

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт сильноточной электроники
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



Торба Максим Сергеевич

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

Специальность 2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
Воробьев М.С.

ТОМСК – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ С ПУЧКАМИ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ	16
1.1 Источники электронов на основе термоэлектронной эмиссии.....	18
1.2 Источники электронов на основе взрывной электронной эмиссии	21
1.3 Источники электронов на основе ионно-электронной эмиссии	28
1.4 Источники электронов на основе эмиссии электронов из газоразрядной плазмы (с плазменным катодом)	35
1.4.1. Источники электронов с сеточным плазменным катодом на основе тлеющего разряда	38
1.4.2. Источники электронов с сеточным плазменным катодом на основе дуги низкого давления	43
1.4.3. Источники электронов с многодуговым сеточным плазменным катодом	48
1.5 Традиционные системы электропитания плазменного катода на основе дугового разряда низкого давления.....	55
1.6 Выводы.....	58
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА.....	61
2.1. Макет источника электронов с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления.....	61
2.2. Системы электропитания и управления.....	66
2.2.1. Высоковольтная система электропитания.....	66
2.2.2. Система электропитания СПК	67
2.3. Зондовые измерения параметров плазмы дугового разряда низкого давления.....	71
2.4. Система коллекторных измерений азимутального распределения плотности тока электронного пучка.....	75
2.5. Выводы	77
ГЛАВА 3. ГЕНЕРАЦИЯ ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ ДУГОВЫМ РАЗРЯДОМ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ.....	79
3.1. Зажигание и горение многодугового разряда низкого давления	79
3.2. Параметры плазмы дугового разряда.....	81

3.3. Пространственная неоднородность плазмы – переход к односторонней системе расположения плазмогенераторов	88
3.4. Выводы по главе	89
ГЛАВА 4. ГЕНЕРАЦИЯ РАДИАЛЬНО СХОДЯЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА	91
4.1. Влияние размера ячейки эмиссионной сетки на параметры радиально сходящегося электронного пучка (моделирование и эксперимент)	91
4.2. Азимутальное распределение плотности тока пучка	99
4.3. Моделирование процессов в плазменном катоде в условиях эмиссии электронов из плазмы	112
4.4. Эффект самофокусировки радиально сходящегося электронного пучка	121
4.5. Модификация поверхности цилиндрических металлических материалов и изделий	124
4.5.1. Режимы облучения поверхности цилиндрических металлических материалов	125
4.5.2. Результаты облучения.....	125
4.6. Выводы по главе	128
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	131
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	153

Введение

В настоящее время источники интенсивных электронных пучков большого сечения находят самое разнообразное научное и практическое применение благодаря их широкому диапазону параметров [1–7], высокой эффективности вклада энергии пучка в вещество, превышающей зачастую 90 %, а также уникальным эффектам, происходящим в поверхности обрабатываемого материала, которые недостижимы при использовании иных способов энергетического воздействия. Пучки большого сечения — это электронные пучки, которые формируются с протяжённой эмиссионной поверхности, и в которых можно пренебречь влиянием тепловых скоростей электронов на распределение плотности тока пучка [7], что позволяет изменять или управлять конфигурацией таких электронных пучков, обеспечивая возможность генерации планарных, кольцевых, радиально сходящихся и расходящихся пучков и др. Под интенсивным электронным пучком понимается поток электронов с плотностью энергии достаточной для нагрева поверхностных слоёв различных материалов вплоть до их плавления и даже частичного испарения. Вне зависимости от способа генерации электронного пучка, такие источники, в том числе, могут использоваться для модификации поверхности различных металлических и металлокерамических материалов и изделий с целью улучшения их функциональных и эксплуатационных свойств (закалка, полировка, повышение коррозионной стойкости и т. д.) [2, 8–11].

Источники электронов с сеточными плазменными катодами (СПК) занимают особую нишу благодаря ряду общеизвестных преимуществ как перед источниками с термоэмиссионным катодом (большому сроку службы, не критичности к вакуумным условиям, высокой энергетической эффективности), так и перед ускорителями на основе взрывоэмиссионных катодов (большой длительности импульсов, повышенному сроку службы, низкой неоднородности плотности тока пучка, большей частоте следования импульсов тока и способности генерировать электронные пучки в широком

диапазоне параметров). СПК представляет собой электродную систему, в которой различными способами создается эмиссионная плазма, отбор частиц с границы которой осуществляется через ячейки мелкоструктурной металлической сетки. Мелкоструктурная сетка стабилизирует границу эмиссионной плазмы, обеспечивая слабую зависимость тока электронного пучка от ускоряющего напряжения [1]. Слоевая/сеточная стабилизация границы эмиссионной плазмы — ключевая особенность СПК, которая реализуется за счет формирования приэлектродного (присеточного) слоя положительно заряженных частиц. Этот слой ограничивает уход электронов из плазмы, а его ширина определяется ее параметрами (потенциалом, концентрацией плазмы и температурой электронов) [12–16].

Именно слоевая (в нашем случае в силу конструктивных особенностей плазменного катода, называемая «сеточная») стабилизация границы эмиссионной плазмы позволяет гибко и независимо управлять основными параметрами электронного пучка, такими как ток и энергия электронов, а импульсно-периодическая генерация эмиссионной плазмы позволяет управлять длительностью и частотой следования импульсов, что крайне важно при проведении поисковых исследований по подбору оптимального режима облучения материалов. При этом сеточная стабилизация границы эмиссионной плазмы позволяет с удовлетворительной точностью динамически регулировать ток эмиссии, что позволяет управлять мощностью пучка даже в течение импульса субмиллисекундной длительности [17], что также крайне важно для использования электронного пучка при решении материаловедческих задач [18]. Независимое малоинерционное управление основными параметрами пучка трудно реализуемо в источниках другого типа. Так, например, в системах на основе термокатодов такие параметры как частота следования или длительность импульсов часто ограничены физическими характеристиками эмиттера, например, тепловой инерцией катода, либо требуют дополнительного управляющего электрода, что затрудняет их независимую регулировку и/или усложняет конструкцию [19]. Источники электронов на основе взрывной

эмиссии с открытой границей плотной катодной плазмы не способны обеспечивать независимую регулировку всех основных параметров по принципу своего действия [20]. Источники на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) для удобного управления параметрами электронного пучка требуют перестройки давления или использования вспомогательного разряда. При этом большинство таких систем, как и термокатодные источники, работает в непрерывном режиме, поскольку импульсный режим не обеспечивает плотности мощности и энергии пучка, требуемой для модификации металлической поверхности, а также неизбежно приводит к необходимости сканирования электронным пучком по поверхности обрабатываемой детали.

Отдельно стоит отметить источники с СПК на основе дугового разряда низкого давления, которые отличаются высокой энергетической эффективностью генерации эмиссионной плазмы (определяемой отношением мощности, затрачиваемой на генерацию плазмы к мощности генерируемого электронного пучка) и позволяют получать интенсивные электронные пучки субмиллисекундной длительности [21–23]. Однако использование в таких системах точечных источников плазмы приводит к необходимости принятия дополнительных мер по снижению локальных неоднородностей её концентрации, негативно влияющих на распределение плотности тока пучка по его сечению, зачастую провоцируя пробой ускоряющего промежутка, что в итоге сказывается на стабильности работы источника и ограничивает его дальнейшее использование.

Существенную долю разработанных и созданных источников электронов преимущественно составляют источники с планарной геометрией ускоряющего промежутка [2, 21, 24]. Такие источники находят широкое использование при решении обозначенных выше задач, однако имеют существенное технологическое ограничение, связанное со сложностью, а зачастую и невозможностью обработки поверхности изделий с геометрией, отличающейся от плоской (например, цилиндрической), что также приводит к необходимости сканирования по поверхности изделия электронным пучком в азимутальном

направлении путем вращения изделия, и, в конечном итоге, служит причиной неудовлетворительного качества обработки его поверхности и/или низкой производительности процесса. Это заставило исследователей задуматься о целесообразности разработки источников электронов, позволяющих генерировать интенсивные радиально сходящиеся пучки электронов [25–27], с катодами на основе различных типов эмиссии, каждый из которых имеет преимущества в своем диапазоне параметров, а также свои технологические особенности и ограничения. Это определяет **актуальность обозначенной тематики** и необходимость разработки альтернативных источников электронов с уникальными параметрами и технологическими возможностями.

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

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

1. Разработка и создание экспериментального стенда источника электронов с СПК на основе многодугового разряда низкого давления, генерирующего интенсивный радиально сходящийся электронный пучок субмиллисекундной длительности.

2. Разработка и создание электродной системы и блоков электропитания СПК на основе многодугового разряда низкого давления.

3. Разработка и создание оригинального диагностического оборудования для проведения коллекторных измерений плотности тока радиально сходящегося пучка.

4. Поиск режимов генерации субмиллисекундного радиально сходящегося электронного пучка с плотностью энергии достаточной для

модификации поверхности металлических материалов и изделий с удовлетворительной неоднородностью.

5. Демонстрация возможности использования созданного источника электронов с СПК с целью модификации поверхности материалов и изделий цилиндрической формы.

Научная новизна:

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

2. В источнике электронов с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления разработана и создана ячейка для генерации радиально сходящегося электронного пучка в секторе 60° с током в ускоряющем промежутке до 100 А и длительностью 150 мкс при ускоряющем напряжении до 30 кВ, обеспечивающая энергию на коллекторе до 200 Дж при плотности энергии пучка до 30 Дж/см², что позволяет проводить модификацию поверхности металлических изделий за один импульс тока пучка длительностью 150 мкс.

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

Теоретическая и практическая значимость:

Разработан и создан источник электронов с СПК на основе дугового разряда низкого давления, позволяющий проводить модификацию поверхности цилиндрических металлических изделий с плотностью энергии пучка до

30 Дж/см² при ускоряющем напряжении до 50 кВ, длительности импульсов до 500 мкс и частоте их следования до 1 с⁻¹.

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

Методы исследования

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

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

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

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

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

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

Научные положения, выносимые на защиту:

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

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

3. С использованием разработанного и созданного прототипа источника электронов с сеточным плазменным катодом на основе многодугового разряда низкого давления обеспечена генерация радиально сходящегося электронного пучка субмиллисекундной длительности с уникальной совокупностью параметров: ускоряющее напряжение от 5 до 50 кВ, ток в ускоряющем промежутке от 20 до 150 А, длительность импульсов от 50 до 500 мкс, частота

следования импульсов до 1 с^{-1} , плотность энергии электронного пучка от 2,5 до 30 Дж/см^2 (при диаметре коллектора 10 – 16 мм).

Достоверность и обоснованность полученных результатов

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

Апробация работы

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

1. 15-я Международная конференция «Газоразрядная плазма и ее применения» (15th International Conference on Gas Discharge Plasmas and Their Applications, GDP 2021 (5 – 10 сентября, 2021 г.)), г. Екатеринбург, Россия;

2. XII Всероссийская конференция по физической электронике, ФЭ – 2022 (19 – 22 октября, 2022 г.), г. Махачкала, Россия;

3. 10-я Международная конференция «Физика плазмы и плазменные технологии» (X International Conference Plasma Physics and Plasma Technology, PPPT – 10 (12 – 16 сентября, 2022 г.)), г. Минск, Беларусь;

4. 8-й и 9-й Международный конгресс «Потоки энергии и радиационные эффекты» (8th, 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE 2022 (2 – 8 октября, 2022 г.); EFRE 2024 (16 – 21 сентября, 2024 г.)), г. Томск, Россия;

5. Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР 2023» (17 – 19 мая, 2023 г.), г. Томск, Россия;

6. VII Международный Крейнделевский семинар «Плазменная эмиссионная электроника» (31 июля – 6 августа 2023 г.), с. Максимиха, Республика Бурятия, Россия;

7. V научно-технический Семинар по электронно-пучковому оборудованию и технологиям «ОБЬ-2024» (10 – 14 июня, 2024 г.), г. Новосибирск, Россия;

8. XXIX Международная конференция по ускорителям заряженных частиц (Russian Particle Accelerators Conference), RuPAC'25 (15 – 19 сентября 2025 г.), г. Санкт-Петербург, Россия;

9. 16-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», ВИТТ-2025 (22 – 25 сентября 2025 г.), г. Минск, Беларусь;

10. 17-я Международная конференция «Газоразрядная плазма и ее применения» (17th International Conference on Gas Discharge Plasmas and Their Applications), GDP 2025 (8 – 12 сентября, 2025 г.), г. Екатеринбург, Россия;

Публикации

Материалы диссертационной работы опубликованы в 10 работах [21, 92, 93, 95, 107, 109, 121, 123, 129, 130] в журналах, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук» или учитываемых в библиографических базах данных научного цитирования Web of Science и Scopus. Зарегистрирован 1 патент на изобретение [123].

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

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

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

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

Объем и структура диссертации

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

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

В **первой главе** проведен сравнительный анализ источников электронов на основе различного типа эмиссии (термоэлектронная эмиссия, взрывная электронная эмиссия, ионно-электронная эмиссия, источники электронов с плазменным катодом). Продемонстрированы преимущества источников с СПК перед остальными типами источников, а также возможность генерации

интенсивных радиально сходящихся субмиллисекундных электронных пучков и перспективность их применения в области обработки металлических изделий цилиндрической формы. Рассмотрены различные системы электропитания СПК. Сделаны выводы о перспективности и способах дальнейшего совершенствования источников электронов с СПК.

Во **второй главе** представлено подробное описание экспериментального стенда источника электронов с СПК, способного генерировать интенсивный радиально сходящийся пучок субмиллисекундной длительности, приведена конструкция электродной системы СПК, многодуговых плазмогенераторов. Рассмотрены разработанные и созданные источники электропитания и управления многодуговым разрядом. Описаны методики и техника эксперимента с представлением принципиальных электрических и конструкционных схем систем измерения. Рассмотрены особенности измерения параметров плазмы зондовым методом, проведения коллекторных измерений интенсивного радиально сходящегося электронного пучка субмиллисекундной длительности с помощью специально разработанной и созданной системы, а также измерение степени его азимутальной неоднородности.

Третья глава посвящена генерации эмиссионной плазмы при использовании многодугового разряда низкого давления в источнике электронов с СПК. Приведены условия и выходные параметры источника электропитания для стабильной генерации многодугового разряда в широком диапазоне его токов. Представлены результаты цикла зондовых измерений, которые позволили установить степень пространственной неоднородности плазмы многодугового разряда в зависимости от расположения и количества плазмогенераторов в СПК.

Четвертая глава посвящена генерации радиально сходящегося электронного пучка и его характеристикам в зависимости от различных условий генерации. Продемонстрировано влияние условий генерации пучка (ускоряющего напряжения, тока дугового разряда, длительности импульса тока пучка, давления рабочего газа) и параметров электродной системы СПК

(размера ячейки эмиссионной сетки, расположения плазмогенераторов, объёма полого анода и др.) на стабильность генерации и достигнутые параметры радиально сходящегося электронного пучка субмиллисекундной длительности. С помощью специальных коллекторных измерений оценена плотность энергии радиально сходящегося электронного пучка и ее азимутальное распределение. Рассмотрены способы стабилизации и снижения неоднородности плотности тока интенсивного радиально сходящегося электронного пучка при наличии дестабилизирующих факторов (дегазация, плавление, испарение и др.). Проведены эксперименты, демонстрирующие возможность модификации поверхности цилиндрических стержней различных диаметров на примере титана марки ВТ1-0 и нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Проведены эксперименты по измерению микротвёрдости и профилометрии поверхности обработанных образцов. Экспериментально продемонстрированы режимы генерации пучка, которые позволяют эффективно и с удовлетворительным качеством проводить модификацию поверхности цилиндрических изделий диаметром от 10 мм до 30 мм.

В **заключении** сформулированы основные результаты проведенных исследований, обсуждаются потенциальные перспективы дальнейшего практического использования созданного источника электронов.

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ С ПУЧКАМИ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ

Развитие электронно-пучковых технологий началось в XX веке, что сопряжено с развитием вакуумной и высоковольтной техники. Сегодня продолжают поиски новых областей применения электронных пучков и их внедрение в производственные процессы, однако одно из направлений, связанное с необходимостью в создании и обработке новых материалов перспективными электрофизическими методами, выгодно отличает электронно-пучковое воздействие от других способов модификации поверхности различных материалов и изделий. Разнообразие потребностей в использовании электронных пучков стимулирует разработку и применение различных типов электронных источников, отличающихся принципами работы, эксплуатационными характеристиками и параметрами генерируемых ими пучков. Планарные электронные пучки значительного сечения успешно применяются для улучшения свойств поверхности различных металлических и металло-керамических материалов и изделий [28–32]. Такие пучки позволяют повысить микротвёрдость и износостойкость поверхности материалов, а также увеличить их коррозионную стойкость, однако возникают трудности при обработке цилиндрических изделий, заключающиеся в достижении удовлетворительной однородности обработанной поверхности образцов или обеспечении рентабельной производительности технологического процесса.

Источники с радиально сходящимися электронными пучками могут компенсировать имеющиеся у планарных пучков недостатки. Их разработка является важным направлением в области обработки поверхности материалов [33–35]. Такие системы обладают рядом уникальных свойств, которые делают их актуальными для широкого спектра приложений, включая обработку материалов, генерацию рентгеновского и СВЧ излучений [36–38] и плазменные технологии. Для получения таких пучков применяются разные виды эмиссии,

при этом каждый тип источника имеет свои сильные и слабые стороны, определяющие область его применения.

Поскольку радиально сходящиеся электронные пучки характеризуются их баллистической фокусировкой, это позволяет достичь высокой плотности энергии в фокальной области, что особенно важно для задач, требующих использования интенсивного электронного пучка для нагрева, расплава или испарения обрабатываемого материала. В результате, ключевым преимуществом радиально сходящихся электронных пучков является их способность создавать высокие плотности тока на коллекторе, а при использовании анодной (или пучковой) плазмы появляется возможность генерации таких пучков при относительно низких ускоряющих напряжениях [21]. Переход к сравнительно низким ускоряющим напряжениям очень важен с точки зрения отсутствия необходимости использования дополнительной радиационной защиты, когда всё рентгеновское излучение поглощается стенками вакуумной камеры, что существенно упрощает эксплуатацию источника электронов и удешевляет его стоимость.

Источники электронов с сеточными плазменными катодами зарекомендовали себя как одни из перспективных источников для их использования с целью модификации поверхности различных металлических и металлокерамических материалов [8]. Прежде всего, это связано с возможностью обеспечения сравнительно высоких токов электронного пучка, сечение которых близится уже к 100 см^2 , с плотностью энергии десятки Дж/см^2 достаточной для плавления даже самых тугоплавких материалов при субмиллисекундной длительности импульса и ускоряющих напряжениях до 50 кВ. Кроме этого, в отличие от традиционных термоэмиссионных катодов, плазменные катоды не требуют нагрева до высоких температур, что снижает энергопотребление и увеличивает срок службы устройства, а также способны генерировать электронные пучки с относительно стабильными параметрами, что особенно важно для решения технологических задач, предъявляющих высокие требования к воспроизводимости облучения. Следует также отметить,

что использование источников с СПК для генерации электронного пучка позволяет достичь высокой степени контроля над его параметрами, что способствует расширению технологических возможностей таких источников электронов за счет возможности независимой регулировки тока пучка и энергии электронов, обеспечивая заданный профиль распределения плотности тока по сечению пучка, что делает систему гибкой и адаптируемой под различные задачи.

1.1 Источники электронов на основе термоэлектронной эмиссии

Принцип термоэлектронной эмиссии заключается в высвобождении электронов с поверхности металла при его нагреве до высокой температуры. Именно благодаря этому явлению становится возможным формирование управляемых электронных пучков, используемых в вакуумных приборах и ускорителях заряженных частиц [39].

Обеспечение высокой плотности эмиссии в таких системах удаётся добиться за счёт нагрева катода до высоких температур, который уменьшает их ресурс, что связано с резким увеличением скорости испарения материала катода при резком росте температуры, а также температурой его плавления, но при этом задаёт максимальную энергию электронов, зависящую от степени нагрева катода и прикладываемого напряжения.

Стоит отметить, что для генерации пучков большого сечения использование термокатодов является непростой задачей из-за сложности их конструкции. Так, для изготовления термокатодов с большой эмиссионной площадью для формирования пучков часто прибегают к использованию многоэлементных катодов, состоящих из отдельных нитей или проволок. При этом при проектировании ускорителей с термокатадами рассчитывают диаметр проволочного термокатада, оптимизируя его под требуемую мощность накала. Стоит отметить, что важнейшие параметры работы пушек на основе термокатодов в первую очередь зависят от материала катода. К примеру,

вольфрамовые катоды используются в мощных электронных приборах, так как обладают высокой термостойкостью, механической прочностью и долговечностью. Оксидные катоды, основанные на использовании соединений бария, стронция и кальция позволяют значительно снизить рабочую температуру (до 800–1000 К), что позволяет эффективно их использовать в радиотехнике и вакуумной электронике. Однако чувствительность к загрязнениям и сравнительно невысокая долговечность является их существенным минусом. Высокую эмиссионную способность и длительный срок службы могут обеспечить катоды из гексаборида лантана LaB_6 , однако такие катоды сложны в изготовлении и дорогостоящи.

Пушки на основе термоэлектронной эмиссии позволяют генерировать мощные электронные пучки (до 1 МВт) [40], но только когда речь идет о сфокусированном электронном пучке, которым приходится сканировать по площади детали, размер которой может быть достаточно существенным.

В работе [41] описана пушка на основе термокатода, которая состоит из вакуумно-плотного армированного изолятора, массивного дискового катода из вольфрама или тантала с диаметром 2,5–3 см с вогнутой поверхностью и отверстием по центру для прохождения ионов на коллектор с целью избежать значительного уменьшения тока эмиссии. Разогрев катода происходит косвенно с помощью подогревателя, выполненного в виде кольца из вольфрамовой проволоки диаметром 0,08 мм, путём эмиссии электронов, ускоренных до 1,5 кВ разностью потенциалов между подогревателем и основным катодом. При этом потребляемая мощность лежит в диапазоне 1,5–4 кВт и зависит от нагрева катода. Электронный пучок, формируемый электронно-оптической системой, транспортируется через систему путём использования трёх фокусирующих линз, последняя из которых регулирует удельную мощность. Пушка способна генерировать пучок электронов с амплитудой тока до 20 А, и энергией электронов 30–40 кэВ. В такой системе одним из самых важных показателей является срок службы термоэмиссионного катода, который ограничивается его распылением под действием

бомбардировки ионами и может составлять до 10^{-3} мм/ч, что ограничивает срок службы катода.

Стоит отметить, что хотя пушки на основе термоэлектронной эмиссии обладают рядом преимуществ: надежность работы и возможность использования в мощных электронных приборах и источниках электронов, они также имеют и свои, не менее значимые недостатки: высокая рабочая температура, приводящая к значительным энергозатратам и чувствительность к загрязнению и окислению, особенно у оксидных и бариевых катодов.

Развитие термоэлектронных источников направлено на повышение эффективности используемых катодов, увеличение их срока службы и снижение энергопотребления. На сегодняшний день, активно исследуются новые материалы катодов, а также разрабатываются конструкции, позволяющие оптимизировать процессы эмиссии электронов и улучшить характеристики электронных пушек, однако стоит отметить, что отсутствие радиально сходящихся систем на основе термоэлектронной эмиссии может говорить о сложности создания таких систем.

Таким образом, несмотря на широкое распространение и высокую надёжность источников электронов на основе термоэлектронной эмиссии, совокупность их физических и конструктивных ограничений существенно затрудняет использование таких катодов для генерации интенсивных радиально сходящихся электронных пучков субмиллисекундной длительности. Высокая тепловая инерционность термокатодов не позволяет реализовать быстрое формирование коротких импульсов с воспроизводимыми параметрами без введения дополнительных элементов управления, а ограничения по плотности эмиссионного тока усложняют получение параметров пучка, требуемых для модификации поверхности металлических изделий. Дополнительными ограничивающими факторами являются значительные энергозатраты на нагрев катода, а также конструктивная сложность формирования интенсивных электронных пучков большого сечения с удовлетворительной однородностью плотности тока. В совокупности это делает источники электронов на основе

термоэлектронной эмиссии малопригодными для генерации интенсивных радиально сходящихся электронных пучков субмиллисекундной длительности направленных на модификацию поверхности металлических изделий цилиндрической формы.

1.2 Источники электронов на основе взрывной электронной эмиссии

Источники электронов, основанные на явлении взрывной электронной эмиссии (ВЭЭ), представляют важный класс генераторов высокоинтенсивных электронных пучков. Они находят применение в мощных импульсных ускорителях, рентгеновских установках, генераторах СВЧ-излучения, а также в исследованиях экстремальных состояний вещества.

При использовании взрывоэмиссионных катодов можно обеспечить наибольшую плотность тока эмиссии, по сравнению с другими методами. Принцип их работы заключается в следующем: при подаче высокого напряжения на промежутки происходит взрыв микроострий на поверхности катода, что вызывает образование локальных плазменных сгустков — катодных факелов. Электроны, выбрасываемые с границы этих плазменных факелов, направляются к аноду с расширением плазмы, движущейся со скоростью порядка 10^6 см/с. Когда граница расширяющейся плазмы достигает анода, начинается переход в дуговую стадию, сопровождающуюся резким увеличением проводимости промежутка. Эмиссия электронов с катода в процессе перехода металла в плазму приводит к росту электронного тока в промежутке. Таким образом, микровзрывы на поверхности катода приводят к выбросу сгустков электронов (эктонов), образующих плотный и короткий по длительности электронный пучок [42].

Одним из ключевых параметров, определяющих эффективность ВЭЭ, является материал катода. Чаще всего используются металлы с низкой работой выхода электронов (например, молибден, медь), а также композиционные материалы, способные выдерживать большие токовые нагрузки. В работах [43]

показано, что катоды с пористыми или многослойными структурами могут повышать эффективность эмиссии за счёт увеличения числа микровзрывов.

Источники электронов, работающие на основе взрывной эмиссии электронов, способны генерировать пучок с высокими плотностями тока. Тем не менее, как и термокатодные аналоги, они имеют относительно ограниченный ресурс катода особенно в условиях технического вакуума и низкую однородность распределения плотности тока по сечению пучка особенно при генерации больших сечений (более 100 см^2). Поэтому для генерации таких пучков используются не единичные острия, а многоострийные катоды, способствующие равномерной генерации плазмы, однако имеющие проблему с одновременным срабатыванием каждого катода, что можно обеспечить путём использования в качестве эмиттеров материала с малым пороговым током дуги (С, Hg) или установки ограничительных сопротивлений на каждый эмиттер. Такие установки также испытывают сложности с импульсами длительностью свыше десятков микросекунд. Эти ограничения можно обойти путём усложнения конструкции как системы, так и самих катодов. Например, снижение скорости расширения границы катодной плазмы может быть достигнуто путём нанесения высокомолекулярного вещества на катод [44], установки ограничивающего сопротивления в цепь катода [45, 46], или введением дополнительных электродов, работающих при автосмещении.

Источники электронов на основе ВЭЭ имеют ряд преимуществ: высокая плотность тока (генерация электронных пучков с токами до нескольких килоампер при наносекундных длительностях импульсов), относительная простота конструкции (не требуют сложных катодно-анодных зазоров или систем предварительного разогрева), быстрое срабатывание (наносекундное и даже пикосекундное формирование пучка, что делает их пригодными для импульсных систем), возможность работы в техническом вакууме и даже форвакууме, а также в газовых средах (в зависимости от условий могут быть адаптированы под различные рабочие среды) [47].

Однако, несмотря на представленные преимущества у данных систем имеется ряд серьёзных недостатков, которые существенным образом влияют на их использование в промышленных и исследовательских целях, а именно: ограниченный ресурс катодов (катодная поверхность подвергается деградации из-за микровзрывных процессов, что снижает долговечность источника), низкая однородность эмиссии, высокие требования к импульсным источникам питания (генерация высоковольтных наносекундных импульсов требует сложной схемотехники). Одним из существенных недостатков таких систем является невозможность независимого управления параметрами генерируемого пучка (амплитуда, длительность импульса тока пучка и энергия ускоренных электронов).

Примером источника на основе взрывоэмиссионных катодов может послужить источник “РИТМ-СП”, описанный в работе [2] и используемый для плавления поверхностных слоёв металлов. Общий вид установки представлен на рисунке 1.1.

Корпус пушки представляет собой трубу из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с внутренним диаметром 156 мм и длиной 320 мм. Эмиттер электронов представляет собой многопроволочный медный катод. Плазменный анод формируется с помощью сильноточного отражательного разряда в среде аргона. Источник способен формировать пучок с амплитудой до 25 кА, с энергией до 40 кэВ, длительностью 2–4 мкс с частотой следования импульсов 0,5 или 0,1 Гц.

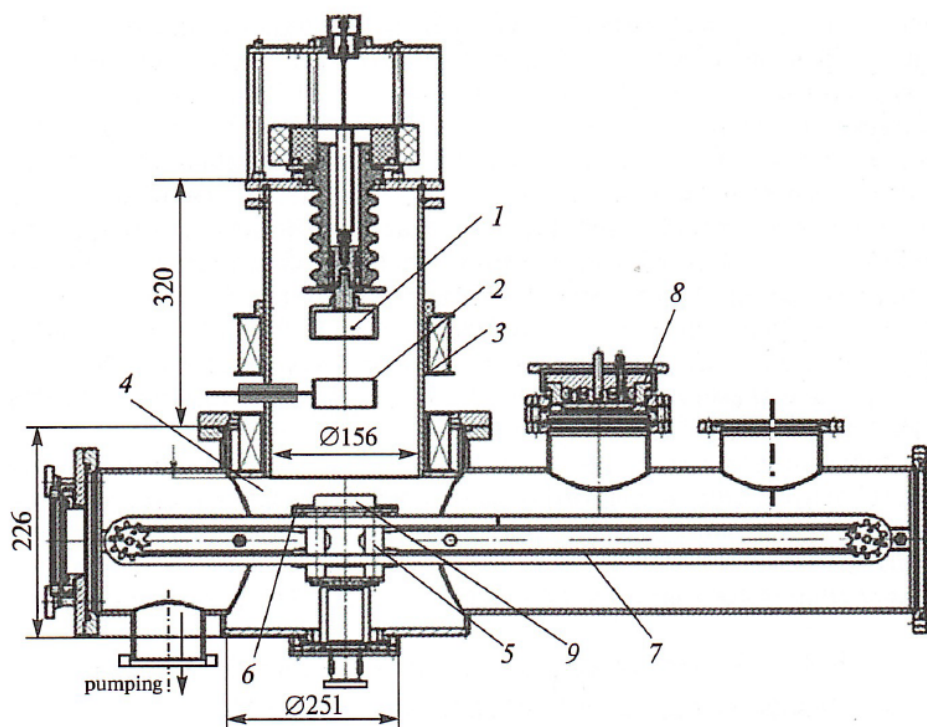


Рисунок 1.1 – Общий вид установки “РИТМ-СП”. 1 – взрывоэмиссионный катод; 2 – анод; 3 – корпус пушки; 4 – вакуумная камера; 5 – медный стержень; 6 – рабочий стол; 7 – цепная передача; 8 – магнетрон; 9 – образец [2]

Как отмечают авторы работы, недостаток представленной установки заключается в возникновении нежелательных искрений и приваривания деталей или рабочего стола при протекании килоамперных токов, что безусловно является заметным технологическим ограничением. Для решения обозначенных проблем используются медно-графитовые колёса для рабочего стола, а также медные стержни для плотного контакта между корпусом установки и столом. Вышеперечисленные решения позволяют решить возникающие проблемы, однако это приводит к усложнению конструкции установки.

Отмечая все вышесказанные преимущества и недостатки представленных систем на основе взрывоэмиссионных катодов, стоит привести примеры систем, способных генерировать радиально сходящиеся электронные пучки.

К примеру, взрывоэмиссионные катоды, используемые в установке ГЕЗА-4М (рисунок 1.2), существенно отличаются от традиционных многоострийных катодов [27]. В новой версии катода источником электронов служит плазма,

создаваемая большим количеством (2400 штук) вакуумно-дуговых разрядных промежутков, равномерно расположенных на поверхности цилиндрической подложки. Каждый разрядный промежуток состоит из четырех острых электродов и одного общего крестообразного разрядного электрода. Такая конструкция позволяет достичь высокой плотности электронной эмиссии и равномерного распределения электронного потока по поверхности мишени.

Эксперименты, проведенные на установке ГЕЗА–4М, показали, что использование взрывоэмиссионных катодов позволяет достичь плотности энергии электронного пучка на мишени до 30 Дж/см^2 на длине не менее 50 см. Это делает их перспективными для обработки оболочек ТВЭЛов, где требуется высокая однородность и интенсивность воздействия. Однако для дальнейшего улучшения параметров пучка необходимо решить ряд задач, таких как оптимизация потенциала стабилизирующей сетки и устранение виртуального катода, который может возникать при больших токах пучка.

Генерация радиальных пучков с помощью взрывоэмиссионных катодов открывает новые возможности для обработки цилиндрических изделий в ядерной энергетике, авиационной и автомобильной промышленности [48]. Такие пучки могут быть использованы для улучшения коррозионной стойкости, износостойкости и других эксплуатационных характеристик материалов, что делает их важным инструментом в современных технологических процессах. Установка, представленная на рисунке 1.2 применяется для облучения оболочек ТВЭЛов для повышения их коррозионной стойкости, жаростойкости и износостойкости [27].

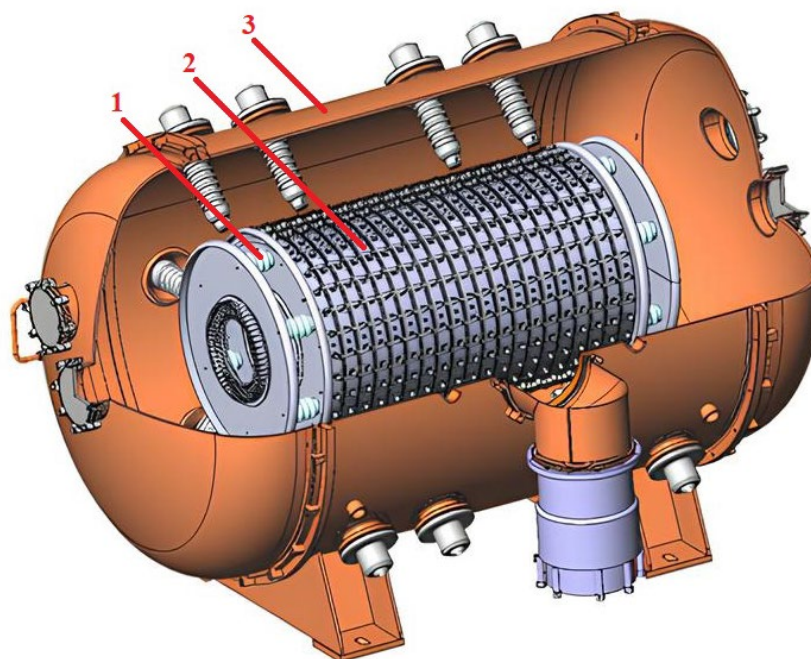


Рисунок 1.2 – Схема установки Геза-4М: 1 – изоляторы; 2 – вакуумно-дуговые разрядные промежутки; 3 – вакуумная камера [27]

Однако стоит заметить, что при уменьшении диаметра анода (стержневого коллектора) наблюдается ухудшение работы источника: ток пучка, длительность, а также фокусировка снижаются, ухудшается повторяемость. Причиной этого, как выяснили авторы [49], является наличие начальных поперечных скоростей электронов, что приводит к пролёту части электронов мимо мишени, дальнейшим осцилляциям и образованию виртуального катода. Также, искажение распределения потенциала в ускоряющем промежутке приводит к образованию плазмы, которая приводит к пробоям этого промежутка, то есть возникает ограничение по длительности импульса, что в итоге ведет к неустойчивости работы источника, в целом.

В работе [26] представлена установка для формирования радиально сходящегося низкоэнергетического сильноточного электронного пучка (рисунок 1.3), оснащённая специально разработанным катодным узлом с

многоканальным инициированием взрывной эмиссии пробоем по поверхности диэлектрика.

Катод представляет собой кольцо из дюралюминия с внутренним диаметром 8 см, в которое равномерно по окружности встроены 18 дуговых источников плазмы. Для увеличения количества взрывоэмиссионных центров в катод впрессованы 12 пучков тонких медных проволок диаметром 80 мкм. Анод выполнен в виде стержня из нержавеющей стали или латуни диаметром 10 мм, в ряде случаев обёрнутого медной фольгой толщиной 0,5 мм в области воздействия пучка. Анод заземляется с двух сторон через цанговые токосъёмы.

Работа пушки осуществляется следующим образом. При подаче на катод I импульса напряжения отрицательной полярности амплитудой 5–25 кВ от генератора высоковольтных импульсов происходит пробой по поверхности торцов керамических трубок, что приводит к образованию плазмы. Ток через каждый поджигающий промежуток (2–11 А) превышает пороговый ток дуги (около 2 А для меди), обеспечивая формирование затравочных катодных пятен. Электроны, эмитируемые этими пятнами и дополнительными взрывоэмиссионными центрами, ускоряются в радиальном направлении к аноду, формируя сходящийся пучок. Плотность энергии пучка варьируется в диапазоне 5–5.5 Дж/см² при зарядном напряжении 17 кВ, а неоднородность пучка оценивалась по его автографу на коллекторе и составляет ± 15 –25 %.

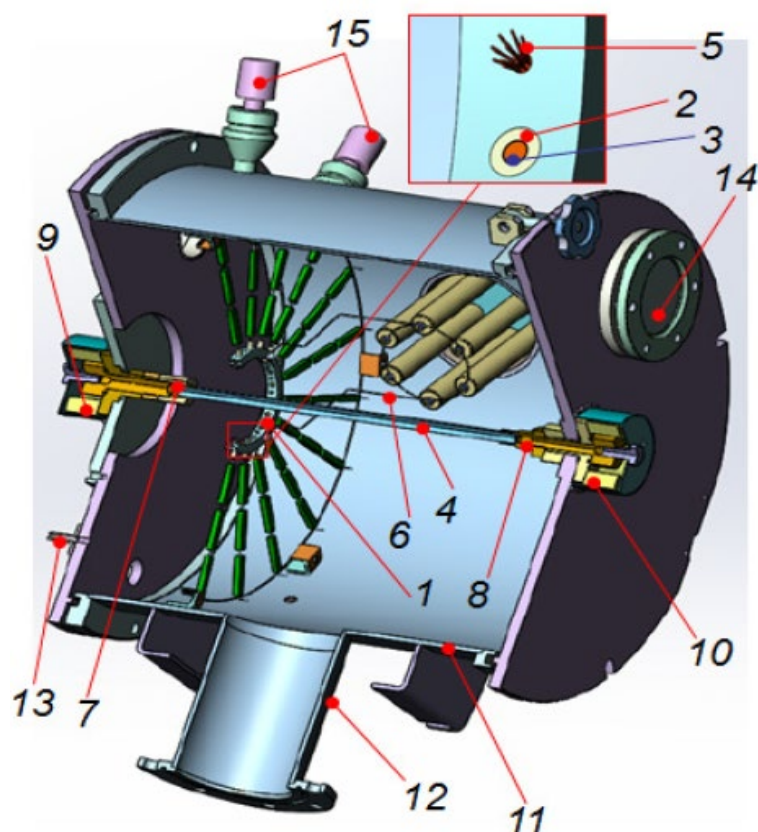


Рисунок 1.3 – Схема установки: 1 – катод; 2 – керамическая трубка; 3 – электрод дугового источника плазмы; 4 – анод; 5 – пучок медных проводов; 6 – подводы импульса высокого напряжения от передающей линии к катоду; 7 и 8 – цанговые разъемы; 9 и 10 – пояса Роговского; 11 – рабочая камера; 12 – патрубок откачки; 13 – патрубок напуска рабочего газа; 14 – смотровое окно со свинцовым стеклом; 15 – датчики давления газа. [26]

Стоит отметить, что, несмотря на все преимущества данной системы перед другими, использование большого количества катодов для обеспечения низкой неоднородности приводит к усложнению конструкции источника электронов.

1.3 Источники электронов на основе ионно-электронной эмиссии

Ионно-электронная эмиссия (ИЭЭ) — это процесс, при котором электроны выбиваются с поверхности материала под воздействием ионной бомбардировки. Эффективность этого процесса зависит от энергии ионов, их

массы, угла падения, а также свойств материала мишени [50]. Коэффициент вторичной электронной эмиссии γ , определяемый как отношение числа выбитых электронов к числу падающих ионов, является ключевым параметром, характеризующим эффективность источника. Разность потенциалов между анодом и высоковольтным катодом, при соблюдении условий по кривым Пашена, приводит к зажиганию высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) [40]. Основным механизмом ионно-электронной эмиссии является неупругое взаимодействие, приводящее к возбуждению электронов в зоне проводимости и их последующему выходу в вакуум. Например, при энергиях до 50 кэВ, для металлов коэффициент γ обычно не превышает 5, тогда как для диэлектриков и полупроводников он может достигать значений около 10 и более [50], что делает их перспективными материалами для создания эффективных источников электронов.

Источники электронов на основе ионно-электронной эмиссии представляют собой важный класс устройств, используемых в различных областях науки и техники, включая электронную микроскопию, ускорители частиц и вакуумную электронику [51, 52]. В отличие от термоэлектронных источников, ионно-электронные источники обладают рядом уникальных характеристик, которые делают их привлекательными для определенных приложений. Их привлекательность заключается в простой конструкции и компактных размерах насосной группы, требуемой для получения «среднего» вакуума в установке, а также в долговечности «холодного» катода, который часто представляет собой обычную металлическую пластину. Это позволяет формировать электронные пучки с заданной конфигурацией через ионно-электронную оптическую систему. Однако существуют ограничения, которые связаны с тем, что необходимая плотность тока пучка на мишени требует определенной конфигурации ионно-электронно-оптической системы, что делает работу источника неустойчивой при изменении основных его параметров – напряжение, ток, давление.

По принципу горения разряда такие системы делятся на источники с самостоятельным и несамостоятельным ВТР [53, 54]. Источники электронов на основе ВТР можно разделить на маломощные (до 5 кВт), средней мощности (5–50 кВт) и большой мощности (выше 50 кВт).

Пример таких источников можно рассмотреть в работе [50], где представлена схема источника на основе ВТР. Особенностью данной пушки является малый диаметр открытой и рабочей части катода. В таких пушках можно получать узкие пучки электронов (диаметр рабочей поверхности катода 0,1–0,5 мм) при повышенном давлении газа. Однако в такой системе повышение давления рабочего газа приводит к развитию неустойчивостей разряда. Для устранения этого недостатка используются дополнительные электроды вспомогательного разряда, напряжение которых достигает 1 кВ, а ток 100 мА. Рабочее давление составляло от 4 до 10 Па в зависимости от рода используемого газа. При этом проблема неустойчивого горения разряда была решена лишь частично. В некоторых режимах, из-за внутренней обратной связи между высоковольтным и вспомогательным разрядами, продолжала наблюдаться неустойчивость горения разряда.

Еще одним примером использования пушек на основе ионно-электронной эмиссии может являться установка, описанная в работе [40]. Это пушка на основе ВТР с дуговым источником ионов (рисунок 1.4) использовалась в том числе для обработки поверхности материалов.

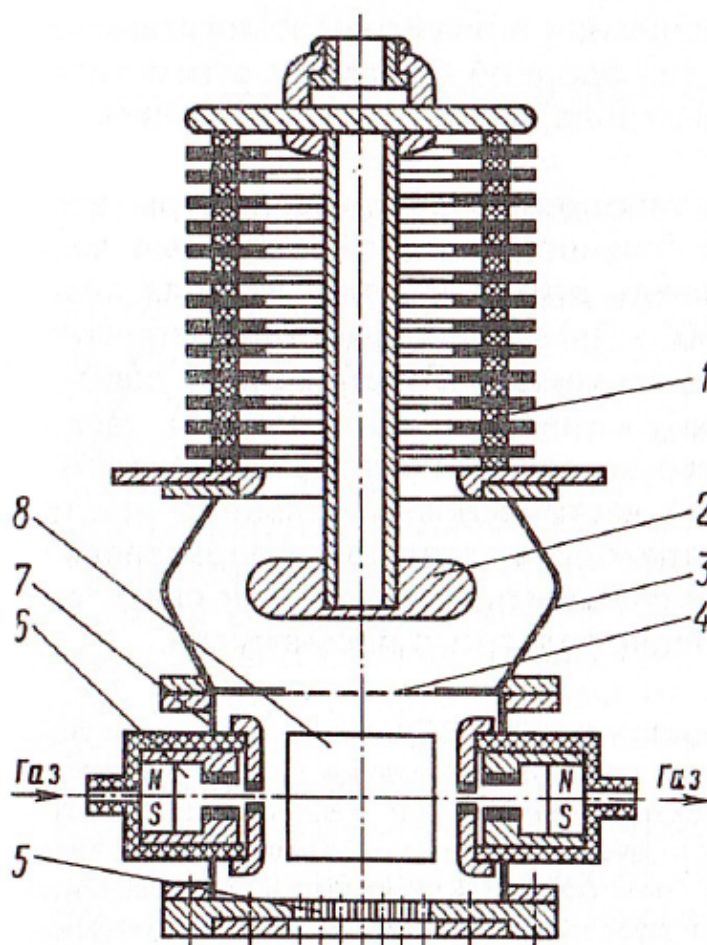


Рисунок 1.4 – Электронная пушка на основе несамостоятельного ВТР с дуговым источником ионов [40]: 1 – высоковольтный секционированный изолятор; 2 – катод; 3,7 – камеры; 4 – перфорированный электрод (сетка); 5 – фольговое выводное устройство; 6 – дуговые камеры; 8 – анод дугового разряда [40]

В данном источнике вспомогательный разряд (источник ионов) генерируется с помощью дуговых источников. Ионы бомбардируют катод, вызывая вторичную ионно-электронную эмиссию, после чего электроны выводятся через перфорированный электрод и извлекаются через фольговое окно. В представленной системе при токе дуговых плазмогенераторов 600 А с длительностью импульса 10 мкс возможно получить пучок сечением 80 см² с током до 40 А. Параметры электронного пучка напрямую зависят от конструкции анодного узла, а также от геометрии рабочей поверхности катода.

В качестве дополнительного источника ионов можно также использовать термокатод, орбитронный разряд, тлеющий разряд с полым катодом и др. [55, 56].

Разделение дуговых камер от большой анодной полости через малые отверстия обеспечивает перепад давления (от 1 до 10^{-2} Па), что позволяет добиться сорбции газа между импульсами и его десорбции во время горения разряда. Таким образом повышение давления рабочего газа в области вспомогательного разряда в совокупности с быстрой десорбцией позволяет уменьшить напуск и повысить электрическую прочность промежутка.

Пушки на основе ВТР могут также использоваться для сварки или плавки различных материалов, а также в процессах 3D-печати [57–59]. Так в работе [57] представлена низковольтная (до 20 кВ) электронно-лучевая пушка для 3D-печати, способная генерировать электронный пучок со средней мощностью 18 кВт (рисунок 1.5).

За счет использования кольцевого катода со сферической или тороидальной эмиссионной поверхностью электронный пучок формируется в виде полого сходящегося конуса без применения дополнительных фокусирующих или отклоняющих элементов. По своей геометрии и принципу работы такой подход также мог потенциально быть использован для генерации радиально сходящихся электронных пучков, соответствуя поставленной в диссертации цели, однако такие источники электронов на основе самостоятельного ВТР вне зависимости от конфигурации пучка не отличаются достаточной для этого импульсной мощностью пучка, необходимой для модификации поверхности цилиндрических изделий.

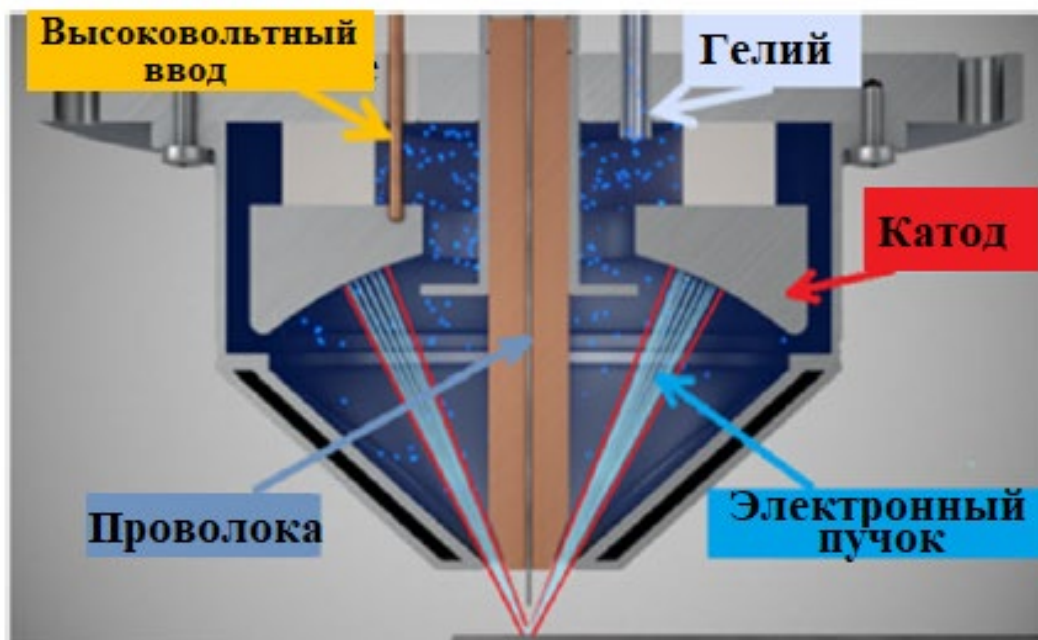


Рисунок 1.5 – Схема установки на основе самостоятельного ВТР с радиально сфокусированным электронным пучком [57]

Стоит отметить, что источники на основе ионно-электронной эмиссии используются также в радиально сходящихся системах. Примером реализации систем с использованием несамостоятельного ВТР являются установки серии TORUS [60]. Этот источник представляет собой тороид, который выполняет функцию катода (рисунок 1.6).

Вспомогательный разряд горит между полым катодом и проволочными анодами, создавая низкотемпературную плазму, из которой через мелкую сетку извлекаются первичные ионы в сторону катода. Это приводит к бомбардировке катода и образованию кольцевого пучка вторичных электронов, направленных внутрь. Электронный пучок проходит через плазму вспомогательного разряда и выводится в атмосферу через цилиндрическое выводное фольговое окно, воздействуя на материал/мишень. Максимальная плотность тока пучка в данной установке составляет 100 мкА/см^2 при ускоряющем напряжении до 120 кВ.

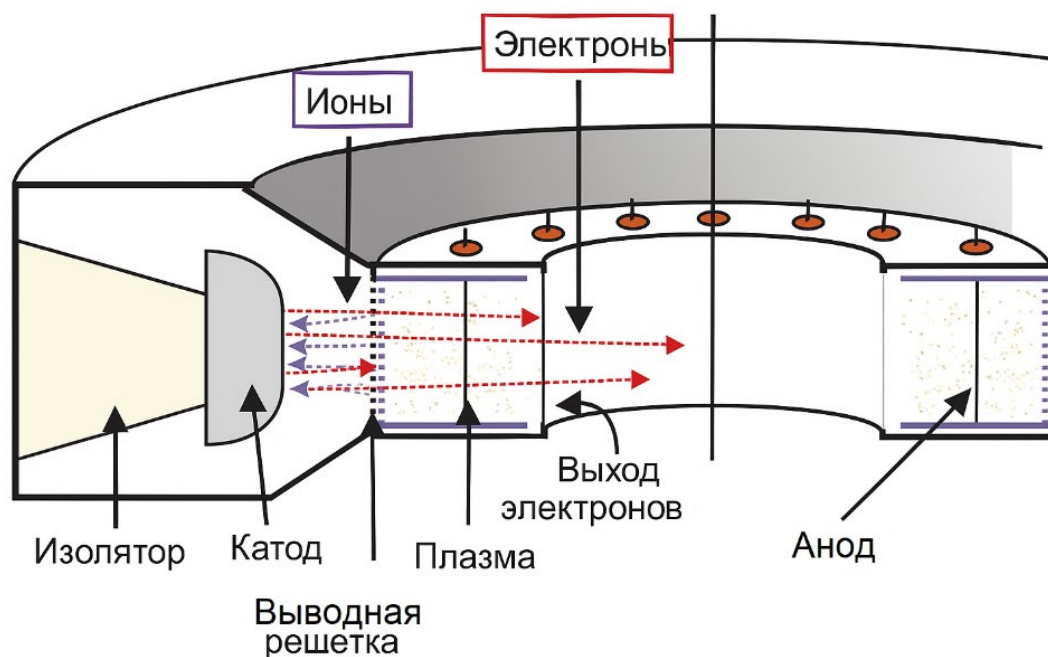


Рисунок 1.6 – Принцип работы установки с холодным катодом с эмиссией вторичных электронов [60]

Таким образом, несомненными преимуществами подобных источников являются низкая рабочая температура, позволяющая снизить энергопотребление, высокая средняя мощность, долговечность, поскольку процесс эмиссии не связан с термической деградацией материала катода и широкий выбор материалов, так как в качестве мишени для ионной бомбардировки могут использоваться различные металлы, полупроводники и диэлектрики, что позволяет оптимизировать параметры источника для конкретных задач. Однако, стоит отметить, что такие системы обладают и немаловажными недостатками: деградация поверхности катода в зависимости от плотности тока, так как постоянная бомбардировка ионами, к примеру, в плавильных пушках, где необходима фокусировка пучка и имеется высокая плотность тока, приводит к эрозии и изменению свойств поверхности катода, снижая эффективность эмиссии со временем. Также следует отметить сложность управления электронным пучком, так как процесс ионно-

электронной эмиссии чувствителен к параметрам ионного пучка (энергия, угол падения, состав ионов), что требует точного контроля и стабилизации этих параметров. В целом, узкий диапазон параметров эффективной генерации пучка делает такие системы достаточно узкопрофильными и сложными в применении. Также, в системах с несамостоятельным ВТР имеется сильная зависимость от давления рабочего газа и ионного источника, который повышает стабильность работы системы и управления пучком, однако сильно усложняет конструкцию источника и увеличивает его стоимость. В результате, системы на основе самостоятельного ВТР не могут использоваться для задач импульсной полировки поверхности металлических материалов и изделий в силу невозможности обеспечения требуемой плотности энергии, которая к тому же приводит к заметным изменениям газовых условий, от которых критически зависят параметры генерируемого электронного пучка.

1.4 Источники электронов на основе эмиссии электронов из газоразрядной плазмы (с плазменным катодом)

Источники электронов с плазменным катодом (ПК) рассматриваются как альтернатива источникам с термокатодом, хотя пока и не нашли такого широкого применения по сравнению с последними. Интерес к такому типу источников всё ещё остаётся высоким из-за их свойств, которые выделяют их на фоне всех остальных источников [61]. Одним из главных достоинств источников с плазменным катодом является возможность работы в повышенном диапазоне давлений (до единиц Па). Это способствует их использованию не только для генерации интенсивных (с токами субкилоамперного уровня) импульсных (чаще всего с длительностью от десятков до тысяч микросекунд) электронных пучков и пучков большого сечения [62, 63] в низких давлениях рабочего газа, но и для формирования электронных пучков в форвакуумной области давлений [64–66]. Такие источники привлекательны для использования в промышленности, например, для модификации поверхностных свойств

материалов и изделий, в том числе неметаллических [67, 68], электронно-лучевой сварки [69–71] и наплавки [72], генерации электромагнитного излучения [73, 74] и др.

Обычно, эмиссионный ток ПК составляет только часть тока разряда [1], поэтому для получения тока пучка большой амплитуды необходимы сильноточные разряды [75]. К примеру, разряды с холодным катодом могут обеспечить ток до нескольких килоампер [14]. В системах на основе вакуумной дуги плазма формируется после появления катодного пятна. При этом расширение плазмы в больших объёмах с типичной скоростью 2×10^6 см/с может занимать значительное время [63], что приводит к появлению пространственно-временной неоднородности тока по сечению пучка. Однако время формирования эмиссионной поверхности можно сократить, используя газовый дуговой разряд низкого давления с полым катодом или полым анодом, в которых наработка и расширение плазмы происходит не только за счёт катодного пятна, но также из-за взаимодействия потока электронов с газом [1].

Важным аспектом в таких системах является формирование границы эмиссионной плазмы (рисунок 1.7), представляющей собой протяженный ионный слой, величина которого зависит от потенциала плазмы относительно анода, концентрации и температуры электронов в ней, а также от величины прикладываемого электрического поля для извлечения электронов [1, 76]. На рисунке 1.7 представлены возможные положения границы эмиссионной плазмы при различных условиях ее формирования.

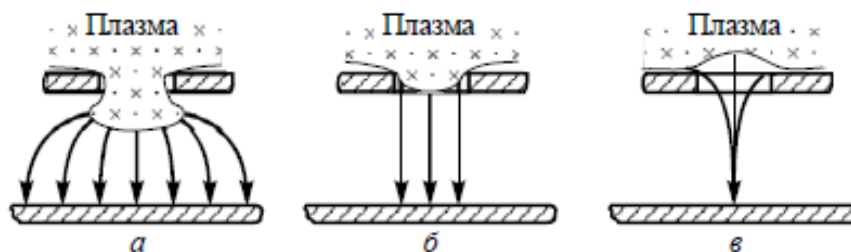


Рисунок 1.7 – Возможные положения границы плазмы [1]

Из представленного рисунка видно, что при плотной эмиссионной плазме и/или слабом поле (рисунок 1.7а), ширина слоя мала, а плазма выходит из отверстия в катоде. При этом плазменная граница формируется в ускоряющем промежутке, что приводит к расфокусировке пучка. Ситуация, описанная на рисунке 1.7б является оптимальной. Её можно достичь путём уменьшения плотности плазмы, увеличением толщины эмиссионного электрода или же увеличением величины электрического поля. При таком соотношении увеличивается ширина слоя, что приводит к стабилизации плазменной границы в катодном отверстии, позволяя генерировать плоскопараллельный электронный пучок. На рисунке 1.7в представлена ситуация, в которой в системе имеется низкая концентрация эмиссионной плазмы и/или сильное электрическое поле. Проникновение ускоряющего электрического поля внутрь эмиссионной области отодвигает границу эмиссионной плазмы от отверстия в катоде, что приводит к фокусировке генерируемого электронного пучка.

Описанные физические процессы необходимо учитывать для обеспечения стабильной работы СПК и источника электронов, в целом. Для стабильной генерации электронного пучка необходимо согласование размеров ячейки эмиссионной сетки d с характерной шириной ионного слоя l , отделяющего плазму от эмиссионного электрода с условием $d \sim 2l$. В этом случае СПК представляет собой плазменное образование, заполняющее объем, ограниченный электродной системой, одна или более сторон которой выполнены в виде мелкоструктурной сетки, через ячейки которой с поверхности плазмы осуществляется эмиссия электронов при приложении внешнего электрического поля. Приэлектродный ионный слой ограничивает уход электронов, обеспечивая стабильную генерацию тока пучка с высокой плотностью и слабой зависимостью от ускоряющего напряжения. Подбор правильного размера ячейки эмиссионной сетки обеспечивает эмиссию электронов с частично открытой границы плазмы. В центральной зоне ячейки, где слои пространственного заряда не перекрываются, захваченные внешним электрическим полем низкоэнергетические электроны могут выходить в

ускоряющий промежуток, тогда как в периферийной области эмиссия электронов ограничена потенциальным барьером. При увеличении ширины слоя пространственного заряда доля открытой области уменьшается, что приводит к сокращению эффективной эмиссионной площади. Поскольку плотность электронного тока в отсутствие потенциального барьера значительно выше, чем при его наличии, общий эмиссионный ток через одно отверстие в основном определяется площадью открытого участка плазмы. Увеличение тока эмиссии электронов повышает потенциал плазмы относительно анода, что, в свою очередь, увеличивает ширину слоя пространственного заряда. Это приводит к уменьшению открытой плазменной поверхности и, как следствие, к снижению эмиссионного тока, что в литературе приобрело название «слоевая стабилизация», а с применением мелкоструктурных сеток стало называться «сеточная стабилизация» [1].

1.4.1. Источники электронов с сеточным плазменным катодом на основе тлеющего разряда

Источники электронов с СПК на основе тлеющего разряда представляют собой передовые устройства, которые находят широкое применение в различных областях науки и техники. В таких устройствах сетка является частью катода, из которого происходит эмиссия электронов. Электроны ускоряются в электрическом поле между сеткой и анодом, что приводит к образованию анодной плазмы.

Стоит отметить, что такие критерии, как сложность конструкции и необходимость тщательной настройки параметров разряда для обеспечения стабильной работы являются существенными недостатками таких систем. Это может потребовать значительных усилий и ресурсов на этапе проектирования и эксплуатации. Например, в экспериментальных условиях для достижения стабильного режима работы часто приходится проводить серию тестовых запусков и корректировать параметры источника, что требует времени и опыта оператора. Следует отметить, что эффективность работы таких источников

сильно зависит от качества используемых материалов и точности изготовления сетки, что может увеличивать их стоимость.

Если говорить о классическом тлеющем разряда, следует отметить недостатки, ограничивающие его использование в некоторых областях. В частности, такой разряд характеризуется низкой плотностью тока (обычно не превышающей нескольких mA/cm^2), что приводит к недостаточной эффективности генерации пучков заряженных частиц для высокоинтенсивных технологических процессов, таких как обработка поверхностей металлических изделий. Кроме того, в классическом тлеющем разряде наблюдается сужение области протекания тока, то есть эффект, при котором разрядный ток перестает равномерно распределяться по всему сечению газового промежутка и сосредотачивается в узкой области или канале. Это приводит к резкому уменьшению эффективной площади, через которую протекает ток.

В работах В.В. Денисова [77–79] и А.С. Метеля [75] рассмотрены несамостоятельные тлеющие разряды, которые демонстрируют значительно более высокие значения тока разряда (до нескольких сотен ампер) и тока пучка. Такие разряды обеспечивают повышенную плотность тока и стабильность в сильноточных режимах благодаря вспомогательному источнику ионизации, однако требуют сравнительно большой площади катода, измеряющейся зачастую квадратными метрами, что приводит к увеличению массогабаритов системы. Кроме этого, они по-прежнему склонны к переходу в дуговую форму горения разряда при увеличении напряжения или давления. При этом катодное пятно появляется в разных участках разрядной системы, что в конечном итоге приводит к невозможности или существенному усложнению ее использования для целей генерации интенсивного электронного пучка большого сечения. Кроме того, для удержания разряда в тлеющей форме требуются сложные технические решения, включая точный контроль параметров (например, использование импульсных режимов или магнитных полей), что усложняет масштабирование таких систем и сдерживает практическое применение.

Следует отметить, что примеры реализации источников электронов на основе несамостоятельных тлеющих разрядов с радиально сходящейся геометрией в литературе отсутствуют, что подчеркивает необходимость разработки новых подходов для достижения фокусированных пучков в подобных системах.

В некоторых случаях возникают проблемы с нестабильностью тлеющего разряда при изменении внешних условий, что требует применения дополнительных методов стабилизации. Например, при изменении давления или температуры могут наблюдаться нестабильности генерации электронного пучка, что может повлиять на качество обработки материалов или результаты научных экспериментов. Для решения этой проблемы применяются системы обратной связи и автоматические регуляторы, которые позволяют поддерживать стабильные параметры разряда. Однако это усложняет конструкцию и увеличивает стоимость источника. Несмотря на эти недостатки, источники электронов с СПК на основе тлеющего разряда остаются важным инструментом для многих современных технологий благодаря своим уникальным возможностям и высокой эффективности.

В работе [75] рассматривается электронная пушка для генерации СВЧ излучения, способная формировать электронный пучок диаметром до 100 мм и током до 700 А с энергией электронов 200 кэВ при длительности импульса ~100 мкс. Эмиттером электронов в данной системе является плазма тлеющего разряда с электростатическим удержанием электронов в полой катодной трубке с диаметром 300 мм и длиной 400 мм. Электроны ускоряются между эмиссионной и ускоряющей сетками, извлекаются и попадают на коллектор.

Как отмечают авторы, образование катодных пятен также является недостатком данной системы. При переходе тлеющего разряда в дуговую форму происходит ухудшение однородности плазмы в эмиттере, что чаще всего вызывает пробой между ускоряющими сетками.

Установка, описанная в работе [80], включает в себя СПК на основе тлеющего разряда и используется для генерации пучка большого сечения

1000×180 мм. На рисунке 1.8 представлена схема электродной системы СПК электронного ускорителя.

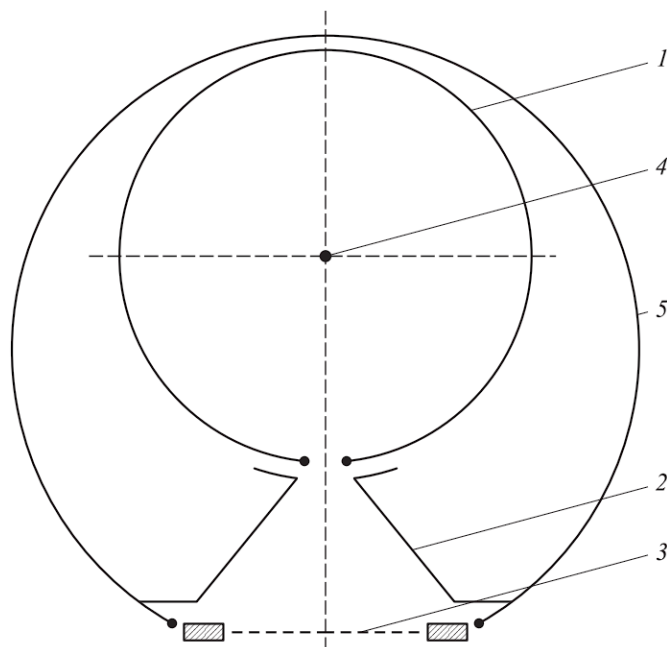


Рисунок 1.8 – Схема электродной системы СПК электронного ускорителя:

1 – катод, 2 – анод, 3 – сетка, 4 – вольфрамовая нить, 5 – корпус [80]

Для зажигания орбитронного тлеющего разряда в представленной системе используется вольфрамовая нить 4, натянутая вдоль оси источника и подключенная через сопротивление к положительному выводу источника питания разряда. Катод 1 имеет щелевое отверстие длиной 1000 мм, а его ширину можно варьировать в пределах $h = 10\text{--}40$ мм. Тлеющий разряд зажигается между нитью 4 и катодом 1 после чего разряд развивается на анод 2. Зажигание разряда происходит при давлении рабочего газа $4\text{--}6 \times 10^{-2}$ Па и напряжении 2,6–1,5 кВ соответственно. Авторы отмечают, что стабильное горение разряда с равномерным распределением наблюдалось при условии, что площадь щели на порядок превосходит значение равное отношению площадей катода к аноду. Уменьшение площади щели приводит к контрагированию разряда, а её увеличение к росту напряжения горения разряда и увеличению минимального рабочего давления. Также стоит отметить, что устойчивое

горение разряда обусловлено влиянием катодного слоя, ширина которого может превосходить размеры разрядной системы и оценивается через соотношение Чайлда-Ленгмюра. В полученной системе авторам удалось добиться неоднородности плотности тока пучка $\sim 10\%$, что является хорошим результатом, в совокупности с высокой стабильностью работы, надёжности и простотой эксплуатации, однако низкие значения плотности тока пучка в описанной планарной геометрии не позволяют использовать подобные системы для модификации металлов и других неорганических изделий.

Тем не менее, одним из ключевых преимуществ таких источников является высокая эффективность преобразования энергии разряда в пучок заряженных частиц. Надёжность и долговечность таких устройств заслуживают внимания, поскольку отсутствие термокатодов, которые требуют высокой температуры для эмиссии электронов, исключает проблемы, связанные с их перегревом или износом. Например, в установках для плазменной обработки материалов использование таких источников позволяет добиться более стабильной работы и уменьшить количество аварийных случаев. Это особенно важно в промышленных условиях, где необходимо обеспечивать непрерывную работу установок без длительных простоев с целью повысить эффективность производства.

В результате, системы с СПК на основе тлеющего разряда также потенциально могут рассматриваться для достижения поставленной в диссертации цели, однако главным недостатком таких источников всё ещё остаётся сложность достижения высокой плотности тока пучка большого сечения, что обусловлено ограничением по току разряда с точки зрения всегда имеющейся вероятности перехода тлеющего разряда в дуговую форму, который без принятия дополнительных мер отличается высокой неоднородностью плотности тока. Все перечисленные факторы делают сложным реализацию системы с тлеющим разрядом и высокой плотностью энергии без значительных технических усовершенствований. Решением этой проблемы может стать

переход к другому типу разряда, например, к контролируемому самостоятельному дуговому разряду низкого давления.

1.4.2. Источники электронов с сеточным плазменным катодом на основе дуги низкого давления

Использование дугового разряда в системах с СПК имеет несколько значительных преимуществ по сравнению с системами с тлеющим разрядом. Интенсивный поток электронов из плазмы дугового разряда позволяет достигать высоких плотностей тока эмиссии, благодаря чему становится возможным генерировать электронные пучки с высокой плотностью энергии, что важно для многих областей применения, например, обработка материалов, сварка или использование в ускорителях частиц. Важно подчеркнуть, что дуговой разряд более устойчив к изменению давления газа или напряжения, что делает его более предсказуемым и управляемым при работе. Более широкий диапазон рабочих давлений, а также долговечность катода расширяют диапазон его применений.

Таким образом, использование дугового разряда в системах с СПК имеет значительные преимущества в системах, где необходимо обеспечить высокую плотность энергии и тока, а также стабильность и долговечность.

Инициирование катодного пятна на поверхности катода электрическим пробоем по поверхности диэлектрика является одним из способов зажигания дугового разряда при низких рабочих давлениях $10^{-2} \div 10^{-1}$ Па. Хотя длина свободного пробега электрона для реакции ионизации оказывается много больше длины зазора, в промежутке зажигается разряд с сравнительно низким напряжением горения. При этом столб плазмы со степенью ионизации достигающей до $\sim 10\%$ занимает основную часть промежутка. При таком инициировании разряда появляется катодное пятно на поверхности катода, электроны которого ускоряются в двойном электрическом слое между плазмой анодного столба и границей катодного факела. При этом энергия электронов практически соответствует напряжению горения разряда [81, 82].

Плазменный факел распространяется к полному аноду со скоростью $(1\div 2)\times 10^6$ см/с, которая увеличивается с ростом давления в разрядной системе. Электроны из катодного факела ионизуют газ в пространстве полого анода, что приводит к накоплению ионов и более быстрому росту тока на полный анод по сравнению с вакуумным случаем [83, 84].

Эффективность данного способа генерации заключается в снижении напряжения горения разряда, которое зависит от геометрии электродного промежутка, амплитуды тока разряда и рода рабочего газа. Наличие катодного пятна позволяет генерировать разряд со стабильным током большой величины, составляющей десятки и сотни ампер [85–88], а стабилизация границы плазмы эмиссионной сеткой позволяет генерировать пучки миллисекундной длительности. При использовании такого способа генерации плазмы можно создавать большие плазменные объемы ($\geq 0,1$ м³), однако при относительно низком давлении ($p < 10^{-3}$ Па) создать объёмную и однородную эмиссионную плазму с высокой плотностью тока эмиссии становится сложно из-за низкого коэффициента извлечения электронов.

Электронная эмиссия с катода в разрядном промежутке возникает благодаря образованию катодного пятна на поверхности катода, его бомбардировке ионами, а также усилению электрического поля вблизи катода за счет ионного слоя [1]. В газоразрядной плазме систем с полым анодом, площадь которого на несколько порядков превышает площадь катода, тепловая скорость электронов значительно превышает скорость ионов. Это способствует формированию потенциального барьера у анода, который создает препятствие для плазменных электронов, что приводит к возникновению отрицательного анодного падения. При приложении ускоряющего напряжения потенциальный барьер в ячейках сетки уменьшается, а потенциал плазмы относительно стенок полого анода и сетки возрастает. Это вызывает перераспределение разрядного тока и, как следствие, увеличение эмиссионного тока. Суть перераспределения разрядного тока заключается в переключении электронной компоненты тока разряда на электрод, положительно заряженный относительно других

электродов. При наличии высокого ускоряющего напряжения электрическое поле со стороны коллектора, имеющего положительный потенциал относительно СПК, проникает сквозь ячейки эмиссионной сетки в плазменный катод, что приводит к переключению плазменных электронов в область эмиссионной сетки и повышению эмиссионного тока.

Обычно в разрядах низкого давления с полым анодом большой площади плазма имеет положительный потенциал относительно анода. При этом важным параметром в такой системе является ширина потенциального барьера вблизи анода. Наличие этого параметра открывает возможность управления распределением плотности тока по сечению пучка, а также его основными параметрами, такими как длительность импульсов, а также частота их следования [89].

Сеточные плазменные катоды позволяют получать электронный пучок не только в схемах с синхронизованным импульсом ускоряющего напряжения [90], источник электропитания которого отличается сложностью и дороговизной, но и в схемах с постоянно приложенным ускоряющим напряжением [91], роль которого чаще всего выполняет высоковольтная конденсаторная батарея. Использование СПК на основе дуги низкого давления с полым анодом при постоянном ускоряющем напряжении существенно упрощает работу источника электронов в импульсном режиме генерации и с большой плотностью тока пучка.

Примером системы с СПК на основе дугового разряда низкого давления является установка “СОЛО” [21, 92]. Представленный источник (рисунок 1.9) электронов позволяет генерировать низкоэнергетический пучок (до 30 кэВ) субмиллисекундной длительности с токами в сотни ампер.

Дуговой разряд в такой системе горит в катодной области между катодом 2 и анодными электродами 3 и 4. Зажигание разряда происходит при помощи импульса поджига U_{trig} величиной 12–15 кВ. Отбор электронов из эмиссионной плазмы осуществляется через ячейки эмиссионной сетки первоначально под действием электрического поля, а после образования анодной (пучковой)

плазмы ускорение электронов происходит в двойном слое между границами двух плазм: катодной и анодной (пучковой) [93]. Стоит отметить, что в данной системе в стандартных режимах работы граница катодной плазмы стабилизирована эмиссионной сеткой, а граница анодной плазмы является подвижной.

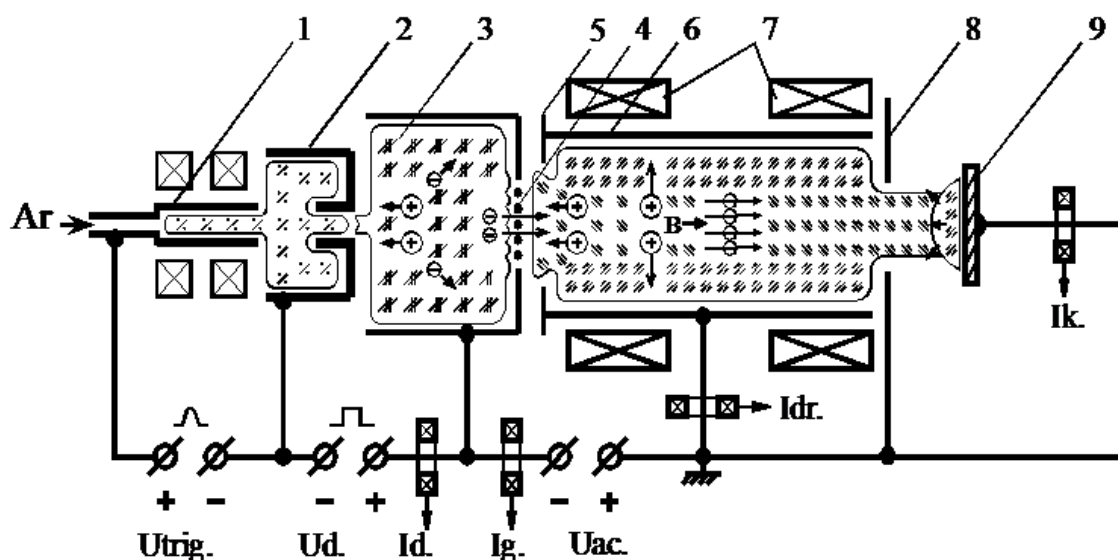


Рисунок 1.9 – Источник электронов “СОЛО”: 1 – поджигающий электрод; 2 – катод; 3 – анод; 4 – эмиссионная сетка; 5 – ускоряющий электрод; 6 – труба дрейфа; 7 – магнитные катушки; 8 – диафрагма; 9 – коллектор [21]

Транспортировка электронного пучка происходит в магнитном поле. Параметры пучка (амплитуда и длительность) напрямую зависят от параметров генерируемого основного дугового разряда. Авторы работы отмечают, что проведённые эксперименты демонстрируют неоднородность пучка при работе без дополнительного перераспределяющего электрода. Так, как отметили авторы, при увеличении длительности импульсов можно заметить увеличение диаметра пучка, при этом равновесное состояние системы достигается не ранее чем через 100 мкс.

В работе [94] рассмотрена установка с сеточным плазменным катодом (рисунок 1.10), способная генерировать электронный пучок с энергией 12 кВ

субмиллисекундной длительности с током 80А, обеспечивая среднюю энергию $\approx 10 \text{ Дж/см}^2$.

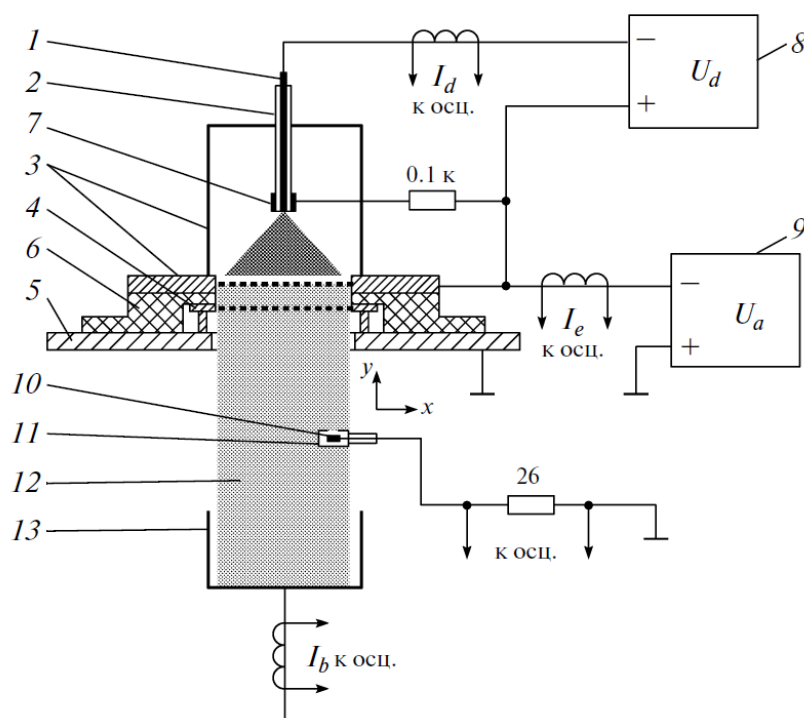


Рисунок 1.10 – Конструкция электронного источника и схема измерения параметров: 1 – катод; 2 – керамический изолятор; 3 – анод; 4 – экстрактор; 5 – фланец вакуумной камеры; 6 – капролоновый изолятор; 7 – поджигающий электрод; 8 – блок питания разряда; 9 – блок питания ускоряющего промежутка; 10 – зонд; 11 – металлический экран; 12 – пучок; 13 – цилиндр Фарадея [94]

В представленной установке катод выполнен в виде медного стержня диаметром 5 мм, который помещён в керамическую трубку. Анодом источника является полый цилиндр с эмиссионным окном диаметром 90 мм в основании, которое перекрыто мелкоструктурной сеткой $0,3 \times 0,3$ мм. Ускоряющее напряжение прикладывается между анодом и сеточным электродом. Рабочее давление в системе 4-15 Па. Зажигание дугового разряда осуществлялось пробоем по поверхности керамики.

Авторы работы отмечают, что при транспортировке пучка вблизи коллектора наблюдается образование плотной плазмы, которая вносит искажения в измерение тока пучка. При этом стоит отметить, что получаемый в работе пучок по сечению близок к гауссовому, что может негативно сказаться на качестве обработки изделий большого диаметра.

1.4.3. Источники электронов с многодуговым сеточным плазменным катодом

Одиночный дуговой разряд принципиально не способен обеспечить низкую неоднородность плазмы на эмиссионной площади, измеряющейся десятками-сотнями квадратных сантиметров, ввиду формирования ограниченной области плазмы с довольно резким спадом концентрации плазмы с увеличением расстояния от плазмогенератора. Именно поэтому для более равномерного заполнения плазмой рабочего объема СПК и снижения локальных неоднородностей плотности тока эмиссии электронов используются многодуговые системы, которые также должны быть потенциально рассмотрены для источника с радиально сходящимся пучком, в котором СПК зачастую имеет цилиндрическую форму, а эмиссия электронов происходит с протяженной поверхности большой площади.

В работе [95] представлена источник с СПК на основе многодугового разряда низкого давления (рисунок 1.11).

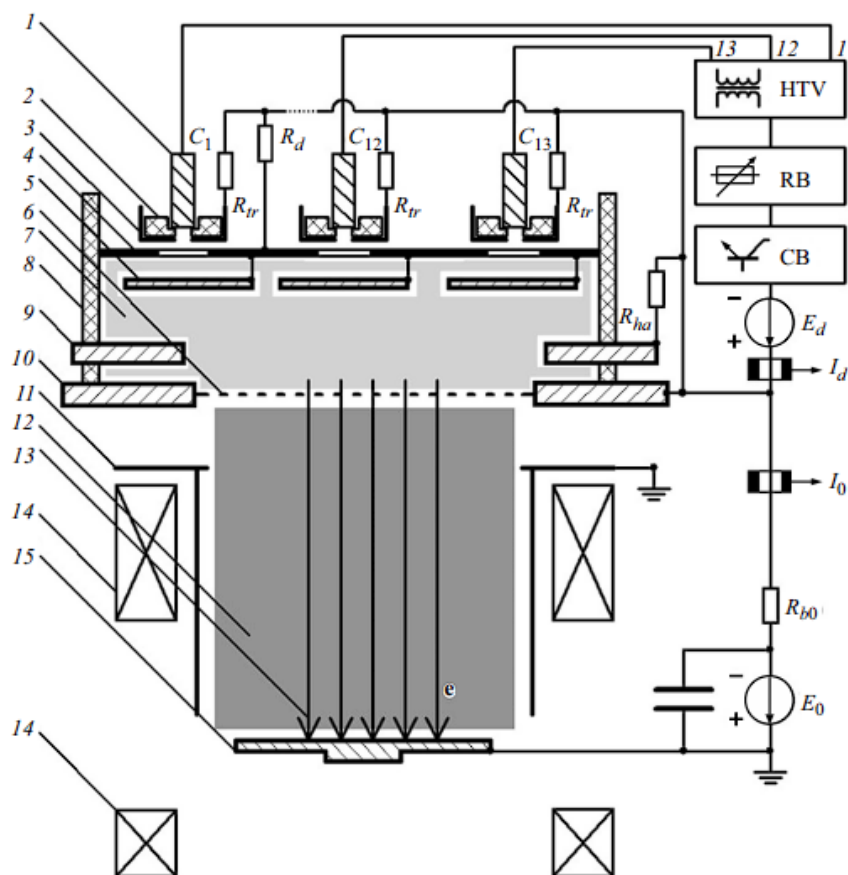


Рисунок 1.11 – Схема модернизированного источника с многодуговой разрядной системой: 1 – катод, 2 – изолятор, 3 – поджигающий электрод, 4 – дополнительный электрод, 5 – перераспределяющий электрод, 6 – эмиссионная сетка, 7 – катодная плазма, 8 – изолятор, 9 – промежуточный анод, 10 – анод, 11 – извлекающий электрод, 12 – анодная (пучковая) плазма, 13 – электронный пучок, 14 – соленоид, 15 – коллектор [95]

В представленной системе иницирование многодугового разряда происходит с помощью 13-и катодов, расположенных на окружности радиусом 84 мм. Такая система позволяет создавать масштабируемые разрядные системы с большим количеством независимых катодных узлов. В проведенных экспериментах авторам удалось достигнуть амплитуды тока пучка до 700 А при длительности импульса до 150 мкс и ускоряющем напряжении до 25 кВ, что позволило проводить электронно-пучковую модификацию поверхности

металлических материалов путем импульсного нагрева поверхностного слоя до его расплава и последующего сверхбыстрого остывания.

Авторы отмечают, что многодуговая система позволила расширить диапазон параметров и увеличить диаметр генерируемого электронного пучка за счет эффективного управления распределением плотности энергии пучка и отдельной регулировки токов каналов, что является несомненным преимуществом перед системами с одним дуговым плазмодгенератором.

Отдельно внимание стоит уделить системам на основе многодугового разряда низкого давления, которые способны генерировать радиально сходящиеся электронные пучки для накачки газовых лазеров [25, 96] и генерации СВЧ-излучения [97]. Так, в работе [25] представлена установка, генерирующая радиально сходящийся электронный пучок с выводом пучка в атмосферу (рисунок 1.12). Плазменный катод и анод установлены соосно внутри цилиндрической вакуумной камеры диаметром 700 мм и длиной 1400 мм. Анод служит опорной решеткой для выводного окна из фольги. Плазменный катод выполнен в виде полого протяженного тороида длиной 700 мм с внешним диаметром 500 мм и внутренним диаметром 350 мм. Внутренний цилиндр изготовлен из сетки с размером ячеек 1×1 мм. Пространство между сеткой и сплошной цилиндрической поверхностью катода заполнено плазмой, создаваемой шестью плазмодгенераторами, расположенными симметрично на обоих концах катода. Плазменный катод подвешен на изоляторе, который выдерживает напряжение до 250 кВ. Диски из нержавеющей стали предотвращают попадание рассеянных электронов на изолятор. Напряжение на плазменный катод подается с помощью шестижильного высоковольтного кабеля. Изолятор вместе с частью кабеля помещается в газонаполненный бак. Источник позволяет генерировать электронный пучок с энергией электронов до 200 кэВ, длительностью импульса 30-100 мкс и током пучка 5-100 А.

Как отмечают авторы работы, для получения удовлетворительной однородности плотности тока пучка на коллекторе в такой системе необходимо выполнить как минимум два условия: во-первых, использовать дополнительные

сетки, которые накладываются на основную сетку в областях с повышенной плотностью эмиссионного тока, перехватывая часть тока, а во-вторых, использовать ускоряющее напряжение более 180 кВ, что, однако, подразумевает усложнение конструкции источника электронов и увеличение требований к радиационной защите. Формируемый в такой системе радиально сходящийся импульсный электронный пучок не может использоваться для модификации металлических материалов, так как плотность мощности выводимого пучка не превышает нескольких Дж/см², что при таких длительностях и энергиях пучка совершенно недостаточно для модификации поверхности металлических материалов.

Нестабильность эмиссии в течение импульсов тока, связанная с десорбцией газа с коллектора после попадания на него электронного пучка, которая дестабилизирует эмиссию с катода, вызывая её неоднородность, также является существенным недостатком представленной системы. Кроме того, дестабилизация и неоднородность эмиссии приводят к ухудшению однородности пучка по сечению, что зачастую недопустимо при процессах поверхностной обработки материалов.

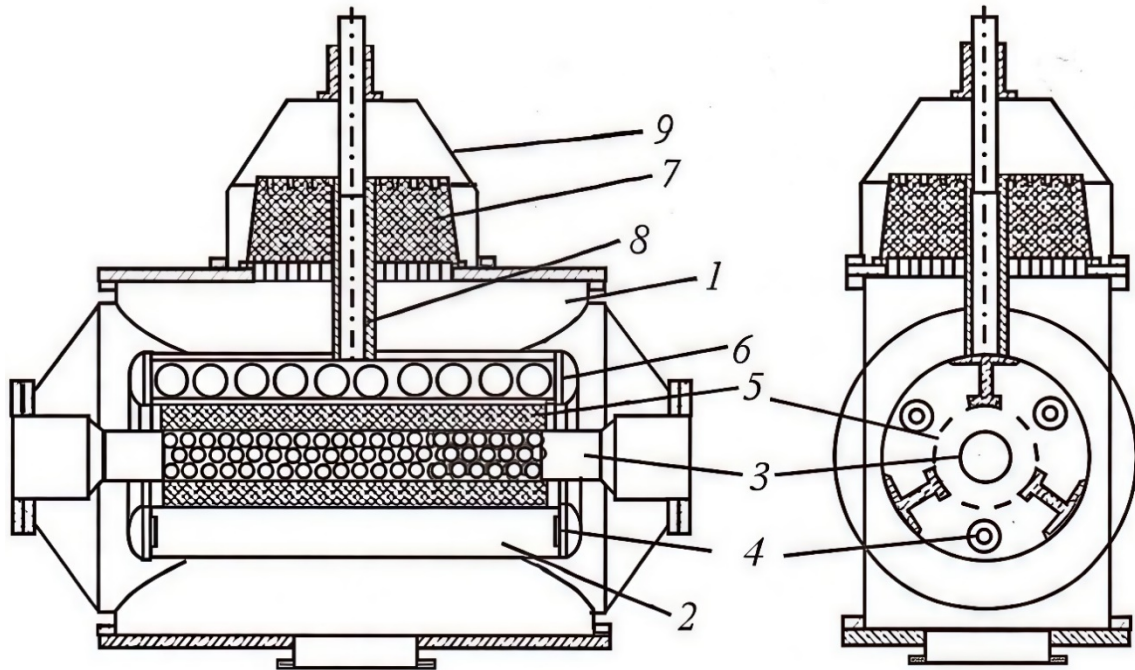


Рисунок 1.12 – Схема установки: 1– вакуумная камера, 2 – плазменный катод, 3 – цилиндрический анод, 4 – плазмогенераторы, 5 – эмиссионная сетка, 6 – полый анод разряда, 7 – высоковольтный изолятор, 8 – цилиндрическая штанга [25, 97]

Выходные характеристики подобных источников удовлетворяют запросам обработки поверхностей органических материалов из-за малой величины плотности тока пучка (100 мкА/см^2), ограниченной механической прочностью выводной фольги, однако, когда речь заходит о плавлении или обработке металлических и металлокерамических изделий, возникает сложность с обеспечением высокой плотности энергии при большой площади пучка. Отличительной особенностью данного источника является возможность плавного и независимого управления параметрами электронного пучка, что позволяет более детально исследовать процессы в СВЧ-генераторе.

Специально стоит рассмотреть источник на основе многодугового разряда низкого давления (“Килоампер”) [22,85–88], являющийся прототипом установки, исследуемой в рамках данной работы. На рисунке 1.13 представлена схема источника электронов.

В вакуумной камере 1 диаметром 80 см и длиной 100 см на проходном высоковольтном изоляторе закреплен СПК 2, представляющий собой полый цилиндр из нержавеющей стали диаметром 20 см и длиной 25 см.

Особое внимание в конструкции данного источника заслуживает многодуговой катодный узел (рисунок 1.14), который состоит из шести плазмогенераторов, закреплённых на торце цилиндра. Каждый катодный узел состоит из диэлектрического основания 3, магниевого катода 4 и поджигающего электрода 5, которые разделены коаксиальным зазором 1 мм. Одним из технических решений, взятых в основу проектирования и создания рассматриваемого в диссертации источника электронов, стало использование металлических токораспределяющих электродов диаметром 15 мм, которые электрически соединены с поджигающим электродом и позволяют снизить неоднородность распределения плотности тока электронного пучка, а также уменьшить вероятность пробоя ускоряющего промежутка.

Внутренняя поверхность СПК, используемого в данной системе, играет роль общего полого анода для всех катодных узлов, а эмиссионное окно перекрыто мелкоструктурной металлической сеткой из нержавеющей стали с ячейками $0,4 \times 0,4$ мм.

В представленной конфигурации авторам удалось достигнуть тока пучка амплитудой 1 кА при ускоряющем напряжении до 80 кВ. Таким образом на коллекторе выделялась энергия $\approx 3,5$ кДж и фиксировался автограф пучка в виде оплавления диаметром 50 мм.

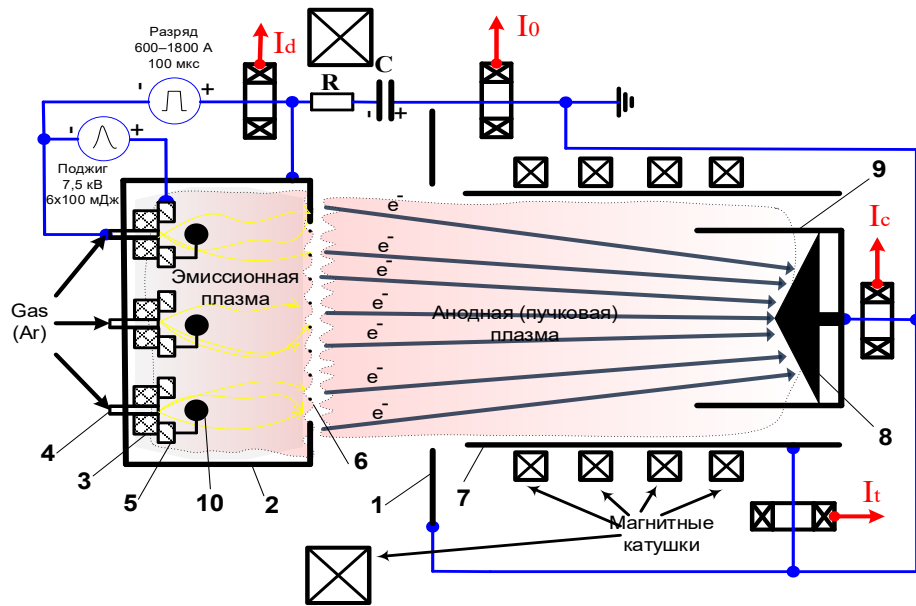


Рисунок 1.13 – Схема источника электронов «Килоампер»: 1 – фланец вакуумной камеры (ускоряющий электрод); 2 – СПК; 3 – изолятор; 4 – катод дугового разряда; 5 – поджигающий электрод; 6 – эмиссионная сетка; 7 – труба дрейфа; 8 – коллектор; 9 – металлический стакан [22]

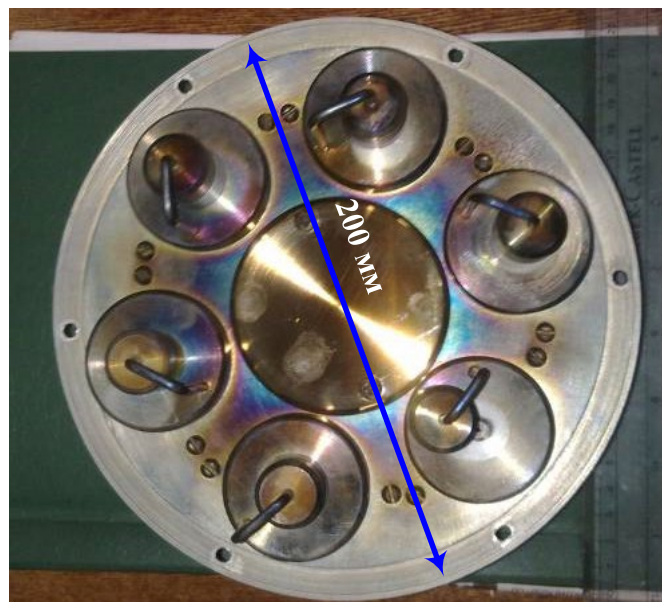


Рисунок 1.14 – Фотография катодного узла источника «Килоампер»

Таким образом, ряд положительных эффектов, которые были достигнуты при работе данного источника легли в основу разработанного, созданного и

исследуемого в диссертации источника электронов с многодуговым СПК с радиально сходящимся электронным пучком, являющегося основным объектом исследования, а используемые технические решения были адаптированы и усовершенствованы для решения задач данной диссертационной работы.

1.5 Традиционные системы электропитания плазменного катода на основе дугового разряда низкого давления

Эффективная работа источников электронов невозможна без надежного источника электропитания плазменного катода, обеспечивающего формирование мощных импульсов с заданными параметрами. В зависимости от требований к длительности, амплитуде и форме импульса тока дугового разряда применяются различные накопительные системы, среди которых наиболее распространены формирующие линии, емкостные и индуктивные накопители [98 – 106].

Формирующие линии (ФЛ) представляют собой специализированные устройства, используемые в импульсной технике для создания импульсов с заданной формой и длительностью, необходимых для работы плазменных эмиттеров. Они широко применяются в системах, где требуется формирование импульсов с высокой амплитудой тока как субмикросекундной, так и субмиллисекундной длительности. Такие ФЛ состоят из коаксиальных линий, кабелей или конденсаторных секций, которые накапливают энергию и высвобождают ее через индуктивность в виде импульса тока при замыкании нагрузки. Основные элементы формирующей линии включают: накопительный элемент (обычно конденсатор или набор конденсаторов), индуктивность и переключатель (например, газовый разрядник или тиристор). Такие ФЛ проектируются с учетом волнового сопротивления, чтобы обеспечить согласование с нагрузкой и минимизировать потери энергии [99, 100].

При активации переключателя (например, искрового разрядника) накопленная энергия передается в нагрузку в виде импульса с определенной

длительностью и формой. Длительность импульса определяется длиной линии и скоростью распространения электромагнитной волны в ней, а амплитуда зависит от накопленной энергии и волнового сопротивления линии. В коаксиальной линии волна распространяется к нагрузке, формируя квазипрямоугольный импульс.

Основные преимущества ФЛ — возможность формировать импульсы с коротким фронтом, воспроизводимость параметров, высокая мощность. Однако их недостатками являются ограниченность в выборе длительности импульса, зависящей от длины линии, невозможность управления длительностью импульса без внесения изменений в конструкцию ФЛ, а также сложность их проектирования. Такие системы находят применение в газоразрядных и лазерных плазменных источниках, где важны стабильность и точное время прихода импульса. Развитие технологий позволило создавать компактные ФЛ на основе ленточных структур с диэлектриками высокой проницаемости, что снижает их габариты без потерь в энергетической эффективности, однако остальные недостатки таких ФЛ сохраняются.

Емкостные накопители [101–103] являются одними из наиболее распространенных источников импульсного электропитания для плазменных эмиттеров, так как обеспечивают простую схему накопления и высвобождения энергии. Конструкция емкостных накопителей включает зарядное устройство, один или несколько высоковольтных конденсаторов, коммутационный элемент (например, тиристор или газовый разрядник) и схему согласования с нагрузкой. Емкостные накопители часто интегрируются с формирующими линиями для улучшения характеристик импульса.

Параметры импульса (амплитуда, длительность) зависят от емкости конденсатора, напряжения заряда и импеданса нагрузки, который чаще всего много меньше токозадающего сопротивления. Например, в спектрометрах емкостной накопитель формирует импульс для возбуждения плазмы, которая затем используется для анализа состава вещества, а в источниках электронных пучков они используются в качестве источников питания.

Главные преимущества емкостных накопителей — высокая энергетическая плотность, простота конструкции и возможность быстрой перезарядки. Однако их недостатками являются относительно низкий КПД, что обусловлено высокими потерями мощности на токозадающих сопротивлениях. Кроме того, такие системы требуют точного расчета параметров конденсаторов и коммутации для предотвращения пробоев и перегрева. Современные технологии позволяют использовать специализированные диэлектрические материалы и улучшенные системы управления для повышения КПД. В системах электропитания емкостные накопители применяются для импульсных лазеров, электродуговых разрядов и ускорителей частиц, где важна высокая амплитуда напряжения и малая длительность разряда. Однако простота и надежность систем электропитания, основанных на использовании емкостных накопителей позволяет реализовать в том числе возможность динамического управления током разряда [104], что сложно реализуемо с использованием других подходов.

Индуктивные накопители [99, 100, 105, 106] используются в системах электропитания, когда требуется генерировать мощные импульсы с высокой прецизионностью, обеспечиваемой высоким внутренним сопротивлением генератора. Основным элементом таких систем является индуктивность (катушка или соленоид), накапливающая энергию в магнитном поле при протекании через нее тока. Передача накопленной энергии в нагрузку осуществляется за счет прерывания первичного контура накопления энергии. Индуктивные накопители позволяют достичь высокой эффективности преобразования энергии, поскольку они менее подвержены потерям, связанным с нагревом и утечками, чем емкостные аналоги. Однако их главный недостаток — необходимость использования мощных коммутирующих элементов, способных выдерживать большие токи и напряжения, что усложняет конструкцию и снижает надежность системы. Индуктивные накопители применяются в различных ускорителях, плазменных пушках и электродинамических системах разряда, где важны стабильность параметров импульса и высокая энергоэффективность. Данный тип источников питания

является «идеальным» источником тока, поэтому динамика нагрузки, например наработка плазмы, и изменение импеданса разрядного промежутка практически не будут влиять на изменение амплитуды тока, что может быть крайне важно в некоторых приложениях.

Каждый из этих типов источников питания обладает своими преимуществами и недостатками. Формирующие линии обеспечивают точную воспроизводимость импульсов с крутым фронтом, но требуют громоздкой конструкции. Емкостные накопители отличаются простотой и высокой энергетической плотностью, однако подвержены потерям на паразитных токозадающих сопротивлениях. В то же время, индуктивные накопители позволяют генерировать мощные импульсы тока при относительно низком напряжении, хотя и требуют сложных и иногда дорогостоящих коммутационных схем.

1.6 Выводы

Приведённый анализ источников электронов демонстрирует конкурентоспособность и несомненное преимущество источников электронов с СПК перед остальными типами источников. Использование в таких источниках мелкоструктурной металлической сетки для стабилизации границы эмиссионной плазмы позволяет не только повысить стабильность генерации электронного пучка с уникальными характеристиками, но и дает возможность независимого управления его основными параметрами (энергия электронов, амплитуда тока пучка, длительность и частота следования импульсов), что особенно важно при проведении поисковых работ по оптимальным режимам электронно-пучковой обработки поверхности различных материалов и изделий с целью изменения ее функциональных и эксплуатационных свойств, что позволяет адаптировать такие источники для решения различных задач. Подобные системы сложно или невозможно реализовать в источниках на других принципах действия.

Таким образом, можно заключить, что источники с СПК имеют относительно простую и надёжную конструкцию, что упрощает их модернизацию для специфических задач, например, для генерации интенсивного радиально сходящегося электронного пучка субмиллисекундной длительности. В этом случае изменение конфигурации пучка легко реализуемо за счет изменения формы СПК в коаксиальные цилиндры, один из которых представляет собой мелкоструктурную металлическую сетку, а достижение больших амплитуд тока сравнительно легко реализуемо за счет использования многодугового разряда низкого давления. В этом случае остается достаточно много вопросов относительно требуемой длины высоковольтного ускоряющего промежутка, позволяющий пропустить электронный пучок с плотностью тока, ограниченной пространственным зарядом пучка, но достаточной для модификации поверхности различных материалов и изделий. Также серьезной научной и инженерной проблемой является одновременное инициирование нескольких плазмогенераторов, количество которых в разных системах может измеряться десятками, что существенно усложняет схемотехнические решения, а, соответственно, снижает их надежность, и требует уделения отдельного внимания при проектировании таких источников электронов.

Использование системы электропитания на основе индуктивных накопителей энергии выглядит как наиболее перспективный путь дальнейшего развития источников электронов с СПК, поскольку обладает рядом неоспоримых преимуществ перед другими системами электропитания, несмотря на наличие в схеме сложного, зачастую дорогостоящего коммутационного элемента. Такие системы обладают высоким внутренним сопротивлением генератора, что позволяет их считать «идеальными генераторами тока» за вычетом потерь на паразитных элементах схемы, которые стремится снизить каждый разработчик, предлагая новые схемотехнические решения и оптимизируя узлы для накопления энергии. Важным свойством таких индуктивных систем также является независимость величины напряжения холостого хода генератора от выходного тока, что позволяет стабильно

генерировать ток дугового разряда в сравнительно широком диапазоне в отличие от емкостных накопителей и ФЛ. Литературный обзор позволил сделать вывод о целесообразности дальнейшего развития систем на основе индуктивных накопителей для разработки систем электропитания плазменных катодов на основе дугового разряда низкого давления.

Таким образом, обзор современного состояния исследований в области разработки и создания источников электронов с СПК и схем их электропитания и управления позволяет сформировать цель настоящего исследования, посвященного разработке и созданию источника электронов с СПК на основе дугового разряда низкого давления, способного генерировать интенсивный радиально сходящийся электронный пучок большого сечения субмиллисекундной длительности, а также сформулировать основные задачи работы:

1. Разработка и создание экспериментального стенда источника электронов с СПК на основе дугового разряда низкого давления, генерирующего интенсивный радиально сходящийся электронный пучок субмиллисекундной длительности.

2. Разработка и создание электродной системы и блоков электропитания СПК на основе многодугового разряда низкого давления.

3. Разработка и создание оригинального диагностического оборудования для проведения коллекторных измерений плотности тока радиально сходящегося пучка.

4. Поиск режимов генерации интенсивного субмиллисекундного радиально сходящегося электронного пучка с плотностью энергии достаточной для модификации поверхности металлических материалов и изделий с удовлетворительной неоднородностью.

5. Демонстрация возможности использования созданного источника электронов с СПК с целью модификации поверхности материалов и изделий цилиндрической формы.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Макет источника электронов с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления

Анализ существующих источников электронов, проведенный в Главе 1, позволил выбрать в качестве основного объекта исследований источник электронов с СПК на основе многодугового разряда низкого давления [22]. Проектирование и модернизация экспериментального стенда позволили изготовить источник, генерирующий интенсивный радиально сходящийся пучок электронов субмиллисекундной длительности (рисунок 2.1).

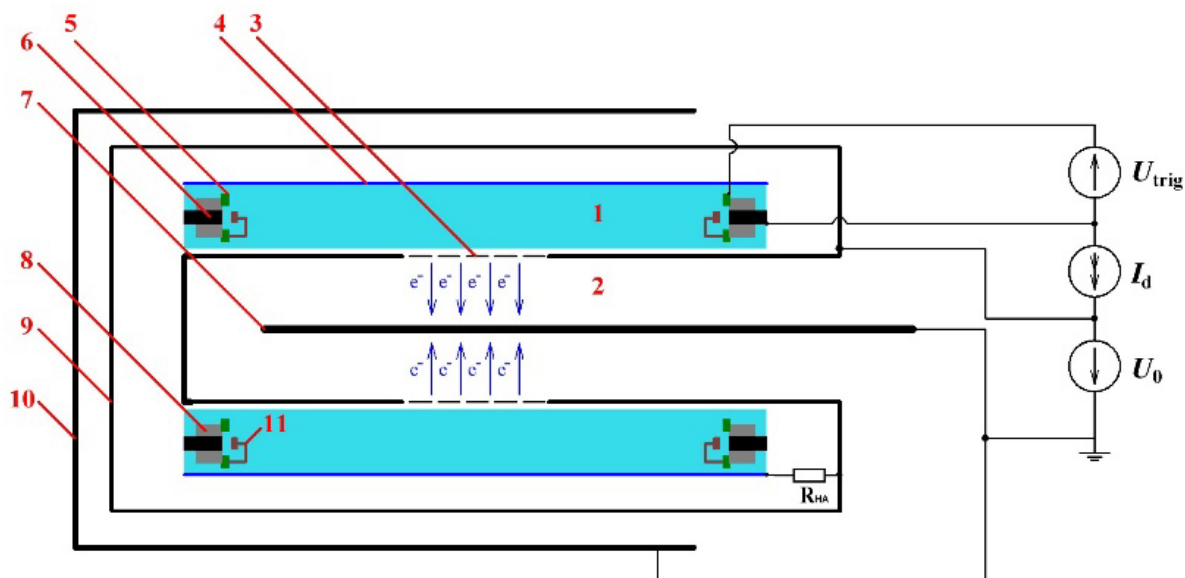


Рисунок 2.1 – Схема источника электронов с СПК: 1 – эмиссионная плазма, 2 – ускоряющий промежуток, 3 – мелкоструктурная эмиссионная сетка, 4 – полый анод, 5 – поджигающий электрод, 6 – катод, 7 – коллектор, 8 – диэлектрик, 9 – корпус плазменного катода, 10 – вакуумная камера, 11 – перераспределяющий электрод

Конструкция источника [107–109] включает в себя вакуумную камеру 10, которая находится под потенциалом «земли», и СПК, который представляет собой коаксиальные цилиндры, выполненные из нержавеющей стали и

имеющие одинаковую длину – 320 мм. Внутренний цилиндр диаметром 220 мм выполняет функцию основного анода и имеет радиально симметричное окно (вырез), перекрытое мелкоструктурной сеткой 3, которая разделяет разрядный 1 и ускоряющий 2 промежутки. Внешний цилиндр диаметром 460 мм выполняет функцию вспомогательного полого анода 4, который подключен через сопротивление R_{ha} к основному аноду для переключения основного тока дугового разряда в область эмиссионной сетки и повышения, тем самым, эффективности извлечения электронов из плазменного катода в ускоряющий промежуток. Через ячейки мелкоструктурной сетки 3, размеры которой составляли $0,14 \times 0,14$ мм или $0,4 \times 0,4$ мм, осуществляется отбор электронов. Для проведения исследований предельных режимов генерации радиально сходящегося электронного пучка ширина эмиссионного окна варьировалась в диапазоне 5–15 см.

При создании плазмогенераторов было отдано предпочтение дуговому разряду открытого типа (без контрагирования) с иницированием катодного пятна пробоем по поверхности диэлектрика [110–112]. Выбор дуги открытого типа обусловлен простой и надежной конструкцией [95], а также слабой зависимостью параметров разряда от напуска рабочего газа по сравнению с контрагированным дуговым разрядом, который при большой длительности импульса (уровня сотен микросекунд) или амплитуде тока дугового разряда (уровня сотен ампер) может приводить к обрывам тока разряда при нехватке рабочего газа в канале контрагирования. Для обеспечения требуемой однородности распределения концентрации эмиссионной плазмы как в аксиальном, так и азимутальном направлениях, удовлетворяющей требованиям, которые предъявляются к однородности генерируемых электронных пучков, на торцах эмиттера было размещено 6 плазмогенераторов (по 3 с каждой стороны) разнесенные по азимуту на угол 60 градусов относительно друг друга. При использовании семижильного высоковольтного кабеля КПВ-300 шесть его жил подключены к катодам 6 и один к аноду 3, роль которого выполняет эмиссионная сетка и внутренняя стенка плазменного катода. В качестве

рабочего газа использовался аргон вследствие его сравнительно большого сечения ионизации. Для равномерной подачи аргона в СПК организована распределённая система подачи газа, в которой все катоды имеют аксиальное отверстие 1 мм, через которое осуществляется напуск газа по трубкам одинаковой длины. Вследствие ограниченного количества токоведущих жил в высоковольтном кабеле КПВ-300, подача импульса поджига на каждый плазмогенератор происходит через катодные провода и общий анод разряда с помощью источника U_{trig} , а поддержание тока разряда обеспечивается источником I_d . При этом каждый поджигающий электрод 5 подключен к аноду 3 через сопротивление 15 Ом. Таким образом, сначала генерируется высоковольтный импульс поджига, происходит пробой по поверхности диэлектрика 8, инициирующий катодное пятно на поверхности катода 6, что способствует последующему зажиганию дугового разряда с длительностью импульса, которая задается системой электропитания СПК. Для диффузного горения дуги напротив каждого катода устанавливается перераспределяющий электрод 11, электрически соединенный с поджигающим электродом 5. Отбор электронов из эмиссионной плазмы и их ускорение до коллектора осуществляются через ячейки эмиссионной сетки под действием постоянного ускоряющего напряжения величиной до 50 кВ, приложенного между СПК и коллектором 7.

Учитывая, что планируемый диаметр обрабатываемых изделий не превышает ~30 мм, расстояние от оси коллектора 7 (изделия) до эмиссионной сетки 3 составило 11 см, удовлетворяющее требованиям по электрической прочности по кривым Пашена [4, 113] и вакуумного пробоя при ускоряющем напряжении до 50 кВ [63]. Расстояние от вакуумной камеры до внешней стенки СПК равно 7 см, также подобрано с учётом обеспечения электрической прочности высоковольтных зазоров для описанных газовых условий генерации электронного пучка [114]. Для соединения с высоковольтным кабелем используется специально сконструированный капролоновый разъём, расположенный на торце СПК, который помимо электрического соединения

источника питания с плазмогенераторами, обеспечивает распределение напуска рабочего газа по всем катодам.

Внешний вид источника электронов представлен на рисунке 2.2. Принципиальная схема, а также расположение плазмогенераторов приведены на рисунке 2.3. Внешний вид сеточного плазменного катода представлен на рисунке 2.4.

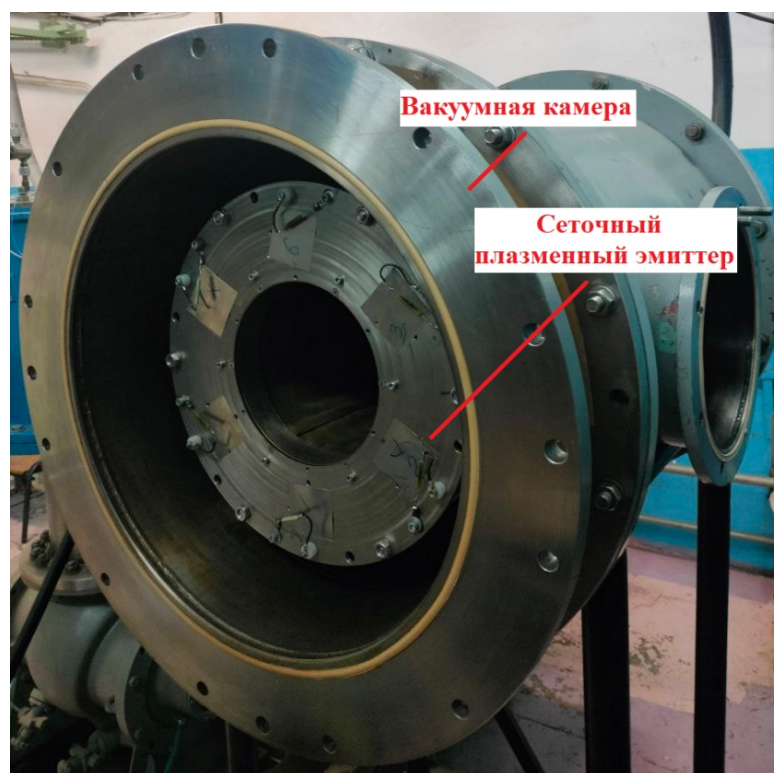
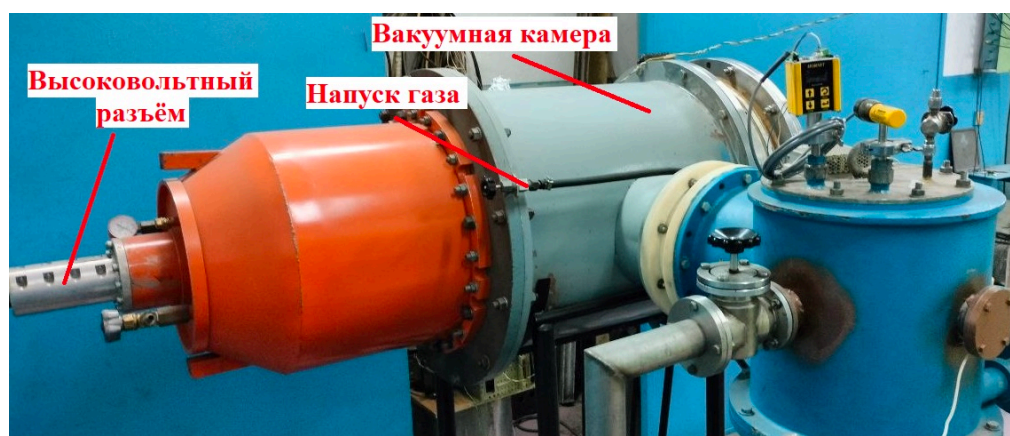


Рисунок 2.2 – Фотографии исследуемого источника электронов с СПК

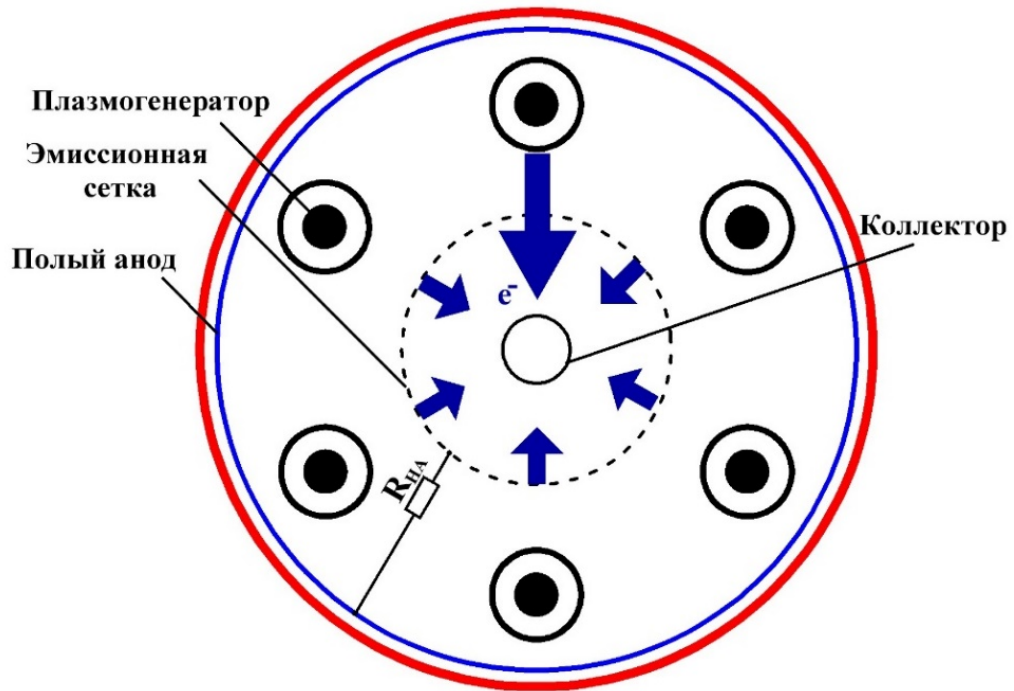


Рисунок 2.3 – Принципиальная схема источника электронов

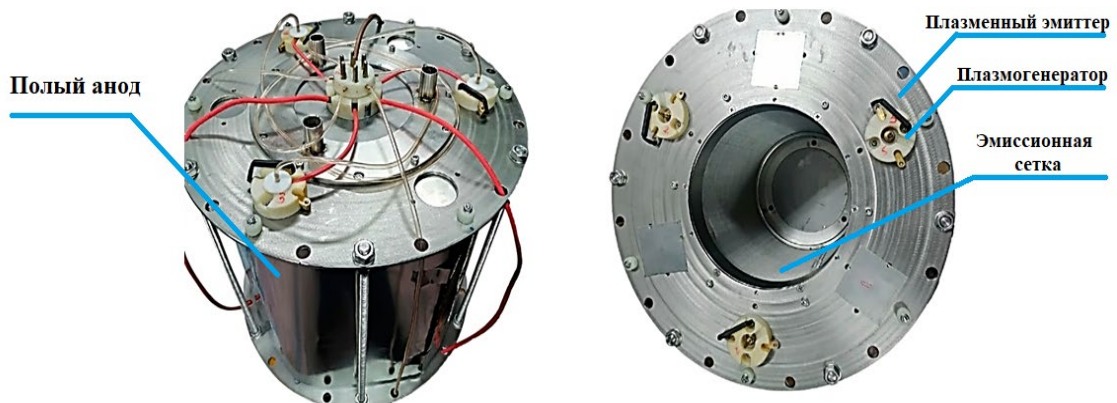


Рисунок 2.4 – Внешний вид плазменного катода

Насосная группа вакуумной откачки состоит из турбомолекулярного насоса ТМН-500 и пластинчато-роторного форвакуумного насоса 2НВР-60Д. Предельное давление в вакуумной камере составляет 6×10^{-3} Па. Рабочий диапазон давлений газа определяется двумя противоречивыми условиями, а именно: с одной стороны, давление газа должно быть достаточным для стабильного инициирования и горения многодугового разряда, а с другой стороны, давление газа должно обеспечивать удовлетворительную

электрическую прочность высоковольтного ускоряющего зазора в левой ветви кривой Пашена [114]. Для удовлетворения двум этим требованиям в качестве рабочего газа выбран аргон, а диапазон давлений составляет (20÷80) мПа.

Стоит отметить, что все эксперименты проводились после «тренировки» системы, которая заключается в постепенном выходе на требуемый режим генерации электронного пучка с постепенным увеличением ускоряющего напряжения и амплитуды тока разряда. «Тренировка» в данной системе, занимающая чаще всего не более 10 минут, является необходимым условием для обеспечения корректности и сопоставимости экспериментальных данных в экспериментах по генерации радиально сходящегося электронного пучка. Количество импульсов было выбрано равным 100.

2.2. Системы электропитания и управления

2.2.1. Высоковольтная система электропитания

Постоянное высокое ускоряющее напряжение поддерживается высоковольтной конденсаторной батареей ($C=6$ мкФ), которая заряжается от каскадного генератора, представляющего собой высоковольтный трансформатор и выпрямитель, собранный по схеме учетверения напряжения. Трёхфазный регулятор, включенный на стороне «земли», позволяет плавно регулировать входное напряжение каскадного генератора. Это управление осуществляется подачей меандра с частотой 50 Гц на вход каскадного генератора амплитудой 10÷100 В. Регулятор напряжения, выполненный по мостовой инверторной схеме, дистанционно управляется из пультовой комнаты. Регулировка высокого напряжения происходит путём задания уставки напряжения, прикладываемого к первичной обмотке высоковольтного трансформатора. Для подвода питания к плазменному катоду от высоковольтной конденсаторной батареи использовался высоковольтный семижильный кабель марки КПВ–300. Кабель, как и проходной высоковольтный изолятор, помещён в герметичный металлический сосуд,

наполненный газообразным азотом до давления $p = 3$ атм. Это позволяет обеспечить электрическую прочность и осуществлять подачу постоянного высокого напряжения до 100 кВ без пробоев. Внешний вид высоковольтной системы электропитания представлен на рисунке 2.5.



а



б

Рисунок 2.5 – Высоковольтная система электропитания: *а* – высоковольтная конденсаторная батарея, *б* – каскадный генератор

2.2.2. Система электропитания СПК

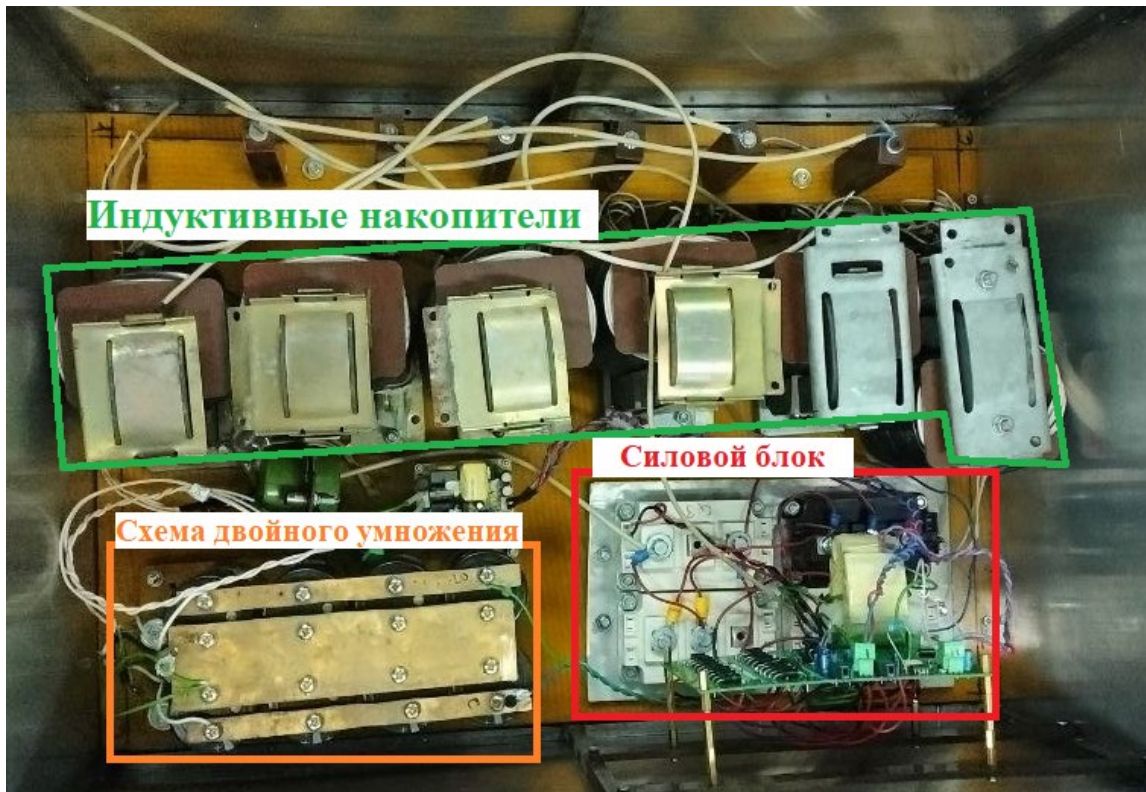
На основании обзора литературы по источникам электропитания плазменных катодов на основе дугового разряда (см. параграф 1.5), в ходе которого были выделены основные преимущества систем с индуктивными накопителями энергии, был рассчитан, спроектирован и создан источник электропитания СПК для питания шести плазмогенераторов за счет

использования шести индуктивных накопителей. Внешний вид (а) и принципиальная схема источника электропитания (б) приведены на рисунке 2.6.

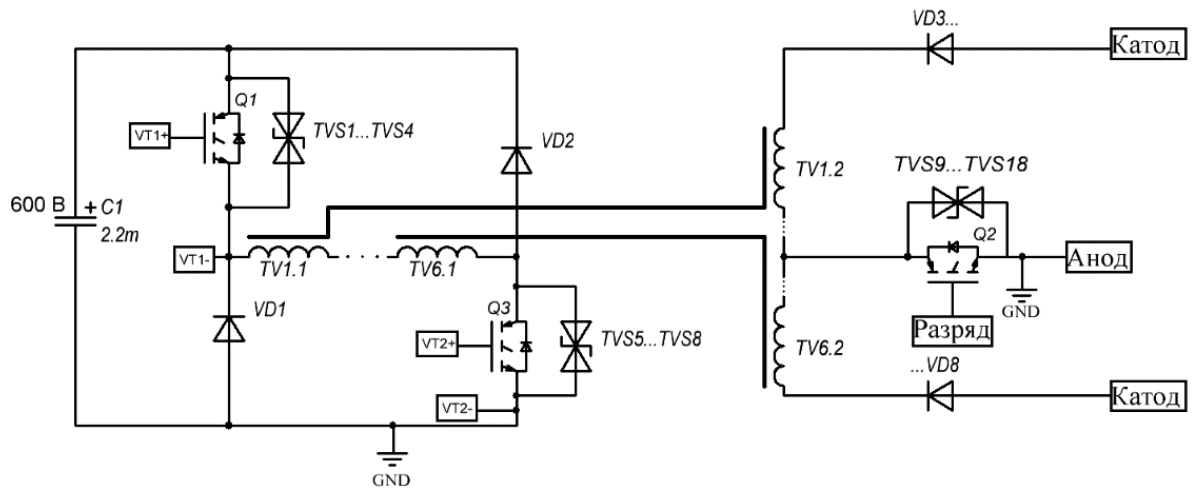
Источник электропитания СПК состоит из двух основных блоков: блока управления и силового блока, включающего в себя источник питания поджига и источник питания дугового разряда. Источник питания поджига работает в режиме длительного ожидания (с заряженными конденсаторами), аккумулируя энергию в конденсаторной батарее и находясь в состоянии постоянной готовности к выдаче выходного импульса при поступлении внешнего сигнала управления. Режим работы: повторно кратковременный с формированием импульса с заданными параметрами (амплитуда и длительность). Источник предназначен для питания многодугового разряда с напряжением горения до 150 В и током до 250 А. В условиях стабильного срабатывания всех плазмогенераторов источник питания СПК формирует выходной импульс с напряжением холостого хода 600 ± 30 В на каждой вторичной обмотке двухобмоточных дросселей. Длительность фронта импульса тока многодугового разряда до 10 мкс, среза – до 10 мкс, длительность импульса – от 10 до 500 мкс. Блок поджига обеспечивает инициирование катодных пятен на поверхности шести катодов пробоем по поверхности диэлектрика с разбросом времени срабатывания не хуже 5 мкс (первого относительно последнего катода). Связь блока управления с источником питания многодугового разряда осуществляется через оптоволоконные каналы связи.

Эмиссионную плазму генерируют шесть плазмогенераторов, ток каждого из которых обеспечивает соответствующий двухобмоточный индуктивный накопитель (TV1 ... TV6). Электропитание схемы реализовано с помощью первичного накопителя – конденсаторной батареи С1, на которую подается выпрямленное сетевое напряжение 220 В через схему двойного умножения напряжения для ее зарядки до 600 В. Вторичными накопителями энергии являются двухобмоточные дроссели TV1 ... TV6. Первичные обмотки дросселей имеют одинаковую индуктивность $L_{перв} = 0,7$ Гн и соединены

последовательно, поэтому на каждой первичной обмотке падение напряжения составляет около 100 В.



a



б

Рисунок 2.6 – Система электропитания СПК: *a* – внешний вид, *б* – принципиальная схема

При подаче управляющих импульсов на затворы ключевых элементов Q1 и Q3 и их переходе в открытое состояние, через первичные обмотки дросселей начинает протекать ток, и энергия из конденсаторной батареи C1 начинает запасаться в магнитном поле дросселей TV1 ... TV6. При переходе ключевых элементов Q1 и Q3 в закрытое состояние полярность напряжения на вторичных обмотках дросселей меняется на противоположную. В этот же момент поступает высоковольтный поджигающий импульс тока разряда амплитудой до 10 кВ, и на поверхности катодов инициируются катодные пятна, а схема начинает работать в фазе передачи энергии в нагрузку. Посредством магнитной индукции осуществляется трансформация энергии из первичной обмотки дросселя во вторичную обмотку с коэффициентом трансформации, равным шести. В результате, минимальное выходное напряжение на вторичных обмотках дросселей достигает 600 В и не зависит от требуемой величины тока разряда. В момент закрытия ключевых элементов Q1 и Q3 ключевой элемент Q2 уже находится в открытом состоянии, и при смене полярности напряжения на вторичных обмотках дросселя через них начинает протекать ток. Напряжение вторичных обмоток дросселей прикладывается к соответствующему разрядному промежутку (катод – анод). В случае, если дуговой разряд загорелся хотя бы на одном из плазмогенераторов, происходит уменьшение падения напряжения как на вторичной, так и на первичной обмотке соответствующего дросселя. Таким образом, напряжение, прикладываемое в первичном контуре к такому дросселю, уменьшается, а оставшееся напряжение (100 В минус падение напряжения на дросселе после зажигания разряда) равномерно распределяется между остальными 5-ю плазмогенераторами, ввиду последовательного соединения их первичных контуров. Такое перераспределение приводит к тому, что напряжение во вторичных обмотках оставшихся дросселей увеличивается (то есть на тех плазмогенераторах, на которых еще не загорелся разряд). Таким образом, чем больше плазмогенераторов сработало, тем большее напряжение холостого хода прикладывается к соответствующему промежутку «катод-анод», разряд в котором не загорелся. В случае, если по какой-то причине дуговой

разряд не загорелся, происходит рекуперация запасенной энергии дросселя в первичный контур через разрядные диоды VD1 и VD2. В результате, помимо обеспечения независимости выходного напряжения холостого хода от тока дугового разряда, последовательное включение первичных обмоток дросселей позволяет обеспечить выходное напряжение от 600 В до 3500 В, повышая стабильность срабатывания плазмогенераторов и позволяя минимизировать разброс их времени срабатывания, который в разработанной и созданной схеме составлял не более 15 мкс.

2.3. Зондовые измерения параметров плазмы дугового разряда низкого давления

Измерение параметров плазмы дугового разряда осуществлялось с помощью оригинальной автоматизированной системы зондовых измерений [115]. Созданная и используемая в эксперименте система измерения зондовых характеристик позволяет обеспечить статистическую достоверность проводимых экспериментов, а также проводить измерения в различные моменты генерации разряда, что даёт возможность оценить скорость наработки и распространения плазмы в объёме СПК. Система регистрирует мгновенное значение тока зонда и смещения на нём и способна в автоматическом режиме получать график зависимости тока зонда от потенциала смещения на зонде. Для измерения параметров плазмы использовался одиночный цилиндрический зонд Ленгмюра длиной 5 мм и диаметром 0,5 мм, приведенный на рисунке 2.7

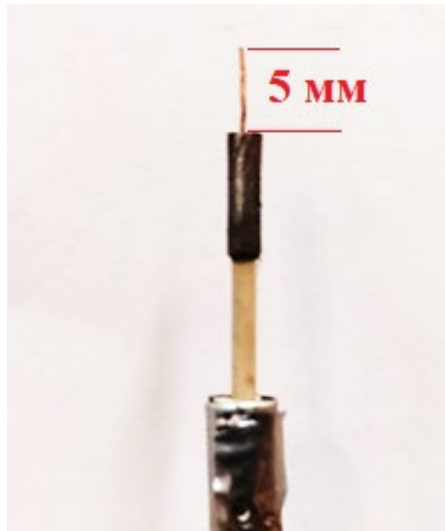


Рисунок 2.7 – Фотография зонда Ленгмюра

Блок-схема зондовой системы измерения представлена на рисунке 2.8 и состоит из трёх блоков: формирователь синхроимпульсов, микроконтроллер и измерительный блок.



Рисунок 2.8 – Блок-схема зондовой системы измерения параметров плазмы

Формирователь синхроимпульсов обеспечивает синхронизацию момента начала измерения относительно импульсов тока разряда при его генерации. Измерительный блок включает в себя аналого-цифровой преобразователь, а

также делитель напряжения для измерения напряжения смещения. Для измерения тока зонда используется шунтирующий резистор с сопротивлением $R = 51 \text{ Ом}$.

Микроконтроллер ATmega2560, установленный на отладочной плате Arduino Mega 2560 R3, применяется для передачи и хранения данных. Система позволяет записывать в память до 100 измерений за один цикл. При превышении этого количества данные передаются на компьютер через интерфейс RS-232 с использованием оптической связи. Передача продолжается, пока число измерений не достигнет установленного значения. Полученные данные обрабатываются, и в окне работы программы отображается зондовая характеристика. Ключевым преимуществом системы является возможность настройки времени задержки измерения относительно фронта импульса тока разряда. Это позволяет измерять параметры эмиссионной плазмы в определённый момент импульса, отслеживая её динамику. За один импульс разряда система фиксирует одну точку вольт-амперной характеристики (ВАХ) зонда. При частоте источника питания 1 Гц получение ВАХ занимает несколько минут с учётом времени передачи данных. Схема измерения зондовых характеристик показана на рисунке 2.9.

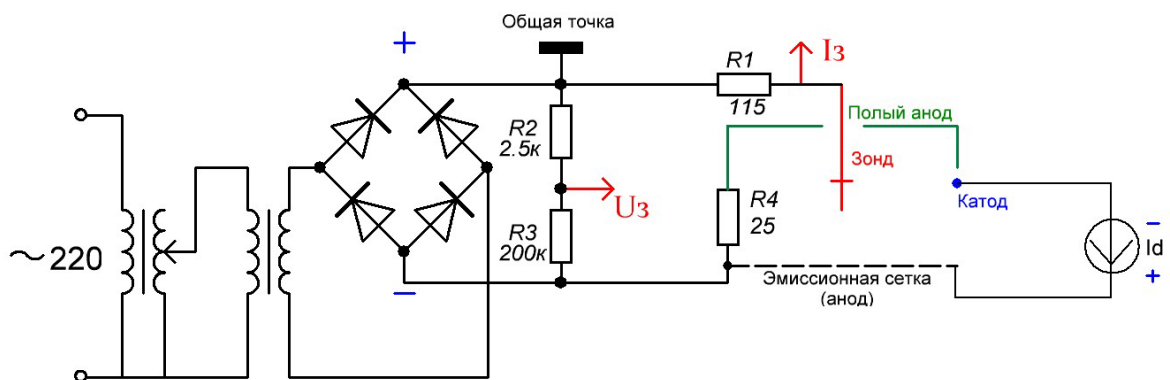


Рисунок 2.9 – Схема измерения зондовой характеристики дугового разряда

Зондовые характеристики измерялись относительно анода дугового разряда, площадь которого на два порядка превышала суммарную площадь всех

катодов, чтобы свести к минимуму искажения в генерируемой плазме. Для измерения параметров плазмы использовалась исключительно электронная ветвь зондовой характеристики, которая позволяет определить локальные параметры плазмы: потенциал, температуру и концентрацию электронов. Напряжение смещения в виде выпрямленной синусоиды с амплитудой 210 В подавалось на зонд через разделительный трансформатор от лабораторного автотрансформатора. Система измерения была гальванически изолирована от общей сети питания. Измерения напряжения смещения и тока зонда проводились относительно «земли» системы измерения в отсутствие ускоряющего напряжения.

Пример получаемых зондовых характеристик при токе разряда $I_d = 120$ А и давлении рабочего газа $p = 5 \times 10^{-2}$ Па приведён на рисунке 2.10.

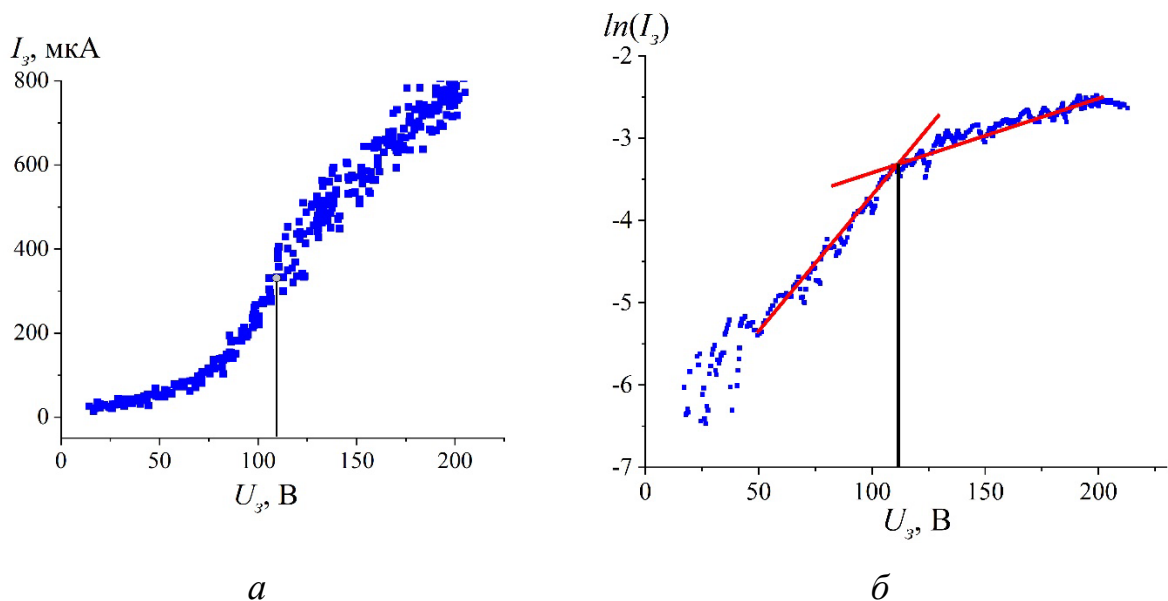


Рисунок 2.10 – Зондовые характеристики: *а* – ВАХ зонда при токе разряда 120 А; *б* – логарифм тока зонда от напряжения смещения

По логарифмической зависимости тока зонда от напряжения смещения (рисунок 2.10) определялись потенциал плазмы и температура электронов. В точке потенциала плазмы, который определяется через зависимость тока зонда от напряжения, определяется электронный ток насыщения. Логарифм электронного тока от потенциала зонда является линейным вплоть до точки,

которая определяет потенциал плазмы. Пересечение касательной к линейному нарастанию логарифма тока и касательной к значениям в области насыщения тока соответствует потенциалу плазмы дугового разряда. В случае, представленном на рисунке 2.10, потенциал плазмы равен 110 В относительно анода разряда.

Основные параметры плазмы вычисляются эмпирически. По наклону прямолинейной зависимости $\ln I_3(U_3)$ вычисляется температура электронов:

$$T_e = \frac{d(U_3)}{d(\ln I_3)} \quad (2.1)$$

Средняя скорость электронов рассчитывается по формуле:

$$v_e = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi \times m_e}} \quad (2.2)$$

Концентрация электронов в плазме определяется по току насыщения, скорости электронов и площади зонда:

$$n_e = \frac{4 I_{н.е}}{e v_e S_3} \quad (2.3)$$

Для случая, представленного на рисунке 2.10, концентрация плазмы составляет $4,7 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$, а температура электронов достигает 40 эВ.

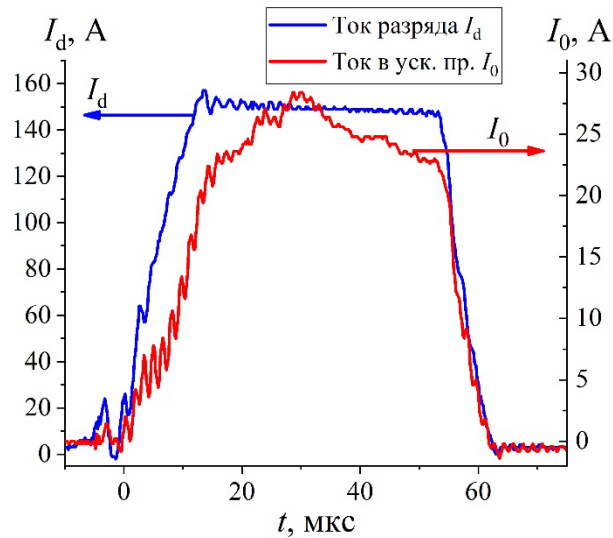
2.4. Система коллекторных измерений азимутального распределения плотности тока электронного пучка

Измерения азимутального распределения плотности тока пучка производились при помощи коллекторного метода. Для этого был создан секционированный коллектор (рисунок 2.11) из нержавеющей стали, который представляет собой трубку, на конце которой через керамическую вставку закреплены четыре пластины из нержавеющей стали, изолированные друг от друга.

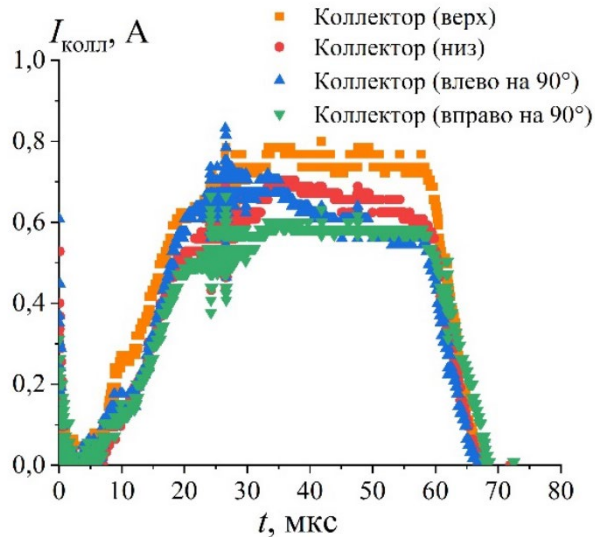


Рисунок 2.11 – Секционированный коллектор для радиально сходящегося электронного пучка

Размер каждой пластины составлял 1×1 см. Для изоляции секций от основного держателя (стержня) использовалась керамическая вставка, выбранная за её высокую термостойкость и минимальную дегазацию в вакууме. Однако в ходе экспериментов было обнаружено замыкание части пучка на керамику, что приводило к накоплению на ней заряда, её распылению, искажению условий генерации пучка, снижению электрической прочности ускоряющего промежутка и риску пробоев, ухудшающих работу источника. Чтобы устранить накопление заряда, поверх керамики установили фольговый экран, который не допускал попадание пучка на неё. Каждая секция коллектора была подключена к потенциалу “земли” через провод, помещённый внутрь защитной трубки, чтобы избежать попадания на него электронного пучка. Ток на каждом коллекторе регистрировался с помощью пояса Роговского с чувствительностью 4 А/В. В экспериментах секционированный коллектор помещался в центр эмиссионной области равноудалённо от эмиссионной сетки. Типичные осциллограммы тока в ускоряющем промежутке и на секциях секционированного коллектора представлены на рисунке 2.12 (а) и (б) соответственно.



а



б

Рисунок 2.12 – Типичные осциллограммы тока на секционированном коллекторе. Параметры пучка: $I_d = 150\text{A}$, $t = 60\text{ мкс}$, $U_0 = 50\text{ кВ}$.

2.5. Выводы

1. Создан макет источника электронов с СПК на основе многодугового разряда низкого давления, способный генерировать радиально сходящийся электронный пучок с энергией до 50 кэВ, током до 150 А и длительностью импульса до 500 мкс.

2. Разработан и создан источник электропитания СПК на основе двухобмоточных индуктивных накопителей энергии, который позволяет стабильно генерировать многодуговой разряд с максимальной амплитудой до 250 А, длительностью импульса до 500 мкс и частотой следования импульсов до 5 с^{-1} .

3. Апробированы методы диагностики параметров эмиссионной плазмы дугового разряда и распределения плотности тока радиально сходящегося электронного пучка, позволяющие получить дополнительную информацию о параметрах плазмы дугового разряда и распределении плотности тока генерируемого электронного пучка, используя автоматизированные системы измерения, осциллографические измерения и визуальные наблюдения при работе источника электронов с радиально сходящимся электронным пучком.

ГЛАВА 3. ГЕНЕРАЦИЯ ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ ДУГОВЫМ РАЗРЯДОМ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

3.1. Зажигание и горение многодугового разряда низкого давления

Принцип работы и основные особенности источника электропитания СПК на основе индуктивных накопителей энергии были представлены в Главе 2 в Разделе 2.2.2. На рисунке 3.1 представлены осциллограммы работы такого источника в режиме накопления энергии в магнитном поле дросселей и ее передачи в нагрузку, которой является дуговой разряд низкого давления. На представленном рисунке кривая 1 демонстрирует напряжение на первичной обмотке индуктивного накопителя (50 В/дел.). Кривая 2 соответствует току (10 А/дел.), который протекает в первичном контуре индуктивных накопителей (первичные обмотки дросселей) через ключи Q1 и Q3 и позволяет накопить энергию в магнитном поле каждого дросселя. Кривая 3 соответствует общему току дугового разряда, который протекает между всеми шестью плазмогенераторами и общим анодом через ключ Q2 (5 А/дел.), отключение которого приводит к трансформации тока нагрузки в первичный контур и рекуперации энергии в первичный накопитель энергии C1 через диоды VD1 и VD2 (рисунок 2.6б). Такой электротехнический подход обеспечивает повышение КПД системы за счёт частичной рекуперации энергии дросселей обратно в источник питания. При запасённой энергии 88 Дж, в нагрузку (дуговой разряд) передаётся 13 Дж (15 %), а 56 Дж (63 %) возвращается в систему в виде рекуперированной энергии. Таким образом, КПД источника $\approx 78\%$, при потерях около 22 %, обусловленных активными сопротивлениями и коммутационными процессами. Полученные значения подтверждают достаточно высокую эффективность схемы и перспективность её применения в системах электропитания плазменных источников электронов.

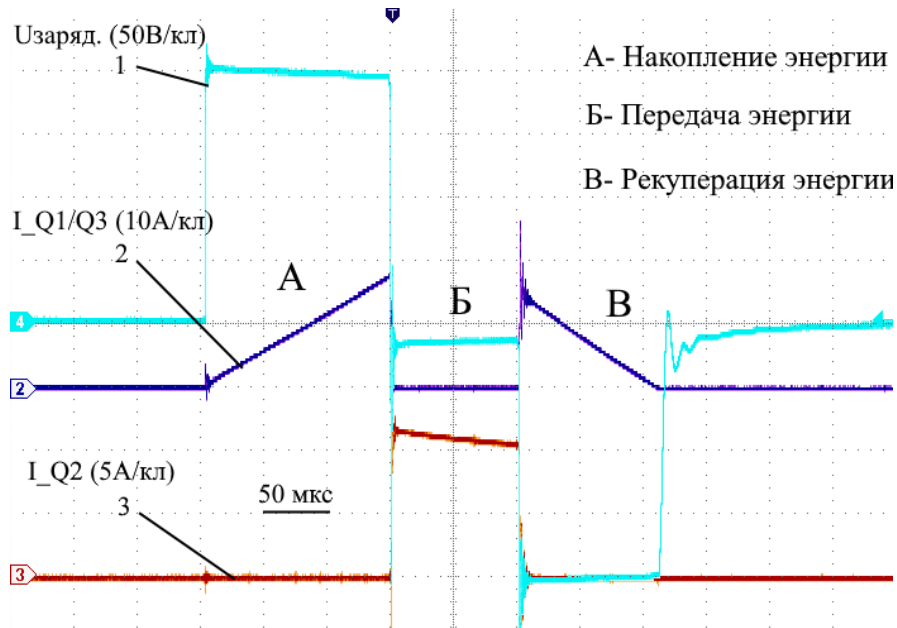


Рисунок 3.1 – Осциллограммы работы источника электропитания СПК: кривая 1 – напряжение на первичной обмотке индуктивного накопителя, кривая 2 – ток первичной обмотки дросселей (ток через Q1/Q3), кривая 3 – общий ток дугового разряда

Вольт-амперная характеристика дугового разряда определялась путем измерения напряжения разряда между одним из катодов и общим полым анодом с помощью высоковольтного щупа АКТАКОМ АСА-0639 с внутренним резистивным делителем 1:1000, а ток разряда регистрировался поясом Роговского с чувствительностью 50 А/В. Полученные ВАХ для различного давления рабочего газа (аргона) представлены на рисунке 3.2.

Полученные ВАХ являются растущими, что может быть обусловлено тем, что генерация эмиссионной плазмы осуществляется в газовых условиях, которые влияют на ионно-электронные процессы в полом аноде СПК. В этом случае для увеличения тока разряда необходимо совершать бóльшую работу для наработки плазмы полого анода, что выражается в необходимости увеличения скорости ионизации и связанным с этим ростом потенциала эмиссионной плазмы. При повышении давления рабочего газа наблюдается снижение напряжения горения разряда, что связано с увеличением количества актов ионизации в объёме и повышением концентрации эмиссионной плазмы. К

примеру, при токе разряда $I_d = 140$ А и повышении давления газа с 20 мПа до 80 мПа напряжение горения разряда уменьшается на ~ 20 В. Такой нелинейный характер изменения напряжения дугового разряда с выходом кривых в область насыщения может быть обусловлен изменением других условий генерации дугового разряда, а именно: изменением рода катодного пятна (от первого до третьего рода) [116], заполнением плазмой большего объема плазменного катода (увеличением эффективной площади полого анода) [76] и др.

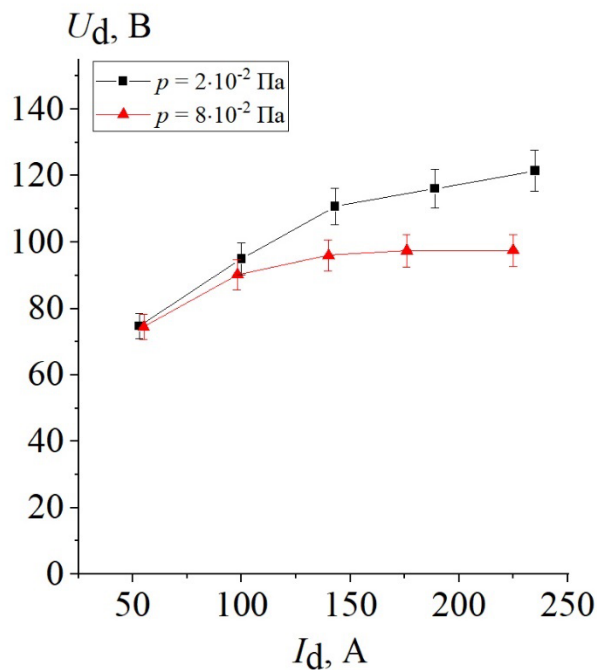


Рисунок 3.2 – ВАХ дугового разряда низкого давления при разных давлениях рабочего газа

3.2. Параметры плазмы дугового разряда

После определения ВАХ разряда были проведены эксперименты по измерению параметров плазмы, генерируемой дуговым разрядом низкого давления. Положение зонда Ленгмюра при проведении зондовых измерений схематично представлено на рисунке 3.3.

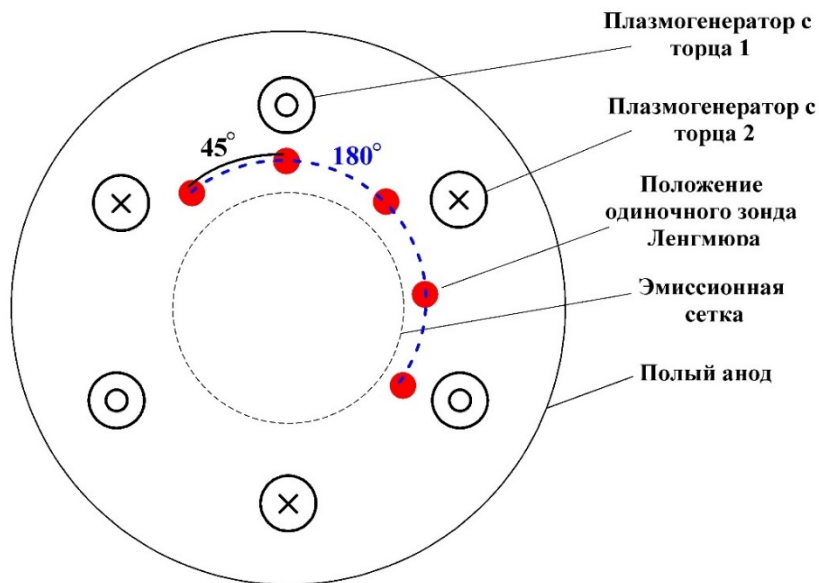
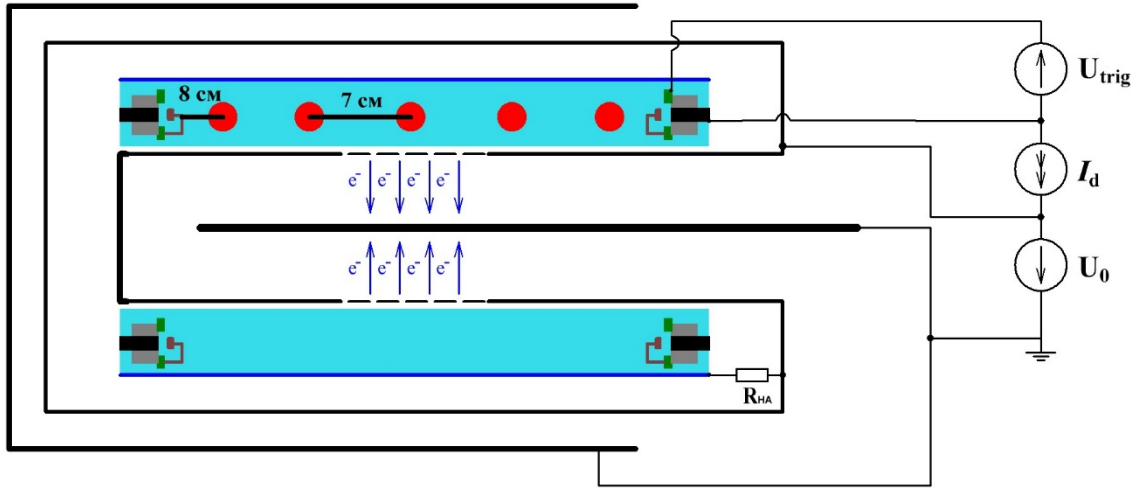


Рисунок 3.3 – Положения одиночного зонда Ленгмюра при проведении экспериментов по измерению параметров плазмы (рисунок не в масштабе)

Измерение параметров плазмы (рисунок 3.4) при различных токах дугового разряда (рисунок 3.4а, рисунок 3.5а), давлениях рабочего газа (рисунок 3.4б) и в различные моменты измерения в течение импульса тока разряда длительностью 100 мкс (рисунок 3.4с, рисунок 3.5б) проводилось в сечении СПК, проходящем через середину эмиссионной щели.

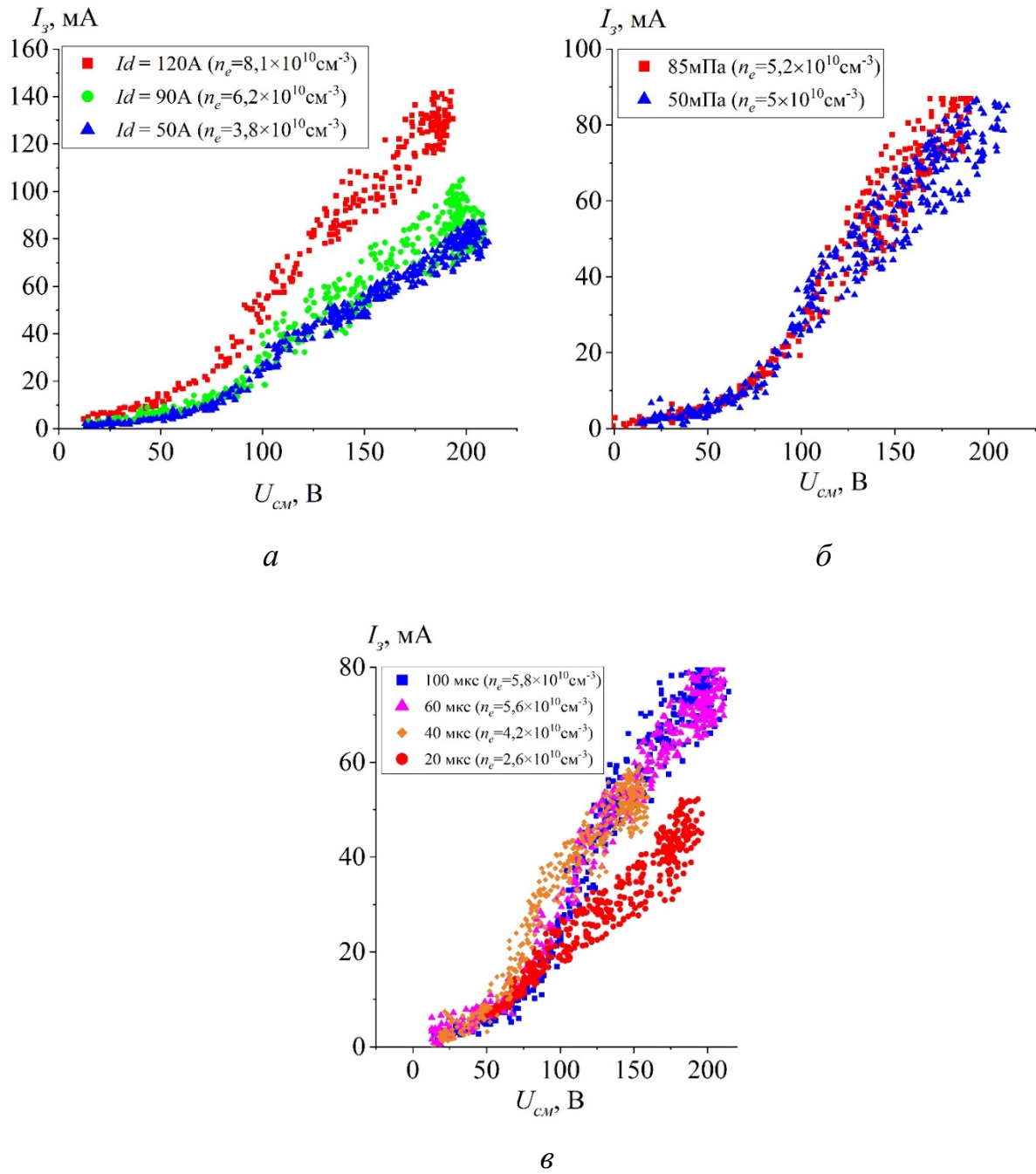


Рисунок 3.4 – Результаты зондовых измерений параметров плазмы дугового разряда в центре эмиссионной области при различных: *a* – токах разряда ($p = 5 \times 10^{-2}$ Па), *б* – давлениях рабочего газа ($I_d = 70$ А), *в* – моментах измерения в течение импульса тока разряда ($I_d = 80$ А, $p = 5 \times 10^{-2}$ Па).

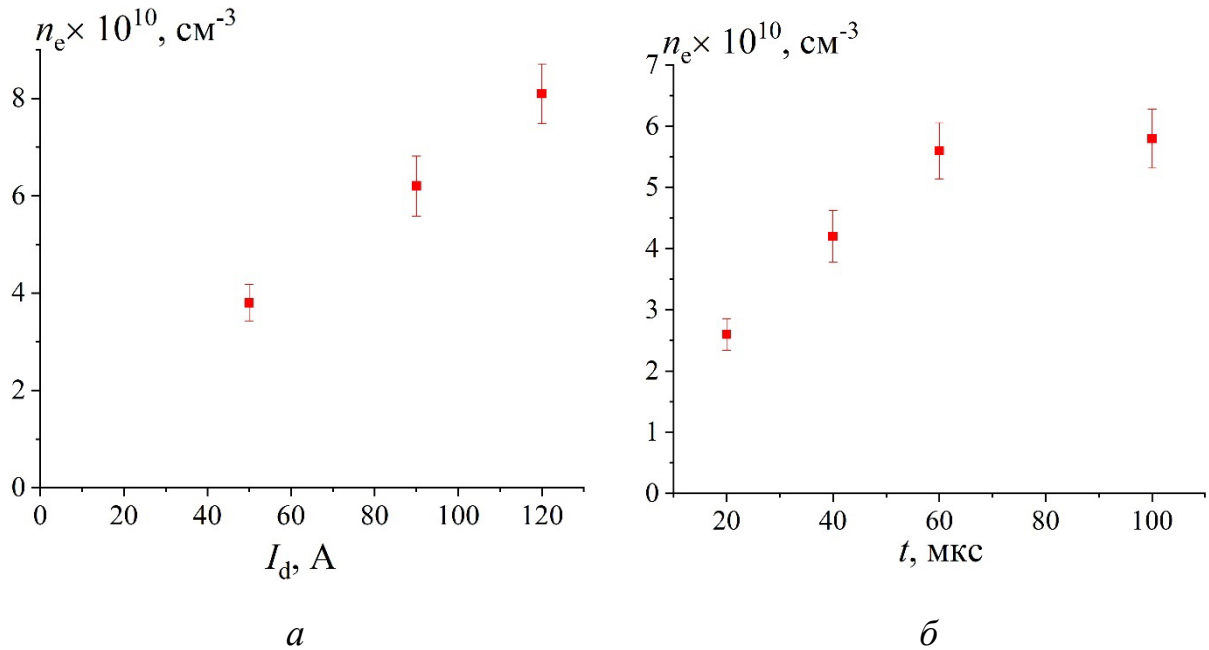


Рисунок 3.5 – Зависимость концентрации плазмы дугового разряда в сечении СПК, проходящим через середину эмиссионного окна при различных: *а* – токах разряда ($p = 5 \times 10^{-2}$ Па), *б* – моментах измерения в течение импульса тока разряда ($I_d = 80$ А, $p = 5 \times 10^{-2}$ Па).

Повышение тока дугового разряда приводит к росту концентрации плазмы во всем рабочем диапазоне давлений. Так, например, при $p = 5 \times 10^{-2}$ Па, увеличение тока разряда с 50 А до 120 А приводит к пропорциональному росту концентрации плазмы n_e с $3,8 \times 10^{10}$ до $8,1 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$, что обусловлено увеличением эмиссии электронов с катодов многодугового разряда, приводящей к росту частоты ионизаций в пространстве СПК.

Изменение давления рабочего газа (рисунок 3.4б) с $p = 5 \times 10^{-2}$ Па до $p = 8,5 \times 10^{-2}$ Па не оказывает существенного влияния на концентрацию плазмы дугового разряда. На рисунке 3.4в представлена зондовая характеристика дугового разряда, снятая в различные моменты времени его импульса. Представленные зависимости демонстрируют развитие плазмы дугового разряда в объёме и заметный рост концентрации электронов в плазме дугового разряда до длительности импульса разряда $t=60$ мкс, после чего рост становится незначительным, что связано с расширением плазмы и заполнением ею объёма

СПК. При этом в течение импульса наблюдается уменьшение ширины присеточного слоя (рисунок 3.6) из-за роста концентрации эмиссионной плазмы, её наработки и расширения.

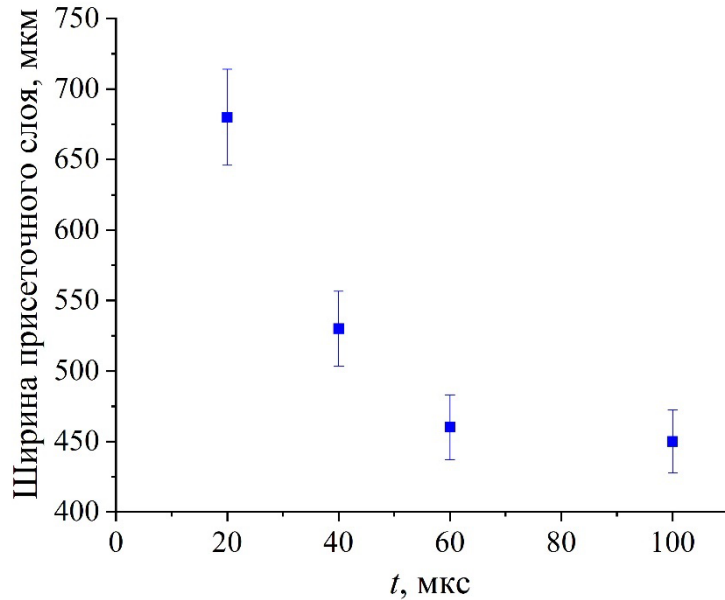


Рисунок 3.6 – Зависимость ширины присеточного слоя от времени в различные моменты импульса: $I_d = 80$ А, $t = 100$ мкс, $p = 5 \times 10^{-2}$ Па

На рисунке 3.7 и рисунке 3.8 представлены графики аксиального и азимутального распределения концентрации эмиссионной плазмы, построенные на основе полученных зондовых характеристик.

Таким образом, азимутальная неоднородность эмиссионной плазмы, которая рассчитывается по формуле 3.1, составила $\approx 10\%$, а аксиальная – $\approx 40\%$.

$$N = \pm \left| \frac{N_{\text{макс}} - N_{\text{ср}}}{N_{\text{ср}}} \right| \times 100\%, \quad (3.1)$$

где N – неоднородность плотности тока пучка, $N_{\text{макс}}$ – максимальное отклонение от среднего значения, $N_{\text{ср}}$ – среднее значение

Стоит отметить, что экспериментально полученное значение аксиальной неоднородности не может быть использовано для удовлетворительной обработки поверхности протяженных изделий и требует улучшения. При

обработке изделий цилиндрической или другой более сложной формы азимутальная неоднородность является основным параметром, однако аксиальная неоднородность также является важным параметром пучка. В исследуемом источнике азимутальная неоднородность составила около 10 %, что является приемлемым результатом для проведения модификации поверхности материалов, однако аксиальная неоднородность около 40 % не может гарантировать качественную обработку протяженных деталей, что можно технологически устранить за счет протягивания изделия через радиально сходящийся электронный пучок, но также сопровождается определенными технологическими сложностями.

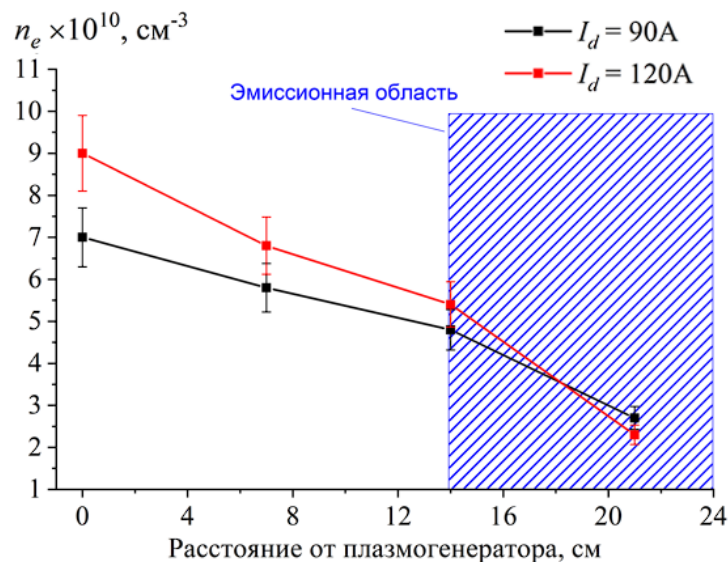
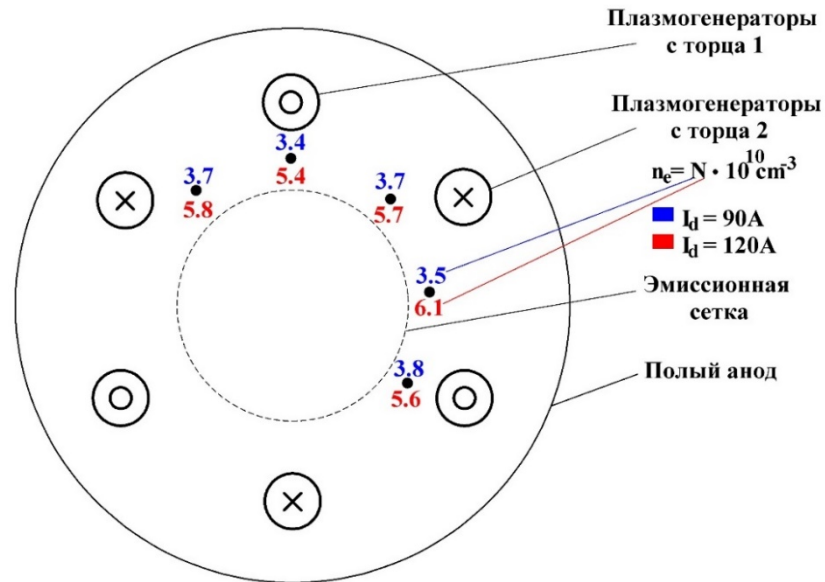


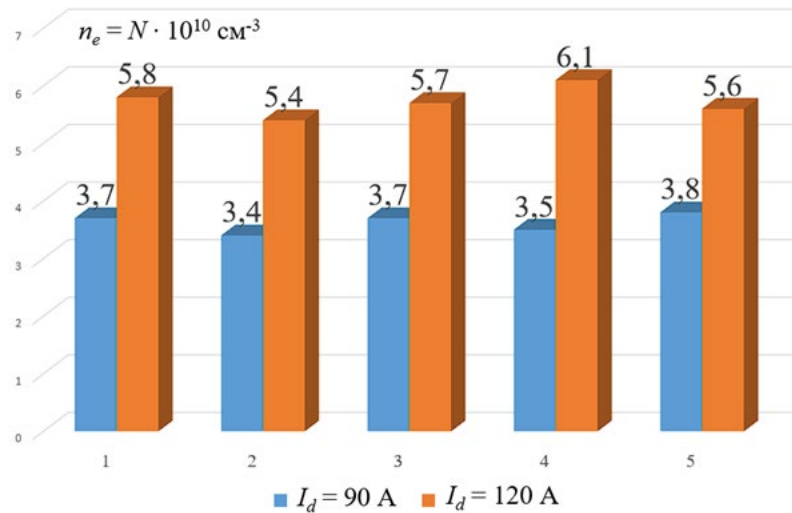
Рисунок 3.7 – Аксиальное распределение концентрации эмиссионной плазмы,
 $p = 5 \times 10^{-2}$ Па

Такое высокое значение неоднородности может быть связано с расположением плазмотронов в СПК и требовало экспериментальной апробации. В ходе проведения экспериментов оказалось, что угол в 60° и «шахматное» расположение плазмотронов являются неоптимальными для получения удовлетворительной аксиальной неоднородности эмиссионной плазмы и, соответственно, удовлетворительной аксиальной неоднородности радиально сходящегося электронного пучка. Таким образом, плазма,

создаваемая плазмогенераторами, расположенными на разных торцах эмиттера, не может однородно заполнить объём между эмиссионной сеткой и полым анодом. Результаты, полученные в ходе выполнения зондовых измерений, требовали внесения изменений в конструкцию СПК для того, чтобы снизить аксиальную неоднородность плазмы.



а



б

Рисунок 3.8 – Распределение концентрации эмиссионной плазмы:

а – схема расположения зонда в плазменном эмиттере,

б – гистограмма распределения концентрации, $p = 5 \times 10^{-2}$ Па

3.3. Пространственная неоднородность плазмы – переход к односторонней системе расположения плазмогенераторов

В представленной на рисунке 3.9 системе снятие зондовых характеристик при подаче высокого напряжения является затруднительным, поэтому снижение неоднородности плазмы возможно оценить лишь по коллекторным измерениям генерируемого радиально сходящегося пучка или по автографу пучка на коллекторе. С учетом результатов проведенных экспериментов, для снижения аксиальной неоднородности радиально сходящегося электронного пучка расстояние от эмиссионной области до плазмогенераторов было уменьшено с 14 до 8 см. При этом, чтобы уменьшить азимутальную неоднородность, все плазмогенераторы были установлены на одну сторону СПК с разнесением на 60 градусов по азимуту относительно друг друга. Также ширина эмиссионной области была сокращена с 15 до 5 см.

Из рисунок 3.10 видно, что проведенные действия позволили значительно уменьшить аксиальную неоднородность концентрации плазмы дугового разряда (до $\approx 10\%$), что является приемлемым результатом и должно способствовать снижению аксиальной неоднородности плотности тока радиально сходящегося электронного пучка.

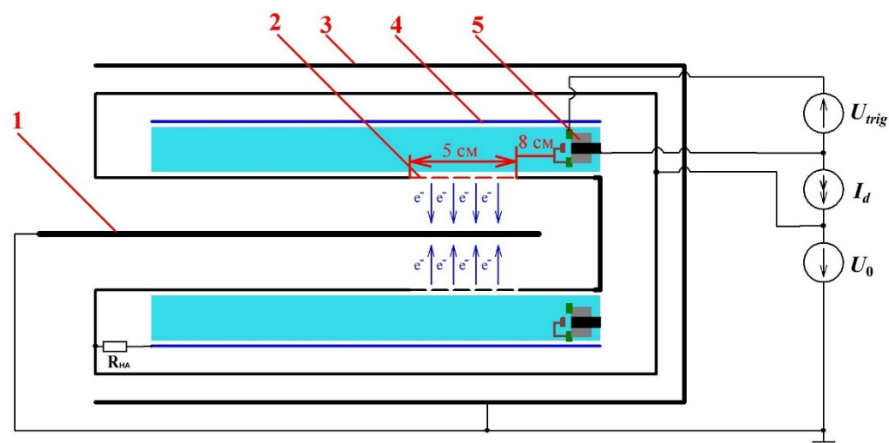


Рисунок 3.9 – Принципиальная схема источника: 1 – коллектор, 2 – эмиссионная сетка, 3 – вакуумная камера, 4 – полый анод, 5 – плазмогенератор (рисунок не в масштабе)

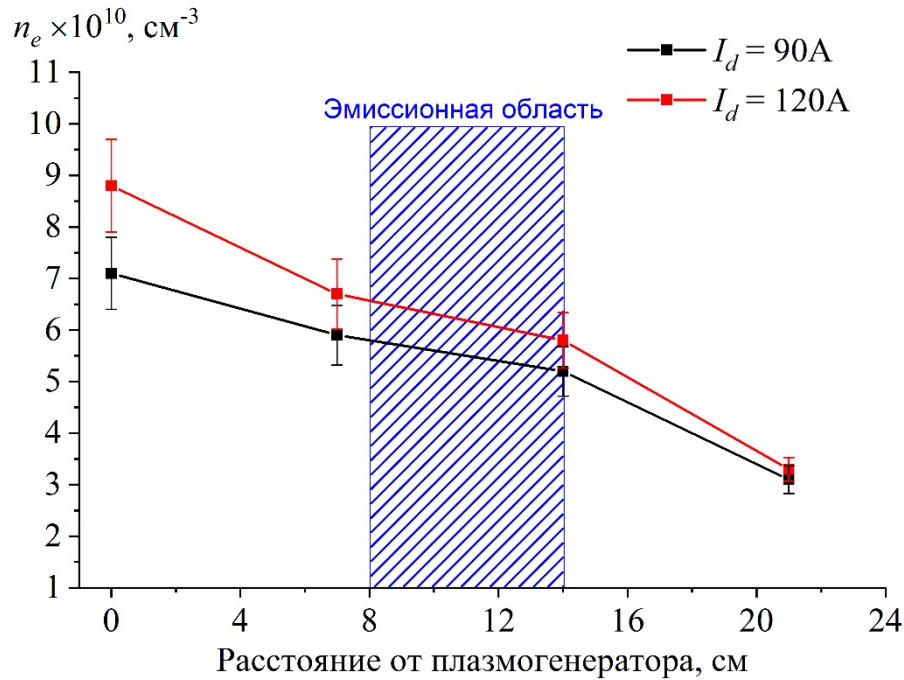


Рисунок 3.10 – Аксиальное распределение концентрации эмиссионной плазмы в модернизированной системе, $p = 5 \times 10^{-2}$ Па

3.4. Выводы по главе

1. Определены вольт-амперные характеристики многодугового разряда низкого давления в среде аргона, показывающие растущий характер ВАХ и снижение напряжения горения разряда на ~ 15 В при повышении давления с $p = 2 \times 10^{-2}$ Па до $p = 8 \times 10^{-2}$ Па при токе разряда до 250 А.

2. Проведены зондовые измерения параметров эмиссионной плазмы, включая зависимости от тока разряда ($I_d = 50, 90$ и 120 А), давления газа ($p = 5 \div 8,5 \times 10^{-2}$ Па) и момента измерения в течение импульса (20, 40, 60 и 100 мкс). Установлено, что увеличение тока разряда с 50 А до 120 А при $p = 5 \times 10^{-2}$ Па приводит к росту концентрации эмиссионной плазмы n_e с $3,8 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ до $8,1 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ за счет роста числа актов ионизаций в пространстве СПК. Экспериментально определена динамика наработки плазмы дугового разряда в объеме СПК, из которой следует, что после 60 мкс концентрация плазмы в средней части эмиттера существенно не изменяется.

3. При размещении плазмогенераторов на торцах СПК по три с каждой стороны определена азимутальная ($\pm 10\%$) и аксиальная ($\pm 40\%$) неоднородности концентрации плазмы дугового разряда, что неприемлемо для обработки поверхности протяженных изделий. Предложены конструктивные изменения для снижения неоднородности: установка всех плазмогенераторов на один из торцов СПК с разнесением их на угол 60° относительно друг друга; уменьшение расстояния между плазмогенераторами и началом эмиссионной области до 80 мм, а также уменьшение ширины эмиссионной области до 50 мм, что позволило снизить аксиальную неоднородность распределения концентрации плазмы дугового разряда до $\pm 10\%$.

4. Получено, что в объеме СПК при использовании многодугового разряда низкого давления общим током I_d до 250 А в отсутствие отбора электронов в ускоряющий промежуток можно достигать концентрации плазмы n_e до $8,1 \times 10^{10}$ см⁻³ при ее удовлетворительной азимутальной ($\approx 10\%$) и аксиальной ($\approx 10\%$) неоднородности.

ГЛАВА 4. ГЕНЕРАЦИЯ РАДИАЛЬНО СХОДЯЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

4.1. Влияние размера ячейки эмиссионной сетки на параметры радиально сходящегося электронного пучка (моделирование и эксперимент)

Для оценки необходимого размера ячейки эмиссионной сетки был проведён расчёт ширины приэлектродного слоя l , который можно считать ионным [1]. Его величина в отсутствие ускоряющего напряжения может быть оценена из равенства плотностей ионного тока на анод, определяемого соотношением Бома и законом Чайлда – Ленгмюра:

$$l = \frac{(\varepsilon_0/n)^{1/2} \varphi^{3/4}}{(ekT_e)^{1/4}}, \quad (4.1)$$

где n – концентрация плазмы, ε_0 – электрическая постоянная, e – заряд электрона, φ – потенциал плазмы относительно эмиссионного электрода, k – постоянная Больцмана, T_e – электронная температура.

Таким образом, взяв значения концентрации ($n=8,1 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$) и потенциала плазмы ($\varphi = 110 \text{ В}$), полученные в ходе проведения зондовых измерений, значение приэлектродного слоя составило $l \approx 0,6 \text{ мм}$. Полученное значение позволяет оценить требуемую геометрию эмиссионной сетки: размер ячейки должен быть не более чем две ширины приэлектродного слоя, что исключает эмиссию электронов с открытой плазменной поверхности, чаще всего приводящей к нестабильностям генерации эмиссионной плазмы и электронного пучка.

Исходя из вышеперечисленных оценок, при проведении экспериментов по генерации радиально сходящегося электронного пучка было использовано два

вида эмиссионных сеток, отличающихся размером ячейки: $0,4 \times 0,4$ мм и $0,14 \times 0,14$ мм.

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

Такой характер распределения плотности тока пучка на коллекторе позволил сделать предположение о нарушении работы СПК и эффективности генерации эмиссионной плазмы, заполняющей пространство полого анода, в условиях отбора из него электронов, а именно о нарушении однородности концентрации эмиссионной плазмы, измеренной до начала экспериментов с ускоряющим напряжением. Подобное нарушение может быть связано с уходом быстрых электронов с краёв эмиссионной области из-за проникновения электрического поля из ускоряющего промежутка в область генерации разряда (рисунок 1.7в). Поскольку энергия этих быстрых электронов достаточна для ионизации, то их уход из СПК приводит к снижению эффективности генерации эмиссионной плазмы. Другими словами, «эффект полого анода», основанный на осцилляции быстрых электронов в пространстве СПК и повышению за счет этого степени ионизации генерируемой плазмы, нарушается.

На рисунке 4.1 представлены характерные осциллограммы тока разряда I_d и тока в ускоряющем промежутке I_0 . На осциллограмме I_0 наблюдаются высокочастотные пульсации тока, при этом ток $I_0 < 32$ А в течение всего импульса генерации тока разряда.

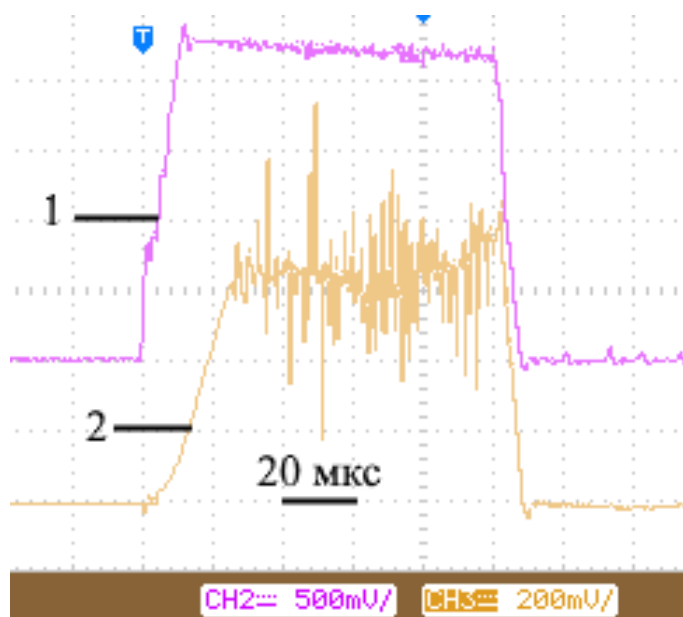


Рисунок 4.1 – Характерные осциллограммы: кривая 1 – ток разряда I_d (25 А/дел.); кривая 2 – ток в ускоряющем промежутке I_0 (10 А/дел.); ускоряющее напряжение $U_0 = 50$ кВ; длительности импульса $t = 100$ мкс; давление $p = 4 \times 10^{-2}$ Па, размер ячейки сетки – $0,4 \times 0,4$ мм, ширина эмиссионной области 15 см.

Из представленных на рисунке 4.2 зависимостей видно, что ток в ускоряющем промежутке I_0 слабо зависит от ускоряющего напряжения U_0 . Несмотря на то, что в данных экспериментах использовалась эмиссионная сетка со сравнительно крупным размером ячейки ($0,4 \times 0,4$ мм), при токе разряда $I_d = 150$ А максимальная величина тока I_0 не превышала $I_0 = 50$ А. Из анализа полученных зависимостей был сделан однозначный вывод, что при появлении ускоряющего напряжения условия плазмообразования нарушаются и существенно отличаются от случая, когда ускоряющее напряжение отсутствует. Это может быть связано с тем, что наличие ускоряющего напряжения и сформированного им электрического поля от коллектора к эмиссионной сетке приводит к отбору из СПК электронов, энергии которых еще достаточно для ионизации рабочего газа, существенно уменьшая длину их пути в пространстве полого анода СПК. В результате, проникновение электрического поля в пространство полого анода СПК приводит к отбору быстрых электронов с краев

эмиссионной области, остальная часть которой отличается отсутствием плазмы или существенно более низкой ее концентрацией. В этом случае «эффект полого анода», основанный на осцилляциях быстрых электронов и длинах свободного пробега быстрых электронов (составляющим при указанных рабочих давлениях ~ 10 м), не запускается, и увеличение извлекаемого тока при увеличении ускоряющего напряжения не наблюдается. Стоит отметить, что при увеличении рабочего давления ток в ускоряющем промежутке возрастает. С одной стороны, это связано с ростом числа актов ионизации в полом аноде СПК и увеличением концентрации эмиссионной плазмы, что приводит к росту газокINETического давления плазмы в условиях прежнего давления электростатического поля со стороны коллектора [1]. С другой стороны, это связано с наработкой анодной (или пучковой) плазмы в ускоряющем промежутке, что может не только приводить к появлению дополнительных γ -электронов тока пучка, рожденных в результате ионно-электронной эмиссии, но также уравнивать газокINETическое давление плазмы, повышая давление электростатического поля со стороны коллектора [93]. Ответ на вопрос о доминирующем механизме для каждого отдельного случая является сложной научной и инженерной задачей, и в рамках данной работы не исследовался.

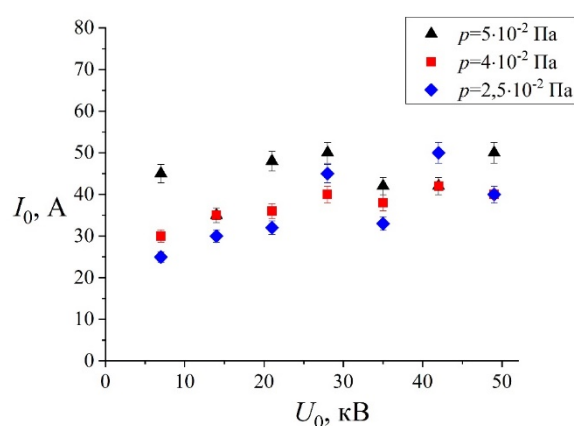


Рисунок 4.2 – Зависимость тока в ускоряющем промежутке от ускоряющего напряжения при различных давлениях рабочего газа. Ток разряда $I_d = 150$ А, время импульса $t = 50$ мкс, размер ячейки сетки – $0,4 \times 0,4$ мм, ширина эмиссионной области 15 см

После проведённых экспериментов стало понятно, что использование сетки с ячейкой $0,4 \times 0,4$ мм является неэффективным, так как проникновение ускоряющего поля в область разряда приводит к снижению степени ионизации эмиссионной плазмы из-за постоянного отбора быстрых электронов, что не позволяет оптимально использовать «эффект полого анода» для наработки плотной эмиссионной плазмы.

Использование эмиссионной сетки с более мелким размером ячейки ($0,14 \times 0,14$ мм) должно препятствовать проникновению электрического поля внутрь области генерации разряда, усиливая «эффект полого анода», и приводить к повышению концентрации эмиссионной плазмы и увеличению тока пучка.

На рисунке 4.3 представлены осциллограммы токов в ускоряющем промежутке при давлении рабочего газа $p = 5 \times 10^{-2}$ Па при использовании эмиссионной сетки с размером ячейки $0,14 \times 0,14$ мм. Видно, что уменьшение размера ячейки эмиссионной сетки (с $0,4 \times 0,4$ мм (рисунок 4.1) до $0,14 \times 0,14$ мм) привело к существенному увеличению тока в ускоряющем промежутке I_0 (с 50 до 140 А). При этом фронт и срез импульса тока I_0 полностью определяется фронтом и срезом импульса тока разряда I_d . После фронта импульса тока в ускоряющем промежутке I_0 наблюдается его рост, что может быть обусловлено как процессами наработки плазмы в пространстве СПК, так и наработкой пучковой плазмы. Надо отметить, что такое поведение зависимости тока в ускоряющем промежутке от ускоряющего напряжения не является характерным для источников с СПК и требует дополнительного исследования, которое будет представлено в параграфе 4.3

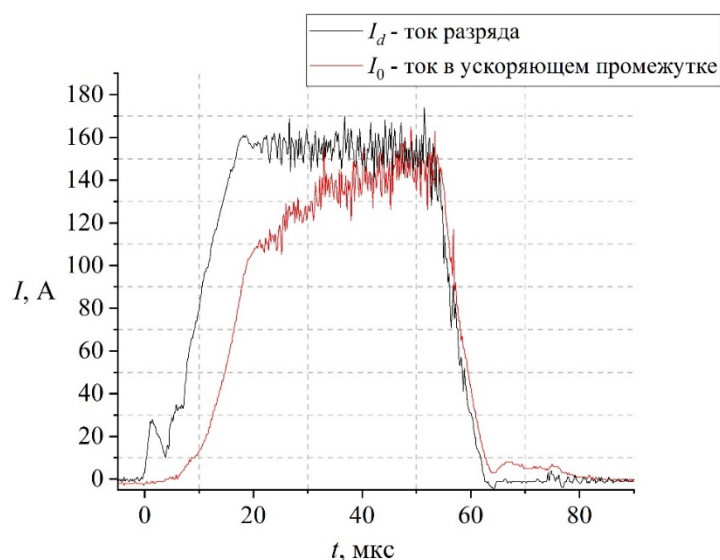


Рисунок 4.3 – Характерные осциллограммы тока в ускоряющем промежутке.

Ячейка сетки $0,14 \times 0,14$ мм, $p = 5 \times 10^{-2}$ Па, $U_0 = 28$ кВ, $I_d = 150$ А, $t = 50$ мкс, ширина эмиссионной области 15 см

На рисунке 4.4 представлена зависимость тока в ускоряющем промежутке от ускоряющего напряжения при различных давлениях рабочего газа при использовании эмиссионной сетки с размером ячейки $0,14 \times 0,14$ мм. Представленный график демонстрирует значительный рост тока в ускоряющем промежутке в сравнении с системой, в которой установлена сетка $0,4 \times 0,4$ мм (рисунок 4.2). Такое существенное расхождение токов генерируемого электронного пучка может быть связано с механизмом запуска «эффекта полого анода», когда при сравнительно крупном размере ячейки эмиссионной сетки и приложении внешнего электрического поля обеспечивается уход быстрых электронов из пространства СПК, что приводит к повышению аксиальной неоднородности концентрации эмиссионной плазмы. В эксперименте данный физический эффект наблюдался в виде оплавления зон коллектора, лежащих в проекции краев эмиссионного отверстия в СПК. Данный эффект хорошо согласуется с ранее проведенными исследованиями [117], в которых было показано, что уменьшение размера ячейки эмиссионной сетки позволяет снизить неконтролируемый рост тока в ускоряющем промежутке источника электронов

с СПК на основе дугового разряда низкого давления, что авторы связывают с влиянием внешнего электрического поля на генерацию эмиссионной плазмы.

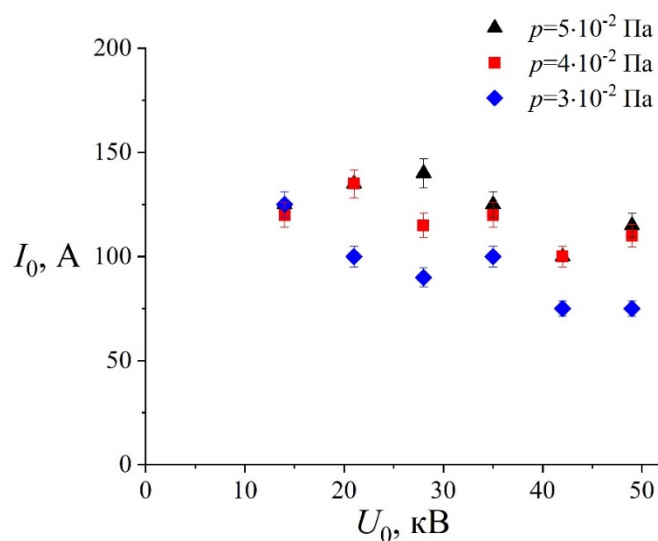


Рисунок 4.4 – Зависимость тока в ускоряющем промежутке от ускоряющего напряжения. Ток разряда $I_d = 150$ А, длительность импульса $t = 50$ мкс, ячейка сетки $0,14 \times 0,14$ мм, ширина эмиссионной области 15 см.

Как видно из зависимости, представленной на рисунке 4.4, полученные значения тока электронного радиально сходящегося пучка превышают значения, рассчитанные по закону Чайлда-Ленгмюра для вакуумного цилиндрического диода [118]:

$$I = \frac{8\pi \times \varepsilon_0}{9} \times \sqrt{\frac{2e}{m_e}} \times \frac{l_a}{\beta^2 \times R_a} \times U_0^{3/2}, \quad (4.2)$$

где ε_0 – электрическая постоянная, e – заряд электрона, m_e – масса электрона, l_a – ширина области эмиссии, R_a – радиус анода, U_0 – ускоряющее напряжение, β^2 – трансцендентная функция, зависящая от соотношения радиусов анода и катода, которую можно представить в виде сходящегося бесконечного ряда или воспользоваться табличным значением этой функции [118]. В нашем случае используется коэффициент $(-\beta^2)$, который соответствует эмиссии с электрода большего диаметра.

В данной системе значение тока Чайлда-Ленгмюра при $U_0 = 50$ кВ и ширине эмиссионной области 15 см равно ≈ 48 А. Таким образом, значения тока в ускоряющем промежутке, полученные в данном источнике электронов способны превосходить токи Чайлда-Ленгмюра в несколько раз за счёт компенсации пространственного заряда электронного пучка ионами анодной или пучковой плазмы, тем самым увеличивая плотность тока на коллекторе.

Также в отличие от графика, изображенного на рисунке 4.2, характеристика является спадающей, что согласно [117] может быть связано с проникновением электрического поля из ускоряющего промежутка внутрь эмиссионной области с увеличением ускоряющего напряжения. Это приводит к снижению эффективности наработки плазмы в полой аноде и, как следствие, уменьшению эмиссии электронов из плазмы дугового разряда. Описанная ситуация с крупной сеткой (а) и мелкой сеткой (б) схематически представлена на рисунке 4.5.

Таким образом, уменьшение размера ячейки сетки приводит к повышению тока в ускоряющем промежутке и, как следствие, к увеличению суммарной энергии в пучке и его плотности. Энергия, вкладываемая в образец за один импульс, в лучшем из проведённых экспериментов при ширине эмиссионной области ≈ 10 см, диаметре коллектора 16 мм, длительности импульса $t = 400$ мкс, $I_0 = 80$ А, $U_0 = 30$ кВ, $I_d = 150$ А, $f = 1$ Гц составляет $J = 700$ Дж/имп. Расчетная плотность энергии пучка в этом режиме составила 14 Дж/см².

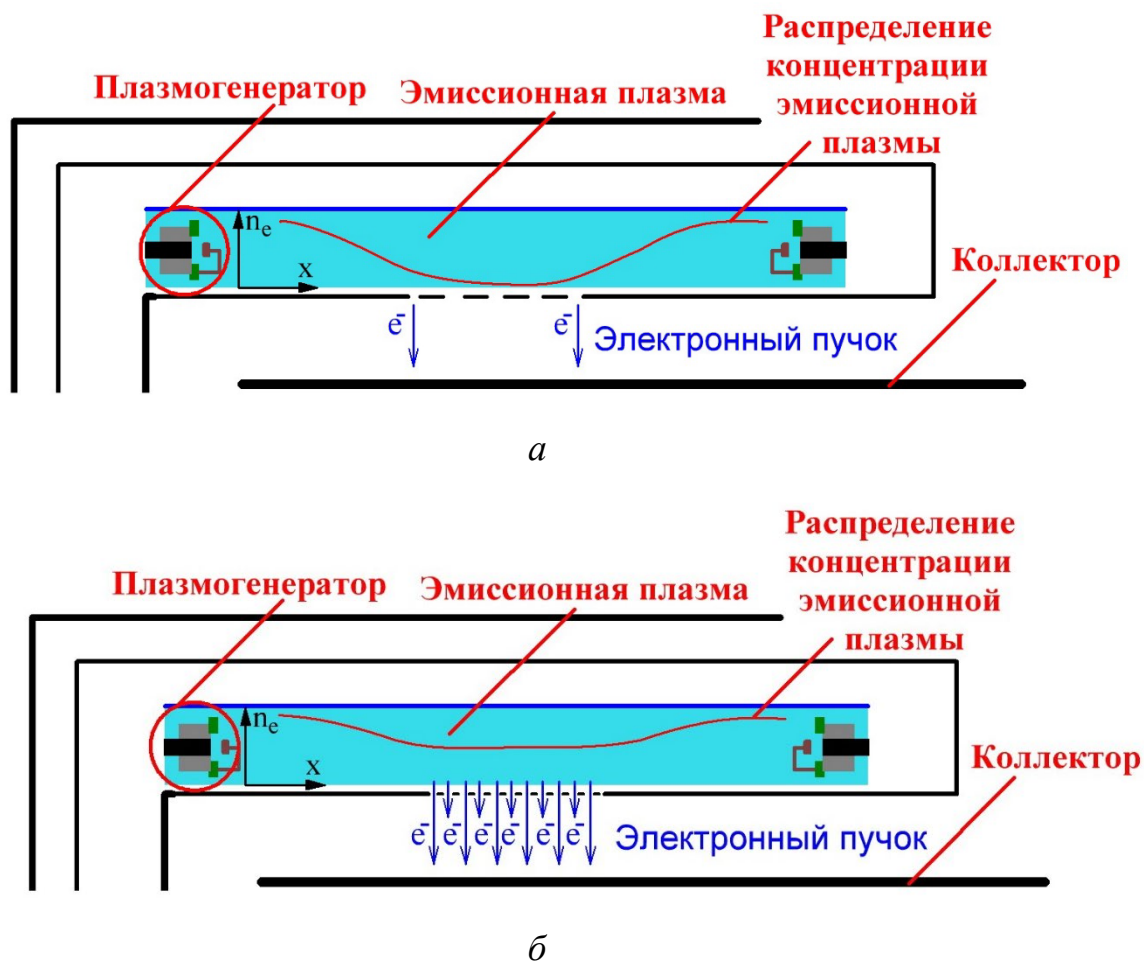


Рисунок 4.5 – Проникновение электрического поля из ускоряющего промежутка с различным размером ячейки сетки: a – $0,4 \times 0,4$ мм,
 b – $0,14 \times 0,14$ мм

4.2. Азимутальное распределение плотности тока пучка

Неоднородность распределения плотности тока пучка по его сечению является одним из наиболее важных параметров для всех источников электронов, которые используются в технологиях для воздействия на материалы. Требования к неоднородности, которые должна обеспечить разрабатываемая установка, всегда различны и зависят от поставленных задач, однако, как правило, для задач поверхностной обработки материалов требования к неоднородности плотности тока пучка по его сечению должны быть не хуже $\pm 10\%$ от среднего значения [119, 120].

Для измерения неоднородности плотности тока интенсивного радиально сходящегося электронного пучка большого сечения, генерируемого в источнике с СПК на основе дугового разряда низкого давления, использовался секционированный коллектор и методика измерения, описанные в разделе 2.4.

На рисунке 4.6 представлены результаты коллекторных измерений при давлении рабочего газа $p = 4 \times 10^{-2}$ Па, токе пучка $I_0 = 20$ А при длительности импульса $t = 100$ мкс, из которых видно, что на одну из пластин секционированного коллектора замыкается в несколько раз больше тока, чем на другие пластины.

Достоверность коллекторных измерений азимутального распределения плотности тока пучка подтверждается экспериментом с получением отпечатка на стержне из нержавеющей стали, имеющего радиус равный радиусу размещения пластин в секционированном коллекторе (рисунок 4.7). По представленным фото видно, что работа источника в том же режиме приводит к локальному оплавлению коллектора из-за возникновения вышеописанного эффекта.

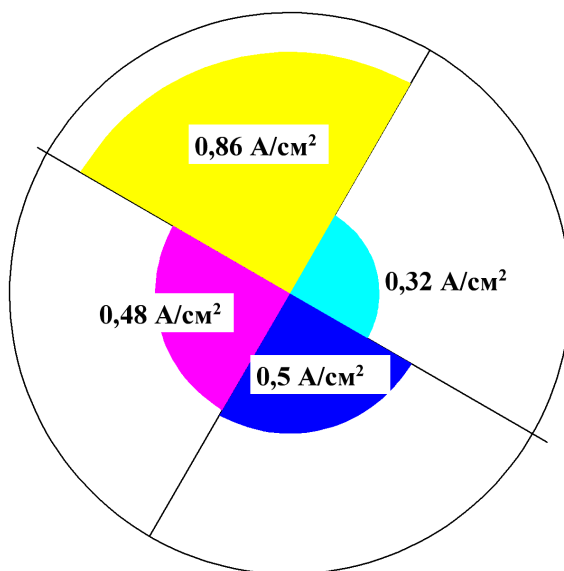


Рисунок 4.6 – Результаты коллекторных измерений ($p = 4 \times 10^{-2}$ Па, ток пучка $I_0 = 20$ А, длительность импульса $t = 100$ мкс)



Рисунок 4.7 – Фото коллектора после обработки. Параметры: $p = 4 \times 10^{-2}$ Па, $I_0 = 20$ А, $t = 100$ мкс, ширина эмиссионной области 5 см

После обработки полученных данных по формуле 3.1 была рассчитана неоднородность плотности тока пучка, которая составила $\pm 60\%$. Полученный электронный пучок со столь высокой неоднородностью не может быть использован для решения задач по обработке поверхности цилиндрических изделий и требует новых подходов, ориентированных на снижение неоднородности.

В ходе проведённых экспериментов было сделано предположение, что локальное замыкание тока пучка на одну из секций коллектора вызвано появлением дестабилизирующих эффектов на поверхности коллектора, связанных с плавлением коллектора и ионизацией испаряемого материала. Согласно механизму, описанному в работе [121], локальное замыкание тока на одну из секций коллектора в начале импульса тока пучка приводит к локальному оплавлению и испарению металла, что было отмечено на цельном металлическом коллекторе. Это приводит к локальному повышению давления и, как следствие, возникновению локального потока ионов из ускоряющего промежутка в область плазменного катода и бомбардировке ускоренными ионами полого анода. Ионная бомбардировка полого анода приводит к появлению ионно-электронной эмиссии с его поверхности и к снижению

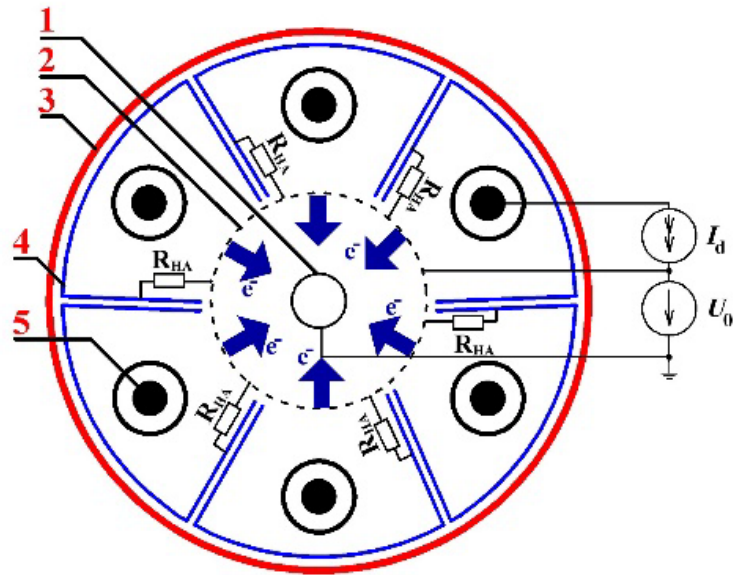
разницы потенциалов между полым анодом и эмиссионной плазмой, что приводит к переключению доли быстрых электронов на полый анод из хвоста энергетического спектра функции распределения электронов по энергиям. В случае использования многодугового СПК, такой механизм может приводить к переключению общего тока дугового разряда в участки эмиссионной сетки, через ячейки которой осуществляется интенсивная ионная бомбардировка поверхности полого анода. Такой механизм генерации можно охарактеризовать наличием положительной обратной связи между потоком ионов, бомбардирующих полый анод, и локальным уходом электронов из СПК, дестабилизирующей генерацию радиально сходящегося электронного пучка и его азимутальную неоднородность.

Для того чтобы проверить достоверность выдвинутого предположения конструкция СПК была модернизирована, и вместо цельнометаллического полого анода был установлен секционированный полый анод, конструкция которого позволяет ограничить область горения дугового разряда для каждого плазмогенератора, исключая возможность влияния дуговых разрядов друг на друга. В такой конфигурации различные процессы (дегазация, плавление, испарение и др.), локально возникающие на коллекторе и дестабилизирующие работу источника электронов, не могут влиять на те участки эмиссионной границы плазмы, которые находятся вне телесного угла участка коллектора, на котором развиваются данные дестабилизирующие процессы. Для стабильного зажигания дуговых разрядов и повышения эффективности извлечения электронов в ускоряющий зазор, в цепь каждого полого анода было установлено сопротивление 10 Ом. В последующих экспериментах с использованием секционированного полого анода использовалась модернизированная схема установки, описанная в параграфе 3.3 и изображенная на рисунке 3.9. Схема модернизированного СПК (а) и его внешний вид (б) представлены на рисунке 4.8.

Чтобы подтвердить предположение о появлении дестабилизирующих эффектов на поверхности коллектора, связанных с плавлением коллектора и

ионизацией испаряемого материала, были повторно проведены коллекторные измерения, а также эксперименты с получением автографа пучка на поверхности цельнометаллического коллектора из нержавеющей стали при тех же параметрах системы. Результаты приведены на рисунке 4.12.

Помимо основных экспериментов, связанных с использованием секционированного полого анода для снижения неоднородности радиально сходящегося электронного пучка, была проведена серия экспериментов, направленная на изучение влияния объёма области горения дугового разряда на параметры эмиссионной плазмы с помощью системы, описанной в параграфе 2.3. Эксперименты проводились при двух различных объёмах, которые регулировались длиной секции полого анода. В ходе эксперимента длина секции полого анода составляла $L = 32$ см (объёмом $V=4320$ см³) и $L = 16$ см (объёмом $V=2160$ см³). Для определения потенциала плазмы, энергии электронов, концентрации плазмы, а также её динамики была проведена серия зондовых измерений.



a

Секция полого
анода

Плазменный
эмиттер

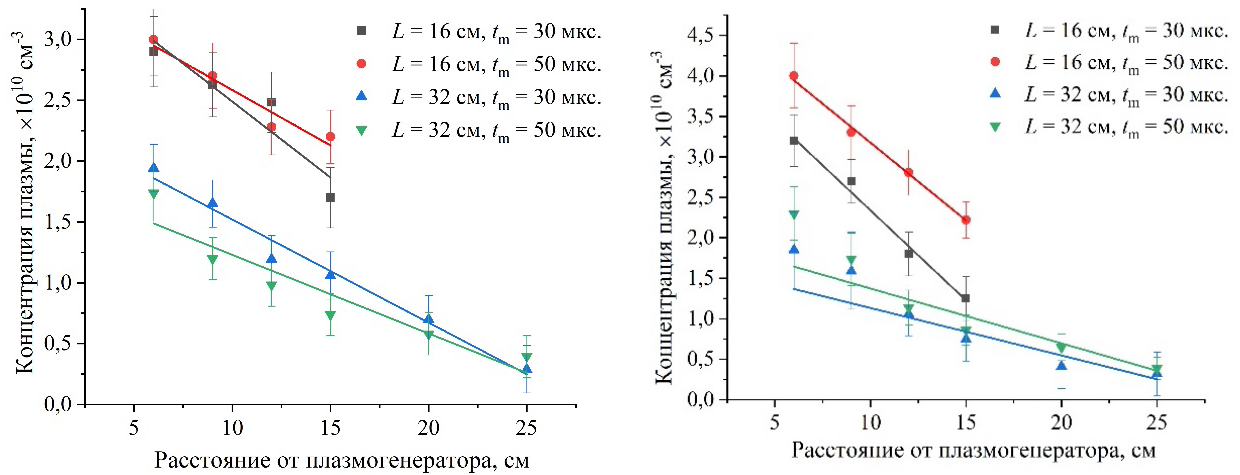


б

Рисунок 4.8 – Модернизированный плазменный катод: *a* – принципиальная схема; *б* – внешний вид плазменного катода

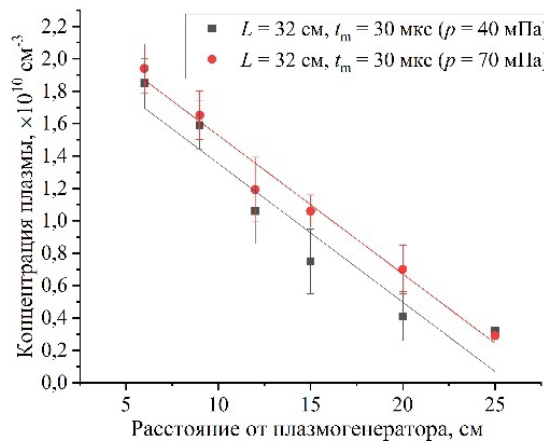
Результаты зондовых измерений представлены на графиках, изображенных на рисунке 4.9 и рисунке 4.10. Для оценки динамики

концентрации плазмы в течение импульса тока разряда зондовые измерения проводились на его 30-й ($t_m=30$ мкс) и 50-й ($t_m=50$ мкс) микросекунде при различных давлениях рабочего газа $p = 40$ (а) и 70 мПа (б).



а

б

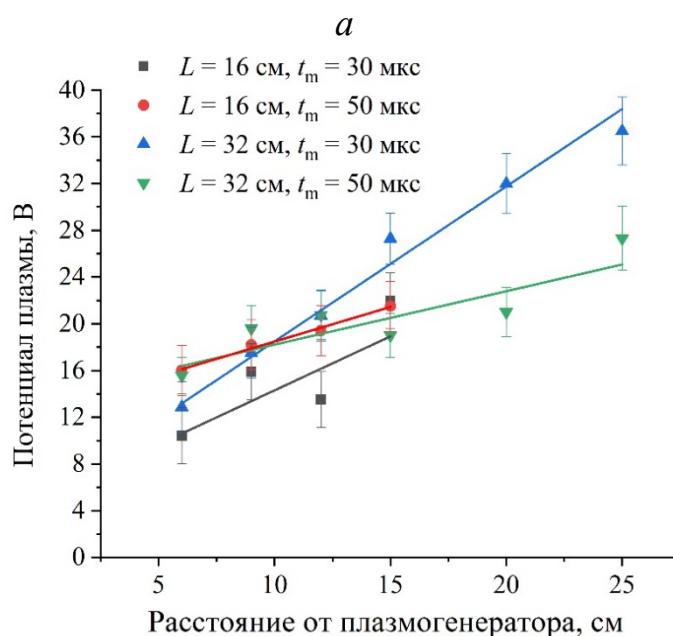
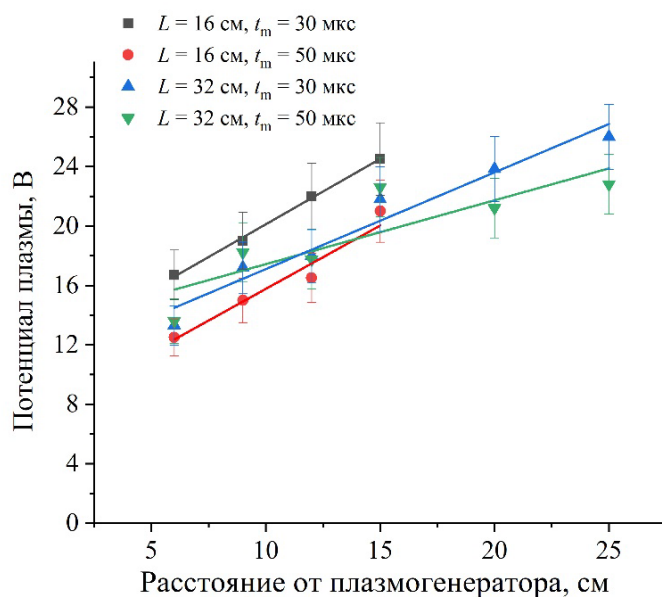


в

Рисунок 4.9 – Результаты измерения концентрации эмиссионной плазмы в секциях полого анода разной длины в различные моменты времени в течение импульса тока разряда $I_d = 150 \text{ А}$: а – $p = 40 \text{ мПа}$, б – $p = 70 \text{ мПа}$, в – концентрация плазмы в секции длиной 32 см при различных давлениях рабочего газа

Первая часть экспериментов была направлена на получение результатов динамики плазмы в области горения разряда. Их результаты представлены на

графике, изображенном на рисунке 4.9. Концентрация плазмы во всех сериях экспериментов убывает с увеличением расстояния от плазмогенераторов, что может быть обусловлено максимальной плотностью заряженных частиц вблизи катодного пятна и распространением плазмы посредством диффузии. Рассматривая временной фактор на данном графике, можно заметить, что в области ближе к источнику (до 10 см) кривые при $t_m = 50$ мкс обычно выше, чем при $t_m = 30$ мкс, что указывает на продолжающуюся наработку плазмы в течение импульса. Однако на больших расстояниях различие между $t_m = 30$ и 50 мкс уменьшается или почти исчезает, что особенно заметно на длинной секции. Геометрия полого анода существенно влияет на крутизну спада, особенно при давлении рабочего газа $p = 40$ мПа (рисунок 4.9а), что может говорить о менее эффективной наработке плазмы в объёме полого анода. Для секции длиной $L = 32$ см начальные значения концентрации хоть и ниже, чем для секции длиной $L = 16$ см, однако спад в аксиальном направлении более плавный. Для секции длиной $L = 16$ см характерен более резкий спад, который, вероятнее всего, обусловлен потерями электронов на стенки полого анода и уменьшает длину их эффективного пробега, связанным с меньшим потенциалом эмиссионной плазмы. Поэтому концентрация в этом случае быстрее снижается по мере удаления от источника. Стоит отметить, что наблюдается незначительное влияние рабочего газа на концентрацию эмиссионной плазмы в секции длиной $L = 32$ см.



б

Рисунок 4.10 – Результаты измерения потенциала плазмы в секциях полого анода разных длины и объёма в различные моменты времени в течение импульса тока разряда $I_d = 150$ А: $a - p = 40$ мПа, $б - p = 70$ мПа

На графике, изображенном на рисунке 4.10 представлена зависимость потенциала эмиссионной плазмы от расстояния от плазмодгенератора. Во всех сериях экспериментов наблюдается общий тренд роста потенциала плазмы по мере удаления от области генерации плазмы, что указывает на формирование продольного электрического поля и перераспределение пространственного

заряда в ускоряющем промежутке. Основные различия в поведении потенциала плазмы можно заметить при сравнении результатов на короткой секции при различных давлениях. При давлении $p=40$ мПа и $t_m = 30$ мкс импульса тока разряда потенциал плазмы выше, чем при $t_m = 50$ мкс, однако при давлении рабочего газа $p=70$ мПа картина полностью меняется.

Измеренные параметры плазмы позволяют оценить ширину присеточного ионного слоя, размер которого определяет количество извлекаемых электронов. В результате обработки полученных данных из зондовых измерений был построен график, который демонстрирует динамику присеточного слоя в длинной секции по мере распространения эмиссионной плазмы от плазмогенератора при разных давлениях и в различные моменты импульса тока разряда ($t_m = 30$ и 50 мкс).

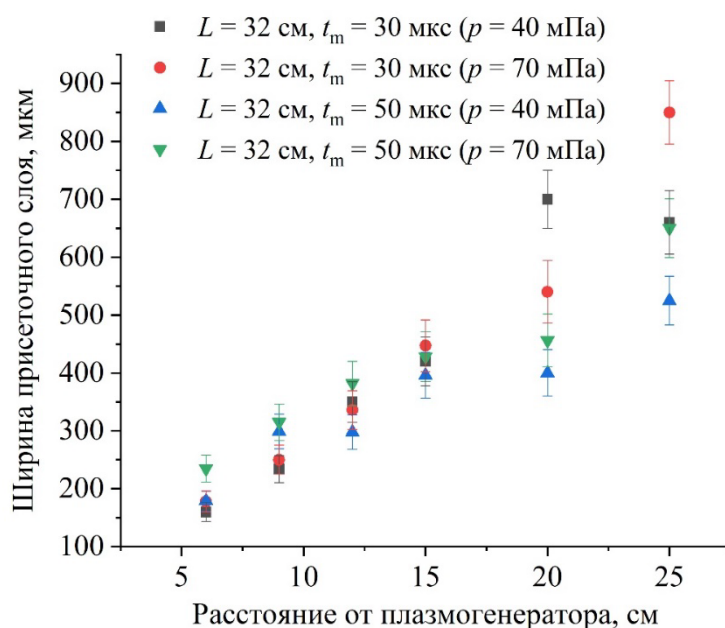


Рисунок 4.11 – Зависимости ширины присеточного слоя l от расстояния от плазмогенератора при разных давлениях рабочего газа при $t_m = 150$ мкс, $U_0=0$ кВ.

Из представленной зависимости видно, что ширина присеточного слоя l растет с увеличением расстояния от плазмогенератора, что может быть связано

с увеличением объёма полого анода и, соответственно, площади анода, прежде всего ответственных за параметры нарабатываемой эмиссионной плазмы [122].

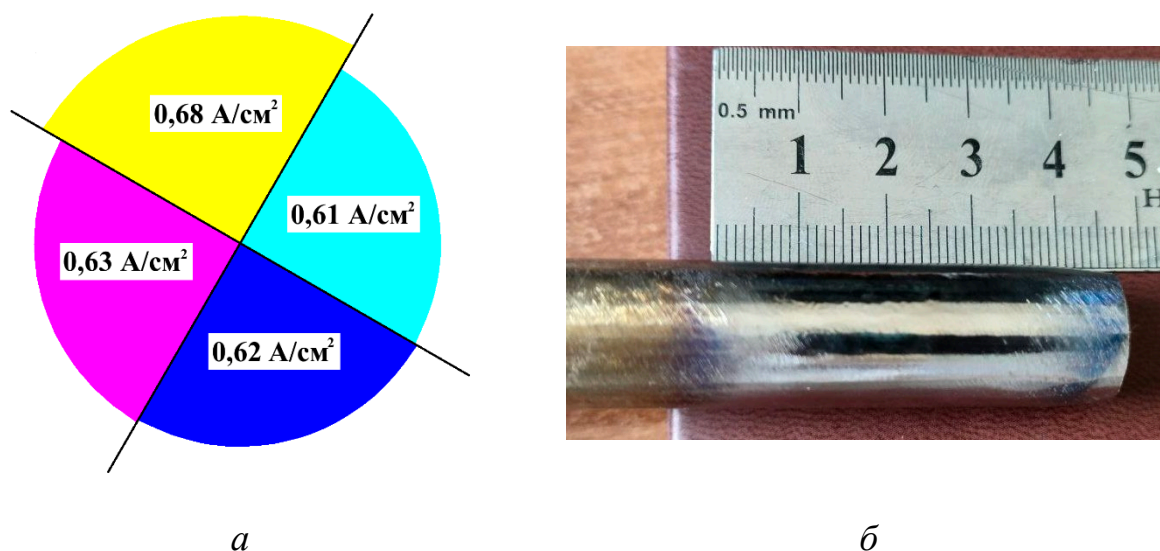


Рисунок 4.12 – Результаты коллекторных измерений: *а* – распределение плотности тока пучка с секционированным полым анодом, *б* – фото коллектора после обработки с использованием секционированного полого анода.

Параметры: $p = 4 \times 10^{-2}$ Па, $I_0 = 20$ А, $t = 100$ мкс, $U_0 = 30$ кВ,
 $E_{уд} = 2,5$ Дж/см², $N = 100$ имп., ширина эмиссионной области 5 см

Повторно проведённые коллекторные измерения показали, что сеточный плазменный катод с секционированным полым анодом позволяет снизить неоднородность распределения плотности тока радиально сходящегося электронного пучка с 60 % до 10 %. Результаты проведённых экспериментов свидетельствуют об уменьшении влияния дестабилизирующих процессов на неоднородность плотности интенсивного радиально сходящегося электронного пучка, связанных с плавлением и испарением коллектора в процессе его облучения [123].

Таким образом подтверждена принципиальная возможность генерации радиально сходящегося электронного пучка с удовлетворительной неоднородностью достаточной для обработки металлических изделий за десятки

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

На рисунке 4.13 представлена осциллограмма тока в ускоряющем промежутке радиально сходящегося электронного пучка, генерируемым в секторе 60° от одной секции секционированного полого анода.

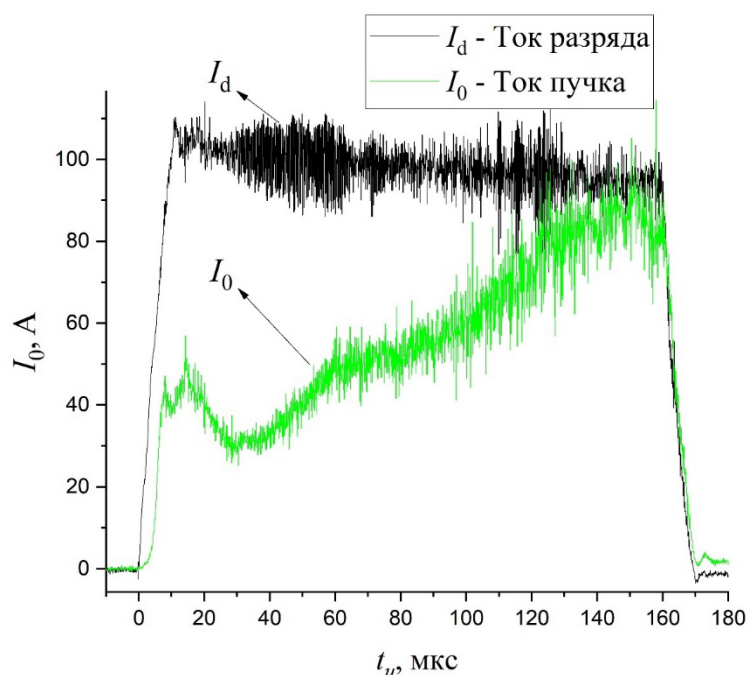


Рисунок 4.13 – Характерная осциллограмма тока разряда и тока в ускоряющем промежутке при работе одной секции полого анода при ускоряющем напряжении 30 кВ, $p = 5 \times 10^{-2}$ Па

Видно, что ток в ускоряющем промежутке со временем возрастает, достигая за $t = 150$ мкс значений порядка $I_0 = 90$ А. Принципиально важно то, что длительность импульса составляет 150 мкс, в течение которых сохраняется

высокий уровень тока пучка. Данный результат напрямую свидетельствует о возможности эффективного энерговыклада в обрабатываемый материал. При ускоряющем напряжении десятки киловольт (в данном случае ~30 кВ) и токе пучка порядка 65 А мгновенная мощность в ускоряющем промежутке достигает мегаваттного уровня (~2 МВт). При интегрировании по длительности импульса энергия электронного пучка составляет 280 Дж за один импульс, что обеспечивает плотность энергии на коллекторе около 41 Дж/см², основываясь на методике расчета [124]. В этом случае, чтобы оценить плотность тока электронного пучка на коллекторе необходимо вычесть величину ионного тока, которую можно рассчитать по формуле 4.3:

$$I_i = \frac{I_0 - I_d \times \alpha}{\gamma + 1}, \quad (4.3)$$

где I_i – ток ионов, I_d – ток разряда, α – коэффициент извлечения электронов из эмиттера, γ – коэффициент вторичной электронной эмиссии

Для расчёта коэффициент извлечения электронов α был принят равным 0,2, а коэффициент γ был принят равным 2. Так для режима, осциллограмма которого представлена на рисунке 4.13, ионный ток на коллекторе составил ~30А. Таким образом энергия электронного пучка без его ионной составляющей составляет ~200 Дж, что при площади облучения ~6,7 см² позволяет достичь плотности энергии электронного пучка ~30 Дж/см². Такой уровень энерговыклада является достаточным для реализации многих технологических процессов поверхностной обработки (плавления, модификации структуры и упрочнения материалов) в течение одного импульса длительностью $t = 150$ мкс.

Таким образом, представленные экспериментальные данные демонстрируют ключевой результат: в секционированной радиально сходящейся системе возможно формирование стабильного интенсивного электронного пучка субмиллисекундной длительности, обеспечивающего

высокий удельный энерговклад, необходимый для эффективной импульсной обработки поверхности металлических материалов и изделий.

4.3. Моделирование процессов в плазменном катоде в условиях эмиссии электронов из плазмы

Ранее были проведены численные оценки, направленные на определение необходимого размера ячейки эмиссионной сетки для обеспечения стабильной эмиссии электронов из сеточного плазменного катода со слоевой/сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы многодугового разряда низкого давления (параграф 4.1). Оценки ионного слоя проводились для системы с крупной эмиссионной сеткой (0,4×0,4 мм). В отсутствие внешнего ускоряющего электрического поля были достигнуты удовлетворительные аксиальная и азимутальная неоднородности концентрации плазмы дугового разряда. Однако при появлении внешнего электрического поля проведённые эксперименты с двумя различными эмиссионными сетками продемонстрировали нарушение работы СПК и эффективности генерации плазмы для эмиссионной сетки с размером ячеек 0,4×0,4×0,25 мм (параграф 4.1). Эксперименты с эмиссионной сеткой 0,14×0,14×0,09 мм наоборот продемонстрировали стабильную работу и более высокие показатели по амплитуде полного тока и однородности плотности энергии на коллекторе (рисунок 4.4). По результатам экспериментальных исследований и на основе численных оценок была предложена интерпретация полученных результатов, которая заключалась в том, что при наличии внешнего электрического поля и использовании эмиссионной сетки с бóльшим размером ячейки в плазменном катоде происходит нарушение «эффекта полого анода»: электрическое поле из ускоряющего промежутка может проникать в область генерации разряда, что приводит к извлечению плазменных электронов с краёв эмиссионной области и, как следствие, недостаточной ионизации газа в области эмиттера, которая расположена над эмиссионной сеткой.

Для моделирования динамики частиц в основном промежутке использовался open-source код `хоорис` и его коммерческая версия код `ООРПС Pro`. Данные программные продукты – PIC + Монте-Карло коды хорошо известны в качестве эффективных инструментов для расчета динамики частиц во времени в различных вакуумных и газовых условиях. В расчётах на внешнем радиусе задавалось граничное условие на однородную эмиссию электронов с заданным током. В качестве калибровки вычислительной схемы и проверки корректности численных расчётов использовалась формула 4.1, которая описывает предельный вакуумный ток, который может протекать в таком цилиндрическом диоде. Проверочные расчёты показали совпадение с аналитическим значением с точностью до единиц процентов. На рисунке 4.14 представлено распределение напряженности электрического поля для вакуумного и газового случая.

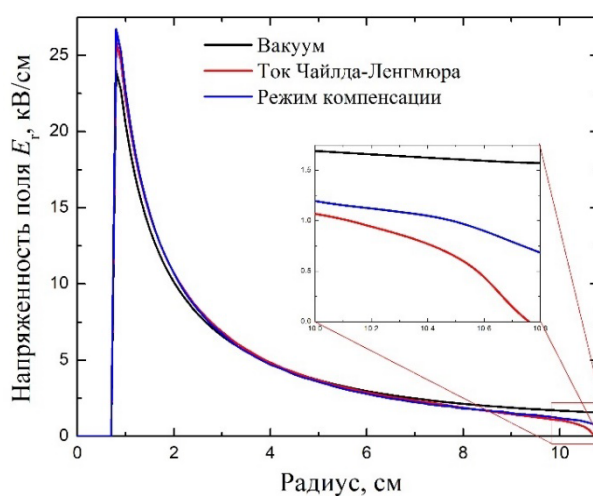


Рисунок 4.14 – Распределение напряженности электрического поля в промежутке для различных условий генерации электронного пучка и распределение электрического поля вблизи сетки. $U_0 = 50$ кВ, $I_0 = 50$ А,

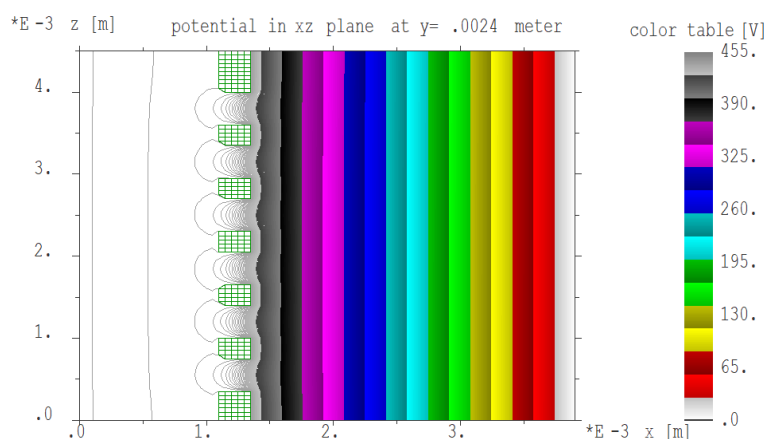
$$p = 5 \times 10^{-2} \text{ Па, ширина эмиссионной области } 50 \text{ мм}$$

Моделирование подтвердило, что для широкого диапазона давлений рабочего газа токи электронного пучка на коллекторе могут в несколько раз превышать значения тока, рассчитанные по закону Чайлда-Ленгмюра для вакуумного диода. Для низких напряжений (10 кВ и ниже) это превышение

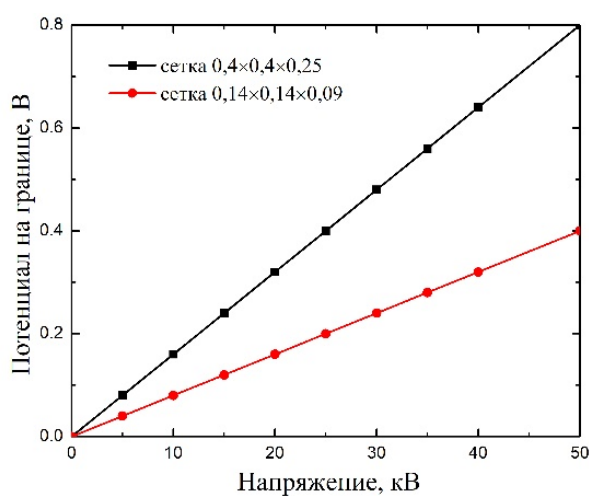
может быть более чем на порядок по причине более активной ионизации рабочего газа в ускоряющем промежутке, формированию ионного пучка и относительно большому времени ухода ионов из зазора по причине относительно низкого напряжения. На рисунке 4.14 представлены три режима работы ускоряющего промежутка: отсутствие тока в зазоре, ток пучка близкий к предельному току Чайлда-Ленгмюра без компенсации объёмного заряда и установившийся режим с компенсацией объёмного заряда для тока, который приблизительно в два раза превышает предельный ток. Характерные значения напряженностей электрических полей вблизи эмиссионной сетки в зависимости от давления газа, тока пучка и амплитуды высокого напряжения могут составлять до $1,5 \times 10^3$ В/см.

Для оценки величины ускоряющего электрического поля, проникающего в пространство СПК через ячейки мелкоструктурной эмиссионной сетки, можно использовать прямое численное моделирование проникновения поля, в котором достаточно оценить диапазон напряженности электрических полей или амплитуду потенциала, который проникает сквозь ячейки сетки в область плазменного катода, и далее использовать эти параметры для моделирования процессов плазменного катода. В качестве граничных условий использованы результаты численного моделирования с определением напряженности поля вблизи эмиссионной сетки, вычисленные в предыдущей части работы.

Моделирование проникновения электрического поля через мелкоструктурные эмиссионные сетки в работе проводилось с использованием коммерческой версии кода KOBRA3-INP [125, 126]. На рисунке 4.15 представлено распределение потенциала вблизи сетки для вакуумного случая и зависимость потенциала на внешней границе эмиссионной сетки для ее различных конфигураций. Видно, что даже с крупной сеткой и с максимальным значением напряжения на ускоряющем промежутке $U_0 = 50$ кВ на внутренней границе СПК потенциал в вакуумном случае не превышает 1 В.



a



б

Рисунок 4.15 – Моделирование проникновения электрического поля в СПК:
a – иллюстрация проникновения потенциала из ускоряющего промежутка
 внутри СПК при $U_0 = 50$ кВ, *б* – зависимость потенциала на внешней границе
 СПК от ускоряющего напряжения для различных конфигураций эмиссионной
 сетки

Таким образом, результаты моделирования показывают, что даже с крупной эмиссионной сеткой электрическое поле и высоковольтный потенциал из ускоряющего промежутка практически не проникают внутрь полого анода. Стоит отметить, что зондовые измерения, проведённые и описанные ранее (параграф 3.2), позволили оценить потенциал плазмы на уровне чуть выше 100 В. Из полученных данных становится очевидно, что амплитуды проникающего

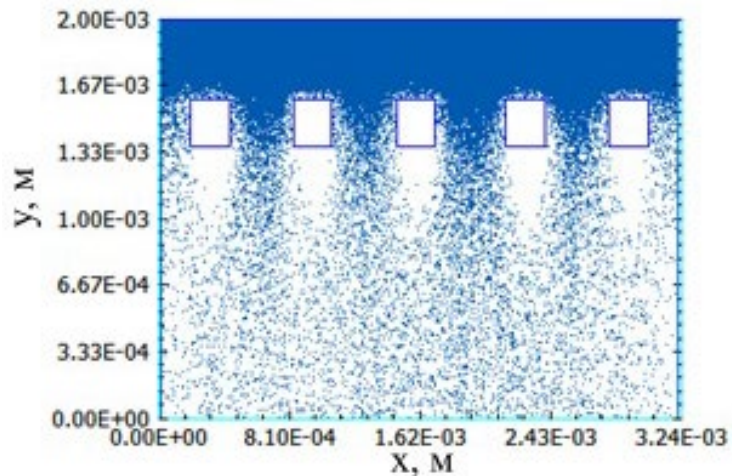
потенциала из ускоряющего промежутка недостаточно для существенного влияния на характер распределения концентрации эмиссионной плазмы с такими параметрами, то есть обнаруженное в экспериментах существенное различие в амплитудах тока с использованием крупной и мелкой эмиссионных сеток нельзя объяснить только за счёт проникновения внутрь плазменного катода электрического поля и потенциала с такими амплитудами.

После полученных данных были проведены эксперименты по моделированию процессов в СПК. Основой для моделирования СПК стали результаты экспериментов по получению зависимости тока в ускоряющем промежутке от ускоряющего напряжения с различными эмиссионными сетками (рисунок 4.2 и рисунок 4.4) при одинаковом токе разряда $I_d = 150\text{A}$. Стоит обратить внимание, что слабая зависимость тока в основном промежутке от величины ускоряющего напряжения согласуется с данными по проникновению электрического поля, полученными при помощи численного моделирования (рисунок 4.15).

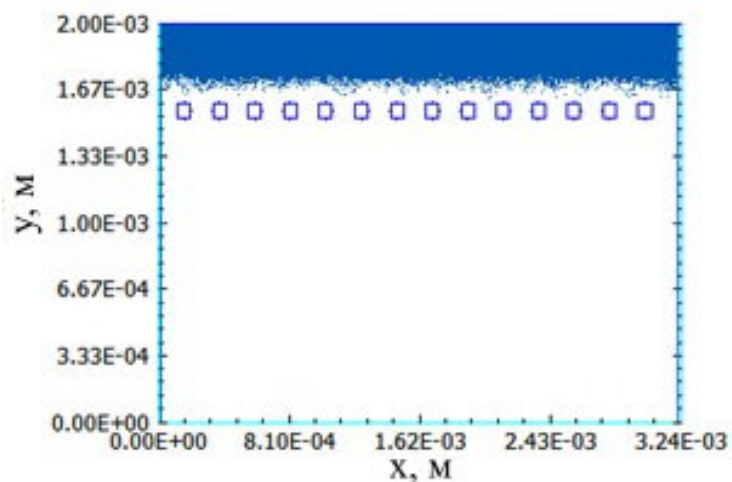
Исходя из предположения, что отличие в амплитудах тока в ускоряющем промежутке для разных сеток могут наблюдаться при характерных размерах приэлектродного слоя, сравнимым с поперечными размерами ячеек сетки. Это означает, что концентрация эмиссионной плазмы в эксперименте с внешним ускоряющим электрическим полем должна значительно превышать концентрацию, оценённую в ходе зондовых измерений в отсутствие ускоряющего напряжения, или потенциал этой эмиссионной плазмы относительно анода должен быть значительно ниже наблюдаемых. Согласно литературе [1, 85] и данным, полученным в ходе экспериментов по измерению пространственно-временных характеристик эмиссионной плазмы, заполнение объёма полого анода длится десятки микросекунд, при этом концентрация плазмы и её потенциал могут значительно изменяться в течение этого времени (параграф 3.2).

Таким образом, в рамках моделирования рассматривается плоская XY-геометрия, которая моделирует 2D массив ячеек эмиссионной решётки с

параметрами $0,4 \times 0,4$ мм и $0,14 \times 0,14$ мм (рисунок 4.16). Подход с заменой мелкоструктурной эмиссионной сетки на 2D-массив щелей с периодической решёткой достаточно эффективен для решения таких задач и многократно применялся ранее для различных систем с СПК [127, 128].



a



б

Рисунок 4.16 – Интегральное распределение электронов за 100 временных шагов в расчётной области в виде 2D массива ячеек эмиссионной решётки с параметрами: *a* – $0,4 \times 0,4$ мм и *б* – $0,14 \times 0,14$ мм. Параметры: потенциал плазмы – 20 В, амплитуда «высокого» напряжения – 50 кВ. Расчёт выполнен при помощи PIC кода OOPIC Pro

В нижней части геометрии расчётной области задаётся эквипотенциальное граничное условие (имитирующее высокое напряжение в ускоряющем промежутке), которое формирует распределение электрического поля в области до эмиссионной сетки, соответствующее распределению электрического поля, полученному ранее при моделировании ускоряющего промежутка. На верхней границе расчётной области аналогично задаётся «плазменный электрод» и определяется потенциал, который соответствует потенциалу эмиссионной плазмы. В верхней части расчётной области в малом объёме (несколько ячеек сетки) с постоянной скоростью с равномерным профилем распределения концентрации и с тепловой начальной скоростью создаются электроны и ионы аргона.

Параметры, используемые для расчётов: потенциал плазмы – 20 В, значение потенциал, имитирующего высокого напряжения – 50 В, скорость генерации частиц до $5 \times 10^{24} \text{ С} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, расчетная сетка составляла 200×200 ячеек, шаг по времени 10^{-13} с, количество макрочастиц – до 10^6 шт.

На рисунке 4.17 приведено распределение потенциала в сечении, проходящем через центр отверстий в решётках. Из рисунка видно, что для решётки $0,4 \times 0,4$ мм потенциальный барьер для плазменных электронов почти в 2 раза ниже, чем для решётки $0,14 \times 0,14$ мм. Интегральное распределение электронов за обозначенный промежуток времени 10^{-13} с в расчётной области показывает, что в случае моделирования решётки $0,4 \times 0,4$ мм наблюдаются утечки тока на «ускоряющий электрод», тогда как для решётки $0,14 \times 0,14$ мм весь инжектируемый электронный ток замыкается на «плазменный электрод».

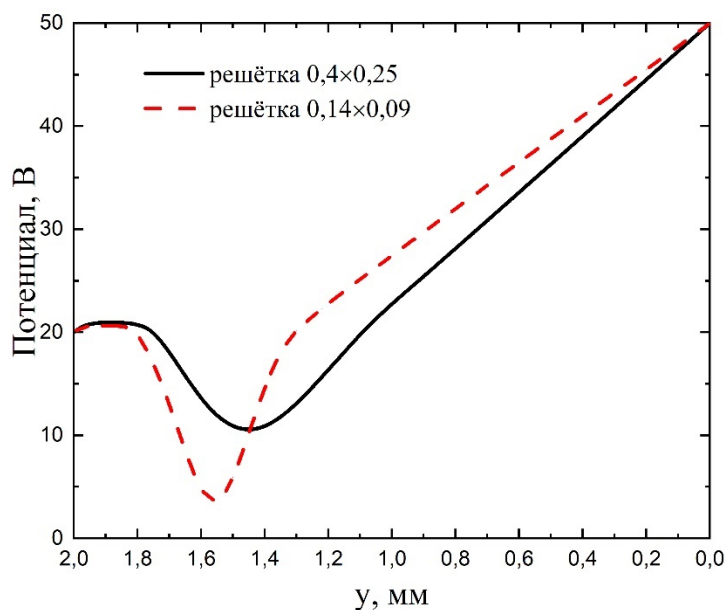


Рисунок 4.17 – Распределение потенциала по центру ячеек для разных решёток

Проведённое моделирование иллюстрирует необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований, ориентированных на изучение динамики плазмы в пространстве плазменного катода в отсутствие и при наличии внешнего электрического поля в различных условиях генерации электронного пучка (величине ускоряющего напряжения, давления газа, размера ячейки эмиссионной сетки и др.).

На рисунке 4.18 представлено мгновенное распределение ионов для решётки $0,4 \times 0,4$ мм, на котором стрелками показаны направленные потоки ионов, которые формируются при прохождении ионного пучка через решётку.

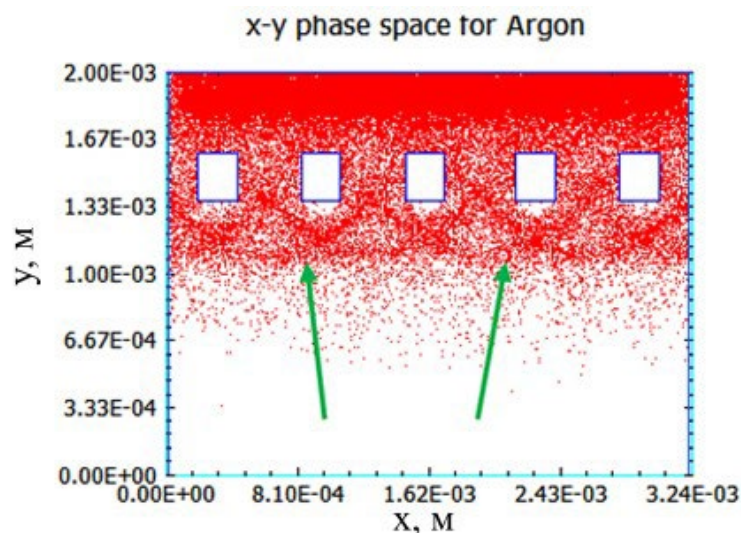


Рисунок 4.18 – Мгновенное распределение ионов в расчётной области, стрелками показаны потоки отраженных ионов

Ионы, которые из-за размеров щели в решётке/сетке не замыкаются на электрод, проходят в основной промежуток, где под действием ускоряющего поля отражаются обратно в область приэлектродного слоя. При этом, в зависимости от конфигурации сетки/решётки, амплитуд потенциалов и значений токов могут реализовываться различные условия для замыкания тока.

Несмотря на ранее выполненные оценки размеров приэлектродного слоя, проведённое численное моделирование показало, что в системе СПК могут реализовываться дополнительные механизмы, нарушающие условия отбора электронов. Эти механизмы обусловлены процессами, которые происходят на стадии заполнения полого анода эмиссионной плазмой и связаны с пространственным распределением потенциала, снижением потенциального барьера в области ячеек крупной эмиссионной сетки при воздействии внешнего электрического поля, а также динамикой ионного потока вблизи сетки. В результате, из-за наличия плотной расширяющейся плазмы дугового разряда, при характерных размерах приэлектродного слоя, сравнимых с поперечными размерами ячеек, происходит уход плазменных электронов, что приводит к перераспределению тока в эмиссионной области, снижению эффективности

“полого анода” и генерации эмиссионной плазмы, а также ухудшению стабильности работы СПК.

4.4. Эффект самофокусировки радиально сходящегося электронного пучка

В ходе проведения экспериментов был обнаружен эффект самофокусировки пучка, который проявлялся в изменении ширины автографа на коллекторе при различных ускоряющих напряжениях [129, 130]. Для более подробного описания эффекта было проведено моделирование системы при различных ускоряющих напряжениях. Для компьютерного моделирования использовался PIC код OOPIC Pro. Расчёты проводились в осесимметричной RZ-геометрии. Для упрощения область СПК и наработка в нем плазмы не учитывались в модели. В расчётную область инжектировался электронный пучок с однородным распределением плотности тока по длине эмиссионной области и с тепловой начальной энергией в десятки эВ. Отпечатки пучка на коллекторе рассчитывались для стационарных условий с токами инжекции электронного пучка, соответствующими среднему значению тока в основном промежутке. На рисунке 4.19 приведены распределения электронов в ускоряющем промежутке для двух различных режимов облучения.

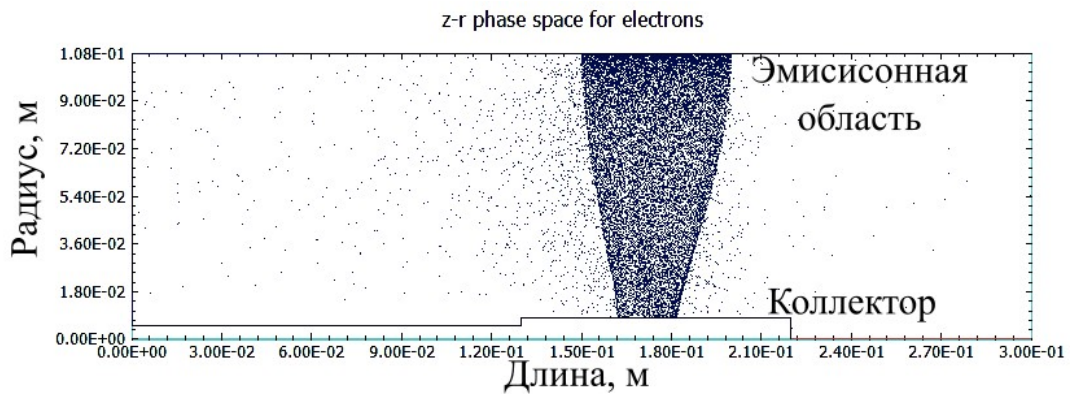
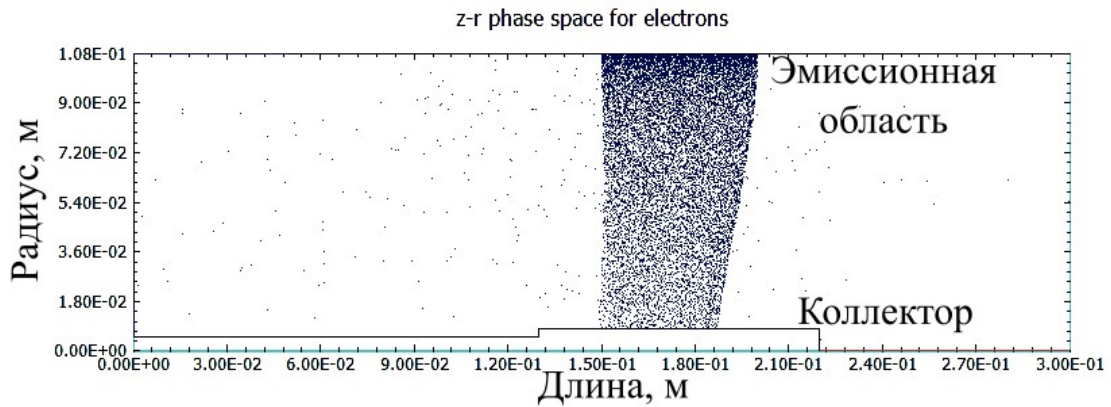


Рисунок 4.19 – Распределение электронов в ускоряющем промежутке для различных ускоряющих напряжений: *а* – $U_0 = 50$ кВ, *б* – $U_0 = 20$ кВ. Ток в ускоряющем промежутке $I_0 = 50$ А, давление $p = 4 \times 10^{-2}$ Па.

Из рисунков видно, что для разных ускоряющих напряжений характер распределения плотности тока пучка на коллекторе существенно отличается: для ускоряющего напряжения 50 кВ электронный пучок на коллекторе практически не меняет своего начального пространственного распределения, тогда как для ускоряющего напряжения 20 кВ видна существенная фокусировка электронного пучка на коллекторе.

На рисунке 4.20 представлены результаты компьютерного моделирования двух рабочих режимов для токов в ускоряющем промежутке до 100 А. Моделирование показало, что для ускоряющего напряжения амплитудой 50 кВ зависимость размера отпечатка от тока в основном промежутке имеет монотонный характер, а для ускоряющего напряжения 20 кВ зависимость имеет

минимум. Полученный результат может быть обусловлен компенсацией объёмного заряда пучка нарабатываемой плазмой в ускоряющем промежутке, распределение и концентрация которой существенно зависит от ускоряющего напряжения. Для проверки результатов расчётов были получены отпечатки электронного пучка на коллекторе для режима облучения с ускоряющим напряжением 50 кВ и токами в диапазоне 30–40 А. Продольный размер полученных отпечатков для этого режима облучения обозначен на рисунке 4.20 закрашенной областью. Видно удовлетворительное совпадение результатов моделирования с полученными в эксперименте отпечатками пучка на коллекторе (рисунок 4.21).

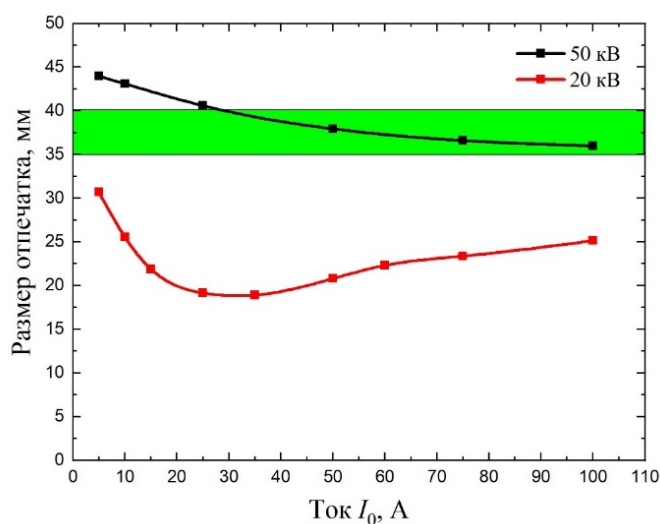


Рисунок 4.20 – Зависимость продольного размера отпечатка электронного пучка на коллекторе от величины тока в ускоряющем промежутке. Цветом выделена область с размерами отпечатков пучка в эксперименте для ускоряющего напряжения 50 кВ.

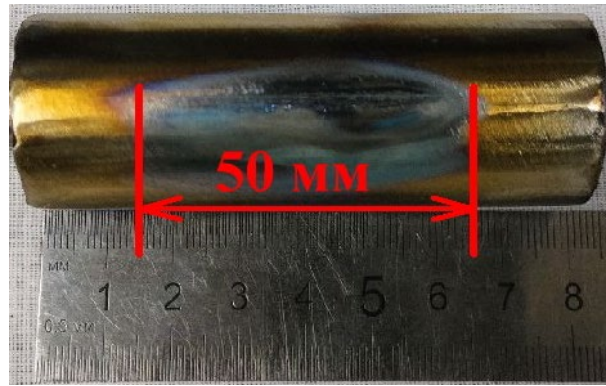
*a**б*

Рисунок 4.21 – Фотография коллектора из нержавеющей стали при ускоряющем напряжении: *a* – $U_0 = 50$ кВ, *б* – $U_0 = 25$ кВ (эксперименты проведены до секционирования полого анода СПК), ширина эмиссионной области 5 см

4.5. Модификация поверхности цилиндрических металлических материалов и изделий

Радиально сходящиеся электронные пучки с СПК представляют собой перспективный инструмент для эффективной модификации поверхности металлических материалов и изделий цилиндрической или более сложной формы. Их уникальные свойства, такие как высокая концентрация энергии, возможность формирования однородного распределения плотности тока по сечению пучка, а также возможность независимого управления параметрами, позволяют решать задачи плавления, полировки поверхностей с достижением большей твердости и износостойкости поверхности и др. При обработке

цилиндрических изделий особое внимание уделяется азимутальному распределению плотности тока пучка, неоднородность которого может приводить к локальному перегреву, оплавлению или возникновению дестабилизирующих эффектов, снижающих качество обработки.

4.5.1. Режимы облучения поверхности цилиндрических металлических материалов

В ходе проведения экспериментов по обработке металлических материалов и изделий цилиндрической формы интенсивным радиально сходящимся электронным пучком большого сечения были определены основные режимы их обработки. Основными критериями для выбора режимов электронно-пучковой обработки были: плотность энергии пучка, достаточная для модификации поверхности металла, а также высокая повторяемость импульсов и минимальное количество пробоев ускоряющего промежутка или их отсутствие. Таким образом, обработка поверхности металлических цилиндрических изделий радиально сходящимся электронным пучком в представленной системе может осуществляться при токе разряда $I_d = 150$ А, ускоряющем напряжении $U_0 = 40\text{--}50$ кВ, длительности импульса $t_{\text{имп}} = 150\text{--}200$ мкс и частоте следования импульсов $f = 1$ Гц. Выбранные режимы генерации позволяют эффективно производить обработку поверхности цилиндрических изделий из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и титана марки ВТ1-0 диаметром 16 мм с удовлетворительной азимутальной и аксиальной неоднородностью плотности тока пучка ($\pm 10\%$).

4.5.2. Результаты облучения

После проведения экспериментов по обработке коллекторов из титана ВТ1-0 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т диаметром 16 мм был проведён цикл измерений микротвёрдости поверхностного модифицированного слоя. Обработка образцов происходила в режимах с $I_0 = 20$ А, $U_0 = 40$ кВ и $t_u = 300$ мкс. Измерение микротвёрдости модифицированного слоя исследуемых

материалов осуществлялось по методу Виккерса на установке ПМТ-3, при нагрузке на индентор 0,2 Н. Был проведён цикл из десяти измерений, в соответствии с ГОСТ 2999-75, ГОСТ 9450-76. Значение микротвёрдости определяли по формуле 4.4.

$$H = \frac{1854 \times P}{d^2}, \quad (4.4)$$

где P -нагрузка, d -диагональ отпечатка.

Таким образом были получены результаты, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – результаты измерения твёрдости

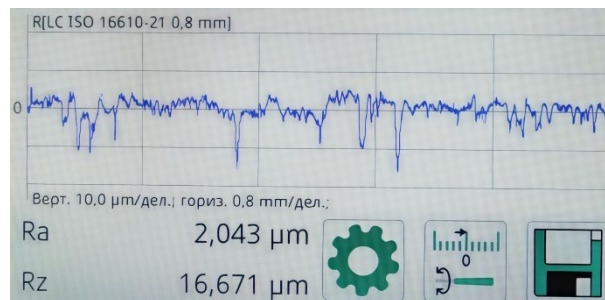
Образец	Исходный	Модифицированный
Титан ВТ1–0, МПа	1800 (± 100)	4700 (± 300)
Сталь 12Х18Н10Т, МПа	1500 (± 50)	1480 (± 50)

Как видно из таблицы 1, микротвёрдость модифицированного слоя титана увеличилась в 2,6 раза в сравнении с исходным образцом. Физическая природа повышения микротвёрдости поверхностного слоя технически чистого титана может быть связана, во-первых, с уменьшением размеров зерен и субзерен α -Ti, во-вторых, с формированием двухфазной (α -Ti + β -Ti) структуры, в-третьих, с увеличением скалярной плотности дислокаций и, в-четвертых, с формированием упругих сжимающих полей напряжений. Выделить какой-либо механизм из перечисленных невозможно из-за отсутствия структурных исследований.

Отсутствие эффекта поверхностного упрочнения стали 12Х18Н10Т, вероятно, связано с противодействием механизмов упрочнения и разупрочнения. Упрочнение поверхностного слоя стали может быть связано с несколькими факторами: с уменьшением размеров зерен и субзерен стали, с увеличением скалярной плотности дислокаций или с формированием твердого раствора на основе α -Fe. Разупрочнение поверхностного слоя стали может происходить из-за формирования растягивающих напряжений и/или растворения частиц карбидной фазы, упрочнявших сталь в исходном состоянии.

Выделить какой-либо механизм из перечисленных невозможно из-за отсутствия структурных исследований.

Также был проведён цикл измерений шероховатости поверхности нержавеющей стали 12X18H10T и титана VT1-0 до и после обработки радиально сходящимся электронным пучком. Результаты измерений представлены на рисунке 4.22 и рисунке 4.23.

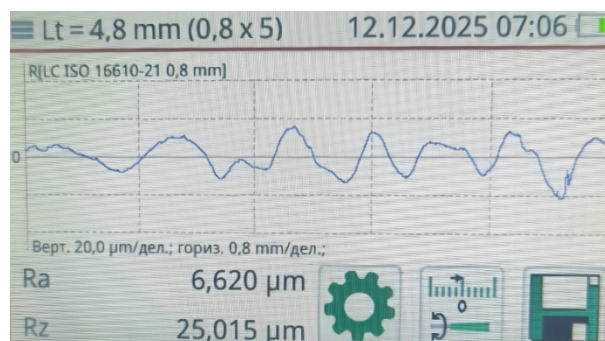


a

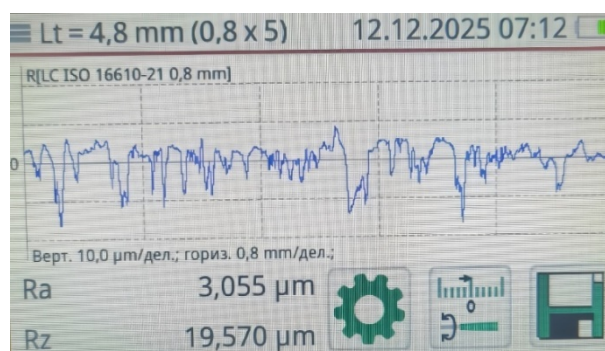


б

Рисунок 4.22 – Результаты профилометрии поверхности образца из стали марки 12X18H10T: *a* – без обработки электронным пучком, *б* – после обработки



а



б

Рисунок 4.23 – Результаты профилометрии поверхности образца из титана марки VT1–0: *а* – без обработки электронным пучком, *б* – после обработки

Из представленных выше графиков видно, что шероховатость поверхности образца из стали 12X18Н10Т уменьшилась с 2 мкм (образец без обработки) до 0,4 мкм (образец после обработки), а шероховатость образца из титана марки VT1–0 уменьшилась с 6,6 мкм до 3 мкм, что является удовлетворительным результатом для решения ряда научных и технологических задач. Полученный эффект в первую очередь связан с быстрым нагревом поверхностного слоя образца выше температуры плавления, что привело к его полировке.

4.6. Выводы по главе

1. В источнике электронов с СПК на основе многодугового разряда низкого давления, генерирующего интенсивный радиально сходящийся

электронный пучок шириной 15 см, установлено, что при ускоряющем напряжении до 50 кВ уменьшение размера ячейки эмиссионной сетки с $0,4 \times 0,4$ мм до $0,14 \times 0,14$ мм приводит к повышению тока в ускоряющем промежутке (с ≈ 50 до ≈ 140 А) и, как следствие, к увеличению суммарной энергии в пучке и его плотности достаточной для модификации поверхности различных металлических материалов. Показано, что такое нехарактерное поведение тока в ускоряющем промежутке может быть обусловлено динамикой плотности эмиссионной плазмы в течение импульса субмиллисекундной длительности.

2. Модернизация источника электронов с СПК на основе многодугового разряда низкого давления, заключающаяся в секционировании многодугового сеточного плазменного катода, позволяющего рассматривать плазменный катод в виде набора элементарных ячеек, ограничивающих области горения дуговых разрядов и исключающих их влияние друг на друга, позволила снизить неоднородность плотности тока интенсивного радиально сходящегося электронного пучка до значений $\pm 10\%$, удовлетворяя требованиям, предъявляемым к электронно-пучковой обработке различных материалов и изделий.

3. В источнике электронов с СПК на основе дуги низкого давления экспериментально продемонстрирован эффект самофокусировки радиально сходящегося электронного пучка, который был подтвержден численным моделированием, продемонстрировав зависимость размера отпечатка на коллекторе от ускоряющего напряжения и тока в ускоряющем промежутке.

4. Разработана элементарная ячейка СПК на основе дуги низкого давления, позволяющая реализовать генерацию радиально сходящегося электронного пучка в секторе 60° со следующими параметрами: ускоряющее напряжение до 30 кВ, ток в ускоряющем промежутке до 100 А, длительность импульсов до 150 мкс, частота следования импульсов до 1 с^{-1} , плотность энергии электронного пучка до 30 Дж/см^2 .

4. Проведены эксперименты по обработке металлических цилиндрических образцов радиально сходящимся электронным пучком в источнике с СПК на основе дугового разряда, демонстрирующие значительное увеличение микротвердости титана ВТ1–0 в 2,6 раза, тогда как микротвердость нержавеющей стали 12Х18Н10Т осталась на прежнем уровне, что может быть связано с отсутствием фазовых переходов. Электронно-пучковая обработка позволила существенно снизить шероховатость поверхности нержавеющей стали 12Х18Н10Т с 2 мкм до 0,4 мкм и титана ВТ1–0 с 6,6 мкм до 3 мкм, обеспечивая эффект полировки за счет локального плавления поверхностного слоя, что также может быть использовано для решения технологических задач на производстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования и их анализ позволили получить следующие **основные результаты:**

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

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

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

4. Проведена модернизация СПК, заключающаяся в установке плазмогенераторов на один из его торцов, разнесении их на угол 60°, уменьшении ширины эмиссионной области до 50 мм и сокращении расстояния до начала эмиссионной области до 80 мм, что позволило снизить аксиальную

неоднородность плазмы с $\approx 40\%$ до $\approx 10\%$, сохранив азимутальную неоднородность на уровне $\approx 10\%$ в отсутствие внешнего ускоряющего электрического поля.

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

6. Секционирование полого анода СПК на основе многодугового разряда низкого давления позволяет снизить азимутальную неоднородность плотности тока радиально сходящегося электронного пучка до 10% за счёт ограничения влияния электронно-пучковых процессов на коллекторе (таких как десорбция, плавление и испарение), возникающих на нём локально и дестабилизирующих работу электронного источника, на отбор электронов с участков плазменной границы, лежащих вне телесного угла участка коллектора, на котором развиваются данные дестабилизирующие процессы. Данные экспериментов подтвердили эффективность предложенной конструкции СПК для повышения стабильности параметров интенсивного радиально сходящегося электронного пучка и снижения неоднородности его распределения, обеспечивая возможность использования разработанного и созданного источника электронов в научных и технологических целях.

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

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

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

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

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

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваль Н. Н. Эмиссионная электроника / Н. Н. Коваль, Е. М. Окс, Ю. С. Протасов, Н. Н. Семашко // Электроника. Прикладная электроника – Москва: МГТУ имени Н. Э. Баумана, – 2009. – 596 с.
2. Озур, Г.Е. Источники низкоэнергетических сильноточных электронных пучков с плазменным анодом / Г.Е. Озур, Д.И. Проскуровский. – Новосибирск, – 2018. – 176 с.
3. Григорьев С.Н. Устройства с полым катодом для обработки поверхности плазмой и пучками ускоренных частиц / С.Н. Григорьев, Ю.А. Мельник, А.С. Метель // Москва: КУРС. – 2016. – 128 с.
4. Бурдовицин, В.А. Форвакуумные плазменные источники электронов / В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, А.В. Медовник [и др.]. – Томск: Изд-во Томского университета. – 2014. – 288 с.
5. Барченко, В.Т. Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий / В.Т. Барченко, О.Л. Вересов, О.И. Гребнев [и др.]. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина). – 2012. – 208 с.
6. Krasik, Y. E. Passive and active plasma emission sources for high-current electron beam generation / Y.E. Krasik, J. Z. Gleizer, D. Yarmolich [et al.] // IEEE Transactions on Fundamentals and Materials. – 2007. – Vol. 127, No. 11. – P. 697-703. – DOI 10.1541/ieejfms.127.697.
7. Бугаев, С.П. Техника получения высокоэнергетических электронных пучков с большим поперечным сечением / С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейндель, П.М. Щанин // ПТЭ. – 1980. – № 1. – С. 7–24.
8. Иванов, Ю.Ф. Низкоэнергетические электронные пучки субмиллисекундной длительности: получение и некоторые аспекты применения в области материаловедения / Ю.Ф. Иванов, Н.Н. Коваль // Структура и свойства

перспективных металлических материалов / под общ. ред. А.И. Потекаева. – Томск: Изд-во НТЛ, – 2007. – С. 345–382.

9. Rotshtein, V. Surface treatment of materials with low-energy, high-current electron beams / V. Rotshtein, Yu. Ivanov, A. Markov // Materials surface processing by directed energy techniques / ed. by Y. Pauleau. – Elsevier. – 2006. – P. 205–240.

10. Proskurovsky, D.I. Application of low-energy, high-current electron beams for surface modification of materials / D.I. Proskurovsky, V.P. Rotshtein, G.E. Ozur // Proc. of 11th Int. Conf. on High Power Particle Beams (BEAMS-96). – Prague, Czech Republic, – 1996. – Vol. 1. – P. 259–262.

11. Громов А.Н. Применение сильноточных импульсных электронных пучков для модифицирования поверхности лопаток газотурбинного двигателя с перфорационными отверстиями / В.А. Шулов, О.А. Быценко [и др.] // Труды 10-ой Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом», Минск, Беларусь, – 2013. – С. 172–175.

12. Жаринов А.В. Плазменный катод электронов с сеточной стабилизацией. I / А. В. Жаринов, Ю. А. Коваленко, И. С. Роганов, П. М. Терюканов // Журнал технической физики. – 1986. – Т. 56, № 1. – С. 66–71.

13. Жаринов А.В. Плазменный катод электронов с сеточной стабилизацией. II / А.В. Жаринов, Ю.А. Коваленко, И.С. Роганов, П.М. Терюканов // Журнал технической физики. – 1986. – Т. 56, № 4. – С. 687–693.

14. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / под ред. П. М. Щанина. – Екатеринбург: УИФ «Наука». – 1993. – 149 с.

15. Груздев, В. А. Отбор электронов из плазмы в присутствии газа в высоковольтном промежутке / В. А. Груздев, Ю. Е. Крейндель, Ю. М. Ларин // Теплофизика высоких температур. – 1973. – Т. 11, № 3. – С. 482–486.

16. Груздев, В.А. Влияние ионизации газа в высоковольтном промежутке с плазменным катодом на положение эмитирующей поверхности плазмы / В. А. Груздев, Ю. Е. Крейндель, Ю. М. Ларин // Журнал технической физики. – 1973. – Т. 43, № 11. – С. 2318–2323.

17. Воробьев, М.С. Динамическое управление мощностью мегаваттного электронного пучка субмиллисекундной длительности в источнике с плазменным катодом / М.С. Воробьев, П.В. Москвин, В.И. Шин [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 2021. – Т. 47, № 10. – С. 38–41. – DOI 10.21883/PJTF.2021.10.50972.18719.

18. Shpanov, D. A. Modeling of the Electron Beam Current during the Pulse for Alloying the Surface of Stainless Steel with Titanium and Aluminum / D. A. Shpanov, P. V. Moskvina, E. A. Petrikova [et al.] // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2024. – Vol. 18, No. S1. – P. S136-S145. – DOI 10.1134/S1027451024701970.

19. Григорьев, Ю.В. Импульсная электронная пушка с выпуском потока большого сечения в атмосферу / Ю.В. Григорьев, Л.П. Шантурин // ПТЭ. – 1978. – №2. – С. 187–189.

20. Бугаев С. П., Литвинов Е. А., Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. Взрывная эмиссия электронов // *Успехи физических наук*. – 1975. – Т. 115, № 1. – с. 101–120.

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

22. Воробьев, М.С. Источник электронов с многодуговым плазменным эмиттером для получения мегаваттных пучков субмиллисекундной длительности / М.С. Воробьев, С.А. Гамермайстер, В.Н. Девятков, [и др.]// Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40, №. 12. – С. 24–30.

23. Лыман, А.А. Обработка стеклянных подложек импульсным форвакуумным плазменным источником электронов / А.А. Лыман, А.В. Казаков, Г.А. Касьянов, Н.А. Панченко // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2024. – № 1-1. – С. 206–208.

24. Рау, А.Г. Электронно-лучевая пушка с термокатодом для сварочной установки / А.Г. Рау, И.В. Осипов, А.В. Тюньков [и др.] // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 129–131. – DOI 10.21293/1818-0442-2017-20-2-129-131.

25. Bugaev, A.S. Radially convergent 30–100- μ s e-beam-pumped Xe and Ne lasers / A.S. Bugaev, N.N. Koval, M.I. Lomaev, et al. // Laser and Particle Beams. – 1994. – Vol. 12, no. 4. – P. 633–646. – DOI 10.1017/S026303460000851X.

26. Кизириди, П.П. Сильноточная электронная пушка с радиально сходящимся пучком / П.П. Кизириди, Г.Е. Озур, В.И. Петров // Потоки энергии и радиационные эффекты (EFRE-2022): Congress Proceedings, Tomsk, 02–08 октября 2022 года / ed. by Dr. Dmitry Sorokin and Anton Grishkov. – Tomsk: TPU Publishing House, – 2022. – С. 35–40. – DOI 10.56761/EFRE2022.S1-O-016501.

27. Энгелько, В.И. Установка Геза-4М для электронно-пучковой модификации поверхности оболочек твэлов с ТЖМТ / В.И. Энгелько, Е.П. Павлов, К.И. Ткаченко, Н.П. Щеголихин // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2019. – № 1. – С. 67–74. – DOI 10.55176/2414-1038-2019-1-67-74.

28. Mueller, G. Surface alloying by pulsed intense electron beams / G. Mueller, V. Engelko, A. Weisenburger, and A. Heinzl. // Vacuum. – 2005. – Vol. 77, no. 4. – P. 469–474.

29. Batrakov, A.V. Surface alloying of metallic substrates with predeposited films through apulsed electron-beam mixing/ A. V. Batrakov, A. B. Markov, G. E. Ozur,[et al.]. // Eur. Phys. J. Appl. Phys. – 2008. – Vol. 43, no. 3. – P. 283–288.

30. Rotshtein, V.P. Surface modification and alloying of metallic materials with low-energy high-current electron beams / V. P. Rotshtein, D. I. Proskurovsky, G. E. Ozur, [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2004. – Vol. 180–181. – P. 377–381.

31. A. Weisenburger [et al.], Creep, creep-rupture tests of Al-surface-alloyed T91 steel in liquid lead bismuth at 500 and 550 °C // J. Nucl. Mater. – 2012. – Vol. 431, nos. 1–3. – P. 77–84.

32. Zou, J.X. Mechanisms of hardening, wear and corrosion improvement of 316 L stainless steel by low energy high current pulsed electron beam surface treatment / J. X. Zou, K. M. Zhang, S. Hao, C. Dong, and T. Grosdidier. // Thin Solid Films. – 2010. – Vol. 519, no. 4. – P. 1404–1415.

33. An, W., Investigation of radially converging electron beams generated by GESA IV / W. An, A. Weisenburger, R. Fetzer, G. Mueller, V. Engelko, and A. Shlapakovski. // 2014 IEEE 41st International Conference on Plasma Sciences (ICOPS) held with 2014 IEEE International Conference on High-Power Particle Beams, Washington DC, USA. – 2014. – P.1–1. – DOI 10.1109/PLASMA.2014.7012444.

34. Fetzer, R. Numerical investigations of radially converging electron beam generated in cylindrical GESA IV facility / R. Fetzer, W. An, A. Weisenburger, and G. Mueller. // 2016 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS), Banff, AB, Canada, 2016. – P. 1–1. – DOI 10.1109/PLASMA.2016.7534093.

35. Engelko, V.I. Experimental Study of the Accelerator of a Pulsed High-Current Radially Converging Electron Beam / V. I. Engelko, R. Fetzer, K. Tkachenko, K. Shchegolikhin, and G. Mueller. // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2019. – Vol. 47, no. 1. – P. 329–335. – DOI 10.1109/TPS.2018.2877990.

36. Нурғалиев Р.К., Цыкин В.С., Птицын Б.Г. [и др.]. Виркатор с радиальным сходящимся пучком [Патент, Российская Федерация]. – № 2352014 С1 : 2007128273/09 : заявл. 23.07.2007 : опубл. 10.04.2009. – М.: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

37. Кицанов, С.А. Виркатор с предмодуляцией электронного пучка на основе сильноточного импульсно-периодического ускорителя / С.А. Кицанов, А.И. Климов, С.Д. Коровин [и др.]. // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72, № 5. – С. 82–90.

38. Селемир, В.Д. Виркатор с баллистической фокусировкой электронного пучка / В.Д. Селемир, А.Е. Дубинов, Б.Г. Птицын [и др.]. // Журнал технической физики. – 2004. – Т. 74, № 5. – С. 125–129.

39. Проскуровский Д. И. Эмиссионная электроника: учебное пособие / Д. И. Проскуровский; М-во образования и науки РФ, Томский гос. ун-т, Сиб. отделение РАН, Ин-т сильноточной электроники СО РАН. — 2-е изд., испр. и доп. — Томск: Томский гос. ун-т, – 2010. – 287 с.

40. Завьялов, М.А. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейндель, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин. – М.: Энергоатомиздат. – 1989. – 256 с.

41. Завьялов, М.А. Электронные пушки для технологии / М.А. Завьялов, Л.А. Лукьянов, А.С. Мурашов [и др.]. // Электротехника. – 1983. – №7. с. 66-68.

42. Месяц, Г. А. Эктоны. Часть 3 : научное издание / Г. А. Месяц ; УрО РАН, , Институт электрофизики. - Екатеринбург : Наука. Уральское отделение. – 1994. – 264 с.

43. Mesyats, G.A. Explosive Electron Emission / G.A. Mesyats. – Ekaterinburg: URO-Press, – 1998. – 250 с.

44. Зайцев, Н.И. Влияние диэлектрического покрытия поверхности кромочного взрывоэмиссионного катода на структуру электронного пучка / Н.И. Зайцев, Е.В. Иляков, Г.С. Кораблев, [и др.] // Тезисы докладов 7-го Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике. – Томск, – 1988. – Ч. 1. – С. 58–60.

45. Бурцев, В.А. Исследование диода со взрывоэмиссионным катодом при больших длительностях импульсах тока / В.А. Бурцев, М.А. Василевский, О.А. Гусев // Журнал технической физики. – 1978. – Т. 48, № 7. – С. 1494–1503.

46. Бурцев, В.А. О повышении стабильности работы многоострийных взрывоэмиссионных катодов / В.А. Бурцев, М.А. Василевский, И.М. Ройфе, Е.В. Середенко, В.И. Энгелько // Письма в Журнал технической физики. – 1978. – Т. 14, № 18. – С. 1083–1087.

47. Гинзбург, Н.С. Короткие сильноточные электронные пучки и мощные микроволновые импульсы в форвакуумном диапазоне давлений / Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, Н. М. Зубарев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2022. – Т. 65, № 5-6. – С. 331-341. – DOI 10.52452/0021346220226505331.

48. Энгелько, В.И. Опытная установка для электронно-лучевой модификации поверхности оболочек ТВЭЛов и ПЭЛов РУ с теплоносителями Рb и Рb-Bi / В.И. Энгелько, К.И. Ткаченко, А.Е. Русанов, Г.А. Биржевой // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2015. – № 4. – С. 93–106.

49. Engelko, V.I. Electron Source of Triode Type with Radial Converging Electron Flow for Irradiation of Cylindrical Targets / V.I. Engelko, V.S. Kuznetsov, and Georg Mueller. // J. Applied Physics. – 2009, – Vol. 105, –023305. DOI: 10.1063/1.2996286

50. Новиков, А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. – М.: Энергоатомиздат. – 1983. – 96 с.

51. Hofer, W.O. Ion induced electron emission / W.O. Hofer // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 1990. – Vol. 45, No. 1–4. – P. 153–164.

52. Yater, J.E. Secondary electron emission and vacuum electronics / J.E. Yater, Journal of Appl. Phys. – 2023. – Vol. 133, № 5. – 050901. — DOI 10.1063/5.0130972

53. Гаврилов, Н.В. Генератор плазмы источника электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда / Н.В. Гаврилов,

П.М. Щанин // В кн.: Источники электронов с плазменным эмиттером – под ред. Ю.Е. Крейнделя, Новосибирск: Наука. – 1983. – С. 74–79.

54. Гаврилов, Н.В. 250-кВ диод с ионно-электронной эмиссией, возбуждаемой импульсной контрагированной дугой / Н.В. Гаврилов, Ю.Е. Крейндель, П.М. Щанин // ЖТФ. – 1985. – Т.55. – №9. – С. 1886–1887.

55. McClure G.W. Low pressure glow discharge / G.W. McClure // Appl. Phys. Lett. – 1963. – V.2. – No. 12. – P. 233–234.

56. Makarov, M. Why does a low-pressure wire-discharge exist self-sustained? / M. Makarov, Y. Loumani, T. Minea [et al.] // Europhys. Lett. – 2006. – V.74. – No. 3. – P. 431–437.

57. Kovalchuk, D. A Coaxial Wire-Feed Additive Manufacturing of Metal Components Using a Profile Electron Beam in Space Application / D. Kovalchuk, V. Melnyk, I. Melnyk // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2022. – Vol. 31. – P. 6069–6082. – DOI 10.1007/s11665-022-06994-z.

58. Ахонин, С.В. Лабораторная электронно-лучевая установка УЭ-208М / С.В. Ахонин, А.Н. Пикулин, В.А. Березос, Д.В. Ковальчук, С.Б. Тугай // Electrometallurgy Today. – 2019. – № 3. – P. 15–22.

59. Мельник, В.И. О расширении технологических возможностей современных газоразрядных электронно-лучевых пушек / В.И. Мельник, И.В. Мельник, Б.А. Тугай, Д.В. Ковальчук // Электронно-лучевые процессы. – 2015. – № 2. – С. 21–24.

60. Teichmann, T. Advances in electron beam technology for environmental and biotechnological applications at Fraunhofer FEP / T. Teichmann [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – Vol. 2443, no. 1. – P. 012017. – DOI 10.1088/1742-6596/2443/1/012017.

61. Гришков, А.А. Низкоэнергетические ускорители электронных пучков большого сечения с выводом в атмосферу (обзор) / А.А. Гришков, М.С. Воробьёв, С.Ю. Дорошкевич, Н.Н. Коваль // ПТЭ. – 2025. – № 2. – С. 4–25.

62. Гаврилов, Н.В. Высоковольтный электронный источник с плазменным эмиттером для формирования пучков большого сечения / Н.В. Гаврилов, Б.М. Ковальчук, Ю.Е. Крейндель [и др.] // ПТЭ. – 1981. – №3. – С. 152–154.

63. Бугаев, С.П. Электронные пучки большого сечения / С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейндель, П.М. Щанин. – М.: Энергоатомиздат. – 1984. – 112 с.

64. Бакеев, И. Ю. Генерация электронного пучка форвакуумным плазменным источником с одиночным эмиссионным каналом при наличии магнитного поля / И.Ю. Бакеев, А.А. Зенин, А.С. Климов, Е.М. Окс // Инженерно-физический журнал. – 2021. – Т. 94, № 5. – С. 1390–1396.

65. Андронов, А.А. Электронно-лучевой синтез керамических покрытий с использованием форвакуумного плазменного источника электронов / А.А. Андронов, Д.Б. Золотухин, Е.М. Окс [и др.] // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии : Материалы V международной конференции, Ижевск, 13–16 ноября 2023 года. – Москва: Национальный исследовательский университет "МЭИ". – 2024. – С. 153.

66. Климов, А.С. Электронно-лучевое испарение керамики в форвакуумном диапазоне давлений / А.С. Климов, А.А. Зенин, Е.М. Окс [и др.] // Прикладная физика. – 2016. – № 3. – С. 40–44.

67. Proskurovsky, D.I. Pulsed electron-beam technology for surface modification of metall / D.I. Proskurovsky, V.P. Rotshtein, G.E. Ozur, et al. // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 1998. – Vol. 16, no. 4. – P. 2480–2488.

68. Proskurovsky, D. Physical foundation for surface treatment of materials with low energy, high current electron beams / D. Proskurovsky, V. Rotshtein, G. Ozur, et al. // Surface and Coatings Technology. – 2000. – Vol. 125, no. 1–3. – P. 49–56.

69. Osipov, I. A plasma-cathode electron source designed for industrial use / I. Osipov, N. Rempe // Review of Scientific Instruments. – 2000. – Vol. 71, no. 4. – P. 1638–1641.

70. Белюк, С.И. Промышленное применение электронных источников с плазменным эмиттером / С.И. Белюк, И.В. Осипов, Н.Г. Ремпе // Известия вузов. Физика. – 2001. – № 9. – С. 77–84.

71. Белюк, С.И. Мощная сварочная электронная пушка с плазменным эмиттером / С.И. Белюк, Б.М. Демидов, А.А. Каплан и др. // Автоматическая сварка. – 1982. – № 1. – С. 74–76.

72. Панин, В.Е. Электронно-лучевая наплавка в вакууме: оборудование, технология, свойства покрытий / В.Е. Панин, С.И. Белюк, В.Г. Дураков и др. // Сварочное производство. – 2000. – № 2. – С. 34–38.

73. Андреев, Ю.А. Исследование генерации ВЧ-излучения с использованием электронного пучка, формируемого в ускорителе с плазменным катодом / Ю.А. Андреев, А.И. Климов, Е.М. Окс, А.А. Чагин // Известия вузов. Физика. – 1993. – № 1. – С. 128.

74. Goebel, D.M. Realization of high efficiency in a plasma-assisted microwave source with two-dimensional electron motion / D.M. Goebel, A.G. Shkvarunets, Y. Carmel, et al. // Physics of Plasmas. – 2002. – Vol. 9, no. 10. – P. 4114–4117.

75. Метель, А.С. Сильноточный плазменный эмиттер электронов на основе тлеющего разряда с многостержневой электростатической ловушкой / А.С. Метель, Ю.А. Мельник // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – № 3. – С. 76. – DOI 10.7868/S0032816213020225.

76. Окс, Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения / Е.М. Окс. – Томск: Издательство научно-технической литературы. – 2005. – 212 с.

77. Ахмадеев, Ю.Х. Генерация однородной низкотемпературной газовой плазмы в импульсном несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом большой площади / Ю.Х. Ахмадеев, В.В. Денисов, Н.Н. Коваль [и др.] // Физика плазмы. – 2017. – Т. 43, № 1. – С. 63–70. – DOI 10.7868/S0367292117010024.

78. Влияние анода несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом на пространственное распределение концентрации плазмы / В.В. Денисов, Н.Н. Коваль, Ю.А. Денисова [и др.] // Известия вузов. Физика. – 2019. – Т. 62, № 7 (739). – С. 47–52. – DOI 10.17223/00213411/62/7/47.

79. Денисов, В.В. Несамостоятельный тлеющий разряд с полым катодом при низких напряжениях горения / В.В. Денисов, Ю.Х. Ахмадеев, Н.Н. Коваль [и др.] // Известия вузов. Физика. – 2019. – Т. 62, № 4 (736). – С. 3–8. – DOI 10.17223/00213411/62/4/3.

80. Гаврилов, Н.В. Плазменный катод электронного ускорителя с большим сечением пучка / Н.В. Гаврилов, В.В. Осипов, О.А. Буреев [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 2005. – Т. 31, вып. 3. – С. 72–78.

81. Коваль, Н.Н. Формирование импульсного разряда низкого давления при принудительном иницировании катодного пятна / Н.Н. Коваль, Ю.Д. Королев, В.Б. Пономарев, В.Г. Работкин, И.А. Шемякин, П.М. Щанин // Физика плазмы. – 1989. – Т. 15, вып. 6. – С. 747–752.

82. Козырев, А.В. Процессы в катодной области дугового разряда низкого давления / А.В. Козырев, Ю.Д. Королев, И.А. Шемякин // Известия вузов. Физика. – 1994. – № 3. – С. 6–23.

83. Коваль, Н.Н. Эффективное использование дуги низкого давления в сетчатом плазменном эмиттере электронов / Н.Н. Коваль, Ю.Е. Крейндель, Г.А. Месяц, В.С. Толкачев, П.М. Щанин // Письма в Журнал технической физики. – 1983. – Т. 9, вып. 9. – С. 568–572.

84. Koval, N.N. The effect of gas on the development of a vacuum arc with a hollow anode / N.N. Koval, Yu.E. Kreindel, V.S. Tolkachev, P.M. Schanin // IEEE Transactions on Electrical Insulation. – 1985. – Vol. EI-20, no. 4. – P. 735–737.

85. Толкачев, В.С. Электронные ускорители с эмиттером на основе дугового разряда низкого давления: дис.канд. техн. наук / В.С. Толкачев. – Томск. – 1988. – 141 с.

86. Воробьёв, М.С. Источник электронов с сетчатым плазменным эмиттером для генерации интенсивного пучка субмиллисекундной длительности / М.С. Воробьёв, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, [и др.] // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т. 57, № 11/3. – С. 204–209.

87. Vorobyov, M.S. The multiarc plasma cathode electron source / M.S. Vorobyov, V.V. Denisov, V.N. Devyatkov, [et al.] // Proc. XXVth Intern. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – 2012. – P. 615–618.

88. Воробьёв, М.С. Формирование и транспортировка интенсивного субмиллисекундного электронного пучка в продольном магнитном поле / М.С. Воробьёв, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин // Труды V Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника». – 2015. – С. 163–170.

89. Коваль, Н.Н. Источники электронов с сеточным плазменным эмиттером: прогресс и перспективы / Н.Н. Коваль, В.Н. Девятков, М.С. Воробьёв // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2020. – Т.63, №10. – С. 7–16.

90. Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков / Под ред. Г.А Месяца. Новосибирск: Наука. – 1976.

91. Белюк С.И. Особенности электрического питания электронных пушек с плазменным катодом / С.И. Белюк, В.М. Бураков, С.В. Гавринцев, Ю.А. Локтионов // В кн.: Источники электронов с плазменным эмиттером – под ред. Ю.Е. Крейнделя, Новосибирск: Наука. – 1983. – С. 91–99.

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

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

94. Казаков, А.В. 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.

95. Девятков, В.Н. Электронный источник с многодуговым плазменным катодом для генерации модулированного пучка субмиллисекундной длительности / В.Н. Девятков, М. А. Мокеев, М. С. Воробьёв, М.С. Торба [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2024, – Т. 50, № 19, – с. 25–28.

96. Бугаев А.С., Генерация в ксеноне при накачке радиально сходящимся пучком электронов / А.С. Бугаев, Н.Н. Коваль, В.В. Рыжов [и др.] // Квантовая электроника. – 1990. – Т. 17, № 1. – С. 17–19.

97. Бугаев, А.С., Генерация СВЧ-излучения радиально сходящимся электронным пучком ускорителя с плазменным катодом / А.С. Бугаев, А.И. Климов, Н.Н. Коваль [и др.] // препринт № 25. – Томск : ТНЦ СО АН СССР, – 1991. – 21 с.

98. Сеницкий, С.Л. Мощные импульсные пучки: учебное пособие / С.Л. Сеницкий, А.В. Аржанников. – Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т. – 2012. – 140 с.

99. Астахов, Ю.Н. Накопители энергии в электрических системах: учебное пособие для электроэнергетических специальностей вузов / Ю.Н. Астахов, В.А. Веников, А.Г. Тер-Газарян. – М.: Высшая школа. – 1989. – 271 с.

100. Лотоцкий, А.П. Физические механизмы при выводе магнитной энергии из индуктивных накопителей в мощных импульсных системах: дис. д-

ра физ.-мат. наук: 01.04.13 / А.П. Лотоцкий. – М.: Институт электрофизики и электроэнергетики РАН. – 1999. – 318 с.

101. Способ заряда емкостного накопителя электрической энергии и устройство для его осуществления: патент РФ № 2351064 / В.И. Иванов, А.С. Петров, Е.Д. Сидоров; патентообладатель ФГБУН Институт электрофизики УрО РАН. – № 2007134562/09; заявл. 12.09.2007; опубл. 27.03.2009, Бюл. № 9. 12 с.

102. Томпсон, М. Руководство по спектрометрическому анализу с индуктивно-связанной плазмой / М. Томпсон, Д.Н. Уолш; пер. с англ. – М.: Недра. – 1988. – 288 с.

103. Чередниченко, А.В. Исследование электронагрева полых катодов вакуумных плазмотронов в малоэрозионных пусковых режимах: дис. канд. техн. наук: 05.09.10 / А.В. Чередниченко. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет. – 2000. – 142 с.

104. Шин, В.И. Широтная и амплитудная модуляция тока пучка для управления его мощностью в течение импульса субмиллисекундной длительности / В.И. Шин, М.С. Воробьев, П.В. Москвин [и др.] // Известия вузов. Физика. – 2022. – Т. 65, № 11(780). – С. 176–184. – DOI 10.17223/00213411/65/11/176.

105. Мифтахов, К.Р. Сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии / К.Р. Мифтахов, А.В. Орлов // Электроэнергетические системы и сети: научная статья. – Стерлитамак: Уфимский государственный авиационный технический университет. – 2016. – С. 45–52.

106. Сверхпроводящий накопитель электрической энергии / А.В. Кацай // ПВ.РФ Международный промышленный портал. – 2009. – 23 дек. – URL: <http://promvest.info> (дата обращения: 14.07.2025).

107. Torba, M.S. Multiarc Plasma Electron Emitter for Generating a Radially Convergent Beam / M.S. Torba, S.Yu. Doroshkevich, M.S. Vorobiev, A.A. Grishkov,

N.N. Koval, R.A. Kartavtsov, M.A. Mokeev, D.A. Shpanov // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2025. – Vol. 68, no. 1. – P. 78–85. – DOI 10.1134/S0020441225700253.

108. Торба, М.С. Генерация радиально сходящегося электронного пучка в источнике электронов с сеточным плазменным катодом / М.С. Торба, С.Ю. Дорошкевич, Р.А. Картавцов, М.С. Воробьёв // *Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР*. – 2023. – № 1-1. – С. 263–266.

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

110. Коваль, Н.Н. Формирование импульсного разряда низкого давления при принудительном иницировании катодного пятна / Н.Н. Коваль, Ю.Д. Королев, В.Б. Пономарев, [и др.] // *Физика плазмы*. – 1989. – Т.15. – В.6. – С. 747–752.

111. Козырев, А.В. Процессы в катодной области дугового разряда низкого давления / А.В. Козырев, Ю.Д. Королев, И.А. Шемякин // *Известия ВУЗов. Физика*, – 1994. – №3. – С. 6–23.

112. Koval, N.N. The effect of gas on the development of a vacuum arc with a hollow anode / N.N. Koval, Yu.E. Kreindel, V.S. Tolkachev, P.M. Schanin // *IEEE Transactions on electrical insulation*. – 1985. – V.20. – №4. – P. 735–737.

113. Бурдовицин, В.А. Форвакуумные плазменные источники электронов / В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, А.В. Медовник, Е.М. Окс, Ю.Г. Юшков. – Томск: Изд-во Том. ун-та. – 2014. – 288 с.

114. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер, М.: Наука. – 1987. – 592 с.

115. Дорошкевич, С.Ю. Измерение параметров плазмы тлеющего разряда орбитронного типа в ускорителе на основе ионно-электронной эмиссии /

С. Ю. Дорошкевич, М.С. Торба, М. С. Воробьев [и др.] // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2023. – № 1-1. – С. 227-229.

116. Андреев, А.А. Вакуумно–дуговые покрытия / А.А. Андреев, Л.П. Саблев, С.Н. Григорьев. – Харьков. ННЦ ХФТИ. – 2010. – 318 с.

117. Девятков, В. Н. Плазменные сеточные катоды на основе контрагированного дугового разряда для генерации импульсного интенсивного низкоэнергетического электронного пучка в плазмонаполненном диоде с продольным магнитным полем / В. Н. Девятков, Н. Н. Коваль // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2019. – Т. 83, № 11. – С. 1509-1513. – DOI 10.1134/S0367676519110097.

118. Langmuir, I. Currents limited by space charge between coaxial cylinders / I. Langmuir, K.B. Blodgett // Phys. Rev. – 1924. – Vol. 24. – P. 49. – DOI 10.1103/PhysRev.24.49.

119. Pavlov, E. P. Industrial Electron Beam Facility for Modification of Gas Turbine Engine Blades / E. P. Pavlov, V. I. Engelko, V. A. Shulov [et al.] // Russian Physics Journal. – 2012. – Vol. 55, No. 12-2. – P. 243-246.

120. Chernov, I.P. Properties and structural state of the surface layer in a zirconium alloy modified by a pulsed electron beam and saturated by hydrogen / I.P. Chernov, S.V. Ivanova, M.Kh. Krening, N. Koval [et al.] // Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki – 2012. – Т. 82. – № 3. – С. 81-87.

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

122. Галанский, В. Л. Влияние рода газа и геометрического фактора на параметры плазмы дугового разряда низкого давления / В. Л. Галанский, Ю. Е. Крейнфельд, Е. М. Окс, А. Г. Рипп // ТВТ. – 1989. – Т. 27, В. 2. – С. 390–392.

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

124. Teresov, A. D. Investigation of characteristics of sub-millisecond electron source with the plasma cathode and the opened boundary of anode plasma / A. D. Teresov, V. T. Astrelin, V. N. Devjatkov [et al.] // 16th International Symposium on High Current Electronics, – Томск: Институт сильноточной электроники СО РАН, –2010. – P. 92-95.

125. Spädtke, P., КОБРА3-INP / P. Spädtke, Wiesbaden: Junkernstr. – 1999.

126. Spaedtke P, Computer Simulation of high-current DC ion beams, The Linear Accelerator Conference: Proceedings, Seeheim, Germany. – 1984. – 356-358.

127. Grishkov, A.A. Simulation of a wide-aperture electron accelerator based on ion-electron emission in repetitively pulsed mode / A.A. Grishkov, M.S. Vorobyov, S.Yu. Doroshkevich, V.A. Shklyayev // Proc. of 8th Int. Cong. on Energy Fluxes and Radiation Effects. – Tomsk. – 2022. – pp.118–127. DOI 10.56761/EFRE2022.S1-P-049004.

128. Астрелин, В.Т. Численное моделирование работы широкоапертурного ускорителя электронов с сетчатым плазменным эмиттером и выводом пучка в атмосферу / В.Т. Астрелин, М.С. Воробьев, А.Н. Козырев, В.М. Свешников //, Прикл. мех. техн. физ., – 2019, – Т. 60(5). – pp. 3–12, DOI 10.15372/PMTF20190501

129. Торба, М.С. Пространственная фокусировка радиально сходящегося электронного пучка в источнике на основе многодугового сеточного плазменного эмиттера / М.С. Торба, А.А. Гришков, С.Ю. Дорошкевич, [и др.] //, Proceedings of 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation. Tomsk: TPU Publishing House. – 2024. – 799–802. DOI 10.56761/EFRE2024.C1-P-023002

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

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2854352

**Устройство для генерации однородного радиально
сходящегося электронного пучка в источнике с
сеточным плазменным катодом**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт сильноточной электроники
Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)
(RU)*

Авторы: *Торба Максим Сергеевич (RU), Дорошкевич Сергей
Юрьевич (RU), Гришков Антон Андреевич (RU), Коваль Николай
Николаевич (RU), Воробьев Максим Сергеевич (RU), Горьковская
Диана Андреевна (RU)*

Заявка № 2025110528

Приоритет изобретения 23 апреля 2025 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 29 декабря 2025 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 23 апреля 2045 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат 004570641734380531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.07.2025 по 28.11.2026

Ю. С. Зубов