

На правах рукописи



Дорошкевич Сергей Юрьевич

**ШИРОКОАПЕРТУРНЫЙ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ
УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ
НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЕЮЩЕГО
РАЗРЯДА С ЭФФЕКТИВНЫМ ВЫВОДОМ ПУЧКА В АТМОСФЕРУ**

2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2023

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

Научный руководитель: доктор технических наук,
Воробьев Максим Сергеевич

Официальные оппоненты: **Косогоров Сергей Леонидович**, доктор технических наук, начальник лаборатории НИЛ КЛ-8 НТЦ «Синтез» АО «НИИЭФА», г. Санкт-Петербург;
Ремнев Геннадий Ефимович, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-производственной лабораторией «Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий» Инженерной школы новых производственных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск;

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Защита состоится «26» декабря 2023 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 24.1.115.02, в Институте сильноточной электроники СО РАН по адресу: 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.

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

<https://www.hcei.tsc.ru/ru/cat/dissertations/dissertations.html>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Озур Г.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время уже неоднократно продемонстрирована возможность и перспективность использования электронных пучков большого сечения (ПБС) с энергией электронов, достигающей нескольких сотен кэВ, и выводом их в атмосферу для научных и технологических целей. К пучкам большого сечения относятся электронные пучки, в которых тепловые скорости электронов не оказывают существенного влияния на распределение плотности тока электронного пучка. Ускорители электронов, генерирующие такие пучки, занимают свою нишу использования не только благодаря сниженным массогабаритам самих установок и упрощенным требованиям к радиационной защите обслуживающего персонала, но и благодаря своим технологическим возможностям, часто недостижимым с помощью высокоэнергетических ускорителей. Так, на сегодняшний день успешно продемонстрирована возможность работы технологий радиационного отверждения лаковых покрытий, обработки сточных вод от загрязнений, в плазмохимических процессах, инициируемых электронным пучком, радиационной стерилизации объектов медицинского назначения, накачки газовых лазеров и др. Также актуальным направлением является радиационная обработка электронными пучками посевного материала с целью его обеззараживания и стимулирующего влияния на ростовые процессы, что повышает урожайность сельскохозяйственных культур. Для решения таких задач требуются надежные и долговечные ускорители электронов со стабильными параметрами, к которым в том числе относятся ускорители с несамостоятельным высоковольтным тлеющим разрядом (ВТР), основанные на ионно-электронной эмиссии, когда ионы, извлекаемые из специально генерируемой плазмы, бомбардируют высоковольтный катод, выбивая вторичные электроны, которые ускоряются и выводятся в атмосферу через тонкую металлическую фольгу. Преимуществами ускорителей на основе несамостоятельного ВТР перед ускорителями других типов (термоэмиссионные, взрывоэмиссионные, с плазменным катодом) являются: относительная простота конструкции, отсутствие нагревательных элементов, высокий срок службы, умеренные требования к насосной группе, возможность управления током пучка без изменения ускоряющего напряжения, генерация эмиссионной плазмы на стороне «земляного» потенциала и др. Однако ускорителям такого типа свойственна существенная зависимость коэффициента вывода тока пучка из вакуума в атмосферу от конфигурации электродной системы, эмиссионной способности высоковольтного катода и сформированной ионно-электронной оптической системы (ИЭОС). Обеспечение коэффициента вывода пучка в атмосферу выше 0,5 в таких системах является непростой задачей и зачастую требует тщательного расчета и моделирования для создания оптимальной ИЭОС. При этом стабильная работа таких ускорителей реализуется в узком диапазоне давлений рабочего газа, которое сверху ограничено пробоем ускоряющего промежутка по закону Пашена, а снизу – стабильностью генерации вспомогательного разряда. Поскольку коэффициент вывода тока пучка

напрямую зависит от сформированной ИЭОС, то возникает необходимость управления параметрами эмиссионной плазмы с целью достижения высокой эффективности вывода электронного пучка для разных условий его генерации без изменения конфигурации электродной системы.

Кроме этого, для генерации эмиссионной плазмы зачастую используется орбитронный тлеющий разряд с полым катодом, отличающийся простотой и надежностью электродной системы, но имеющий один из главных недостатков, заключающийся в возникновении катодных пятен на стенках полого катода с возможным переходом тлеющего разряда в дуговую форму, что приводит либо к локальным неоднородностям плотности тока пучка, либо к электрическому пробое укоряющего промежутка. Поиск новых решений повышения стабильности горения разряда такого типа также является актуальной задачей, поскольку определяет надежность и стабильность работы ускорителя электронов в целом.

В рамках данной работы проведены исследования по возможности повышения коэффициента вывода электронного пучка из вакуума в атмосферу, а также стабильности работы ускорителя электронов на основе несамостоятельного ВТР при переходе к импульсно-периодическому режиму генерации эмиссионной плазмы, когда одно и то же значение среднего тока вспомогательного разряда можно получать при его разных амплитудах, регулируя коэффициент заполнения импульсов.

Цель работы:

Повышение эффективности вывода электронного пучка в атмосферу и расширение диапазона регулировки его параметров в широкоапертурном ускорителе электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда.

Для достижения цели были решены следующие основные задачи:

1. Создание экспериментального стенда ускорителя на основе несамостоятельного ВТР;
2. Разработка и создание оригинального диагностического оборудования для исследования параметров эмиссионной плазмы вспомогательного разряда и распределения плотности тока электронного пучка в атмосфере;
3. Определение параметров вспомогательного орбитронного тлеющего разряда с полым катодом и генерируемой в нем эмиссионной плазмы как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режимах с диапазоном частот 1–70 кГц и изменением коэффициента заполнения импульса от 0,2 до 0,8;
4. Определение параметров вспомогательного разряда и эмиссионной плазмы при подаче ускоряющего напряжения (до 150 кВ), а также определение коэффициента вывода электронного пучка в атмосферу при генерации вспомогательного разряда в режимах, описанных в п.3.;
5. Измерение распределения плотности тока по сечению пучка, выведенного в атмосферу, при генерации вспомогательного разряда в режимах, описанных в п.3.

Научная новизна:

1. Определены параметры орбитронного тлеющего разряда с полым катодом в ранее не используемом импульсно-периодическом режиме генерации с частотой следования импульсов 1–70 кГц, коэффициентом заполнения импульсов 0,2–0,8 и амплитудой тока разряда 50–300 мА;

2. Продемонстрировано влияние генерации электронного пучка на параметры плазмы вспомогательного орбитронного тлеющего разряда как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме генерации, в ускорителе на основе несамостоятельного ВТР;

3. Разработан способ повышения коэффициента вывода электронного пучка в атмосферу для ускорителей на основе несамостоятельного ВТР, характеризующийся частотой следования импульсов тока вспомогательного разряда десятки килогерц и управлением коэффициентом заполнения импульсов (Патент RU № 2772817, приоритет от 01.10.2021 г.);

4. Обнаружено, что генерация вспомогательного разряда в импульсно-периодическом режиме позволяет снизить неоднородность распределения плотности электронного тока по сечению пучка на 10 – 30% по сравнению с непрерывным режимом при сохранении средней плотности тока электронного пучка в ускорителях на основе несамостоятельного ВТР;

Практическая значимость:

1. Создан ускоритель электронов, пригодный для электронно-пучковой обработки различных материалов, с генерацией пучка в атмосфере сечением $45 \times 65 \text{ см}^2$, энергией до 150 кэВ, плотностью электронного тока пучка в импульсе до 15 мкА/см^2 и его среднего значения за период 6 мкА/см^2 , с коэффициентом вывода пучка в атмосферу до 0,6 при частоте следования импульсов 5 – 30 кГц и коэффициенте заполнения импульсов 0,2 – 0,5;

2. Полученные параметры плазмы орбитронного тлеющего разряда в импульсно-периодическом режиме могут быть использованы при проведении численных экспериментов с разрядами данного типа;

3. Новые режимы генерации плазмы орбитронного тлеющего разряда могут быть использованы для создания ионных источников нового поколения, отличающиеся более широким диапазоном параметров генерируемого пучка;

4. Определен диапазон частот следования импульсов для генерации вспомогательного разряда, в котором достигается повышение эффективности вывода электронного пучка в атмосферу;

5. Продемонстрировано уменьшение количества микровзрывов, способных перейти в дуговой разряд, на поверхности полого катода вспомогательного разряда при переходе в импульсно-периодический режим, что повышает стабильность работы ускорителя в целом.

Методы исследования

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

1. Измерение вольт-амперных характеристик вспомогательного тлеющего разряда;

2. Регистрация тока электронного пучка в атмосфере и определение коэффициента вывода;
3. Определение параметров плазмы вспомогательного разряда (концентрации плазмы, температуры электронов, потенциала плазмы) с помощью зондового метода и созданной автоматизированной системы измерения;
4. Измерение распределения концентрации плазмы вспомогательного разряда;
5. Измерение распределения плотности тока по сечению пучка, выведенного в атмосферу, с использованием созданной автоматизированной системы измерения.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Минимальная частота следования импульсов, при которой реализуется устойчивое горение самостоятельного импульсно-периодического орбитронного тлеющего разряда с полым катодом, обеспечивается наличием остаточной плазмы с концентрацией не ниже порогового значения, зависящего от конкретных условий генерации в электродной системе, перед каждым последующим импульсом тока разряда. Использование такого разряда позволяеткратно повысить максимальную концентрацию эмиссионной плазмы по сравнению с непрерывным режимом за счет уменьшения коэффициента заполнения импульсов и роста амплитуды тока разряда. Так, например, при переходе от непрерывного к импульсно-периодическому режиму генерации разряда с частотой следования импульсов десятки килогерц и коэффициентом их заполнения 0,2 – 0,5 концентрация плазмы увеличивается до четырех раз при стабилизации среднего тока разряда от 30 до 100 мА в объеме не менее 0,1 м³ и давлении гелия 2 – 4 Па.

2. Применение в ускорителе электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) импульсно-периодического режима генерации вспомогательного орбитронного тлеющего разряда с частотой следования импульсов десятки килогерц позволяеткратно повысить максимальное значение коэффициента вывода электронного пучка в атмосферу. Рост коэффициента вывода связан с уменьшением времени на развитие фонового тока ВТР, и наличия паузы, в течение которой фоновый ток ВТР существенно снижается. Так, например, по сравнению с непрерывным режимом генерации орбитронного разряда переход к импульсно-периодическому режиму позволяет увеличить максимальный коэффициент вывода пучка сечением 2900 см² с 0,2 до 0,6 без внесения изменений в конструкцию ускорителя.

3. Генерация вспомогательного самостоятельного орбитронного тлеющего разряда в импульсно-периодическом режиме снижает неоднородность распределения плотности тока пучка в атмосфере на 10 – 30% по сравнению с непрерывным режимом генерации за счёт выравнивания распределения концентрации эмиссионной плазмы в объеме, что достигается большей амплитудой тока разряда и наличием паузы его генерации.

4. Создан широкоапертурный импульсно-периодический ускоритель электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда, отличающийся уникальной совокупностью параметров и генерирующий пучок сечением $45 \times 65 \text{ см}^2$ с энергией электронов 100 – 150 кэВ, коэффициентом вывода пучка в атмосферу до 0,6 с плотностью тока в импульсе до 15 мкА/см^2 и ее средним значением до 6 мкА/см^2 с неоднородностью менее $\pm 30\%$ при частоте следования импульсов 5 – 30 кГц и коэффициенте их заполнения 0,2 – 0,5.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

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

Достоверность научных положений обусловлена следующим:

1. Достоверность первого научного положения основана на использовании общепринятой стандартной методики определения параметров плазмы с одиночным зондом Ленгмюра с получением большого массива экспериментальных данных (≈ 8000 точек для каждой зондовой вольт-амперной характеристики) с их последующей обработкой и анализом. Проведением расчета параметров прикатодного слоя во вспомогательном разряде, используя общепринятый теоретический подход, основанный на моделях Чайлда-Ленгмюра и Бома;

2. Достоверность второго научного положения подтверждается стандартным способом определения коэффициента вывода через отношение тока пучка к току в ускоряющем промежутке (току нагрузки высоковольтного источника). Наибольшая ошибка возможна при определении тока пучка в атмосфере, в первую очередь связанная с отражением электронов от коллектора, достигающим 20%. Однако, учет данного коэффициента лишь увеличит ток электронного пучка и повысит коэффициент вывода пучка в атмосферу;

3. Достоверность третьего научного положения подтверждается использованием в автоматизированной системе измерения элементной базы, частотные характеристики которой в полной мере соответствуют исследуемому диапазону частот, а также определением значений плотности тока на каждой секции коллектора путем расчета алгебраического среднего по 200 значениям;

4. Достоверность четвертого научного положения подтверждается использованием стандартных методов измерения параметров электронного пучка, выведенного в атмосферу, описанных в п.2 и п.3.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих всероссийских и международных конференциях: VII Международный Крейнделевский семинар «Плазменная эмиссионная электроника» (с. Макси-

миха, Республика Бурятия, Россия, 2023); Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР 2023» (г. Томск, Россия, 2023); Международный конгресс «Потоки энергии и радиационные эффекты» (EFRE-2020, EFRE-2022) (г. Томск, Россия, 2020, 2022); Международная конференция «Физика плазмы и плазменные технологии» (PPPT – 10) (г. Минск, Беларусь, 2022); XII Международная конференция «Химия нефти и газа» (г. Томск, Россия, 2022); XII Всероссийская конференция по физической электронике (ФЭ-2022) (г. Махачкала, Россия, 2022); Международная конференция «Газоразрядная плазма и ее применения» (GDP-2021) (г. Екатеринбург, Россия, 2021); Международная конференция «Перспективы развития фундаментальных наук – 2020» (г. Томск, Россия, 2020).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 3 относятся к списку публикаций, в которых излагаются основные результаты диссертации (1 патент и 2 статьи в журналах из перечня ВАК), 10 статей в научных журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus, 12 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций.

Внедрение результатов и предложения по их использованию

Диссертационная работа выполнялась в рамках государственного задания № FWRM-2021-0006 (0291-2021-0006), договора ХД-205/23 на выполнение НИОКР «Модернизация узлов ускорителя электронов и оптимизация его основных характеристик», а также в рамках плана научных исследований стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики.

Предполагается использовать полученные результаты для повышения энергетической эффективности ускорителей электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда с выводом пучка в атмосферу, а также, используя ускоритель данного типа, проводить облучение электронным пучком с энергией до 150 кэВ посевного материала для его обеззараживания и стимулирования роста семян, обработки полимерных материалов и изделий с целью улучшения их физико-механических и эксплуатационных свойств.

Личный вклад автора

Представленные в работе результаты получены лично автором, а также при совместной работе с соавторами публикаций: М.С. Воробьевым, А.А. Гришковым, М.С. Торбой, В.А. Леванисовым, С.А. Сулакшиным, Р.А. Картавцовым, Н.Н. Ковалем, И.В. Лопатиным и В.В. Шугуровым. Постановка задач осуществлялась научным руководителем д.т.н. М.С. Воробьевым с регулярными консультациями д.т.н. Н.Н. Коваля при участии автора работы.

Создание автоматизированных систем измерения параметров плазмы и распределения плотности тока электронного пучка проводилось при участии В.А. Леванисова, М.С. Торбы и Р.А. Картавцова.

На основе экспериментальных данных, полученных автором диссертации, сотрудником лаборатории теоретической физики ИСЭ СО РАН А.А. Гришковым было проведено численное моделирование, включающее в себя траекторный анализ заряженных частиц, с обсуждением условий генерации и результатов моделирования совместно с автором диссертации.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 161 страницу. В работе насчитывается 86 рисунков, 7 таблиц и 153 наименования в списке литературы.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

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

В первой главе проведен сравнительный анализ ускорителей электронов на основе различного типа эмиссии (термоэмиссия, взрывная эмиссия, эмиссия из плазменных катодов, ионно-электронная эмиссия), с выводом генерируемого ПБС в атмосферу. Продемонстрирована конкурентоспособность ускорителей с несамостоятельным ВТР перед остальными типами ускорителей с ПБС, а также их перспективность в электронно-пучковой области применения. Отмечены актуальные задачи по совершенствованию данных ускорителей: снижение потерь электронного пучка на анодной и опорной решетке, снижение неоднородности плотности тока пучка в атмосфере, повышение стабильности работы ускорителя, а также расширение диапазона параметров получаемого пучка и повышение эффективности генерации и вывода в атмосферу. Выполнение данных задач возможно путем управления параметрами вспомогательного разряда, которые определяют ИЭОС ускорителя.

Во второй главе описаны методики и техника эксперимента с представлением принципиальных электрических схем созданных систем измерения. Рассмотрены особенности измерения параметров плазмы зондовым методом, проведения калориметрии выведенного в атмосферу электронного пучка и измерения распределения его плотности тока по сечению.

Все экспериментальные исследования проводились на созданном широкоапертурном ускорителе электронов на основе несамостоятельного ВТР с выводом ПБС в атмосферу, схема которого представлена на рисунке 1.

Конструкция ускорителя включает в себя две основные области: область генерации эмиссионной/анодной плазмы с помощью вспомогательного разряда 1, и область ускорения заряженных частиц 2 (ускоряющий промежуток), в которой горит несамостоятельный ВТР, и заряженные частицы приобретают энергию, соответствующую ускоряющему напряжению U_0 .

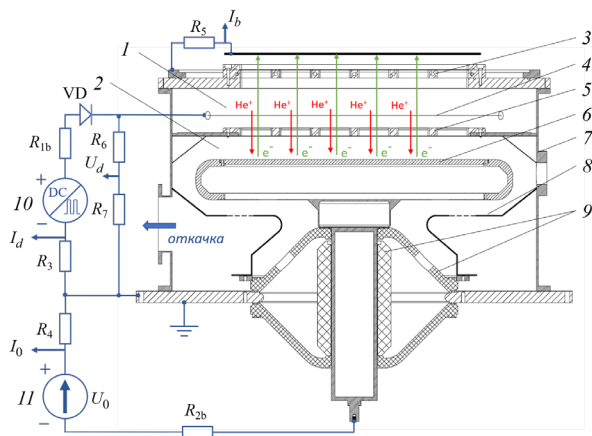


Рисунок 1 – Схема ускорителя электронов с несамостоятельным ВТР: 1 – область анодной плазмы; 2 – ускоряющий промежуток; 3 – выводное фольговое окно; 4 – тонкопроволочный анод; 5 – анодная решетка; 6 – высоковольтный катод; 7 – вакуумная камера; 8 – экран; 9 – изоляторы; 10 – источник питания вспомогательного разряда; 11 – высоковольтный источник питания

Граница между этими промежутками установлена с помощью медной анодной решетки 5, имеющей щелевую конфигурацию отверстий шириной 8 мм и длиной 95 мм, повторяющих конфигурацию отверстий в водоохлаждаемой опорной решетке выводного фольгового окна 3, перекрытого алюминий-магниевой фольгой марки АМг-2н толщиной 30 мкм. Анодная и опорная решетки имеют размер 45×65 см и толщину 2,4 мм, выполнены из меди марки М1 и имеют геометрическую прозрачность 68%.

Роль вспомогательного разряда выполняет самостоятельный орбитронный тлеющий разряд с полым катодом и двумя тонкопроволочными анодами. Полый катод диаметром 103 см и высотой 13 см с общей площадью $\approx 2,1 \text{ м}^2$ представляет собой часть цилиндрической вакуумной камеры 7, ограниченную анодной решеткой 5 и выводным фольговым окном 3. Анодом выступают две вольфрамовые проволоки 4 диаметром 0,35 мм и длиной 85 см с суммарной площадью $\approx 18 \text{ см}^2$, натянутые вдоль длинной стороны анодной решетки и находящиеся в геометрической тени для электронного пучка.

Электропитание вспомогательного разряда осуществляется с помощью источника, который способен работать как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме с частотой f от 1 до 100 кГц с возможностью изменения коэффициента заполнения импульсов D в диапазоне (0,1–0,8), а также позволяющий стабилизировать и управлять средним выходным током I_{dep} в диапазоне от 10 до 500 мА.

Ионы, эмитированные с границы эмиссионной/анодной плазмы и прошедшие через отверстия анодной решетки набирают энергию в ускоряющем промежутке длиной 6,8 см и бомбардируют поверхность высоковольтного катода, выполненного из нержавеющей стали и находящегося под потенциа-

лом до -150 кВ относительно «земли», что приводит к вторичной ионно-электронной эмиссии. Вследствие перезарядки ускоренных ионов, в высоковольтном промежутке возникает поток нейтралов с широким энергетическим спектром, которые также бомбардируют поверхность катода. В результате бомбардировки катода ионами и нейтралами возникают вторичные электроны, которые ускоряются по направлению к анодной решетке до энергии, соответствующей приложенному ускоряющему напряжению. Проходя щелевые каналы анодной решетки, пучок электронов инжектируется в область генерации эмиссионной/анодной плазмы, через которую он проходит с минимальными взаимодействиями с рабочим газом, и затем выводится в атмосферу через выводное фольговое окно.

В третьей главе описан используемый способ генерации вспомогательного тлеющего разряда, который характеризуется частотой следования импульсов f в десятки кГц ($1 - 70$ кГц) с управлением амплитудой и длительностью импульса тока путем изменения коэффициента D при стабилизации тока I_{dcp} . Характерные осциллограммы и ВАХ разряда в непрерывном ($D = 1$) и импульсно-периодическом режимах генерации при стабилизации тока I_{dcp} представлены на рисунке 3 и рисунке 4 соответственно.

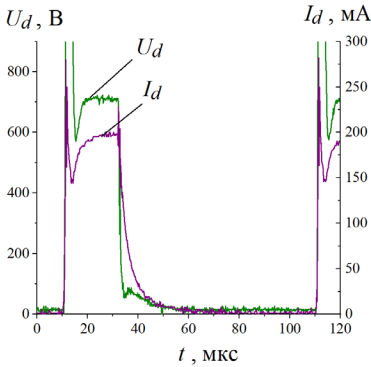


Рисунок 3 – Осциллограммы тока и напряжения вспомогательного разряда: $f = 10$ кГц; $p = 3$ Па; $I_{dcp} = 55$ мА; $D = 0,2$

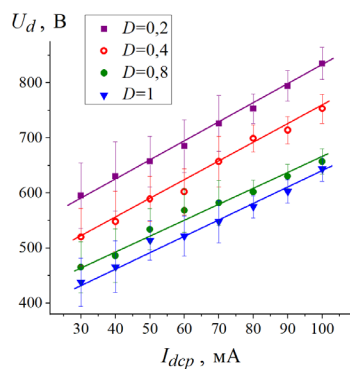


Рисунок 4 – ВАХ вспомогательного разряда при разном коэффициенте заполнения импульсов D : $p = 3$ Па; $f = 20$ кГц

Предложенный импульсно-периодический режим генерации позволяет повысить концентрацию эмиссионной плазмы вспомогательного разряда до четырех раз по сравнению с непрерывным режимом при одинаковом среднем значении тока разряда (Таблица 1).

Повышение тока I_d способствует увеличению объема, занимаемого плазмой, однако, полученные распределения свидетельствуют о высокой неоднородности эмиссионной плазмы в непрерывном режиме генерации тлеющего разряда при токах $I_d = 50$ мА и 75 мА (Рисунок 5).

Таблица 1 – Параметры плазмы орбитронного тлеющего разряда с полым катодом в разных режимах генерации

Режим генерации	φ_{pl} (В)	T_e (эВ)	$n_e \times 10^8$ (см ⁻³)
Непрерывный $I_d = 60$ мА	220	4,9	1,5
Непрерывный $I_d = 90$ мА	230	3,1	4,1
Импульсно-периодический $I_{dcp} = 60$ мА $D = 0,4$ ($t_m = 30$ мкс)	270	6,2	2,6
Импульсно-периодический $I_{dcp} = 60$ мА $D = 0,2$ ($t_m = 15$ мкс)	315	7,7	5,5

Особое внимание уделено изменениям параметров эмиссионной плазмы при генерации электронного пучка (Рисунок 6), который как в импульсно-периодическом режиме, так и в непрерывном, способствует снижению напряжения вспомогательного разряда U_d на ≈ 40 В и уменьшению потенциала плазмы относительно полого катода φ_{pl} на ≈ 20 В, при этом снижается неоднородность распределения концентрации эмиссионной плазмы на 20%. Значения ускоряющего напряжения в диапазоне $U_0 = (10-150)$ кВ практически не оказывают влияния на изменение распределения параметров эмиссионной плазмы, важно лишь наличие U_0 .

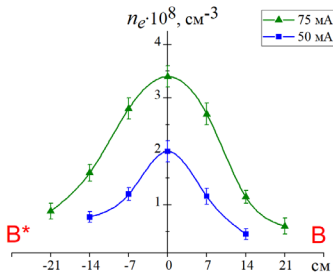


Рисунок 5 – Распределение концентрации эмиссионной плазмы в непрерывном режиме для разного тока разряда при $p = 3$ Па

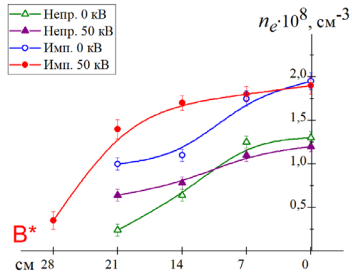


Рисунок 6 – Распределение концентрации плазмы в импульсно-периодическом и непрерывном режимах при различных U_0 ($I_{dcp} = 60$ мА, $f = 10$ кГц, $p = 2,7$ Па, $D = 0,4$)

Проведены оценки времени релаксационных процессов плазмы вспомогательного разряда, которые влияют на генерацию следующего импульса тока разряда, а также на генерацию электронного пучка в целом, что особенно актуально для генерации плазмы в больших вакуумных объемах ($\geq 0,1$ м³).

Длительность релаксационных процессов эмиссионной плазмы после окончания импульса генерации разряда превышает длительность паузы (Рисунок 7), что приводит к инжекции ионов в ускоряющий промежуток в течение всего периода генерации, но в разном их количественном отношении.

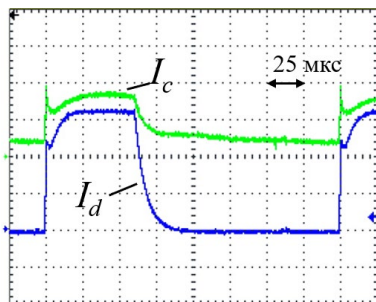


Рисунок 7 – Оциллограммы тока вспомогательного разряда I_d (50 мА/дел) и тока на цилиндрическом коллекторе I_c (0,2 мА/дел) при условиях: $I_{dep} = 30$ мА; $f = 5$ кГц; $p = 3$ Па; $D = 0,3$

по времени зарядка диэлектрических слоев до критической напряженности электрического поля. Таким образом, импульсно-периодический режим вспомогательного разряда позволяет снизить число микровзрывов на стенках полого катода, способствующих переходу в дуговой разряд, и тем самым снизить локальные неоднородности в эмиссионной плазме, влияющие на ВТР и генерацию электронного пучка.

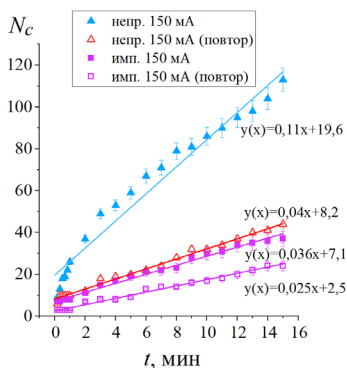


Рисунок 8 – Количество зафиксированных дуг в непрерывном и импульсно-периодическом режиме при повторе эксперимента через 15 минут ($I_{dep} = 150$ мА, $f = 20$ кГц, $p = 0,4$ Па, $D = 0,5$)

малым изменением положения границы эмиссионной плазмы и ИЭОС в диапазоне токов до 100 мА.

Отдельно рассматривается стабильность генерации вспомогательного разряда за счет измерения количества возникающих переходов вспомогательного разряда из тлеющей в дуговую форму горения при генерации разряда в различных режимах (Рисунок 8).

Показано, что при генерации разряда в импульсно-периодическом режиме число возникающих дуг становится меньше с повышением частоты генерации и уменьшением коэффициента заполнения импульса разряда. Данные факторы снижают время генерации разряда, что приводит к росту электрической прочности межэлектродного промежутка. Кроме этого, ограничивается

Четвертая глава посвящена эффективности вывода электронного пучка в атмосферу как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режимах генерации вспомогательного разряда.

В непрерывном режиме коэффициент вывода β , определяемый через отношение тока пучка в атмосфере I_b к току в ускоряющем промежутке I_0 , слабо зависит от величины тока вспомогательного разряда в исследуемом диапазоне, а при токе в 100 мА даже снижается (Рисунок 9) и составляет $\beta < 0,2$ при $U_0 = 140$ кВ, что свидетельствует о значительных потерях тока пучка внутри электродной системы ускорителя. Слабая зависимость коэффициента β от тока вспомогательного разряда I_d в непрерывном режиме генерации связана с

В импульсно-периодическом режиме коэффициент β имеет наибольшее значение в начале импульса генерации, а в паузу составляет около $\beta = 0,05$ (Рисунок 10). Такая зависимость β обусловлена характером изменения тока пучка (Рисунок 11а) и тока в ускоряющем промежутке (Рисунок 11б).

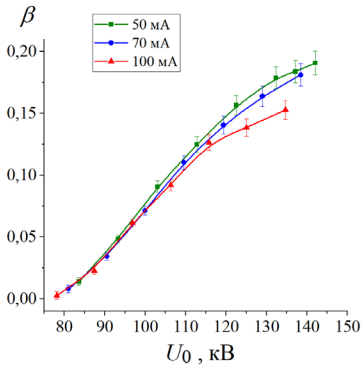


Рисунок 9 – Зависимость коэффициента вывода тока пучка в атмосферу от ускоряющего напряжения в непрерывном режиме при разном токе вспомогательного разряда

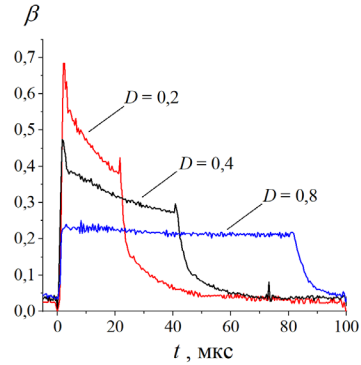


Рисунок 10 – Коэффициент вывода пучка в атмосферу при разном коэффициенте заполнения импульса ($I_{dcp} = 80$ мА, $f = 10$ кГц, $p = 3$ Па)

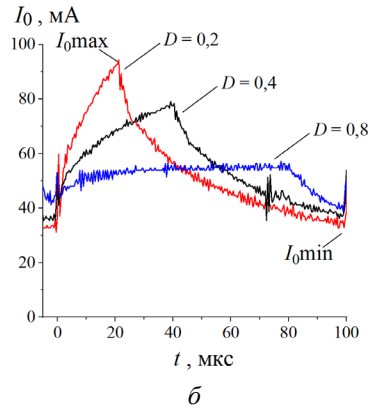
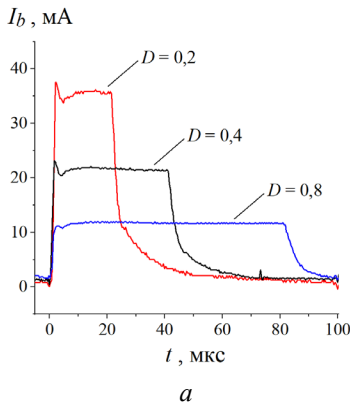


Рисунок 11 – Осциллограммы тока при разном коэффициенте заполнения импульса: а – ток электронного пучка в атмосфере; б – ток в ускоряющем промежутке; условия генерации: $I_{dcp} = 80$ мА, $f = 10$ кГц, $p = 3$ Па

При уменьшении коэффициента заполнения D происходит сокращение длительности импульса тока I_d с соответствующим повышением его амплитуды, что приводит к сокращению длительности и увеличению амплитуды импульса тока пучка I_b , выведенного в атмосферу. Амплитуда тока пучка при этом остается постоянной на протяжении всего импульса генерации для раз-

ных D . Ток в ускоряющем промежутке увеличивается в течение всего импульса генерации, и в отличие от тока пучка в паузу имеет низкую скорость спада и не достигает к концу паузы нулевых значений. Наличие тока I_0 в паузу генерации обусловлено поступлением в ускоряющий промежуток ионов из эмиссионной плазмы вспомогательного разряда, а также релаксационными процессами самого ВТР. В зависимости от ускоряющего напряжения мгновенное значение коэффициента β в конце импульса генерации может достигать $\beta = 0,55$ при $D = 0,2$ и напряжении $U_0 = 150$ кВ.

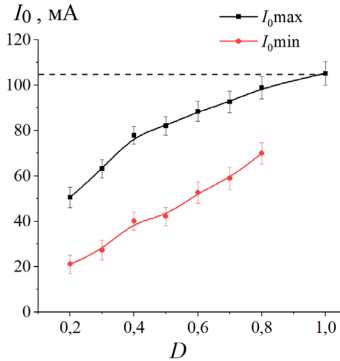


Рисунок 12 – Зависимость минимального I_{0min} и максимального I_{0max} значения тока в ускоряющем промежутке от коэффициента заполнения импульса D

в ускоряющем промежутке за длительность генерации не может выйти на максимальные значения, соответствующие непрерывному режиму (Рисунок 12). Кроме этого, наличие длительной паузы, в течение которой происходит спад I_0 , способствует началу роста тока при следующем импульсе с меньшего значения. Рост тока I_0 косвенным образом свидетельствует о развитии ВТР со временем, что может быть обусловлено такими процессами как: перезарядка ионов и бомбардировка высоковольтного катода быстрыми нейтралами, отражение ускоренных электронов от анода и ионизация газа вблизи него.

С повышением частоты генерации разряда ток выведенного пучка изменяется незначительно, однако ток I_0 при $f = 70$ кГц возрастает, как и в случае повышения коэффициента D (Рисунок 12), что в итоге приводит к снижению коэффициента вывода β . Повышение частоты следования импульсов уменьшает длительность паузы между импульсами, а также за счет наличия индуктивности и емкости в контуре питания разряда увеличивается постоянная составляющая тока вспомогательного разряда, и как следствие, тока пучка. Таким образом, частота более 50 кГц приводит к квазинепрерывному режиму, когда постоянная составляющая тока сравнима со средним значением.

Зависимость на Рисунке 12 представляет собой максимальные I_{0max} и минимальные I_{0min} значения тока в ускоряющем промежутке для разного коэффициента заполнения. В данных режимах сохранялось одинаковое амплитудное значение тока вспомогательного разряда $I_{dam} = 175$ мА для разных D путем подбора среднего значения тока I_{dcp} . Видно, что наименьшие значения тока в ускоряющем промежутке для I_{0max} и I_{0min} соответствуют малым D . По мере увеличения коэффициента D ток I_0 растет и стремится к максимальному значению, соответствующему непрерывному режиму генерации. Малые значения D приводят к тому, что ток

Из траекторного анализа ионов с границы эмиссионной плазмы, полученного с использованием кода KOBRA3-INP, следует, что основная доля потерь электронного пучка локализована в поперечном сечении щели анодной решетки. При образовании кроссовера реальный размер отпечатка может быть и больше поперечного размера щели, поскольку ионная оптика будет определяться не только геометрическими параметрами решетки, но и энергией ионов, которая определяется потенциалом эмиссионной плазмы относительно полого катода разряда.

Представленное на рисунке 13 распределение ионов в зависимости от потенциала плазмы φ_{pl} в диапазоне 50 – 250 В свидетельствует о том, что повышение потенциала плазмы приводит к расширению области ионной бомбардировки поверхности катода. Выделенные области на рисунке соответствуют участкам высоковольтного катода, с которых вторичные электроны будут выводиться в атмосферу 1, либо будут попадать на электроды и составлять потери генерируемого пучка 2.

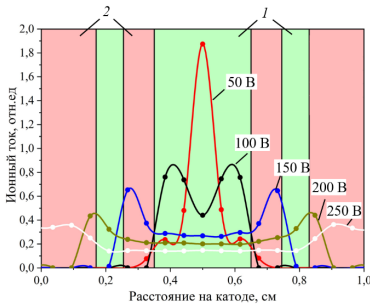


Рисунок 13 – Распределение ионов на поверхности высоковольтного катода при разном потенциале плазмы: 1 – область вывода электронного пучка; 2 – область потерь; расчет кодом OOPIC Pro

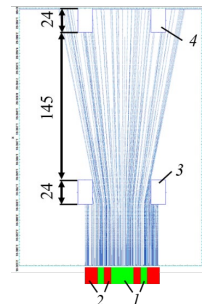


Рисунок 14 – Траектории вторичных электронов с катода: 1 – область вывода электронного пучка; 2 – область потерь; 3 – анодная решетка; 4 – опорная решетка; расчет кодом OOPIC Pro

Из рисунка 14 видно, что при равномерной эмиссии вторичных электронов с поверхности высоковольтного катода в пределах одной щели расфокусировка электронного пучка приводит к тому, что часть электронного пучка выводится в атмосферу через соседние апертуры. Проведенное моделирование показывает, что для данной конфигурации электродной системы оптимальным потенциалом плазмы относительно полого катода является величина 50 – 100 В, при которой достигается наибольший коэффициент вывода и наименьшая неоднородность электронного пучка в пределах одной апертуры анодной решетки.

На рисунке 15 представлена зависимость ионного тока для одной щели от потенциала плазмы при ускоряющем напряжении $U_0 = 100$ и 150 кВ. В коде KOBRA3-INP, в отличие от кода хооріс, положение границы плазмы определялось самосогласованно, поэтому при потенциалах $\varphi_{pl} < 50$ В наблюдается резкое снижение коэффициента прохождения ионов, которое связано с при-

ближением плазмы к анодной решетке и замыканием большей доли частиц на ее боковые стенки.

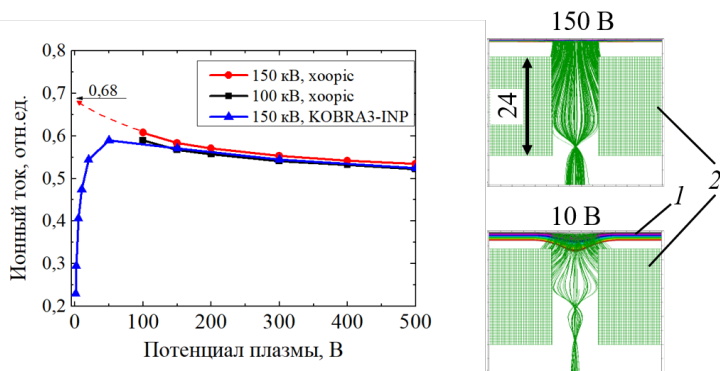


Рисунок 15 – Расчетная зависимость прохождения ионов через анодную решетку в зависимости от потенциала плазмы: 1 – граница эмиссионной плазмы; 2 – анодная решетка; расчет кодом хооріс и КОBRA3-INP

Показано, что уменьшение потенциала плазмы ϕ_{pl} с 150 до 10 В (характерно для паузы между импульсами разряда) способствует замыканию ионов по большей части на анодную решетку, а малая часть от ионного потока, прошедшая в ускоряющий промежуток, становится более сфокусированной. Релаксационные процессы в эмиссионной плазме обеспечивают поставку ионов в ускоряющий промежуток, однако из проведенных расчетов следует, что данные ионы должны создавать вторичные электроны с малым коэффициентом потерь за счет фокусировки. Такой картины не наблюдается в эксперименте, поскольку ток в ускоряющем промежутке в течение паузы остается значительным в сравнении с моментом генерации эмиссионной плазмы, что косвенным образом подтверждает наличие фонового тока ВТР в ускоряющем промежутке.

Было сделано предположение, что значительная часть фонового тока может быть сосредоточена в каналах анодной решетки, поскольку в данной области имеется малый градиент электрического поля, а бомбардировка боковой поверхности анодной решетки ускоренными электронами пучка и ионами из вспомогательного разряда приводит к десорбции газа и локальному повышению давления.

Если в модели эмитировать ионы с боковых поверхностей ребер анодной решетки и ускорить их до энергии сравнимой с потенциалом плазмы вспомогательного разряда 200 В, то образованный данными ионами электронный пучок будет иметь сравнительно низкий коэффициент вывода β относительно электронов, рожденных ионами из плазмы вспомогательного разряда (Рисунок 16). Малый коэффициент вывода связан с расфокусировкой ионов и бомбардировкой области катода, размеры которой превышают границы апертур анодной решетки. Полученные высокие значения коэффициента β для

ионов из эмиссионной плазмы обусловлены рассмотрением случая без учета потерь в выводной фольге и фонового тока в ускоряющем промежутке.

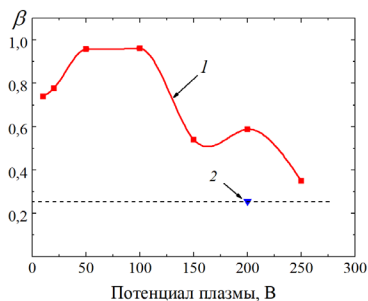


Рисунок 16 – Расчетный коэффициент вывода электронного пучка в атмосферу в зависимости от потенциала плазмы: 1 – коэффициент для ионов из эмиссионной плазмы; 2 – для ионов с боковых стенок апертуры анодной решетки; расчет кодом OOPIC Pro

толщине анодной решетки (24 мм), так и о существенном вкладе фонового тока ВТР в области анодной решетки ускоряющего промежутка.

Отдельно рассматривается вопрос снижения неоднородности распределения плотности тока по сечению пучка, выведенного в атмосферу, при использовании предложенного способа генерации вспомогательного разряда. Для измерения распределения плотности тока электронного пучка, выведенного в атмосферу, использовался созданный секционированный коллектор (Рисунок 17), а также специально созданная автоматизированная система измерения, позволяющая определить распределение как в импульсно-периодическом, так и в непрерывном режимах.

На рисунке 18 приведено распределение плотности тока электронного пучка, генерируемого в непрерывном режиме вспомогательного разряда. Из диаграммы видно, что максимум распределения находится в центре, что объясняется наибольшей эффективностью ионизационных процессов в приосевой области плазменного эмиттера. Однако присутствует смещение плотности тока пучка по длинной стороне в область коллекторов (1, 7, 13, 19), расположенных ближе к напуску рабочего газа. Такое распределение свидетельствует о локальном увеличении концентрации эмиссионной плазмы вспомогательного разряда возле напуска. Повышение амплитуды тока разряда приводит к снижению неоднородности генерируемого электронного пучка, а также росту величины плотности тока пучка. Данные зависимости повторяют изменение концентрации плазмы вспомогательного разряда, которое было получено при измерениях параметров эмиссионной плазмы (глава 3), проведенных зондовым методом.

Проведенные калориметрические измерения мощности электронного пучка с помощью проточного водяного калориметра показали, что средняя мощность выведенного пучка составляет до 1 кВт при расчетной мощности в ускоряющем промежутке от 4 до 8 кВт для разных режимов генерации вспомогательного разряда. Измеряя среднюю мощность выведенного пучка и мощность его потерь на водоохлаждаемой опорной решетке фольгового окна сделана оценка, из которой следует, что около 50% потерь мощности электронного пучка локализовано на анодной решетке. Большие потери пучка на анодной решетке свидетельствуют как о неоптимальной электронной оптике при большой

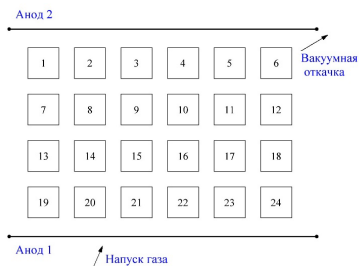


Рисунок 17 – Схема нумерации секций коллектора

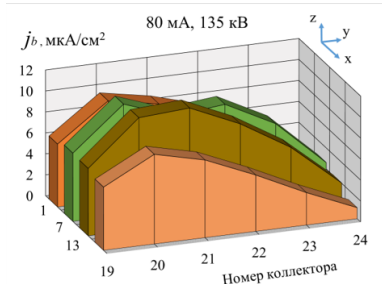
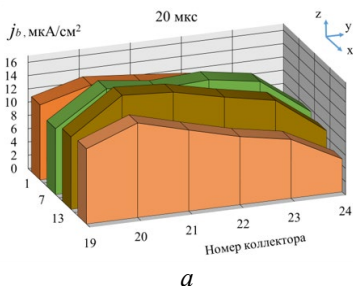
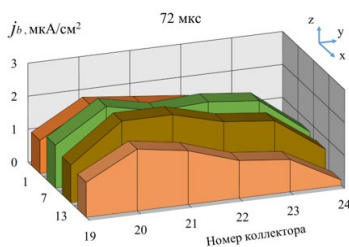


Рисунок 18 – Распределение плотности тока пучка в атмосфере в непрерывном режиме генерации ($U_0 = 135$ кВ, $I_d = 80$ мА)

Распределение плотности тока пучка в импульсно-периодическом режиме генерации приведено на рисунке 19. При ускоряющем напряжении 135 кВ было зарегистрировано распределение на 20-ой микросекунде (генерация вспомогательного разряда) и на 72-ой (пауза генерации вспомогательного разряда).



а



б

Рисунок 19 – Распределение плотности тока пучка в импульсно-периодическом режиме: $I_{dcp} = 80$ мА, $f = 10$ кГц, $p = 3$ Па, $U_0 = 135$ кВ, $D = 0,4$; а – во время генерации на 20 -ой мкс; б – в паузе генерации разряда на 72-ой мкс

Из диаграмм видно, что распределение в импульсно-периодическом режиме генерации ($f = 10$ кГц) также смещено в сторону напуска рабочего газа, однако по сравнению с непрерывным режимом генерации зависимость от напуска становится менее выраженной. При переходе с непрерывного режима $I_d = 80$ мА в импульсно-периодический: $f = 10$ кГц, $I_{dcp} = 80$ мА, $D = 0,4$ неоднородность электронного пучка N по сечению снижается на 20 %. Средняя плотность тока пучка в атмосфере в импульсно-периодическом режиме генерации вспомогательного разряда остается такой же величины, как и в непрерывном режиме $j_b \approx 6$ мкА/см².

Генерация разряда в импульсно-периодическом режиме: $f = 10$ кГц, $I_{dcp} = 50$ мА, $D = 0,2$ позволяет выводить электронный пучок в атмосферу с неоднородностью $N = \pm 15\%$, что является лучше вышеописанного режима ($f = 10$ кГц, $I_{dcp} = 80$ мА, $D = 0,4$), обладающего бóльшим средним током раз-

ряда. Из этого следует, что уменьшение коэффициента заполнения импульса при неизменном среднем значении тока разряда позволяет за меньшее время получить электронный пучок с меньшей неоднородностью плотности тока.

Таким образом, импульсно-периодический режим генерации вспомогательного разряда позволяет снизить неоднородность распределения плотности тока электронного пучка по сравнению с непрерывным режимом на величину 10 – 30% в соответствии с частотой 10 – 20 кГц при сохранении средней плотности тока электронного пучка.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации:

1. На основании проведенных исследований создан импульсно-периодический ускоритель электронов на основе несамостоятельного ВТР, генерирующий электронный пучок сечением $45 \times 65 \text{ см}^2$, энергией 100–150 кэВ, плотностью электронного тока пучка в импульсе до 15 мкА/см^2 и ее средним значением 6 мкА/см^2 при неоднородности менее $\pm 30\%$, с коэффициентом вывода пучка в атмосферу до $\beta = 0,6$ при частоте следования импульсов 5 – 30 кГц и коэффициенте заполнения импульсов 0,2 – 0,5.

2. Использование самостоятельного орбитронного тлеющего разряда с полым катодом в импульсно-периодическом режиме для генерации электронного пучка в ускорителе на основе несамостоятельного ВТР с частотой следования импульсов 1 – 30 кГц позволяет повысить концентрацию эмиссионной плазмы до четырех раз по сравнению с непрерывным режимом путем изменения коэффициента заполнения импульсов в диапазоне 0,2 – 0,5 при стабилизации среднего тока вспомогательного разряда.

3. Генерация электронного пучка в импульсно-периодическом режиме, также как в непрерывном, способствует снижению напряжения горения вспомогательного разряда на $\approx 40 \text{ В}$ и уменьшению потенциала плазмы относительно полого катода на $\approx 20 \text{ В}$, при этом снижается неоднородность распределения концентрации эмиссионной плазмы на 20%.

4. Коэффициент вывода β слабо зависит от амплитуды тока разряда I_d в исследованном диапазоне, однако увеличивается с уменьшением коэффициента D при стабилизации среднего значения тока I_d , что связано с уменьшением времени на развитие части тока несамостоятельного ВТР и достижения меньшего значения тока в ускоряющем промежутке. Переход к импульсно-периодическому режиму генерации вспомогательного разряда с частотой 5 – 30 кГц позволяет увеличить коэффициент вывода β на 0,3 в момент максимума тока в ускоряющем промежутке без изменения конструктивных параметров ИЭОС ускорителя.

5. В паузу генерации вспомогательного разряда спад тока пучка в атмосфере I_b происходит быстрее, чем спад тока в ускоряющем промежутке I_0 , что приводит к резкому уменьшению коэффициента вывода до $\beta = 0,01 - 0,1$. Такой рост потерь тока пучка в паузу между импульсами тока разряда связан с релаксационными процессами в плазме вспомогательного разряда, уменьшением энергии и доли ионов, поступающих в ускоряющий промежуток, а следовательно, изменением ИЭОС и релаксационными процессами ВТР.

6. Импульсно-периодический режим вспомогательного разряда позволяет снизить число переходов тлеющего разряда в дуговую форму горения, и тем самым снизить локальные неоднородности в эмиссионной плазме, влияющие на несамостоятельный ВТР, и, соответственно, генерацию электронного пучка.

7. Генерация вспомогательного самостоятельного орбитронного тлеющего разряда в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов 10 – 20 кГц снижает неоднородность распределения плотности тока по сечению пучка на 10 – 30% по сравнению с непрерывным режимом при сохранении средней плотности тока электронного пучка. Наименьшая неоднородность как в течение генерации вспомогательного разряда, так и в паузу между импульсами достигается при меньших значениях коэффициента заполнения импульса, а именно в диапазоне 0,2 – 0,5.

8. Экспериментально показана возможность получения эффекта обеззараживания и стимулирующего влияния на ростовые процессы семян сельскохозяйственных культур, используя ускоритель электронов на основе самостоятельного высоковольтного тлеющего разряда с энергией электронов до 150 кэВ.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Эффективный способ генерации и вывода электронного пучка в атмосферу в широкоапертурном ускорителе на основе ионно-электронной эмиссии / **С.Ю. Дорошкевич**, М.С. Воробьёв, М.С. Торба, А.А. Гришков, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, В.В. Шугуров, В.А. Леванисов // Приборы и техника эксперимента. – 2023. – № 3. – С. 53–60.

2. Предпосевная обработка семян яровой пшеницы импульсным электронным пучком в атмосфере / **С.Ю. Дорошкевич**, К.П. Артёмов, Н.Н. Терещенко, Т.И. Зюбанова, М.С. Воробьёв, Е.Е. Акимова, О.М. Минаева, Е.А. Покровская, В.И. Шин, М.С. Торба, В.А. Леванисов // Химия высоких энергий. – 2021. – Т. 55. – № 4. – С. 326–332.

Патент:

3. Способ повышения энергетической эффективности источников электронов на основе ионно-электронной эмиссии / **С.Ю. Дорошкевич**, М.С. Воробьёв, Н.Н. Коваль, М.С. Торба, С.А. Сулакшин, В.А. Леванисов, В.В. Шугуров, В.И. Шин // Патент на изобретение 2772817 С1, 26.05.2022. Заявка № 2021128647 от 01.10.2021.

Публикации в сборниках статей и трудов конференций

4. Снижение неоднородности плотности тока пучка в атмосфере в ускорителе электронов на основе несамостоятельного ВТР / **С.Ю. Дорошкевич**, М.С. Воробьёв, А.А. Гришков, М.С. Торба, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, Р.А. Картавцов // Труды VII международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника», Улан-Удэ, 2023, С. 92–96.

5. Измерение параметров плазмы тлеющего разряда орбитронного типа в ускорителе на основе ионно-электронной эмиссии / **С.Ю. Дорошкевич**, М.С. Торба, М.С. Воробьёв, С.С. Ковальский, А.А. Гришков, // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск (17–19 мая), В – Спектр, 2023. – Ч. 1. – С. 227 – 229.

6. Simulation of a wide-aperture electron accelerator based on ion-electron emission in repetitively pulsed mode / А.А. Grishkov, М.С. Vorobyov, **S.Yu. Doroshkevich**, V.A. Shklyayev // Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. Congress Proceedings, Tomsk, 2022. – P. 118–127.

7. Auxiliary orbitron glow discharge of a wide aperture electron accelerator based on ion-electron emission / А.А. Grishkov, М.С. Vorobyov, **S.Yu. Doroshkevich**, V.A. Shklyayev // Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. Congress Proceedings, Tomsk, 2022. – P. 109–117.

8. Низкоэнергетические ускорители электронов с плазменным эмиттером и выводом пучка в атмосферу для обработки органических материалов / **С.Ю. Дорошкевич**, М.С. Воробьев, М.С. Торба, В.А. Леванисов, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин // В сборнике: Химия нефти и газа. Материалы XII Международной конференции. Томск, 2022. – С. 315–316.

9. Efficiency of electron beam extraction to the atmosphere in an accelerator based on ion-electron emission / **S.Yu. Doroshkevich**, M.S. Vorobyov, M.S. Torba, N.N. Koval, S.A. Sulakshin, V.A. Levanisov // Journal of Physics: Conference Series. 15th International Conference on "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" (GDP-2021). – 2021. – 012116.

10. Increasing the operation stability of the electron accelerator based on ion-electron emission / M.S. Torba, **S.Yu. Doroshkevich**, M.S. Vorobyov, V.A. Levanisov // Journal of Physics: Conference Series. 15th International Conference on "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" (GDP-2021). – 2021. – 012122.

11. Measurement and calculation of the absorbed dose during irradiation of the grain by a pulse electron beam with energy up to 160 keV / M. Vorobyov, **S. Doroshkevich**, K. Artyomov, E. Pokrovskaya // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE-2020. – 2020. – P. 310–314.

12. Electron accelerator based on ion-electron emission for generation of a wide-aperture beam / **S. Doroshkevich**, S. Sulakshin, M. Vorobyov, N. Koval, A. Ekavyan, A. Chistyakov // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE-2020. – 2020. – P. 42–45.

13. Дорошкевич, С.Ю. Широкоапертурный ускоритель электронов на основе ионно-электронной эмиссии с выводом пучка в атмосферу / **С.Ю. Дорошкевич** // В сборнике: перспективы развития фундаментальных наук, сборник научных трудов XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск. – 2020. – С. 32–34.

14. Measurement of plasma parameters in an electron source with a plasma cathode based on a low-pressure arc discharge / **S.Y. Doroshkevich**, M.S. Vorobyov, S.S. Kovalsky I.V. Lopatin, N.N. Koval, S.A. Sulakshin // Journal of Physics: Conference Series. The proceeding 14th International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications". Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. – 2019. – 012006.

15. Energy spectrum of an electron beam outputted into ambient air on an electron accelerator with a grid plasma cathode / M.S. Vorobyov, V.F. Tarasenko, E.K. Baksht, A.V. Kozyrev, N.N. Koval, **S.Y. Doroshkevich** // Proceedings - 2018 20th International Symposium on High-Current Electronics, ISHCE 2018. – 2018. – P. 66–69