна из причин, приводящая к появлению заметной неоднородности сильного электронного пучка при его распространении в традиционном для плазменных источников электронов диапазоне давлений, обусловлена сжатием пучка под действием собственного магнитного поля. Однако, проведенные

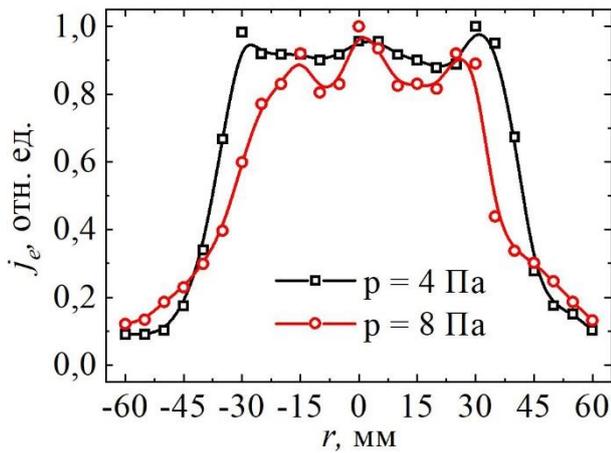


Рисунок 24 – Радиальные распределения плотности тока электронного пучка j_b при различном давлении рабочего газа. Расстояниях от экстрактора 120 мм

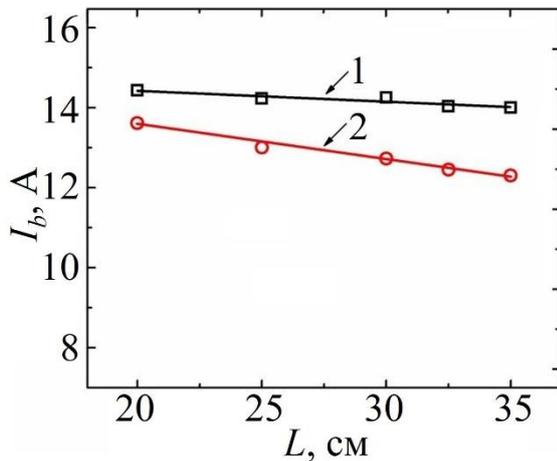


Рисунок 25 – Зависимость тока пучка I_b , измеряемого цилиндром Фарадея (1) и калориметром (2), от расстояния L от экстрактора.

$$I_e = 20 \text{ А}, p = 8 \text{ Па}, U_a = 8 \text{ кВ}$$

которых неравномерность распределения плотности тока ускоренного электронного пучка по его сечению не превышает 10%.

Для определения эффективности передачи энергии от электронного источника к облучаемому изделию (коллектору) были проведены исследования транспортировки электронного пучка, показавшие, что при ускоряющем напряжении более 4 кВ ток пучка уменьшается не более чем на 20% при распространении в пространстве дрейфа на расстояние до 35 см от экстрактора (рисунок 25). Это подтверждается измерениями тока пучка как с помощью цилиндра Фарадея, так и с помощью калориметра. При ускоряющих напряжениях менее 3 кВ на расстоянии $L = 35$ см пучок преимущественно «трансформируется» в пучковую плазму,

оценки свидетельствуют о том, что в форвакуумной области давлений собственное магнитное поле электронного пучка не может являться единственным фактором, оказывающим влияние на фокусировку пучка. Тем более, влияние собственного магнитного поля не может объяснить сжатие пучка при увеличении давления газа (рисунок 24). Для выявления причин указанного поведения пучка было произведено моделирование его распространения в пространстве дрейфа с применением численных методов. Расчет показал, что уже через несколько микросекунд в пространстве дрейфа образуется достаточно плотная пучковая плазма с положительным (относительно стенок камеры) потенциалом составляющем единицы вольт. Данная плазма оказывает дополнительное фокусирующее действие на электронный пучок за счет формы распределения потенциала. Рассчитанное распределение плотности тока электронного пучка представлено на рисунке 23.

Таким образом, на равномерность широкоапертурного электронного пучка, генерируемого плазменным источником электронов в форвакуумном диапазоне давлений, оказывают влияние несколько процессов и факторов. Учет этих процессов и факторов позволил непротиворечиво объяснить наблюдаемые закономерности, а также найти условия, при ко-

т.е. большая часть энергии электронов пучка тратится на генерацию плазмы, а часть электронов пучка рассеивается на газе по мере распространения в пространстве дрейфа.

Другим не менее важным параметром, характеризующим качество передачи энергии от источника электронов к облучаемому объекту, являются потери электронного пучка на экстракторе. Большая величина потерь приводит не только к снижению энергопередачи, но и к существенному нагреву экстрактора, что, в свою очередь, приводит к выходу из строя источника электронов. При использовании в качестве ускоряющего промежутка системы, состоящей из двух плоскопараллельных сеток, эффективность прохождения пучка определяется, прежде всего, прозрачностью экстракторной сетки, которая составляет порядка 70%. Таким образом, при прохождении пучка через экстракторную сетку теряется порядка 30% тока пучка. Кроме потерь пучка, сетка недолговечна и под влиянием нагрева от потока заряженных частиц нередко перегорает, что приводит к выходу электронного источника из строя и требует замены сетки. Применение многопертурных систем извлечения, широко используемых в ионных источниках,

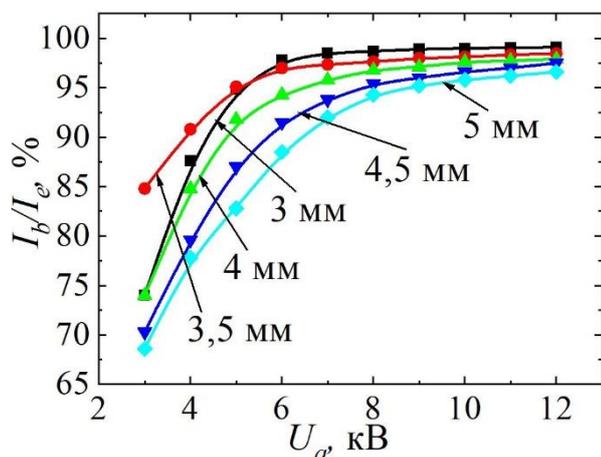


Рисунок 26 – Зависимости коэффициента токопрохождения от ускоряющего напряжения при различных значениях диаметра отверстий в аноде

величину 95% (потери на экстракторе – 5%).

позволяет решить эту проблему. На основе численных расчетов с применением программы КОBRA – 3 (Программа разработана П. Шпедтке, GSI, Германия) был проведен предварительный анализ конструкции многопертурной системы перед ее изготовлением. Экспериментально показано, что использование многопертурной системы не приводит к увеличению неоднородности распределения плотности тока по сечению пучка, но уменьшает потери пучка на экстракторе. Найдено, что коэффициент токопрохождения (отношение тока на коллектор к полному току эмиссии) при достижении ускоряющим напряжением определенного значения (рисунок 26) превышает величину

Четвертая глава «Форвакуумные плазменные источники широкоапертурных импульсных электронных пучков и их применение» посвящена описанию созданных на основе проведенных исследований широкоапертурных импульсных источников электронов на основе тлеющего разряда с полым катодом (рисунок 27) и катодной дуги (рисунок 28) функционирующих в форвакуумной области давлений. Представлены их параметры (таблицы 2 и 3) и характеристики (рисунки 29 и 30), а также приведены некоторые примеры возможного применения.

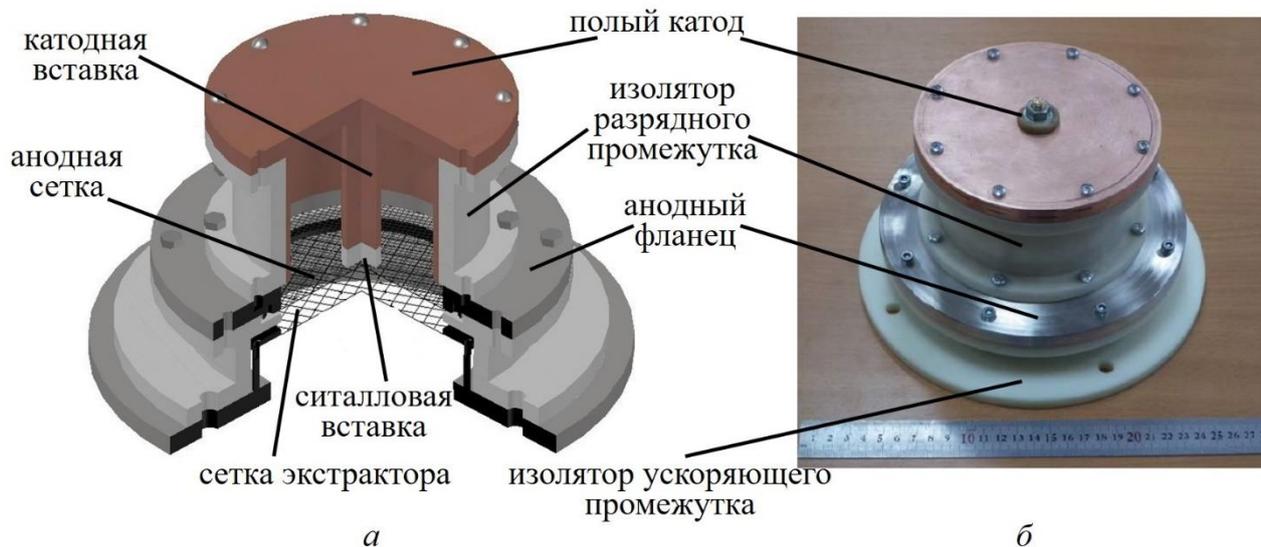


Рисунок 27 – Форвакуумный широкоапертурный импульсный источник электронов на основе тлеющего разряда с полым катодом

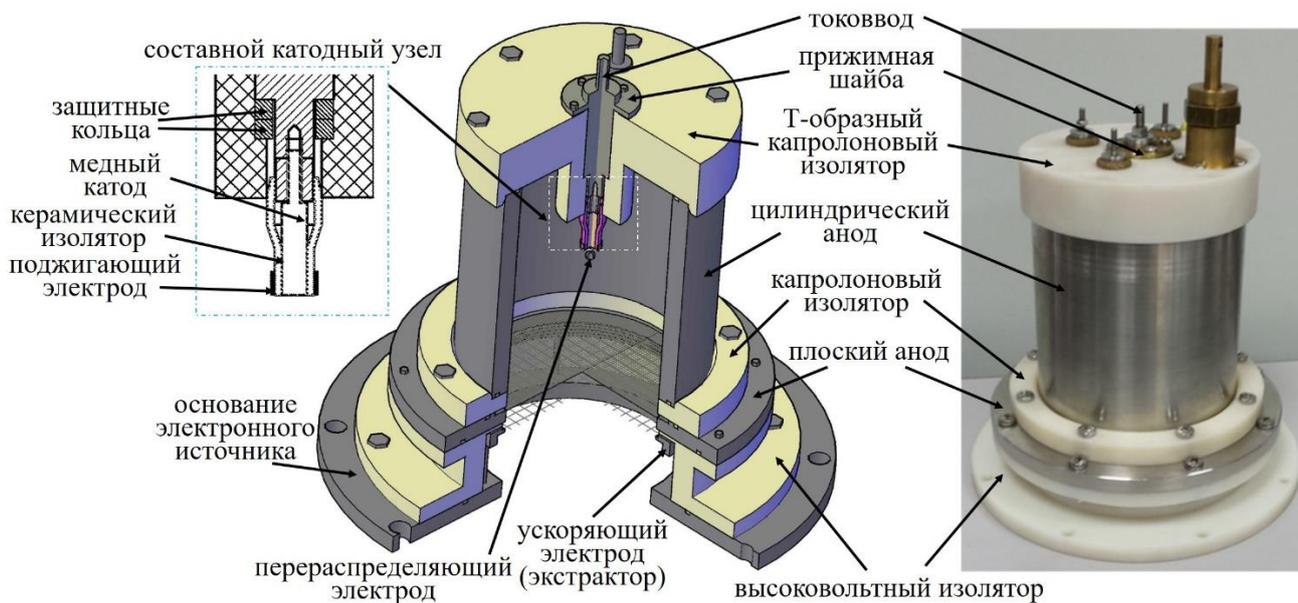


Рисунок 28 – Форвакуумный широкоапертурный импульсный источник электронов на основе дугового разряда с катодным пятном

Таблица 2 – Параметры широкоапертурного импульсного источника электронов на основе тлеющего разряда с полым катодом

Режим работы	Импульсный
Выходное напряжение источника питания разряда, кВ	До 4
Ток разряда, А	До 150
Ускоряющее напряжение, кВ	До 15
Ток пучка, А	До 120
Площадь сечения пучка с неравномерностью, не превышающей 10%, см ²	10–20
Длительность импульса, мкс	20–1000
Частота повторения импульсов, Гц	До 50
Плотность энергии в импульсе на мишени, Дж/см ²	До 10
Максимально достигаемая мощность электронного пучка, МВт	1
Рабочий газ	Воздух, гелий, аргон и др.
Давление рабочего газа, Па	1–20

Таблица 3 – Параметры форвакуумного широкоапертурного импульсного источника электронов на основе дугового разряда с катодным пятном

Режим работы	Импульсный
Выходное напряжение источника питания разряда, кВ	До 1
Ток разряда, А	До 200
Ускоряющее напряжение, кВ	До 15
Ток пучка, А	До 170
Площадь сечения пучка с неравномерностью, не превышающей 15%, см ²	До 50
Длительность импульса, мс	0,02–20
Частота повторения импульсов, Гц	До 50
Плотность энергии в импульсе на мишени, Дж/см ²	До 60
Рабочий газ	Воздух, гелий, аргон и др.
Давление рабочего газа, Па	3–30

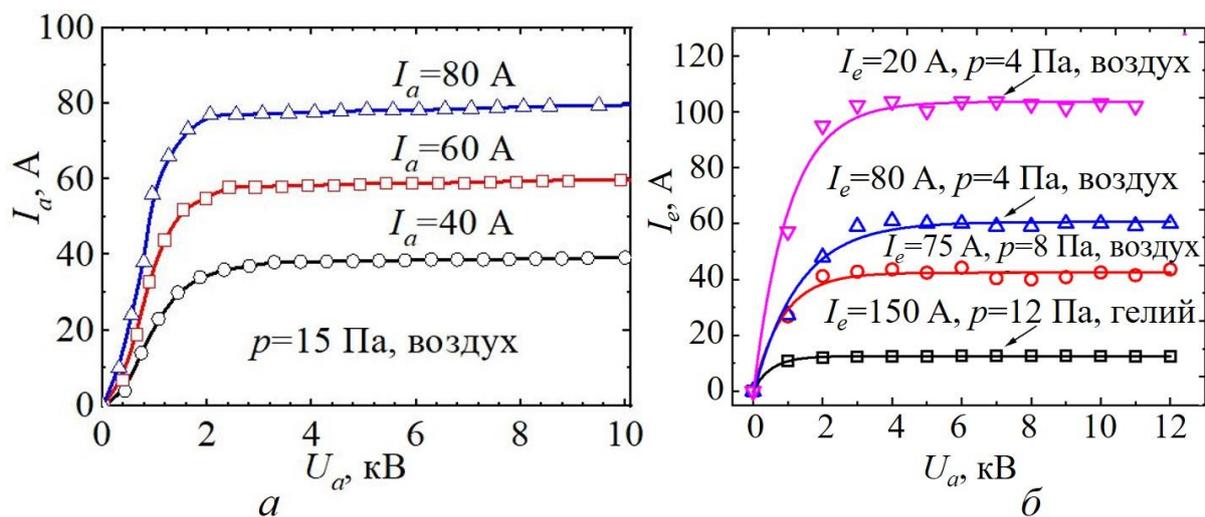


Рисунок 29 – Вольт-амперные характеристики широкоапертурных импульсных источников электронов на основе тлеющего разряда с полым катодом (а) и дугового разряда с катодным пятном (б)

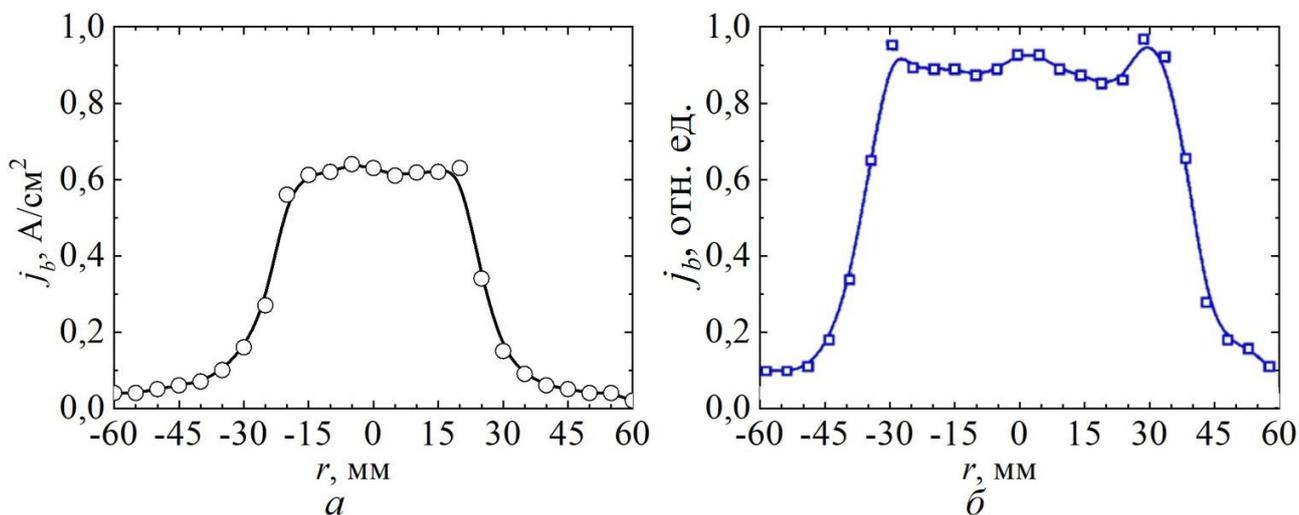


Рисунок 30 – Радиальные распределения плотности тока электронного пучка широкоапертурных импульсных источников электронов на основе тлеющего разряда с полым катодом (а) и дугового разряда с катодным пятном (б)

Генерируемая в области транспортировки электронного пучка плазма, наряду с ограничением тока пучка, оказывает положительное влияние на процессы нейтрализации зарядки непроводящей мишени при ее обработке электронным пучком. Для изучения особенности этого процесса в импульсном режиме применялись два подхода: 1 – моделирование непроводящей мишени с помощью изолированного металлического коллектора; 2 – измерение потенциала непроводящего коллектора косвенными методами (методы «конденсатора» и «вторичных электронов»).

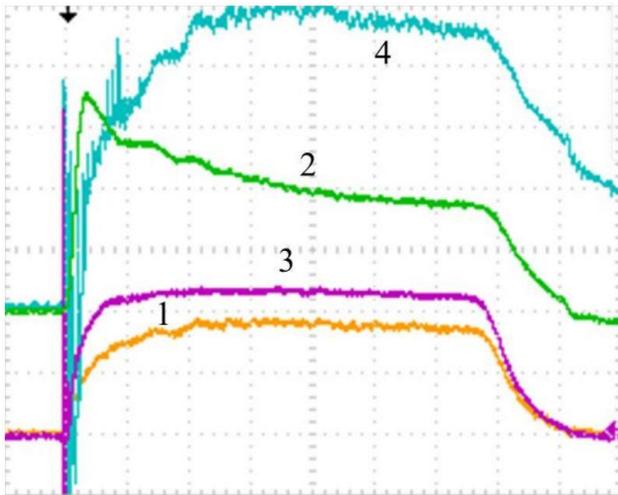


Рисунок 31 – Типичные осциллограммы токов I_a эмиссии 1 – (2 А/дел), I_d разряда 3 – (4 А/дел), I_p измерительного электрода 4 – (5 мА/дел) и потенциала ϕ изолированного коллектора 2 – (1000 В/дел). 5 мкс/дел, $U_a=10$ кВ, $p=8$ Па

Механизм компенсации электронного заряда коллектора обусловлен процессами, протекающими в течение достаточно продолжительного (несколько микросекунд) времени. Установившееся к концу импульса значение потенциала ϕ изолированного коллектора возрастает с увеличением тока пучка и с уменьшением площади коллектора (рисунок 32).

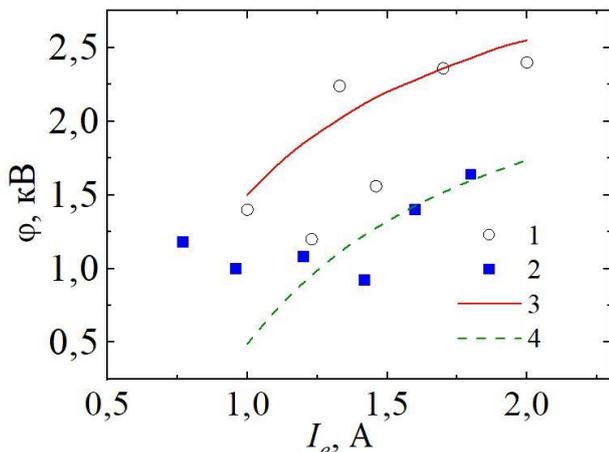


Рисунок 32 – Потенциал ϕ изолированного коллектора как функция тока I_e эмиссии для различной площади S_c коллектора: 1, 3 – 250 см², 2 – 500 см², 4 – 300 см², 1, 2 – эксперимент, 3, 4 – расчет. ($U_a=10$ кВ, $p=8$ Па)

Как видно из результатов осциллографических измерений (рисунок 31), ток на ионной ветви измерительного электрода, находящегося под отрицательным потенциалом по отношению к стенкам вакуумной камеры, нарастает в течение ~ 10 мкс, оставаясь затем неизменным до окончания импульса. Наведенный потенциал изолированного коллектора испытывает резкий скачок в первую микросекунду до $2\div 3$ кВ, а затем — плавный спад в $1,5\div 2$ раза. Таким образом, хотя в импульсном режиме абсолютное значение потенциала изолированного коллектора несколько выше, чем в непрерывном режиме, тем не менее, он остается много меньше величины ускоряющего напряжения.

Отмеченное поведение потенциала коллектора указывает на то, что механизм компенсации электронного заряда коллектора обусловлен процессами, протекающими в течение достаточно продолжительного (несколько микросекунд) времени.

На рисунке 33 показана зависимость тока коллектора электронного пучка от его потенциала. Отрицательная ветвь характеристики содержит участок насыщения, на котором полный ток остается электронным. Это отражает собою тот факт, что ионов пучковой плазмы недостаточно для компенсации заряда, приносимого на коллектор электронным пучком. С другой стороны, вольтамперная характеристика измерительного электрода (рисунок 34), который, в сущности является зондом Ленгмюра, содержит четко выраженный участок насыщения на ионной ветви. При этом, как видно, величина тока насыщения, а следовательно, и соответствующая ионному току плотность

плазмы в случае изолированного коллектора примерно в два раза выше, чем при заземленном коллекторе.

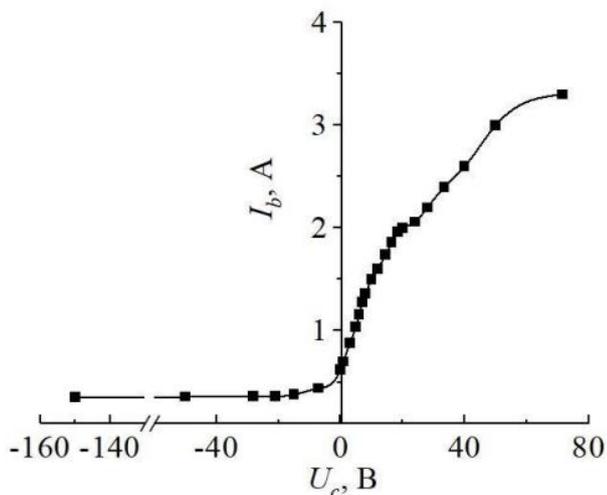


Рисунок 33 – Ток коллектора I_b как функция потенциала коллектора U_c . ($U_a=10$ кВ, $p=8$ Па, $S_c=500$ см²)

На основании полученных результатов механизм компенсации отрицательного заряда электронного пучка на изолированной мишени может быть представлен следующим образом. В начале импульса тока ускоренный электронный пучок заряжает коллектор до таких высоких отрицательных значений потенциала, при которых в объеме вакуумной камеры между коллектором и заземленными стенками зажигается тлеющий разряд. Этот разряд поддерживается высоковольтным источником питания. Процесс токопереноса между изолированным коллектором и отрицательным полюсом источника питания осуществляется электронным пучком. В результате зажигания разряда плотность плазмы вблизи коллектора повышается

(рисунок 34) и ионов из плазмы оказывается теперь достаточно для компенсации зарядки изолированной мишени ускоренным электронным пучком.

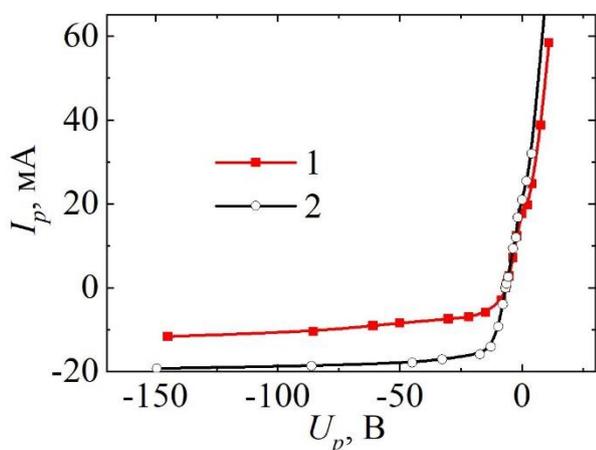


Рисунок 34 – Зависимость тока I_p измерительного электрода от напряжения смещения U_p для заземленного (1) и изолированного (2) коллектора. ($U_a=10$ кВ, $p=8$ Па, $I_a=2,2$ А, $S_c=500$ см²)

Анализ процессов зарядовой компенсации дает следующее выражение для установившегося потенциала изолированного коллектора ϕ :

$$\phi = \frac{W_i S_p}{\gamma_e I_b \cdot \frac{1}{ev_i} \cdot \frac{(1-\gamma_e)I_b}{(1+\gamma_i)ev_i S_c} - AI_b^{0.5}}, \quad (3)$$

где W_i – энергия (в потенциальных единицах), затрачиваемая на образование одной ион-электронной пары; S_p – площадь поверхности плазмы, с которой она теряет ионы; γ_e , γ_i – коэффициенты электронно-электронной и ионно-электронной эмиссии; I_b – ток электронов пучка; v_i – скорость ионов; S_c – площадь коллектора; A – постоянный для заданного давления газа коэффициент.

где W_i – энергия (в потенциальных единицах), затрачиваемая на образование одной ион-электронной пары; S_p – площадь поверхности плазмы, с которой она теряет ионы; γ_e , γ_i – коэффициенты электронно-электронной и ионно-электронной эмиссии; I_b – ток электронов пучка; v_i – скорость ионов; S_c – площадь коллектора; A – постоянный для заданного давления газа коэффициент.

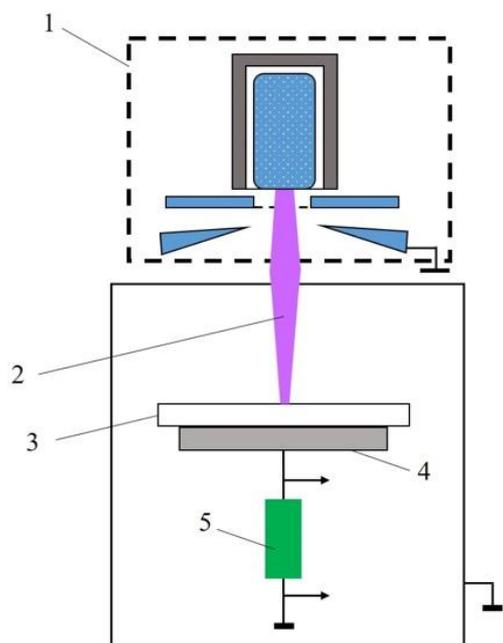


Рисунок 35 – Схема измерений потенциала методом «конденсатора». 1 – электронный источник, 2 – пучок, 3 – керамическая пластина, 4 – металлический держатель, 5 – измерительный резистор

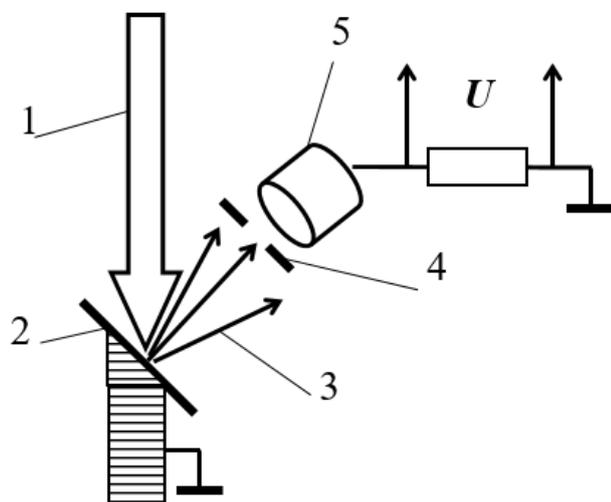


Рисунок 36 – Измерение потенциала по энергии вторичных электронов с помощью магнитного энергоанализатора. 1 – электронный пучок, 2 – керамическая мишень, 3 – вторичные электроны, 4 – диафрагма, 5 – магнитный энергоанализатор

Суть метода конденсатора (рисунок 35) состоит в восстановлении потенциала на поверхности путем интегрирования измеренного тока зарядки и разрядки диэлектрика в переходных процессах при воздействии импульсного электронного пучка. Метод вторичных электронов (рисунок 36) заключался в измерении потенциала поверхности керамики по энергиям вторичных электронов, выбитых с нее пучком. Вторичные электроны ускоряются потенциалом, наведенным на поверхности, и их энергия измеряется магнитным энергоанализатором. По величине этой энергии определяется потенциал на поверхности керамики. Оба метода дали удовлетворительное совпадение (в пределах 15%; рисунок 37, кривые 2 и 3) измерений потенциала поверхности керамики.

Результаты измерений обоими методами представлены на рисунках 37 и 38. При увеличении тока пучка потенциал поверхности керамики возрастает, приближаясь к насыщению при токах более 30 А (рисунок 38, кривая 1). Увеличение давления газа ведет к резкому снижению потенциала (рисунок 38, кривая 2).

Наблюдаемое в эксперименте более высокое абсолютное значение отрицательного потенциала диэлектрической поверхности по отношению к потенциалу изолированной металлической мишени (рисунок 37) может быть объяснено как результат меньшей площади мишени. В случае изолированной металлической мишени поверхностью, «принимающей» ионы, компенсирующие внесенный пучком отрицательный заряд, является вся поверхность мишени, тогда как для диэлектрической

мишени эта поверхность ограничена областью с высоким отрицательным зарядом, примерно равной поперечному сечению пучка.

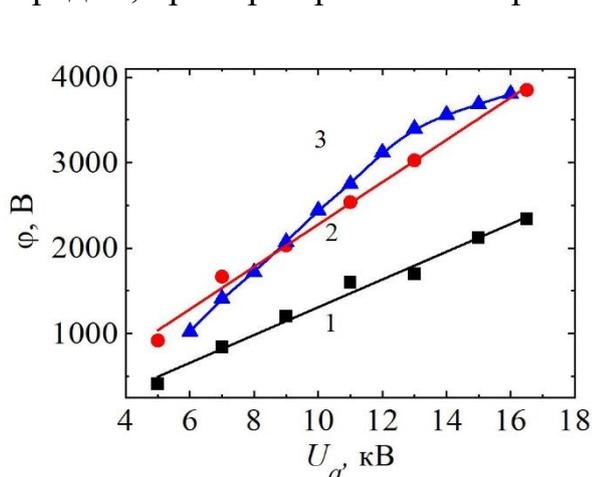


Рисунок 37 – Зависимость потенциала изолированного металлического коллектора (1) и поверхности керамики (2 – метод вторичных электронов, 3 – метод конденсатора) от ускоряющего напряжения. Ток пучка – 20 А, давление – 4 Па, длительность импульса – 225 мкс

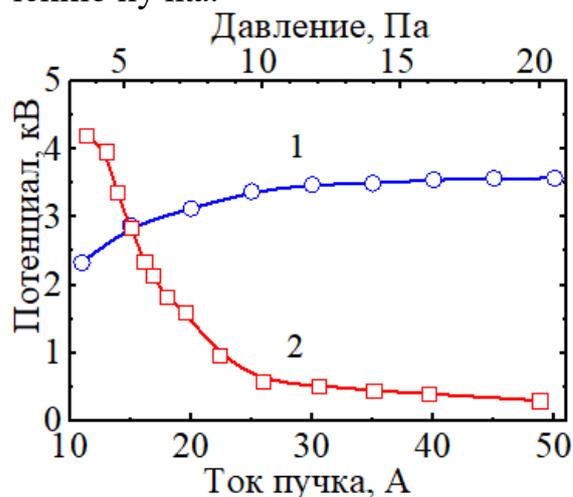


Рисунок 38 – Зависимость потенциала поверхности керамики от тока пучка (1 – нижняя шкала) и давления (2 – верхняя шкала). Ускоряющие напряжения – 13 кВ (1) и 15 кВ (2). Давление – 4 Па (1). Ток пучка – 20 А (2). Длительность импульса – 225 мкс

Таким образом, в форвакуумной области давлений в процессе облучения непроводящей или изолированной мишени электронным пучком наводимый на ее поверхности отрицательный потенциал по абсолютной величине оказывается много меньше соответствующей энергии ускоренных электронов, что не может приводить к отражению электронов пучка от поверхности внесенным в нее зарядом. Абсолютная величина отрицательного потенциала, внесенного пучком на поверхность непроводящей керамической мишени, возрастает с увеличением тока пучка и ускоряющего напряжения электронного источника, но резко снижается с повышением давления рабочего газа.

Эффективная нейтрализация заряда, приносимого на облучаемый объект электронным пучком в форвакуумном диапазоне давлений, и достигнутый уровень плотности энергии в импульсе позволили произвести электронно-лучевую обработку непроводящих материалов.

В качестве примера представлены результаты обработки поверхности широко используемой алюмооксидной керамики. Достижение в эксперименте оплавления тонкого поверхностного слоя керамики свидетельствует об его импульсном нагреве до температуры, превышающей 2000°C (температура плавления $\text{Al}_2\text{O}_3 - 2050^{\circ}\text{C}$). Оплавление привело к существенному повышению микротвердости поверхностного слоя (рисунок 39). Вместе с тем при обработке керамики не наблюдалось ее разрушения за счет градиента температур. Последнее свидетельствует о возможности модификации поверхностных свойств непроводящих материалов без значительного нагрева их объема.

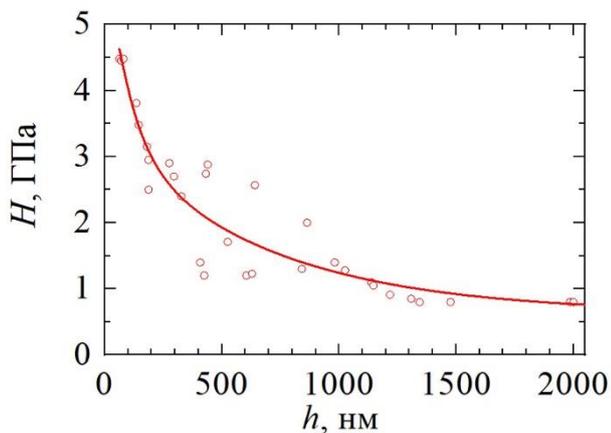


Рисунок 39 – Распределение микротвердости H по глубине образца

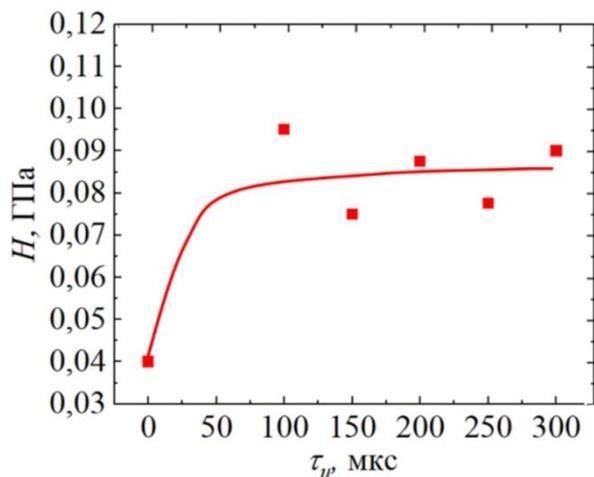


Рисунок 40 – Зависимость микротвердости поверхности ПТФЭ от длительности импульса τ_u

Обработка импульсным электронным пучком приводит также к уменьшению шероховатости поверхности исходного образца приблизительно в 2-3 раза.

В качестве еще одного примера представлены результаты обработки политетрафторэтилена (ПТФЭ). Воздействие электронного пучка на политетрафторэтилен приводит к сглаживанию его поверхности, уменьшению угла смачиваемости, увеличению микротвердости (рисунок 40) и коэффициента трения. При этом шероховатость обработанной поверхности уменьшается с увеличением длительности импульса.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК РФ

1. Медовник, А.В. Временные характеристики импульсного источника электронов, функционирующего в форвакуумной области давлений / А.В. Медовник, Е.Э. Поздеев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 1, Ч. 2 – С. 93–98.
2. Особенности функционирования дугового разряда в форвакуумном плазменном источнике электронов / А.В. Казаков, А.В. Медовник, В.А. Бурдовицин, Е.М. Окс // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, № 2. – С. 55 – 58.
3. Масс-зарядовый состав ионов плазмы дугового разряда форвакуумного широкоапертурного источника электронов / А.В. Тюньков, В.А. Бурдовицин, А.В. Медовник // Прикладная физика. – 2015. – № 4. – С. 45–49.
4. Моделирование процессов инициирования катодной дуги разрядом по поверхности диэлектрика в форвакуумной области давлений / А.В. Медовник, И.Ю. Бакеев, В.А. Бурдовицин [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2016. – Т. 89, № 5. – С. 1275–1280.
5. Форвакуумный плазменный источник импульсных электронных пучков / Ю.Г. Юшков, В.А. Бурдовицин, А.В. Медовник, Е.М. Окс // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 2. – С. 85–88.
6. Форвакуумный импульсный плазменный источник электронов на основе дугового разряда / А.В. Казаков, В.А. Бурдовицин, А.В. Медовник, Е.М. Окс // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – № 6. – С. 50 – 53.
7. Медовник, А.В. Формирование импульсного электронного пучка в системе с плазменным катодом в форвакуумной области давлений / А.В. Медовник, В.А. Бурдовицин, Е.М. Окс // Известия вузов. Физика. – 2010. – Т. 53, № 2 – С. 27–33.
8. Распределение плотности тока по сечению импульсного электронного пучка в форвакууме / Ю.Г. Юшков, Е.М. Окс, А.В. Медовник, В.А. Бурдовицин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – Т. 2, № 2. – С. 161–163.
9. Бакеев, И.Ю. Моделирование распространения электронного пучка, генерируемого форвакуумным источником на основе дугового разряда / И.Ю. Бакеев, А.В. Медовник, А.В. Казаков // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 4 (38). – С. 166–170.
10. Электронно-лучевая обработка керамики / А.В. Медовник, В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, Е.М. Окс // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – № 3. – С. 39–44.
11. Потенциал диэлектрической мишени при ее облучении импульсным электронным пучком в форвакуумной области давлений / В.А. Бурдовицин, А.В. Медовник, Е.М. Окс [и др.] // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, № 10. – С. 103–108.

12. Структура поверхности алюмооксидной керамики при облучении импульсным электронным пучком / В.А. Бурдовицин, Э.С. Двилис, А.В. Медовник [и др.] // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83, № 1. – С. 117–120.

13. Компенсация заряда изолированной мишени при облучении импульсным электронным пучком в форвакуумной области давлений / В.А. Бурдовицин, В.С. Гулькина, А.В. Медовник, Е.М. Окс // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83, № 12. – С. 134–136.

14. Модификация поверхности полимерных материалов импульсным электронным пучком / А.В. Казаков, А.С. Климов, А.В. Медовник [и др.] // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – № 4 (30). – С. 75–78.

15. Структура поверхности полипропилена при облучении импульсным электронным пучком в форвакуумном диапазоне давлений / А.В. Казаков, А.С. Смаилов, А.В. Медовник [и др.] // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 4 (34). – С. 56–59.

16. Опыт разработки и применения форвакуумных плазменных электронных источников / В.А. Бурдовицин, И.Ю. Бакеев, А.В. Медовник [и др.] // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19, № 2. – С. 5–10.

17. Модификация поверхностных свойств ПТФЭ методами ионного и электронно-лучевого воздействия / И.А. Курзина, И.В. Пухова, А.В. Медовник [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2016. – Т. 13, № 4. – С. 473–484.

18. Optical radiation in breakdown of the acceleration gap of a forevacuum pressure, wide-aperture, plasma-cathode, pulsed electron source / V.A. Burdovitsin, A.V. Kazakov, A.V. Medovnik [et al.] // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 17–19.

Статьи в изданиях, входящих в Scopus и Web of Science

1. Pulsed cathodic arc for forevacuum-pressure plasma-cathode electron sources / A.V. Kazakov, A.V. Medovnik, V.A. Burdovitsin, E.M. Oks // IEEE Transaction on Plasma Science. – 2015. – Vol. 43, N 8. – P. 2345–2348.

2. Millisecond pulsed arc discharge in a forevacuum-pressure plasma-cathode electron source / A.V. Medovnik, V.A. Burdovitsin, A.V. Kazakov, E.M. Oks // IEEE Transaction on Plasma Science. – 2017. – Vol. 45, N 8. – P. 2075–2079.

3. Generation of millisecond low-energy large-radius electron beam by a forevacuum plasma-cathode source / A. Kazakov, A. Medovnik, V. Alexander, E. Oks // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2019. – Vol. 47, N 8. – P. 3579–3585.

4. Broad-beam plasma-cathode electron beam source based on a cathodic arc for beam generation over a wide pulse-width range / A.V. Kazakov, A.V. Medovnik,

E.M. Oks, N.A. Panchenko // Review of Scientific Instruments. – 2020. – Vol. 91, N 9. – P. 093304.

5. Plasma electron source for the generation of wide-aperture pulsed beam at forevacuum pressures / E.M. Oks, V.A. Burdovitsin, A.V. Medovnik, Yu.G. Yushkov // Review of Scientific Instruments. – 2013. – Vol. 84, N 2. – P. 023301.

6. Influence of gas pressure on electron beam emission current of pulsed cathodic-arc-based forevacuum plasma electron source / V.A. Burdovitsin, A.V. Kazakov, A.V. Medovnik, E.M. Oks // Physics of Plasmas. – 2017. – Vol. 24, N 9. – P. 093109.

7. Stability of electron beam generation by forevacuum-pressure plasma-cathode electron beam source based on a cathodic arc / A.V. Burdovitsin, A.V. Kazakov, A.V. Medovnik, E.M. Oks // Physics of Plasmas. – 2018. – Vol. 25, N 7. – P. 073109-1–073109-7.

8. Electron beam treatment of non-conducting materials by a fore-pump-pressure plasma-cathode electron beam source / V.A. Burdovitsin, A.S. Klimov, A.V. Medovnik, E.M. Oks // Plasma Sources Science and Technology. – 2010. – Vol. 19, N 5. – P. 055003.

9. Effects of ion- and electron-beam treatment on surface physicochemical properties of polylactic acid / I.V. Pukhova, O.A. Laput, A.V. Medovnikna [et al.] // Applied Surface Science. – 2017. – Vol. 422. – P. 856–862.

10. Effects of ion- and electron-beam treatment on surface physicochemical properties of polytetrafluoroethylene / I.V. Vasenina, K.P. Savkin, A.V. Medovnik [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2018. – Vol. 334. – P. 134–141.

Монографии

1. Форвакуумные плазменные источники электронов / В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, А.В. Медовник [и др.]. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2014. – 288 с.

2. Применение форвакуумных плазменных источников электронов для обработки диэлектриков / А.С. Климов, А.В. Медовник, Ю.Г. Юшков [и др.]. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2017. – 188 с.

Публикации в сборниках статей и трудов конференций

1. Initial stage of discharge development in fore-vacuum plasma electron source / E.M. Oks, A.V. Medovnik, V.A. Burdovitsin, V.I. Gushenets // Известия вузов. Физика. – 2007. – Vol. 50, N 9 (2). – P. 202–205.

2. Generation of electron beam with millisecond pulse duration by plasma-cathode source based on the arc discharge in the fore-vacuum pressure range / A. Andreichik, V. Burdovitsin, A. Medovnik [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1899, N 1. – P. 040006.

3. Kazakov, A.V. Formation of pulsed large-radius electron beam in the forevacuum pressure range by a plasma-cathode source based on arc discharge / A.V. Ka-

zakov, A.V. Medovnik, E.M. Oks // Journal of Physics: Conference Series: The proceeding 14th International Conference «Gas Discharge Plasmas and Their Applications», Tomsk, 15–21 September, 2019 / Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. – Tomsk: IOP Publishing Ltd, 2019. – P. 012043.

4. Formation of emission plasma in a pulsed forevacuum-pressure plasma-cathode electron source based on a cathodic arc with redistributing electrode / I.Yu. Bakeev, A.V. Kazakov, A.V. Medovnik, E.F. Oks // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1488, N 1. – P. 012001.

5. Инициирование дугового разряда в форвакуумном плазменном источнике электронов / А.В. Казаков, А.В. Медовник, В.А. Бурдовицин, Е.М. Окс // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т. 57, № 3/2. – С. 106–109.

6. Распределение плотности тока электронного пучка, генерируемого импульсным форвакуумным плазменным источником электронов на основе дугового разряда / А.В. Казаков, А.В. Медовник, В.А. Бурдовицин, Е.М. Окс // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т. 57, № 11/3. – С. 68–72.

7. Казаков, А.В. Особенности функционирования плазменного источника электронов на основе дугового разряда с катодным пятном в форвакуумном диапазоне давлений / А.В. Казаков, А.В. Медовник // Известия вузов. Физика. – 2015. – № 9/2. – С. 151–155.

8. Generation of large cross-sectional area electron beams by a fore-vacuum-pressure plasma electron source based on the arc discharge / V. Burdovitsin, A. Kazakov, A. Medovnik, E. Oks // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1772. – P. 040001.

9. Modification of polymer materials by electron beam treatment / I.V. Puhova, K.V. Rubtsov, A.V. Medovnik [et al.] // Key Engineering Materials. – 2015. – Vol. 670. – P. 118–125.

10. Processing of polypropylene by low-energy pulsed electron beam from forevacuum plasma source / V.A. Burdovitsin, A.V. Kazakov, A.V. Medovnik [et al.] // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 683. – P. 95–99.

Патенты, свидетельства о регистрации программного продукта

1. Патент № 107657 U1 Российская Федерация, МПК H05H 5/00, H01J 3/00. Форвакуумный плазменный электронный источник : № 2011107955/07 : заявл. 01.03.2011 : опубл. 20.08.2011 / Юшков Ю.Г., Медовник А.В., Бурдовицин В.А., Окс Е.М. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР). – 4 с.

2. Патент № 134728 U1 Российская Федерация, МПК H05H 5/00, H01J 37/00. Форвакуумный источник импульсного электронного пучка : № 2013128695/07 : заявл. 24.06.2013 : опубл. 20.11.2013 / Бурдовицин В.А., Медовник А.В., Казаков А.В., Окс Е.М. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР). – 5 с.

3. Патент № 151645 U1 Российская Федерация, МПК В29С 71/04, Н01J 37/06, С08L 23/26. Установка модификации поверхности изделия из полипропилена : № 2014117474/04 : заявл. 29.04.2014 : опубл. 10.04.2015 / Бурдовицин В.А., Казаков А.В., Климов А.С., Медовник А.В., Окс Е.М., Смаилов А.С. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР). – 5 с.

4. Патент № 175410 U1 Российская Федерация, МПК G01Т 1/29. Устройство для измерения распределения плотности энергии по сечению импульсного электронного пучка большого радиуса : № 2017128504 : заявл. 09.08.2017 : опубл. 04.12.2017 / Бурдовицин В.А., Казаков А.В., Медовник А.В., Окс Е.М.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР). – 5 с.

5. Патент № 2758497 С1 Российская Федерация, МПК Н05Н 1/24. Ускоряющий промежуток импульсного форвакуумного источника электронов на основе дугового разряда : № 2021104526 : заявл. 24.02.2021 : опубл. 29.10.2021 / Казаков А.В., Медовник А.В., Окс Е.М., Панченко Н.А.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР). – 4 с.

6. Патент № 2759425 С1 Российская Федерация, МПК Н05Н 3/00, Н01J 27/04, Н01J 37/065. Плазменный эмиттер импульсного форвакуумного источника электронов на основе дугового разряда : № 2020138865: заявл. 27.11.2020 : опубл. 12.11.2021 / Казаков А.В., Медовник А.В., Окс Е.М., Панченко Н.А.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР). – 4 с.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014611491 Российская Федерация. Моделирование потенциала изолированной мишени при облучении импульсным электронным пучком в форвакууме / Медовник А.В., Гулькина В.С., Золотухин Д.Б. ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР). – № 2013661427 ; дата поступления 10.12.2013 ; дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ 04.02.2014. – 1 с.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014661221 Российская Федерация. Моделирование временных зависимостей разрядных характеристик форвакуумного плазменного источника электронов в импульсном режиме / Медовник А.В., Золотухин Д.Б. ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР). – № 2014618763 ; дата поступления 01.09.2014 ; дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ 27.10.2014 – 1 с.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615838 Российская Федерация. Моделирование инициирования дугового разряда вспомогательным разрядом по поверхности диэлектрика в форвакуумном импульсном источнике электронов / Казаков А.В., Бакеев И.Ю., Медовник А.В. ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР). – № 2015612780 ; дата поступления 09.04.2015 ; дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ 26.05.2015 – 1 с.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016617434 Российская Федерация. Моделирование распространения электронного пучка, генерируемого форвакуумным источником на основе дугового разряда / Медовник А.В., Бакеев И.Ю. ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР). – № 2016615149 ; дата поступления 20.05.2016 ; дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ 06.07.2016 – 1 с.

Тираж 100 экз. Заказ.
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники.
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.
Тел. (3822) 533018.