

На правах рукописи



Воробьев Максим Сергеевич

**РАЗВИТИЕ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ С СЕТОЧНЫМИ
ПЛАЗМЕННЫМИ ЭМИТТЕРАМИ НА ОСНОВЕ ДУГОВОГО
РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ С ПОЛЫМ АНОДОМ**

1.3.5 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2022

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

Научный консультант:	доктор технических наук, профессор, Коваль Николай Николаевич
Официальные оппоненты:	Бурдаков Александр Владимирович , доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, советник дирекции Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск; Ремнёв 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; Косогоров Сергей Леонидович , доктор технических наук, начальник лаборатории НИЛ КЛ-8 НТЦ «Синтез» АО «НИИЭФА», г. Санкт-Петербург
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

Защита состоится «14» декабря 2022 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.03, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на официальном сайте ТУСУРа: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/vev6rwpb>

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук



Казиков А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. К настоящему моменту источники ускоренных электронов находят широкое практическое и научное использование и обладают широким диапазоном параметров генерируемого электронного пучка, определяемого как способами его генерации, так и решаемой задачей по применению. Источники электронов могут использоваться для обработки различных органических материалов (полимеры, пищевые или медицинские продукты и др.), чаще всего пучками, выводимыми в атмосферу, либо для обработки в вакууме различных неорганических (металлических и металлокерамических) материалов с целью изменения функциональных и эксплуатационных свойств их поверхности.

При этом глубокое изучение физики процессов, разработка и создание на этой основе нового оборудования с уникальными параметрами, пригодного для решения задач, отраженных в Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (СНТР РФ), является одним из основных и приоритетных направлений. Так, создание источников электронов нового поколения представляет интерес для пяти из семи приоритетных направлений СНТР РФ. Кроме этого, разработка и создание новых источников электронов согласуется с основными направлениями развития Томской области, которая активно развивает инновационные кластеры типа: кластер «Smart Technologies Tomsk», кластер ядерных технологий, нефтехимический и лесопромышленный кластеры, кластер технологий переработки возобновляемых природных ресурсов и др., где использование электронных пучков целесообразно и экономически оправдано.

Вышеуказанные задачи можно рационально решать, используя источники электронов с сеточными плазменными эмиттерами (СПЭ) на основе дуги низкого давления с полым анодом, имеющих слоевую стабилизацию границы эмиссионной плазмы, что конструктивно реализуется за счет использования мелкоструктурной металлической сетки, размер ячеек которой сравним с толщиной ионного слоя. Такие источники электронных пучков обладают рядом преимуществ как перед источниками с термокатодом (большой срок службы, нечувствительность к вакуумным условиям, высокая энергетическая эффективность, малое время готовности), так и перед источниками на основе взрывоэмиссионных катодов (большая длительность импульсов, повышенный срок службы, высокая однородность плотности тока пучка, большая частота следования импульсов). Термином «сеточный плазменный эмиттер» обозначается электродная система плазменного источника электронов, внутри которой генерируется плазма какого-либо типа разряда, из которой осуществляется эмиссия электронов. Отбор электронов в ускоряющий промежуток осуществляется через ячейки эмиссионной сетки, геометрия и расположение которой могут быть различны в зависимости от конкретного источника. Используя СПЭ с слоевой (или сеточной) стабилизацией границы эмиссионной плазмы, за счет разделения системы электропитания разряда и ускорения электронов, можно независимо друг от друга и в широких пределах

управлять основными параметрами пучка (ток, энергия ускоренных электронов, длительность и частота следования импульсов), что сложно реализуемо или невозможно в источниках электронов на основе других типов эмиттеров.

При рассмотрении различных типов СПЭ необходимо отметить эмиттеры на основе дугового разряда низкого давления, отличающиеся высокой энергетической эффективностью генерации эмиссионной плазмы, что позволяет генерировать интенсивные субмиллисекундные электронные пучки амплитудой тока сотни ампер и выше. Однако использование дугового разряда в таких структурах неразрывно связано с наличием в эмиттере «точечных» источников плазмы – катодных пятен, которые чаще всего стабилизируются на холодном металлическом катоде, площадью на порядки меньше, чем у остальных электродов плазменного эмиттера. Локализация эмиссионных центров приводит к появлению пространственной неоднородности эмиссионной плазмы, эмиссионного тока и, как результат, тока пучка. Поскольку площадь поперечного сечения пучка может достигать десятков, сотен и даже тысяч квадратных сантиметров, это приводит к необходимости генерации эмиссионной плазмы в больших объемах, что в условиях ее пространственно-временного развития в течение импульсов субмиллисекундной длительности также ведет к изменению указанных параметров в течение импульса тока пучка. Наличие неоднородностей не только усложняет дальнейшее использование генерируемых электронных пучков, но и является одной из основных причин нестабильности работы источника электронов в целом, что, прежде всего, связано с нарушением сеточной стабилизации границы эмиссионной плазмы, снижением электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка, и в конечном итоге существенно ограничивает дальнейшее увеличение параметров генерируемых электронных пучков.

Большой вклад в развитие плазменной эмиссионной электроники, используя, в частности, источники электронов с СПЭ для генерации электронных пучков различной конфигурации, имеющих очень широкий диапазон параметров и технологические возможности, внесли Ю.Е. Крейндел, А.В. Жаринов, П.М. Щанин, М.А. Завьялов, Н.Н. Коваль, В.И. Гушенец, Н.В. Гаврилов, Е.М. Окс, Н.Г. Ремпе, В.А. Бурдовицин, А.П. Семенов, В.Я. Мартенс, А.С. Метель и др., дело которых сейчас продолжают их ученики. Обзор литературных данных показал, что в настоящий момент по-прежнему имеется потенциал для дальнейшего изучения и развития такого оборудования, ориентированного на расширение параметров источников электронов с СПЭ и стабильность генерации эмиссионной плазмы и электронного пучка, что и определяет **актуальность** настоящей работы.

Именно поэтому настоящая диссертационная работа посвящена изучению физических процессов работы, разработке и совершенствованию конструкций, а в целом развитию таких источников электронов, и, в частности, источников с СПЭ на основе дуги низкого давления, стабильно генерирующих пучки электронов, с совокупностью параметров, не достигавшимися ранее, что представляет научный и практический интерес, и позволяет расширить сферу возможных применений таких источников электронов.

Цели работы заключались:

- в комплексном изучении процессов генерации интенсивных субмиллисекундных электронных пучков в источниках с сеточным плазменным эмиттером на основе дугового разряда низкого давления с полым анодом и поиске методов контролируемого изменения их параметров в течение импульса тока пучка субмиллисекундной длительности;

- в создании на основе этих исследований нового поколения источников электронов с СПЭ, способных формировать электронные пучки различной конфигурации с широким диапазоном интегральных и удельных параметров электронного пучка, контролируемых как в течение его импульса, так и от импульса к импульсу;

- в демонстрации возможности использования интенсивных субмиллисекундных электронных пучков для эффективной обработки различных органических и неорганических материалов и изделий с целью улучшения их эксплуатационных свойств, а также для других научных и технологических применений.

Для достижения целей были решены следующие основные **задачи**:

- изучены физические процессы генерации эмиссионной плазмы в дуговых разрядах низкого давления, эмиссии из нее электронов в системах с СПЭ с полым анодом, формирования и транспортировки электронных пучков различных конфигураций и параметров;

- созданы или модернизированы источники электронов с СПЭ на основе дугового разряда низкого давления, способные генерировать электронные пучки в широком диапазоне параметров (энергия электронов десятки – сотни кэВ, амплитуда импульса тока пучка единицы – сотни ампер, длительность импульса тока пучка единицы – сотни микросекунд, частота следования импульсов от одиночных импульсов до десятков импульсов в секунду);

- разработано и модифицировано диагностическое оборудование для различных источников электронов с СПЭ на основе дугового разряда низкого давления для исследования параметров генерируемых электронных пучков, и в частности, общей энергии пучка; распределения плотности энергии и тока пучка по его сечению; определения энергетического спектра электронов в пучке, выведенном в атмосферу; измерения параметров эмиссионной плазмы; измерения температуры поверхности мишени, облучаемой интенсивным электронным пучком;

- разработаны современные и модифицированы ранее используемые системы электропитания разработанных и модернизированных источников электронов с СПЭ на основе дугового разряда низкого давления;

- определены условия генерации модулированного электронного пучка субмиллисекундной длительности в низкоэнергетическом (5–25 кэВ) источнике электронов, позволяющие осуществлять управление мощностью тока пучка в течение импульса субмиллисекундной длительности;

- выявлены и экспериментально продемонстрированы механизмы стабилизации тока электронного пучка в источниках электронов различной конфи-

гурации, обеспечивающие расширение диапазона параметров генерируемых электронных пучков;

- определены способы снижения неоднородности плотности эмиссионного тока, в том числе ответственные за повышение электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка;

- продемонстрирована возможность управления температурой поверхности образцов, облучаемых низкоэнергетическим модулированным электронным пучком субмиллисекундной длительности;

- продемонстрированы новые возможности использования интенсивных импульсных электронных пучков большого сечения с выводом пучка в атмосферу (модификация натурального латекса, формирование углеродных структур в пленках поливинилхлорида, обработка сельхозпродукции); возможности использования модулированных электронных пучков субмиллисекундной длительности для обработки поверхности различных материалов и изделий с целью улучшения их эксплуатационных и функциональных свойств; перспективности использования источника электронов с СПЭ на основе дуги низкого давления для нагрева плазмы в открытой магнитной ловушке на установке «ГОЛ-3».

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

1. Определены, обоснованы и реализованы механизмы генерации электронного пучка, обеспечивающие увеличение электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка в источниках электронов с СПЭ на основе дуги низкого давления, заключающиеся во введении отрицательной обратной связи по току пучка двумя разными способами, а именно: 1) в результате пропорционального снижения тока дуги СПЭ на величину возрастания тока в ускоряющем промежутке; 2) в результате переключения тока дугового разряда на электрод обратной связи при его бомбардировке ионами из ускоряющего промежутка. Использование этих мер ведет к повышению общей энергии электронных пучков, генерируемых источниками с СПЭ.

2. Используя уникальное свойство источников электронов с СПЭ, связанное со стабилизацией границы эмиссионной плазмы, обеспечивающей слабую зависимость тока электронного пучка от величины ускоряющего напряжения, выявлены условия генерации амплитудно- и широтно-модулированных интенсивных субмиллисекундных электронных пучков, что позволяет управлять как их мощностью, так и шириной их энергетического спектра в течение импульса. Это расширяет технологические возможности источников электронов с СПЭ.

3. Установлены основные физические принципы воздействия амплитудно- и широтно-модулированных интенсивных субмиллисекундных электронных пучков на поверхность неорганических материалов, заключающиеся в определении оптимальной скорости ввода энергии пучка в поверхность материала для целенаправленного формирования ее структуры, а также продемонстрирована возможность использования таких пучков для решения ряда

других научных и технологических задач, которые в настоящее время невозможно решить, используя источники электронов на основе эмиттеров другого типа.

4. Разработано и создано новое поколение источников электронов с плазменными катодами на основе дуги низкого давления, обеспечивающих более высокую стабильность и управляемость генерации электронных пучков, а также имеющих более широкий диапазон перестройки параметров генерируемого электронного пучка: энергия электронов ($5 \div 200$) кэВ, ток пучка ($10 \div 1000$) А, плотность тока эмиссии ($0,01 \div 50$) А/см² при сечении пучка ($1000 \div 10$) см², плотность тока на мишени до 50 А/см², длительность импульса ($10 \div 1000$) мкс, энергии пучка (десятки Дж \div 5 кДж), неоднородность плотности энергии по сечению пучка не хуже $\pm 15\%$ от среднего значения. По совокупности основных параметров, диапазону их независимой перестройки, а также ресурсу, составляющему $\geq 10^7$ имп. при средней мощности до 5 кВт, созданные источники электронов не имеют прямых мировых аналогов и являются перспективными для их использования в научных и технологических целях.

Научная и практическая ценность работы:

1. Результаты проведенных комплексных исследований вносят существенный вклад в понимание физических процессов генерации плазмы в источниках электронов с СПЭ на основе дуги низкого давления, имеющих амплитудную, широтную или частотную модуляцию в течение импульса тока разряда субмиллисекундной длительности, а также физических процессов генерации электронных пучков в таком модулированном режиме.

2. Созданы источники электронов с СПЭ, обеспечивающие генерацию субмиллисекундных электронных пучков различных конфигураций с энергией в импульсе до 5 кДж и средней мощностью до 5 кВт, а также отличающиеся возможностью контролируемого изменения параметров пучка в течение импульса тока, которые по совокупности основных параметров не имеют мировых аналогов.

3. Существенно расширены возможности импульсных электронно-пучковых технологий модификации поверхности различных органических и неорганических материалов, в том числе заключающиеся в достижении новых режимов облучения таких материалов как в вакуумном пространстве (за счет управления скоростью ввода энергии в поверхность неорганического материала), так и в атмосфере (за счет управления шириной энергетического спектра электронного пучка). В частности, предложенные в работе способы генерации электронных пучков позволили достичь кратного увеличения энергии пучка как при воздействии низкоэнергетического интенсивного пучка на металлическую мишень в вакууме, так и в экспериментах, ориентированных на поддержание температуры горячей плазмы, созданной релятивистским электронным пучком микросекундной длительности, при инжекции адиабатически сжимающегося в нарастающем магнитном поле электронного

пучка субмиллисекундной длительности в магнитную пробку установки «ГОЛ-3» для целей УТС, повысив его энергию с 1,6 кДж до 2,9 кДж.

4. При использовании источника электронов с СПЭ на основе дуги низкого давления продемонстрирован способ управления мощностью пучка в течение импульса субмиллисекундной длительности, что позволяет управлять скоростью ввода энергии в поверхность металлических материалов, а, следовательно, формировать необходимое температурное поле этой поверхности для целенаправленного формирования ее структуры.

5. Результаты диссертационной работы в области генерации интенсивных низкоэнергетических электронных пучков субмиллисекундной длительности могут быть использованы на предприятиях Российской Федерации для решения прикладных задач по увеличению износостойкости пар трения, узлов машин и механизмов для предприятий нефтегазовой, авиакосмической, энергетической, атомной, медицинской и смежных областей, а также на инструментальных участках машиностроительных производств.

6. Результаты диссертационной работы в области генерации высокоэнергетических электронных пучков субмиллисекундной длительности, выведенных в атмосферу, к примеру, могут послужить основой для разработки бездиоксиновых методов утилизации отходов хлорполимеров, позволяя осуществлять дехлорирование последних в мягких условиях без использования высокотемпературных воздействий (в том числе, при мусоросжигании), приводящих к выделению хлордиоксинов. Это перспективно, поскольку функциональные углеродные материалы, не содержащие хлора, очень востребованы в различных областях промышленности (адсорбенты, носители катализаторов, электродные материалы, наполнители полимеров и др.). Кроме этого, показано, что такие пучки могут применяться для модификации натурального латекса без каких-либо химических добавок, позволяя увеличивать прочность образцов с 3 МПа до 21 МПа, что перспективно для создания биосовместимых латексных изделий медицинского назначения.

Методология и методы исследования

В процессе выполнения диссертационной работы создано специальное диагностическое оборудование для исследования параметров эмиссионной плазмы, генерируемой дугой низкого давления, измерения неоднородности генерируемого электронного пучка, выведенного в атмосферу, а также разработаны и созданы уникальные системы электропитания СПЭ, позволяющие не только расширить параметры генерируемого электронного пучка, но и оценить влияние ионной компоненты тока в ускоряющем промежутке в различных режимах генерации электронного пучка. Кроме этого, использованы известные и апробированные экспериментальные методики и оборудование для исследования характеристик дугового разряда, плазмы и пучков заряженных частиц. Для моделирования основных физических процессов генерации плазмы и формирования электронных пучков применялись аналитические оценки и численные методы с использованием современной вычислительной техники.

При подготовке диссертационной работы были выполнены как расчетные, так и экспериментальные работы. Экспериментальные работы проведены с использованием стандартных и специально разработанных методик измерения электрофизических параметров рассматриваемых источников электронов, основанных на возможностях современной элементной базы, что позволило получать и обрабатывать большие массивы данных для их дальнейшего анализа.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. В источниках электронов с сеточным плазменным эмиттером на основе дугового разряда низкого давления управление мощностью электронного пучка в течение импульса субмиллисекундной длительности может быть реализовано в результате динамического изменения амплитуды тока разряда, и, соответственно, тока пучка, с учетом изменяющегося в течение импульса ускоряющего напряжения. Данный способ управления позволяет генерировать субмиллисекундные пучки с энергией электронов десятки–сотни кэВ с мощностью до 10 МВт при скорости ее изменения до 0,5 МВт/мкс. Это позволяет варьировать скорость ввода энергии пучка в поверхностный слой мишени, тем самым управлять температурой на её поверхности в диапазоне от сотен до тысяч градусов Цельсия с коэффициентом пульсации менее 5%.

2. В источнике электронов с сеточным плазменным эмиттером на основе дугового разряда низкого давления и выводом пучка в атмосферу через фольгу, реализуется управление энергетическим спектром пучка в атмосфере за счет изменения ускоряющего напряжения в течение импульса тока пучка субмиллисекундной длительности. При этом обеспечивается возможность компенсации потерь электронного пучка в фольге за счет динамического изменения амплитуды тока разряда и, соответственно, амплитуды тока в ускоряющем промежутке при энергии электронов E не ниже минимальной пороговой величины $E_{пор}$, определяемой материалом и толщиной фольги, и полного выключения тока пучка при $E < E_{пор}$, что снижает ударную тепловую нагрузку на фольгу и предотвращает ее разрушение.

3. Изменение газовых условий в источнике электронов с сеточным плазменным эмиттером на основе дугового разряда низкого давления, приводящее к неконтролируемому росту тока в ускоряющем промежутке и даже его электрическому пробою, может быть нивелировано введением отрицательной обратной связи по току пучка при пропорциональном уменьшении амплитуды тока дуги и/или снижении коэффициента извлечения электронов в результате переключения доли тока дугового разряда на специальный электрод обратной связи при его бомбардировке ионами из ускоряющего промежутка.

4. Использование в источнике электронов с сеточным плазменным эмиттером на основе дугового разряда низкого давления многокатодной (в эксперименте 6 катодов) разрядной ячейки с общим полым анодом объемом $\approx 7500 \text{ см}^3$ обеспечивает неоднородность плотности эмиссионного тока до уровня не хуже $\pm 15 \%$ и генерацию пучка в диодной системе с плазменным

анодом с открытой границей плазмы. В диапазоне давлений рабочего газа аргона (15÷25 мПа) это обеспечивает генерацию интенсивных (до 1 кА) широкоапертурных (~100 см²) электронных пучков субмиллисекундной длительности при ускоряющем напряжении до 100 кВ и с энергией в импульсе до 5 кДж, а также транспортировку электронного пучка в продольном магнитном поле (350÷450) Гс на расстояние ~100 см.

5. Использование в широкоапертурном источнике электронов с сеточным плазменным эмиттером двухэлектродной многоапертурной электронно-оптической системы, в которой на эмиссионную сетку, стабилизирующую границу эмиссионной плазмы, со стороны разрядного промежутка укладывается металлическая маска с отверстиями соосными с отверстиями в ускоряющем электроде, роль которого выполняет выпускное фольговое окно, обеспечивает рост коэффициента прохождения тока пучка β через выпускное фольговое окно с $\beta=0,4$ до $\beta=0,8$, превышающего геометрическую прозрачность опорной решетки в 1,5 раза, а также повышение электрической прочности ускоряющего промежутка и снижение неоднородности распределения плотности тока пучка до уровня $\pm 5\%$.

6. Источники электронов с СПЭ на основе дугового разряда низкого давления обеспечивают генерацию широкоапертурных (10÷1000 см²) импульсных (1÷1000 мкс) электронных пучков с уникальным набором параметров: энергия электронов 10÷200 кэВ, ток пучка 10÷1000 А, плотность тока пучка 0,01÷50 А/см², интегральная плотность энергии пучка в импульсе 0,1÷100 Дж/см² с ее неоднородностью по сечению пучка не хуже $\pm 15\%$. По совокупности основных параметров, диапазону их независимой перестройки, а также ресурсу, превышающему 10⁷ имп., созданные источники электронов превосходят известные аналоги и являются перспективными для их использования в научных и технологических целях.

Степень достоверности и апробация работы

Принципиальным отличием диссертационной работы от предыдущих исследований, обуславливающим ее оригинальность и новизну, является использование для реализации целей и задач исследования вновь созданного и модернизированного уникального пучкового оборудования – источников электронов с СПЭ на основе дуги низкого давления, обеспечивающих возможность генерации пучков с широким ранее нереализованным диапазоном параметров, пригодных для их использования в научных и технологических целях, и, в частности, для обработки как органических, так и неорганических материалов и изделий. Достоверность результатов обеспечивается использованием комплекса современных дублирующих экспериментальных и расчетных методов исследований, удовлетворительным совпадением экспериментальных и расчетных зависимостей, систематическим характером исследований, непротиворечивостью полученных данных и их согласием с результатами других исследователей.

Результаты работ докладывались и обсуждались на 16-ой Международной конференции по сильноточной электронике (Томск, Россия, 2010), 5-ой Все-

российской конференции молодых ученых "Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии" (Томск, Россия, 2012), 25-ой Международной конференции по разрядам и электрической изоляции в вакууме (ISDEIV) (Томск, Россия, 2012), Международном конгрессе по энергетическим потокам и радиационным эффектам (EFRE-2014, EFRE-2016, EFRE-2018, EFRE-2020, EFRE-2022) (Томск, Россия, 2014, 2016, 2018, 2020, 2022), Международном Крейнделевском семинаре «Плазменная эмиссионная электроника» (Улан-Удэ, Россия, 2012, 2015, 2018), Международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применения» (Томск, Россия, 2015, 2019; Новосибирск, Россия, 2017; Екатеринбург, Россия, 2021), 11-ой Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, Беларусь, 2015), 8-ой Международной конференции «Физика плазмы и плазменные технологии» (Минск, Беларусь, 2015), XV Международном Российско-Китайском Симпозиуме «Новые материалы и технологии» (Сочи, Россия, 2019), Международной конференции по электронно-пучковым технологиям (EBT-2016, EBT-2018) (Варна, Болгария, 2016, 2018), Летней школе МАГАТЭ по применению ускорителей для радиационных процессов (Варшава, Польша, 2017), Международной конференции «Физика низкотемпературной плазмы» (ФНТП-2017) (Казань, Россия, 2017), научно-техническом семинаре по электронно-пучковому оборудованию и технологиям (Обь-2017, Обь-2019) (Новосибирск, Томск, Россия, 2017, 2019), Международной научно-практической конференции «Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы» (Обнинск, Россия, 2018), Международной конференции «Ядерная и радиационная физика и материалы» (Ереван, Армения, 2019), 48-ой Международной конференции по плазменной науке (ICOPS-2021) (США, онлайн, 2021), 9-ом Международном симпозиуме по теоретической и прикладной плазмохимии (г. Иваново, Россия, 2021).

Публикации. Основные материалы диссертации опубликованы в **54 работах**, из которых **21 статья** в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, **34 полных текстов докладов** в трудах международных и всероссийских конференций, симпозиумов и совещаний, **20 докладов из которых**, цитируются в базах данных Web of Science и Scopus.

Реализация результатов работы

Результаты работы были получены в рамках выполнения следующих проектов: проект РНФ №18-79-00011 (2018-2019) – руководитель; проект РНФ №20-79-10015 (2020-2023) – руководитель; проект РФФИ №17-08-00627 – руководитель; проект РФФИ №18-42-703010 – руководитель; грант Президента РФ для кандидатов наук №МК-123.2019.2 – руководитель; государственное задание ИСЭ СО РАН №0366–2014-0008 (2014–2015), № 0366–2015–0009 (2016–2017), № 0366-2018-0013 (2018–2020), FWRM-2021-0006 (2021-2025); проект РНФ №14-29-00091 (2014-2018) – исполнитель; проект

РФФИ №16-48-700079 – исполнитель; проект РФФИ №19-18-50358 – исполнитель; проект РФФИ №16-38-50262 – исполнитель.

Разработанные в результате выполнения работы технические решения защищены двумя Патентами РФ. Результаты диссертации по предпосевному электронно-пучковому облучению семян были использованы во Всероссийском научно-исследовательском институте радиологии и агроэкологии (ФГБНУ ВНИИРАЭ), по модификации поверхности образцов при борировании и бороалитировании инструментальной и углеродистой стали методом обработки импульсным модулированным интенсивным электронным пучком субмиллисекундной длительности – в Институте физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФМ СО РАН), по инъекции интенсивного субмиллисекундного электронного пучка в линейную магнитную ловушку – в Институте ядерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН), по финишной полировке внутренней и внешней поверхностей коронарных стентов – в ООО «Ангиолайн Ресерч», что подтверждается соответствующими актами внедрения и использования.

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке магистрантов и аспирантов ТПУ, ТГУ, ТУСУР и ИСЭ СО РАН.

Личный вклад автора

Автором лично сформулированы цели работы и постановка задач, выдвинуты основные идеи исследований. Автором самостоятельно или под его непосредственным руководством проанализированы полученные данные, а в результате выдвинуты защищаемые научные положения. Автор руководил работой и принимал непосредственное участие в разработке, создании, модернизации и эксплуатации всех описанных экспериментальных установок, в подготовке к экспериментам, в развитии диагностических методик, в анализе и обработке экспериментальных результатов. Текст диссертации написан автором лично.

Автором сделаны выводы и даны рекомендации по внедрению результатов работы при создании нескольких источников электронов с СПЭ на основе дуги низкого давления. Обсуждение задач исследований и, методов их решения и результатов анализа экспериментальных данных проводились совместно с соавторами, фамилии которых указаны в работах, опубликованных по теме диссертации.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и приложений с общим объемом 296 страниц, 119 рисунков и 8 таблиц. Список цитируемой литературы включает 258 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна и практическая ценность результатов,

приведены защищаемые научные положения и сведения о публикациях автора по теме диссертации.

В первой главе проведен сравнительный анализ имеющихся в настоящее время источников электронов. Сделан вывод, что источники электронов с плазменными эмиттерами с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы являются одними из наиболее перспективных источников для их использования в различных научных исследованиях и технологических процессах благодаря ряду своих неоспоримых преимуществ, а именно, уникальному диапазону параметров, возможности управления основными параметрами пучка в отдельности относительно простыми способами, удовлетворительной воспроизводимости импульсов тока пучка, сравнительно высокому ресурсу катода и простоте конструкции, возможности достижения низкой (не выше $\pm 5\%$.) неоднородности электронного пучка и др. Максимальная энергетическая эффективность дугового разряда, обусловленная его низким напряжением горения (≈ 100 В и ниже) и большими токами (от единиц-десятков ампер до нескольких килоампер), позволили выбрать СПЭ на основе дугового разряда низкого давления с полым анодом как один из основных предметов исследования. Показано, что структурная схема таких источников является общей (Рис. 1), в том числе при наличии анодной плазмы, генерируемой самим электронным пучком.

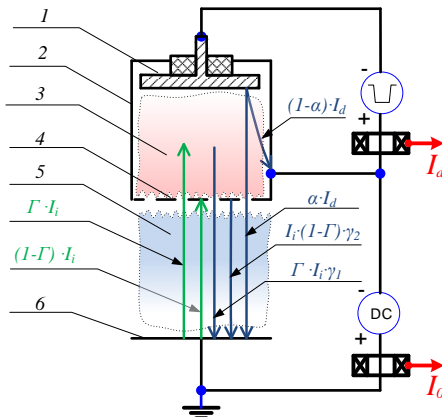


Рисунок 1 – Общая структурная схема источника электронов с СПЭ: 1 – катод дугового разряда; 2 – анод дугового разряда; 3 – катодная/эмиссионная плазма; 4 – эмиссионная сетка; 5 – анодная/пучковая плазма; 6 – коллектор

Такой источник электронов имеет СПЭ, внутри которого генерируется плазма на основе дугового разряда низкого давления, а отбор электронов осуществляется через ячейки эмиссионной сетки 4, являющейся частью полого анода 2 и необходимой для стабилизации границы катодной/эмиссионной плазмы 3. Анодная плазма 5 генерируется электронным пучком, создаваемым и формируемым за счет электронов, извлекаемых из СПЭ или рожденных в результате ионно-электронной эмиссии при бомбардировке эмиссионного электрода ускоренными ионами.

Ток в ускоряющем промежутке I_0 может быть записан в виде:

$$I_0 = \alpha \cdot I_d + I_{i2} \cdot [1 + (1 - \Gamma) \cdot \gamma_2 + \Gamma \cdot \gamma_1], \quad (1)$$

где $\alpha = I_{em}/I_d$ – коэффициент извлечения электронов из СПЭ, равный отношению тока эмиссии I_{em} к току разряда I_d ; I_{i2} – ток ускоренных ионов из анодной плазмы; γ_2 – коэффициент ионно-электронной эмиссии с металла при бом-

бардировке эмиссионного электрода ускоренными ионами; γ_1 – коэффициент ионно-электронной эмиссии из эмиссионной плазмы СПЭ; G – эффективная геометрическая прозрачность эмиссионного электрода.

В заключении к главе сформулированы основные задачи исследований.

Во второй главе описаны методики и техника экспериментов. Описаны конструкции трех подробно изучаемых в работе источников электронов и основные схемы их электропитания и управления. Рассмотрены особенности calorиметрических измерений энергии генерируемых пучков, способы измерения основных параметров эмиссионной плазмы, неоднородности плотности эмиссионного тока, плотности тока пучка в плоскости мишени, а также характеристик пучков, выведенных в атмосферу. Приведены методики измерения температуры поверхности образца, облучаемого электронным пучком в вакууме, а также энергетического спектра пучка, выведенного в атмосферу.

Все экспериментальные исследования проводились, используя три основных типа источников электронов с СПЭ: низкоэнергетический (до 25 кэВ) источник «СОЛО», источник «КИЛОАМПЕР» средних энергий (до 100 кэВ), и высокоэнергетический (до 200 кэВ) источник «ДУЭТ», существенно отличающихся как конструктивно, так и схемотехнически, хотя основные принципы их действия сохраняются, что дает возможность анализа результатов и выработки общих рекомендаций по развитию источников электронов с СПЭ.

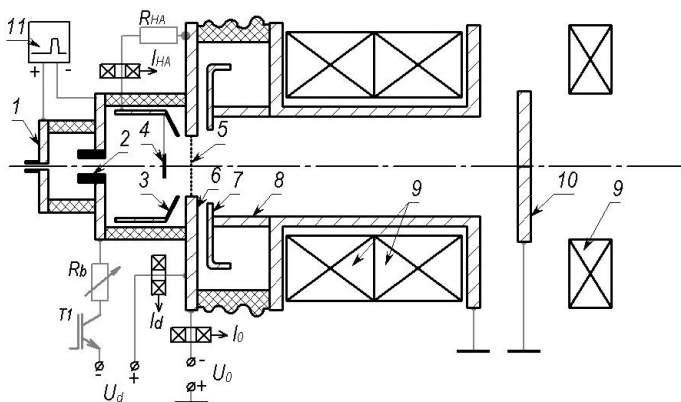


Рисунок 2 – Схема источника электронов «СОЛО»: 1 – поджигающий электрод; 2 – катод; 3 – полый анод (анодная вставка); 4 – дополнительный электрод (перераспределяющий электрод или электрод обратной связи); 5 – эмиссионная сетка; 6 – эмиссионный электрод; 7 – извлекающий (ускоряющий) электрод; 8 – труба дрейфа; 9 – магнитные катушки; 10 – коллектор; 11 – источник поджига

Схема источника «СОЛО» с СПЭ на основе дуги низкого давления и плазменным анодом с открытой границей плазмы представлена на рисунке 2. Иницирующий разряд загорается между положительным поджигающим электродом 1 и катодом 2 при приложении импульса напряжения U_{irig} величиной (12÷15) кВ. Основной дуговой разряд горит между катодом 2 и анодом 5, 6. Анодная вставка 3, электрически соединённая с анодом дугового разряда

через токоограничительное сопротивление $R_{НА}$ и играющая роль полого анода, необходима для облегчения условий зажигания и стабильного горения дугового разряда и крепления дополнительного перераспределяющего электрода 4, имеющего с ней электрический контакт. Постоянное ускоряющее напряжение $U_0=(5\div 25)$ кВ, обеспечиваемое высоковольтной конденсаторной батареей емкостью 6 мкФ, прикладывается между плоским эмиссионным электродом 6 с мелкоструктурной эмиссионной сеткой 5 диаметром 40 мм с размером ячейки $h=0,33$ мм и извлекающим электродом 7, выполненным в виде диафрагмы диаметром 82 мм. Извлекающий электрод 7, труба дрейфа 8 внутренним диаметром 80 мм и длиной ≈ 100 мм, и коллектор 10 диаметром ≈ 100 мм находятся под потенциалом «земли». Отбор электронов из эмиссионной плазмы осуществляется через ячейки эмиссионной сетки первоначально под действием электрического поля, создаваемого электродами 7 и 8, а после образования анодной (пучковой) плазмы, ускорение электронов происходит в двойном слое между границами двух плазм: катодной (граница которой стабилизируется сеткой 5) и анодной (граница которой открыта). Ускоренные электроны пучка транспортируются к коллектору в магнитном поле катушек 9, величина поля в которых варьируется в диапазоне $(0,01\div 0,1)$ Тл.

Схема источника электронов «КИЛОАМПЕР» с СПЭ на основе многодугового разряда низкого давления представлена на рисунке 3.

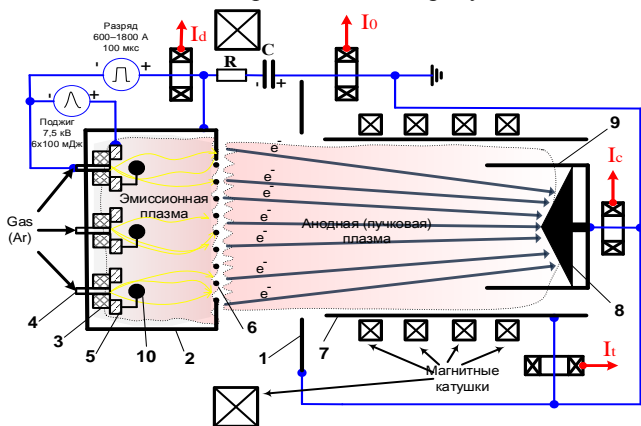


Рисунок 3 – Схема источника электронов «КИЛОАМПЕР»: 1 – фланец вакуумной камеры; 2 – СПЭ/полюс анода разряда; 3 – изолятор; 4 – катод разряда; 5 – поджигающий электрод; 6 – эмиссионная сетка; 7 – труба дрейфа; 8 – коллектор; 9 – металлический стакан, 10 – перераспределяющий электрод

В вакуумной камере 1 диаметром 80 см и длиной 100 см на проходном высоковольтном изоляторе закреплен СПЭ 2, представляющий собой полый цилиндр из нержавеющей стали диаметром 20 см и длиной 25 см. На одном из торцов цилиндра по окружности диаметром 15 см закреплены шесть катодных узлов с иницированием катодного пятна разрядом по поверхности

диэлектрика. Каждый катодный узел обеспечивает ток уровня 300 А и состоит из диэлектрического основания 3, на котором закреплены магниевый катод 4 и поджигающий электрод 5, разделенные коаксиальным зазором 1 мм. Катоды 4 выполнены в виде стержня диаметром 4 мм и длиной 10 мм с аксиальным отверстием диаметром 1 мм для напуска рабочего газа в СПЭ. На расстоянии 5 мм от каждого из катодов установлены перераспределяющие электроды 10 диаметром 15 мм, электрически соединенные с поджигающим электродом 5. Внутренняя поверхность СПЭ общей площадью около 0,2 м² играет роль общего полого анода для отдельных дуговых разрядов всех катодных узлов. Эмиссионное окно диаметром 14 см перекрыто мелкоструктурной сеткой 6 из нержавеющей стали с ячейками ≈(0,4×0,4) мм и геометрической прозрачностью 35%. Расстояние между эмиссионной сеткой и фланцем камеры 1 составляет 90 мм. Ускорение электронов происходит в катодном слое между сеточным эмиссионным электродом 6 и границей анодной (пучковой) плазмы, образующейся в ускоряющем зазоре и пространстве дрейфа пучка в процессе ионизации остаточного и рабочего газов электронным пучком. Электроны, ускоренные до энергии, соответствующей приложенному ускоряющему напряжению $U_0 \leq 100$ кВ, поступают в трубу дрейфа 7 длиной 80 см и диаметром 16 см, в конце которой установлен цилиндр Фарадея 8, 9. Формирование и транспортировка электронного пучка осуществляется в ведущем магнитном поле величины (0,01÷0,05) Тл.

Схема источника электронов «ДУЭТ» с многоапертурным СПЭ на основе дуги низкого давления с выводом генерируемого пучка большого сечения в атмосферу представлена на рисунке 4.

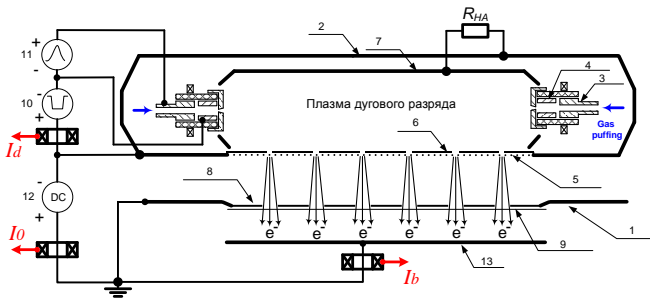


Рисунок 4 – Схема источника электронов «ДУЭТ»: 1 – вакуумная камера; 2 – СПЭ; 3 – поджигающий электрод; 4 – катод; 5 – эмиссионная сетка; 6 – маска; 7 – полый анод; 8 – опорная решетка выпускного фольгового окна; 9 – выпускная фольга; 10 – источник питания разряда; 11 – источник питания поджига; 12 – источник высокого напряжения (конденсаторная батарея); 13 – коллектор

СПЭ 2 в таком источнике представляет собой полый полуцилиндр из нержавеющей стали, одна из сторон которого перекрыта мелкоструктурной металлической сеткой, и на торцах которого закреплены два катодных узла

на основе дуги низкого давления, обеспечивающие ток амплитудой до $I_d=150$ А и длительностью импульсов тока до $t=250$ мкс с инициированием катодного пятна электрическим пробоем в газе между полым катодом 4 и поджигающим электродом 3. Внутренняя поверхность полуцилиндра играет роль общего полого анода 7 для двух катодных узлов. Полый анод 7 электрически соединен с эмиссионной сеткой 5 через сопротивление R_{HA} , что необходимо для переключения тока разряда в область эмиссионной сетки и стабилизации тока в ускоряющем промежутке I_0 . Под действием постоянного ускоряющего напряжения $U_0 \leq 200$ кВ, приложенного между СПЭ и выпускным фольговым окном источника электронов, через ячейки сетки осуществляется отбор электронов. Выпускное фольговое окно состоит из медной опорной решетки 8 толщиной 20 мм, перфорированной отверстиями $\varnothing 15$ мм с общей геометрической прозрачностью 56%, на которую уложена фольга 9 из алюминий-магниевого сплава АМг-2н толщиной 30 мкм, позволяющая выводить через нее электроны при $U_0 \geq 80$ кВ.

Давление рабочего газа p (Ar) во всех вышеописанных источниках электронов варьировалось в диапазоне $(1 \div 10) \cdot 10^{-2}$ Па. Для питания ускоряющих промежутков использовались высоковольтные конденсаторные батареи с их частичной разрядкой в течение импульса генерации тока пучка.

В третьей главе приведены расчеты и экспериментально продемонстрирована возможность динамического изменения мощности электронного пучка в течение импульса субмиллисекундной длительности. Управление мощностью пучка может быть востребовано, например, для управления скоростью ввода энергии пучка в поверхность металлических или металлокерамических материалов с целью целенаправленного формирования структурно-фазового состояния облучаемой поверхности и изменения ее функциональных и/или эксплуатационных свойств, а также для управления энергетическим спектром пучка, выведенного в атмосферу, при решении радиационных задач, когда длина пробега электронов в веществе соизмерима с глубиной воздействия на материал.

Простота управления током в ускоряющем промежутке за счет изменения тока разряда СПЭ с пропорциональным изменением концентрации эмиссионной плазмы позволяет управлять мощностью пучка при формировании амплитудно- и широтно- модулированного импульса тока дугового разряда субмиллисекундной длительности. Максимальная амплитуда импульса тока разряда ограничена условиями стабильной генерации пучка, когда отбор электронов осуществляется через потенциальный барьер или частично открытую границу эмиссионной плазмы. Ширина приэлектродного слоя, который в условиях отрицательного падения потенциала между плазмой и эмиссионным электродом в предположении $(\varphi_p - \varphi_a)/kT_e \gg 1$ можно считать ионным, может быть оценена как:

$$l_i = (\varepsilon_0/n_e)^{1/2} (\varphi_p - \varphi_a)^{3/4} / (ekT_e)^{1/4}, \quad (2)$$

где φ_p , T_e и n_e потенциал, температура и концентрация эмиссионной плазмы. Для рабочего диапазона тока $I_d=(10 \div 500)$ А в источнике «СОЛО» величина $l_i=(200 \div 60)$ мкм, что удовлетворяет указанному требованию.

Из осциллограмм на рисунках 5–7 видно, что условия генерации могут быть такими, когда форма импульса тока I_0 практически полностью повторяет форму импульса тока I_d , обеспечивая микросекундные фронты тока I_0 . Изменяя ток I_d в течение импульса, можно генерировать субмиллисекундные пучки переменной мощности (до 10 МВт при скорости изменения не более 0,5 МВт/мкс), когда мощность пучка может быть как постоянной (рисунок 5, б) или растущей (рисунок 6, б), так и круто падающей (рисунок 7, б).

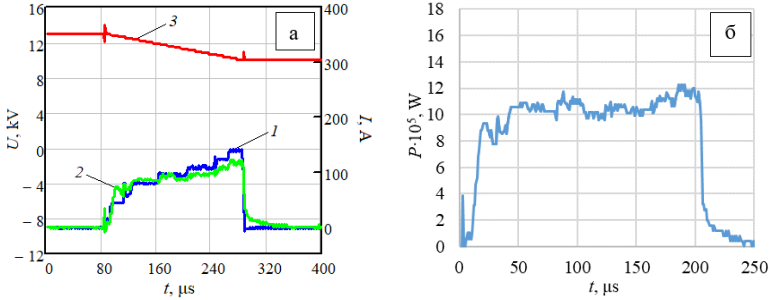


Рисунок 5 – Осциллограммы (а) $I_d - I, I_0 - 2$ и $U_0 - 3$ при квазипостоянной мощности пучка P (б) и плотности энергии пучка 25 Дж/см²

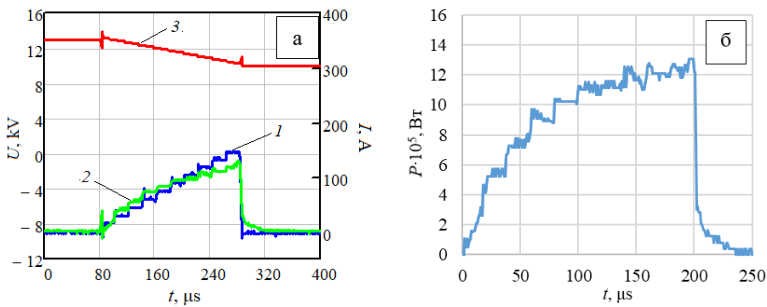


Рисунок 6 – Осциллограммы (а) $I_d - I, I_0 - 2$ и $U_0 - 3$ при растущей мощности пучка P (б) и плотности энергии пучка 25 Дж/см²

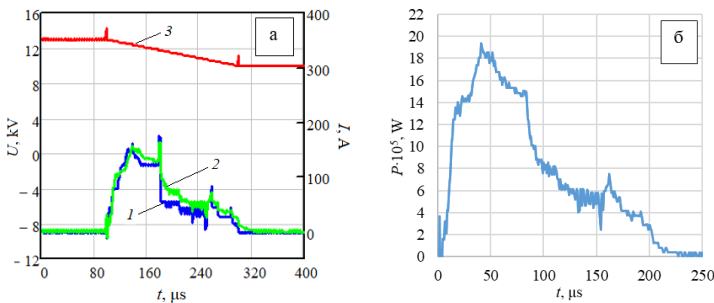


Рисунок 7 – Осциллограммы (а) $I_d - I, I_0 - 2$ и $U_0 - 3$ при спадающей мощности пучка P (б) и плотности энергии пучка 25 Дж/см²

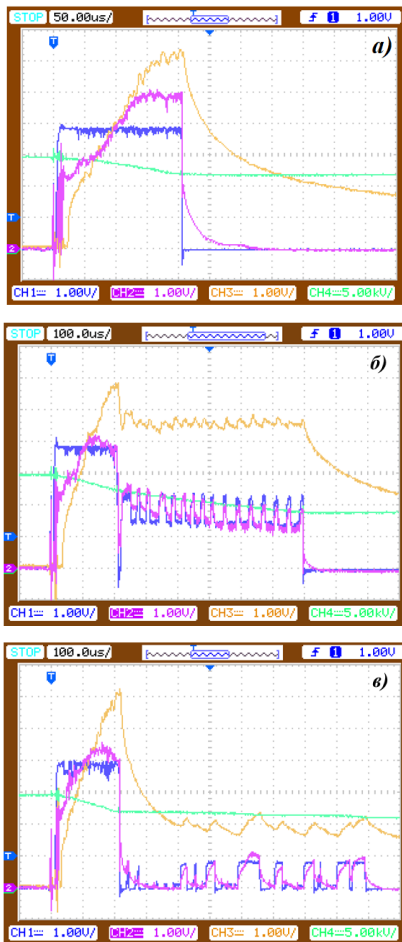


Рисунок 8 – Характерные осциллограммы тока разряда I_a , 20 А/дел. (голубой), тока I_0 , 20 А/дел. (фиолетовый), напряжения U_0 , 5 кВ/дел. (зелёный) и температуры поверхности силуминового образца T (оранжевый) оцениваемая как $T=308+164 \cdot U$, где $U = 1$ В/дел. в отсутствие режима последующего удержания температуры (а), удержания температуры T на уровне ≈ 1000 °С (б), удержания температуры T на уровне ≈ 600 °С (в)

пучка в течение его импульса. При этом произведение $(I_0 \cdot t)$ в широкоапертурных источниках электронов с СПЭ импульсно-периодического действия

Используя такой способ динамического управления мощностью пучка, были проведены демонстрационные эксперименты по управлению температурой поверхности образца в течение субмиллисекундной длительности. Для измерения температуры использовался высокоскоростной инфракрасный пирометр Kleiber KGA 740-LO. Из рисунка 8 видно, что управление скоростью ввода энергии электронного пучка в поверхность образца позволяет изменять температуру поверхности и даже удерживать ее на уровне сотен-тысяч градусов Цельсия с коэффициентом пульсации $\pm 5\%$, который обусловлен минимальной дискретностью регулирования амплитуды и длительности импульса тока дугового разряда, но может быть еще ниже при использовании более прецизионного источника электропитания СПЭ. Расчетная температура поверхности $T(t)$ (рисунок 9, а), полученная для экспериментальных импульсов тока I_0 и напряжения U_0 (рисунок 9, б), имеет хорошее согласие с экспериментальными измерениями.

Управление энергетическим спектром пучка было реализовано за счет контролируемого изменения ускоряющего напряжения в течение импульса тока пучка субмиллисекундной длительности. Согласно математической модели, связывающей ток и напряжение конденсатора ($i_c=C \cdot du_c/dt$), квазипрямоугольная форма тока I_0 приводит к линейному уменьшению ускоряющего напряжения, а, следовательно, к уменьшению энергии электронов

может достигать больших значений, что может приводить к значительному (десятки процентов) снижению U_0 в течение импульса субмиллисекундной длительности.

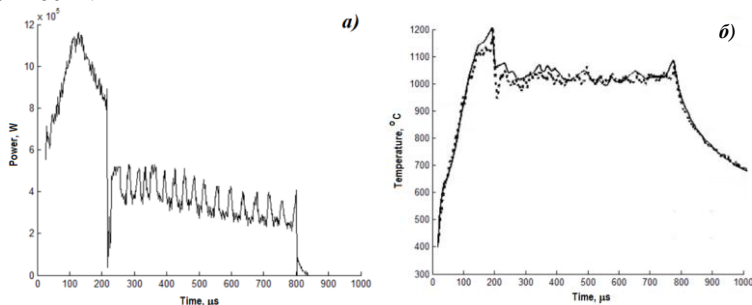


Рисунок 9 – Изменение мощности теплового источника (а), расчетная (—) и экспериментальная температура поверхности облучаемого образца (---) (б)

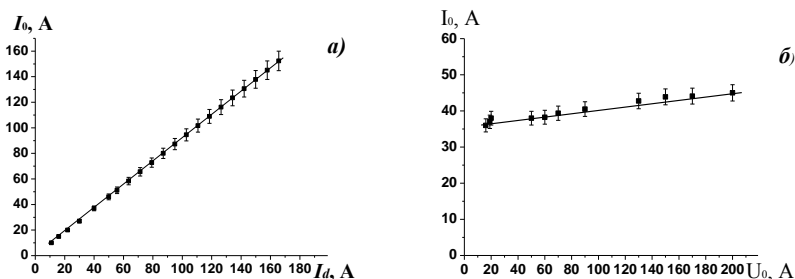


Рисунок 10 – Зависимости тока I_0 от тока I_d при $U_0=150$ кВ (а) и тока I_0 от напряжения U_0 при $I_d=50$ А (б): длина ускоряющего промежутка $d_0=140$ мм; $p=30$ мПа; $h=0,4$ мм (источник электронов «ДУЭТ»)

Управление током пучка в источнике «ДУЭТ» осуществляется за счет изменения амплитуды тока I_d (рисунок 10, а), при этом при фиксированном токе I_d напряжение U_0 слабо влияет на величину тока I_0 (рисунок 10, б).

Для измерения энергетического спектра пучка в источнике электронов «ДУЭТ» использовался так называемый фольговый метод. Для этого на расстоянии от выводной фольги устанавливался экранированный коллектор диаметром 65 мм, фиксирующий часть тока пучка I_{col} , выведенного в атмосферу, и позволяющий изменять толщину фольги–фильтра, через которую ускоренные электроны попадают на коллектор. Восстановление спектра пучка по кривой его ослабления в тонких фольгах осуществлялось методом регуляризации Тихонова.

На рисунке 11 приведены кривые ослабления тока пучка при различных U_0 . Величина тока I_{col} практически не зависит от давления газа в ускоряющем промежутке, что видно из зависимостей, представленных на рисунке 11, б, из чего следует, что основное расширение энергетического спектра пучка происходит в результате взаимодействия пучка с выводной фольгой и слоем воздуха между выводной фольгой и коллектором фольгового фильтра.

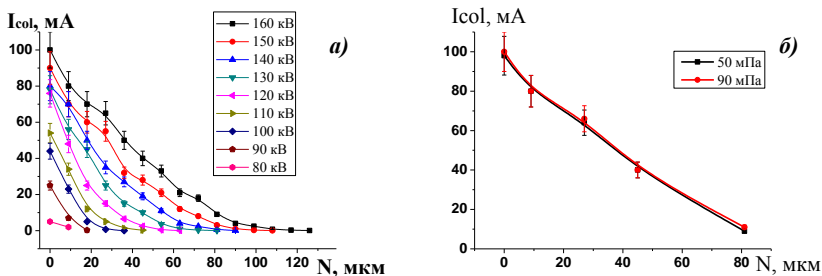


Рисунок 11 – Кривые ослабления тока пучка на коллектор I_{col} в зависимости от толщины фольги фильтра N при разных ускоряющих напряжениях U_0 (а) и при разных давлениях рабочего газа и $U_0=160$ кВ (б)

Суммарный энергетический спектр электронного пучка, представленный на рисунке 12, б, является результатом сложения спектров, полученных для различных ускоряющих напряжений в диапазоне $U_0=(110\div 160)$ кВ (рисунок 12, а).

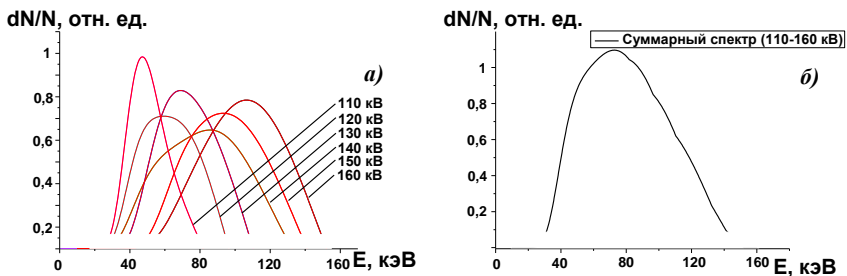


Рисунок 12 – Энергетические спектры электронного пучка, выведенного в атмосферу, снятые для разных U_0 (а) и суммарный энергетический спектр электронного пучка, выведенного в атмосферу, при изменении U_0 с 160 кВ до 110 кВ в течение импульса тока пучка (б). Условия эксперимента: выводная фольга АМг-2н толщиной 30 мкм, расстояние от фольги до коллектора 15 мм

При снижении U_0 в течение импульса тока пучка происходит расширение его энергетического спектра. Так, при постоянном ускоряющем напряжении величиной $U_0=160$ кВ ширина энергетического спектра электронного пучка (на полувысоте) в атмосфере на расстоянии 30 мм от выводной фольги источника электронов составляет ≈ 60 кэВ, а при напряжении U_0 , изменяющемся по линейному закону в течение импульса тока пучка в диапазоне $U_0=(160\div 100)$ кВ, ширина энергетического спектра пучка достигает 120 кэВ. При этом обеспечивается возможность компенсации потерь тока пучка в фольге за счет динамического изменения амплитуды тока разряда и, соответственно, амплитуды тока в ускоряющем промежутке при энергии электронов E не ниже минимальной пороговой величины $E_{пор}$, определяемой материалом и толщиной фольги, и полного выключения тока пучка при

$E < E_{пор}$, что снижает ударную тепловую нагрузку на фольгу и предотвращает ее разрушение.

Четвертая глава посвящена способам введения отрицательной обратной связи (ООС) по току пучка в источниках электронов с СПЭ для устойчивой генерации электронного пучка в условиях неконтролируемого увеличения тока в ускоряющем промежутке, обусловленного влиянием ускоренных ионов как на процессы генерации эмиссионной, так и анодной плазмы. Предложено несколько способов снижения такой нестабильности как за счет устранения положительной обратной связи, связанной со снижением импеданса дугового разряда и неконтролируемым ростом его тока в течение импульса субмиллисекундной длительности, так и за счет введения ООС в общий ток в ускоряющем промежутке. Использование любого из предложенных способов введения ООС позволило не только повысить стабильность работы нескольких источников электронов с СПЭ, но и обеспечить большую повторяемость и управляемость импульсов, а также повысить интегральную энергию генерируемых электронных пучков.

Все три типа источников электронов, рассматриваемых в настоящей диссертационной работе, а также многие другие источники электронов с плазменным эмиттером, работающие в условиях существования анодной/пучковой плазмы и дополнительная эмиссия в которых осуществляется из эмиссионного электрода, имеющего потенциал анода разряда, можно представить в виде единой эквивалентной электрической схемы, представленной на рисунке 13.

Величиной Ω на рисунке 13 обозначена электрическая проводимость межэлектродных промежутков и приэлектродных слоев, измеряемая в $[\text{Ом}^{-1}] = [\text{См}]$. Все эти величины являются переменными, поскольку, например, зависят от параметров эмиссионной плазмы и меняются в процессе переключения тока с одного электрода на другой.

Инициирование катодного пятна позволяет развиваться току от источника электропитания основного дугового разряда U_d . При этом если напряжение U_0 отсутствует, и величина Ω_e стремится к нулю, ток дугового разряда I_d замыкается через анод (эмиссионный электрод) и полый анод, который может быть электрически соединен с перераспределяющим электродом, подключенные через ограничительное сопротивление R_{HA} , определяющее долю тока разряда, протекающего в его цепи. Переключение тока разряда в область анода-эмиссионного электрода происходит благодаря появлению отрицательного относительно анода падения напряжения U_{HA} на резисторе R_{HA} . Наличие напряжения U_0 приводит к появлению проводимости Ω_e в цепи ускоряющего промежутка и переключению тока разряда в ускоряющий промежуток. В отсутствие и/или пренебрежимо малой величине ионной компоненты тока в ускоряющем промежутке электронный пучок будет состоять из тока эмиссии I_{em} . В диапазоне рассматриваемых давлений рабочего газа $(0,6 \div 10) \cdot 10^{-2}$ Па такой режим работы чаще всего наблюдается при высоких ускоряющих напряжениях (~ 100 кВ и выше) и низких плотностях тока пучка (≤ 100 мА/см²). Тем не менее, каким бы ни был режим генерации электроно-

го пучка, в экспериментах ионная компонента тока в ускоряющем промежутке всё-таки наблюдается (Ω_{i2}), что, в том числе, приводит к появлению вторичных гамма-электронов ($\Omega_{\gamma i}$), эмитируемых с поверхности эмиссионного электрода в результате ионно-электронной эмиссии. Величина Ω_{i2} определяется концентрацией синтезируемой пучковой плазмы, а, следовательно, зависит от тока пучка, давления рабочего газа, величины магнитного поля и др., а $\Omega_{\gamma i}$ определяется током и энергией ускоренных ионов, их массой и материалом эмиссионного электрода. Появление электрической проводимости в ускоряющем промежутке Ω_e , значение которой превышает общую проводимость приэлектродных слоев Ω_{RE} , Ω_{HA} и Ω_a приводит к увеличению амплитуды тока разряда I_d . К дополнительному росту тока разряда может приводить появление проводимости Ω_{i12} в цепи между коллектором и катодом дугового разряда. Такая проводимость может возникнуть, например, в результате бомбардировки катода разряда ионами из ускоряющего промежутка. Такое увеличение тока дугового разряда можно рассматривать как положительную обратную связь по току пучка, поскольку приводит к увеличению амплитуды тока пучка.

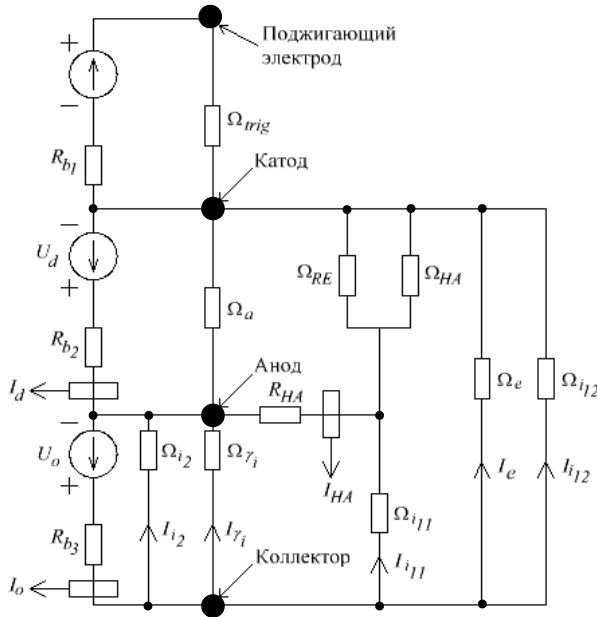


Рисунок 13 – Эквивалентная электрическая схема источников электронов с плазменными эмиттерами различной конфигурации и широким диапазоном параметров генерируемого электронного пучка

Нивелирование положительной обратной связи, приводящей к росту тока I_0 и тока I_d , достигается за счет использования генераторов тока, внутреннее сопротивление которых близко к идеальному. Так, для случая бомбардировки катода дугового разряда ускоренными ионами, выбивающих с его

поверхности вторичные гамма-электроны, дуговой разряд становится менее самостоятельным, что при фиксированной амплитуде тока I_d приводит к самосогласованному снижению его амплитуды на величину $I_i \times (1 + \gamma_c)$, обусловленного снижением токовой нагрузки на катодное пятно.

Величина тока I_0 в течение импульса может изменяться в результате нескольких механизмов, а именно: а) в результате изменения доли электронов, извлекаемых из плазменного эмиттера (изменение коэффициента α); б) в результате изменения величины тока ускоренных ионов, рожденных в результате ионизации остаточного, рабочего, десорбированного газов, а также паров мишени, определяющего, в том числе, величину тока гамма-электронов, рожденных в результате бомбардировки эмиссионного электрода ускоренными ионами. Из формулы (1) видно, что часть тока ускоренных ионов, равная $(I_i \times \Gamma)$ не участвует в наработке гамма-электронов с эмиссионного электрода, проникая в пространство СПЭ через ячейки эмиссионной сетки. Наличие этих ионов в СПЭ, с одной стороны, повышает потенциал эмиссионной плазмы и приводит к неконтролируемому росту ее концентрации (чаще всего локальному), но с другой стороны обеспечивает более стабильное горение разряда в пространстве СПЭ (снижает его импеданс), облегчает иницирование разряда, в том числе, в модулированном режиме, обеспечивая при необходимости большую паузу между импульсами тока разряда.

а. Стабилизация тока пучка за счет обратно пропорционального изменения амплитуды тока дугового разряда

На рисунке 14 приведена осциллограмма, полученная в источнике электронов «ДУЭТ», из которой видно, что в нестабильном режиме работы при постоянном токе разряда амплитудой $I_d = 10$ А (на рисунке 14 не представлен) импульс тока I_0 имеет нарастающую форму, что связано с изменением условий генерации электронного пучка (наличием диэлектрических включений на электродах высоковольтного ускоряющего промежутка или неконтролируемым ростом давления газа как в пространстве СПЭ, так и области ускорения электронного пучка) и приводит к пропорциональному увеличению тока пучка I_b , выведенного в атмосферу.

Для решения задачи, связанной со снижением амплитуды тока разряда в течение его импульса, использовалась схема электропитания СПЭ на основе индуктивного накопителя с возможностью организации падающей вершины тока разряда таким образом, чтобы за длительность импульса $t = 100$ мкс амплитуда тока I_d уменьшалась не более чем на 50%. Из осциллограммы, представленной на рисунке 15, видно, что уменьшение тока I_d со скоростью $\approx 0,5$ А/мкс приводит к компенсации роста тока I_0 , который в итоге имеет квазипостоянную плоскую вершину в течение импульса длительностью 100 мкс.

б. Введение отрицательной обратной связи в ток пучка по обратному ионному потоку из ускоряющего промежутка в СПЭ

Такой подход в организации последовательной ООС заключается в оценке доли тока в ускоряющем промежутке, и пропорциональному снижению доли электронов, извлекаемых из СПЭ. Из формулы (1) видно, что ток I_0 представляет собой сумму токов, определяемых I_{em} и I_{i2} , а из схемы на рисун-

ке 13 видно, что ток эмиссии I_{em} является разницей между током I_d и током, замыкающимся на любые другие электроды СПЭ (например, эмиссионную сетку, полый/промежуточный анод, или дополнительный электрод).

Экспериментальное подтверждение возможности стабилизации тока в ускоряющем промежутке в результате самосогласованного переключения тока разряда на дополнительный электрод в условиях его ионной бомбардировки проводились как на установке «СОЛО», так и на установке «ДУЭТ».

Несмотря на то, что указанные источники электронов имеют разные диапазоны параметров электронного пучка, в обоих источниках присутствует электрод – анодная вставка (для источника «ДУЭТ» – электрод 7 (рисунок 4), для источника «СОЛО» – электрод 3 с подключенным к нему дополнительным электродом 4, использующийся для снижения пространственной неоднородности плотности эмиссионного тока (рисунок 2)).

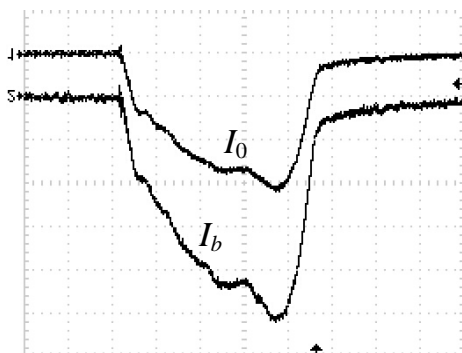


Рисунок 14 – Осциллограмма тока I_0 и тока I_b в экспериментах без маски 5 (см. рисунок 4). Масштаб: по горизонтали 10 мкс/дел., по вертикали для I_0 – 2 А/дел., для I_b – 0,5 А/дел. $U_0=200$ кВ, $I_d=10$ А, $p=35$ мПа

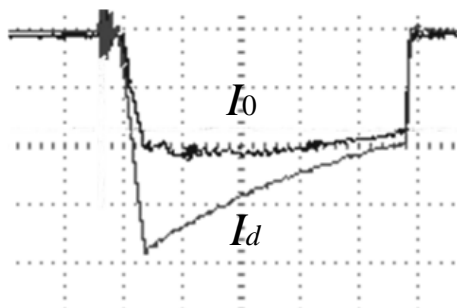


Рисунок 15 – Коррекция тока I_0 в результате снижения тока I_d в течение импульса в экспериментах с маской 6 (см. рисунок 4). Масштаб: по горизонтали 20 мкс/дел., по вертикали 10 А/дел., $p=35$ мПа

В обоих источниках ток I_{HA} , фиксируемый в цепи резистора R_{HA} , представляет собой сумму токов из эмиссионной плазмы (электронной I_e и ионной I_{i1} компоненты), тока ускоренных ионов, прошедших через ячейки сетки в пространство плазменного эмиттера и бомбардирующих электрод 4 (в источнике «СОЛО») или электрод 7 (в источнике «ДУЭТ»), а также тока вторичных электронов, возникающих в результате бомбардировки этих электродов ускоренными ионами, число которых зависит от коэффициента ионно-электронной эмиссии γ_3 материала, из которого изготовлены эти электроды:

$$I_{HA} = I_e - I_{i1} - I_{i2} (S_4 T / S_5) (1 + \gamma_3), \quad (3)$$

где S_4 – площадь проекции перераспределяющего электрода на плоскость эмиссионной сетки 5 и S_5 – площадь эмиссионного отверстия (на примере источника «СОЛО» (рисунок 2)).

На осциллограммах рисунка 16, полученных в источнике электронов «СОЛЮ», можно наблюдать, что при установленном перераспределяющем электроде 4 имеется характерный всплеск на фронте тока I_{HA} , прежде всего обусловленный током плазменных электронов I_e , поскольку ток в ускоряющем промежутке еще отсутствует. Меньшую амплитуду тока I_{HA} при увеличении p (рисунок 16, б) можно объяснить компенсацией электронной компоненты разряда ионной компонентой I_{i1} , которая увеличивается вместе с концентрацией эмиссионной плазмы. Также с ростом p уменьшается фронт импульса тока I_0 , что связано с уменьшением времени, требуемого для наработки анодной плазмы. В зависимости от условий генерации пучка, в том числе от величины и конфигурации ведущего магнитного поля или давления рабочего газа, это время может достигать десятков микросекунд.

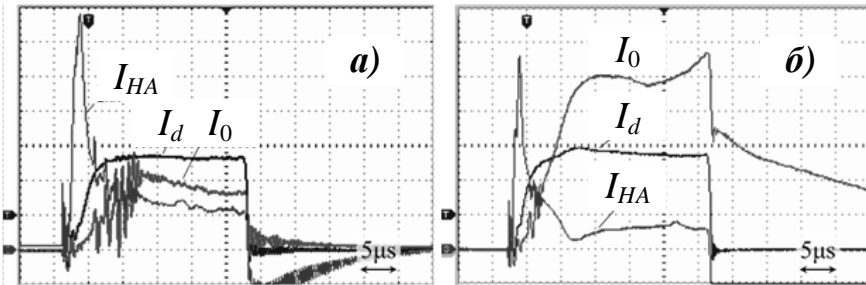


Рисунок 16 – Осциллограммы тока I_d (40 А/дел), тока в цепи полого анода I_{HA} (4 А/дел) и тока I_0 (40А/дел) при $U_0=16$ кВ, поле соленоидов $B_1=50$ мТл, $B_2=100$ мТл. $p=65$ мПа (а) и 110 мПа (б)

Также из осциллограмм рисунка 16 видно, что при повышенном p ток I_0 превышает ток I_d , что связано с ростом тока ускоренных ионов I_{i2} и гамма-процессами в СПЭ. Отношение токов $\frac{I_0}{I_d} = \frac{\alpha + F[\gamma_2(\Gamma - 1) + \gamma_1 \Gamma s_2]}{\alpha}$ растет с увеличением p и коэффициентов γ_1, γ_2 . В этом случае управляемость током I_0 за счет изменения тока I_d можно оценивать, используя два относительных коэффициента: $k_d = I_0/I_d$ (коэффициент усиления тока разряда) и $k_{em} = I_0/I_{em}$ (коэффициент усиления тока эмиссии):

$$k_d = \alpha k_{em} \cong \alpha [1 + 0.3(\gamma_2 + 1)n_{a2} K_g (v_i / v_b)], \quad (4)$$

где n_{a2} – концентрация газа в пространстве дрейфа пучка; K_g – коэффициент ионизации газа электронами тока пучка; $v_i = (kT_e/M)$ бомовская скорость; v_b – скорость ускоренных электронов.

При организации относительно крутого (≈ 100 А/мкс) среза импульса тока I_d и повышенном p происходит резкое (~ 1 мкс) уменьшение тока I_0 , обусловленное прекращением эмиссии электронов из СПЭ, предшествующее дальнейшему более медленному спаду тока I_0 , связанному с релаксацией анодной плазмы. Предположение о прекращении эмиссии электронов из СПЭ после выключения тока разряда, прежде всего, основано на факте, что в этот же

момент происходит резкая смена полярности тока I_{HA} , что приводит к появлению положительного потенциала на электродах 3, 4 (рисунок 2) относительно эмиссионного электрода СПЭ. Смена полярности тока I_{HA} , вероятнее всего, связана с продолжающейся бомбардировкой электрода 4 ионами из ускоряющего промежутка, но отсутствием электронной компоненты тока разряда, ранее замыкающейся на электроды 3, 4 в течение импульса тока разряда. Согласно формуле (3), гамма-электроны ($I_{i2} \cdot (S_d \Gamma / S_3) \gamma_3$) с поверхности электрода 4 больше не участвуют в процессе токоотбора из СПЭ, поскольку не могут преодолеть потенциальный барьер, образованный между эмиссионной плазмой и положительно смещенными электродами 3, 4. Ток пучка в этом случае определяется в основном процессами ионно-электронной эмиссии с поверхности сеточного и эмиссионного электродов 5, 6 (рисунок 2) под действием ионов, нарабатываемых пучком электронов из газа, имеющегося в трубе дрейфа 8, а его величина уменьшается экспоненциально со временем:

$$I_0(t) = I_0 \exp[-(t/T_2)(1 - \gamma_2(1 - \Gamma)L_2/\lambda_2)], \quad (5)$$

где $T_2 = L_2(M/kT_e)$ – среднее время выхода ионов на границу области взаимодействия; $L_2 = v_i T_2$; λ_2 – длина свободного пробега ускоренных электронов в анодной плазме. Длительность тока $I_0(t)$ увеличивается с ростом n_{a2} и γ_2 .

Предполагая, что к моменту окончания импульса тока разряда нет эмиссии из плазменного катода, т.е. согласно формуле (1) компоненты $I_{em} = 0$ и $I_{i2} \cdot \Gamma \cdot \gamma_1 = 0$, и принимая $\gamma_2 \approx 3.5$ при $U_0 = 15$ кВ, а эффективную геометрическую прозрачность эмиссионного электрода для ускоренных ионов Γ с учетом наличия периферийной металлической части эмиссионного электрода и достаточно узкого (около 3 см) распределения плотности тока I_0 в форме гауссианы, измеренного секционированным калориметром, принимая равной $\Gamma \approx 0,3$, можно оценить величину тока ускоренных ионов I_{i2} . Так, для осциллограмм на рисунке 16 к моменту окончания импульса тока разряда амплитудой $I_d \approx 100$ А эффективный коэффициент извлечения электронов из плазменного эмиттера равный $\alpha_{eff} = (I_{em} + I_{i2} \cdot \Gamma \cdot \gamma_1) / I_d$ при давлении $p = 65$ мПа составлял $\alpha_{eff} \approx 0,4$ и $I_{i2} \approx 5,5$ А (рисунок 16, а), а при давлении $p = 110$ мПа $\alpha_{eff} \approx 0,81$ и $I_{i2} \approx 40$ А (рисунок 16, б).

Из графиков, представленных на рисунке 17 и снятых для установившихся режимов тока дугового разряда, видно, что с ростом тока разряда I_d растет величина тока I_{HA} . При этом увеличение R_{HA} приводит к уменьшению тока I_{HA} таким образом, что величина автосмещения потенциала остается на уровне $(15 \div 30)$ В в источнике «СОЛЮ» и на уровне $(30 \div 50)$ В в источнике «ДУЭТ» в зависимости от условий генерации эмиссионной плазмы (давления газа, амплитуды тока I_d , величины магнитного поля и др.).

При $R_{HA} = 0$, когда потенциал электрода 4, анодной вставки 3 и анода 5, 6 (рисунок 2) дугового разряда одинаковый, амплитуда тока I_{HA} соизмерима с амплитудой тока I_d (рисунок 18, а). В этот момент ток разряда преимущественно замыкается по оси системы через электрод 4, что было подтверждено отдельными зондовыми измерениями. При наличии ускоряющего напряжения и зажигания дугового разряда видно, что в течение первых двадцати

микросекунд разряд переключается в область эмиссионной сетки, что приводит к появлению тока I_0 (с амплитудой I_{0max}), а ток I_{HA} даже меняет свой знак, что также можно объяснить замыканием тока ускоренных ионов на электрод 4 со стороны ускоряющего промежутка. При этом амплитуда тока I_{HA} обратной полярности также измеряется десятками ампер ($I_{HAmax} \sim 50$ A).

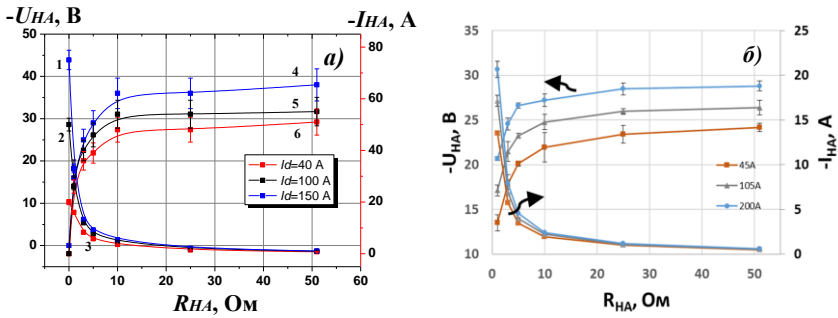


Рисунок 17 – Зависимость тока I_{HA} (кривые 1, 2, 3) и напряжения U_{HA} (кривые 4, 5, 6) от величины сопротивления R_{HA} при разных токах разряда I_d в источнике «ДУЭТ» (а) и источнике «СОЛО» (б)

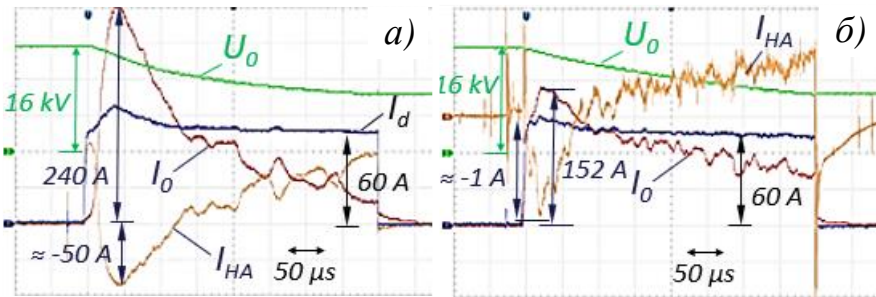


Рисунок 18 – Характерные осциллограммы тока I_d , тока I_{HA} , тока I_0 и напряжения U_0 при $R_{HA}=0$ Ом (а) и 51 Ом (б) при диаметре электрода 4 равным 35 мм в источнике «СОЛО» (рисунок 2), $U_0=16$ кВ, $p(\text{Ar})=110$ мПа

Из рисунка 18, б видно, что введение сопротивления $R_{HA}=51$ Ом приводит к появлению высокочастотной модуляции тока I_{HA} с частотой на уровне ≈ 50 кГц. При этом ВЧ-модуляции на осциллограмме тока разряда практически отсутствуют, что говорит о его динамическом перестроении в пространстве СПЭ. При наличии напряжения U_0 и зажигании дугового разряда появляется ток I_0 , амплитуда которого, как и при $R_{HA}=0$, имеет явно выраженный максимум I_{0max} в первые десятки микросекунд, но амплитуда этого выброса меньше на $\approx 30\%$, чем на рисунке 18, а. Наличие тока I_0 снова приводит к интенсивной бомбардировке электрода 4 вплоть до смены полярности тока I_{HA} , что также обусловлено преобладающим влиянием ионной компоненты тока I_{i2} над электронной компонентой I_e . Вместе с изменением полярности тока I_{HA} меняется полярность U_{HA} , когда электроды 3 и 4 имеют положитель-

ный потенциал относительно эмиссионного электрода, что приводит к переключению доли тока разряда на эти электроды, а, следовательно, к снижению коэффициента извлечения α . Таким образом включается самосогласованный механизм ООС, когда увеличение тока I_0 ведет к снижению коэффициента α .

На рисунке 19 представлена зависимость коэффициента $k_d=I_0/I_d$ от величины R_{HA} при разных токах I_d . Видно, что при $R_{HA}=0$ Ом коэффициент K_d может достигать $K_d=4$ и тем выше, чем ниже амплитуда тока разряда. С увеличением R_{HA} вне зависимости от амплитуды тока I_d коэффициент K_d кратно снижается и достигает насыщения при $R_{HA}\approx 25$ Ом. При этом из зависимостей на рисунке 20 видно, что увеличение сопротивления R_{HA} в диапазоне $R_{HA}=(0\div 51)$ Ом и выше приводит к снижению амплитуды выброса тока I_{HAmax} таким образом, что напряжение U_{HAmax} изменяется немонотонно в диапазоне (30÷50) В.

В экспериментах на источнике «СОЛО» с СПЭ введение самосогласованной ООС за счет обратного тока ионов позволило увеличить ускоряющее напряжение в беспробоном режиме с 15 кВ до 25 кВ при прочих одинаковых условиях и обеспечить стабильную генерацию миллисекундного модулированного электронного пучка, описанного в Главе 3.

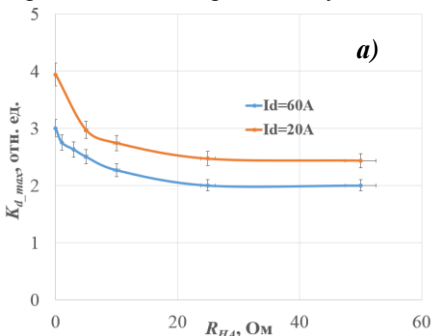


Рисунок 19 – Зависимость коэффициента усиления тока разряда $K_d=I_0/I_d$ от величины сопротивления R_{HA} при разных токах разряда I_d . $U_0=16$ кВ, $p=75$ мПа, $V_1=50$ мТл, $V_2=100$ мТл.

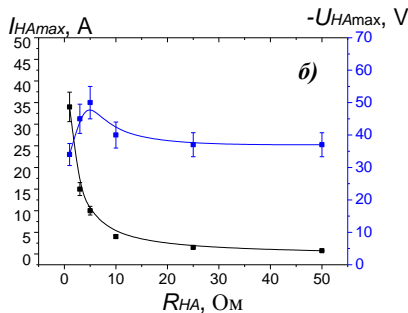


Рисунок 20 – Зависимость тока I_{HAmax} (обратная полярность на рисунке 18) и падения напряжения U_{HAmax} в момент максимума тока I_{HA} от величины сопротивления R_{HA} .

Пятая глава посвящена вопросам снижения неоднородности плотности тока электронного пучка по его сечению как в области эмиссии, так и на мишени, особенно актуальным для дугового разряда и которые неразрывно связаны с возможностью расширения предельных параметров генерируемых электронных пучков, таких как энергия электронов в пучке, его амплитуда, а, соответственно, мощность пучка, а также его длительность, а, соответственно, его энергия. В этом случае вопрос неоднородности плотности тока эмиссии и тока пучка является ключевым в том числе с точки зрения достижения стабильности работы источников с СПЭ, что также продемонстрировано в данной главе, используя источник «ДУЭТ» ($E_b\leq 200$ кэВ) с многоапертурным СПЭ и выводом пучка большого сечения (≈ 1000 см²) в атмосферу и источник

электронов «КИЛОАМПЕР» ($E_b \leq 100$ кэВ) на основе многодугового разряда с интегральной энергией пучка ≤ 5 кДж.

а. Генерация электронного пучка в источнике электронов на основе многодугового сеточного плазменного эмиттера

Предельные параметры пучка, достигаемые с помощью источников электронов с СПЭ на основе дугового разряда низкого давления, прежде всего, ограничены возникновением электрического пробоя ускоряющего промежутка. В том числе, это связано со значительной неоднородностью плотности эмиссионного тока и, как следствие, неоднородностью плотности тока пучка, что, кроме этого, затрудняет дальнейшее использование источников для практических целей.

Зондовые измерения (рисунок 21), проведенные на установке «СОЛО», показали, что на фронте импульса тока разряда (первые несколько микросекунд) большая часть (близкая к 100%) тока замыкается по оси системы. В отсутствие перераспределяющего электрода 4 (рисунок 2) ток I_{HA} нарастает до амплитудного значения за ≈ 20 мкс без пика на фронте в отличие от случая, когда этот электрод установлен, что косвенным образом также подтверждает развитие разряда от оси системы.

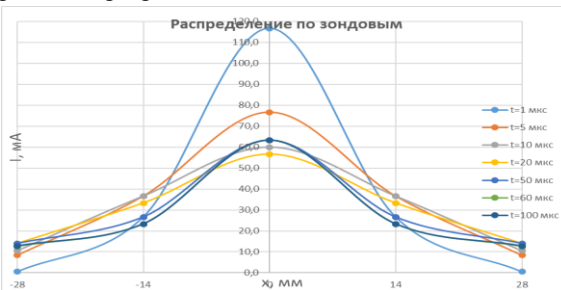


Рисунок 21 – Развитие дугового разряда (результат зондовых измерений). Параметры эксперимента $I_d=60$ А, $p=25$ мПа, $V_1=20$ мТл, $V_2=100$ мТл

с течением времени расширяясь в пространстве полого анода. Разряд достигает установившегося режима горения, когда величины токов на каждый из зондов постоянны в течение оставшейся части импульса, не раньше чем через $\approx (40 \div 60)$ мкс от момента зажигания дугового разряда. Такое же заключение можно сделать на основе измерений энергии пучка на секционированном калориметре, показывающих, что в отсутствие перераспределяющего электрода в СПЭ такая сложная «пикированная» форма плотности энергии пучка в плоскости мишени достигает квазиустановившегося значения не раньше, чем через 100 мкс.

Обеспечить более высокую равномерность плотности эмиссионного тока, извлекаемого в ускоряющий промежуток из СПЭ, можно созданием эмиттера с многокатодной разрядной системой (в эксперименте использовалось шесть катодных узлов) и большей площадью эмиссионной сетки (≈ 150 см²), что было реализовано в источнике электронов «КИЛОАМПЕР». Рассчитанная

Отмечено, что вне зависимости от величины ведущего магнитного поля в диапазоне (50÷500) мТл и амплитуды тока разряда в диапазоне (20÷250) А в первые несколько микросекунд разряд имеет максимальную плотность в области центрального зонда, с

конфигурация внешнего магнитного поля позволяет с минимальными потерями на стенках трубы дрейфа транспортировать электронный пучок на значительное расстояние (~ 1 м) при низком ($\approx 0,04$ Па) давлении. Увеличение площади эмиссии позволяет снизить плотность эмиссионного тока с десятков до единиц А/см^2 , а использование многодуговой системы – снизить неоднородность плотности эмиссионного тока, которая была рассчитана на основе результатов, полученных на установке «СОЛО». Результаты моделирования представлены на рисунке 22.

Характерные осциллограммы тока I_d , тока I_0 , тока трубы дрейфа I_t и тока коллектора I_c при использовании высоковольтной конденсаторной батареи емкостью

$$C=3 \text{ мкФ},$$

$$p=0.04 \text{ Па (Ар)} \text{ и начальном}$$

$$\text{напряжении } U_0=70 \text{ кВ}$$

приведены на рисунке 23, а. Видно,

что при зажигании разряда

электронный пучок замыкается

на трубу дрейфа 7 (ток I_t)

(рисунок 3), коллектор 8, 9

(ток I_c) и вакуумную камеру 1

(не представлена). В некоторый

момент времени, определяемый

условиями эксперимента, токи

I_0 , I_t и I_c по модулю резко

возрастают, при этом полярность

тока I_t меняет знак на противоположный.

С этого момента транспортировка

электронного пучка осуществляется

в условиях компенсации его простран-

ственного заряда ионами, образующимися

в пространстве дрейфа при взаимодей-

ствии электронного пучка с остаточным

и рабочим газом. В начале импуль-

са компенсация пучка еще не полная,

и в токе I_t преобладает электронная

компонента. По мере компенсации

пространственного заряда пучка, ионы,

образованные в протяженном

пространстве дрейфа, преимущественно

замыкаются на трубу дрейфа 7

поперек линий ведущего магнитного

поля, в то время как низкоэнергетиче-

ские электроны движутся вдоль силовых

линий магнитного поля и уходят на

коллектор 8, 9. Кроме этого, внешнее

продольное магнитное поле обеспечи-

вает сжатие пучка при его формиро-

вании, что позволяет транспортиро-

вать его до коллектора с минималь-

ными потерями тока на стенках

вакуумной камеры 1 и трубы дрейфа

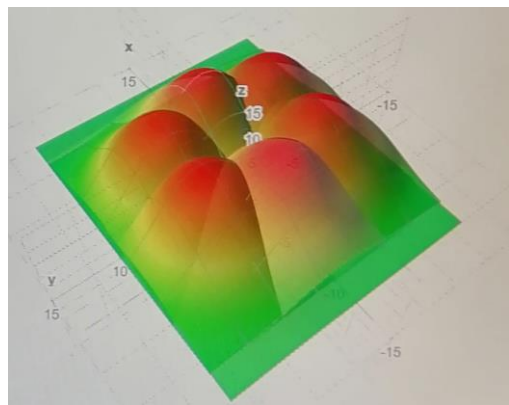


Рисунок 22 – Моделирование неоднородности плотности тока эмиссии для источника электронов «ЖИЛОАМПЕР» в многодуговом СПЭ без учета влияния внешнего магнитного поля. Параметры расчета: суммарный ток разряда $I_d=360$ А, $t=120$ мкс, $p=25$ мПа, $B_1=20$ мТл, $B_2=100$ мТл

ственного заряда ионами, образующимися в пространстве дрейфа при взаимодействии электронного пучка с остаточным и рабочим газом. В начале импульса компенсация пучка еще не полная, и в токе I_t преобладает электронная компонента. По мере компенсации пространственного заряда пучка, ионы, образованные в протяженном пространстве дрейфа, преимущественно замыкаются на трубу дрейфа 7 поперек линий ведущего магнитного поля, в то время как низкоэнергетические электроны движутся вдоль силовых линий магнитного поля и уходят на коллектор 8, 9. Кроме этого, внешнее продольное магнитное поле обеспечивает сжатие пучка при его формировании, что позволяет транспортировать его до коллектора с минимальными потерями тока на стенках вакуумной камеры 1 и трубы дрейфа 7. Превышение тока I_0 над током I_d в данном случае также свидетельствует о наличии ионно-электронной эмиссии согласно формуле (1), а слабую зависимость $I_0=f(U_0)$ (рисунок 23, б) можно объяснить ограниченной током разряда эмиссионной способностью СПЭ и слоевой стабилизацией границы эмиссионной плазмы.

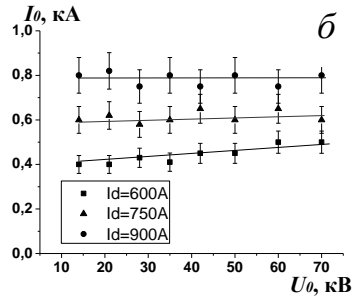
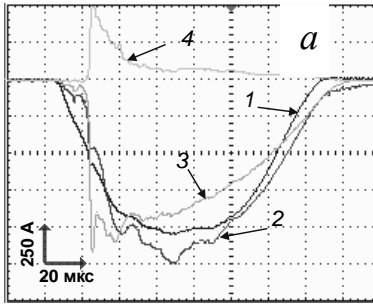


Рисунок 23 – Характерные осциллограммы токов на установке «КИЛОАМПЕР»: 1 – I_d ; 2 – I_0 ; 3 – I_c ; 4 – I_r при $U_0=70$ кВ и $p(\text{Ar})=2 \cdot 10^{-2}$ Па (а) и зависимость тока I_0 от U_0 для разных токов I_d при $C=3$ мкФ (б)

При увеличении емкости батареи до $C=6$ мкФ характер зависимости $I_0=f(U_0)$ практически не меняется, и при начальном ускоряющем напряжении $U_0=90$ кВ максимальный ток I_0 , при котором не происходил пробой ускоряющего промежутка, составил $I_0=500$ А, а величина тока $I_0=1$ кА стала достижимой только при снижении до $U_0=50$ кВ (при $C=3$ мкФ начальное ускоряющее напряжение достигало $U_0=70$ кВ).

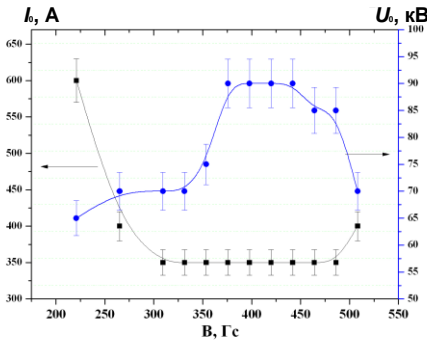


Рисунок 24 – Зависимости тока I_0 и максимального напряжения U_0 , от максимальной величины ведущего магнитного поля B

Вне зависимости от емкости высоковольтной конденсаторной батареи расчетная энергия пучка достигала ≈ 5 кДж при длительности импульса на полувысоте равной 100 мкс. Максимальная электрическая прочность ускоряющего промежутка наблюдается при величине продольного магнитного поля в диапазоне (350–450) Гс (рисунок 24).

б. Использование многоапертурной электронно-оптической системы в источнике электронов с СПЭ

Геометрическая прозрачность опорной решетки выпускного фольгового окна в различных источниках электронов с выводом пучка в атмосферу может составлять от 90% до 50 %, что приводит к существенным потерям электронного пучка на опорную решетку. Кроме этого, при генерации пучков столь большой площади (~ 1000 см²) обязательно встает вопрос снижения неоднородности плотности тока пучка. Для решения обеих проблем (сниже-

ния потерь и неоднородности плотности тока пучка) может использоваться многоапертурная электронно-оптическая система (ЭОС), когда эмиссионную поверхность эмиссионной сетки можно разделить на участки, эмиссия электронов с которых имеет максимальную вероятность вывода электронного пучка в атмосферу.

Для этого на эмиссионную сетку 5 источника электронов «ДУЭТ» (рисунок 4) укладывалась маска 6 из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм, которая была перфорирована круглыми отверстиями соосными с отверстиями в опорной решетке выпускного фольгового окна. Таким образом, широкий электронный пучок представляет суперпозицию элементарных пучков, сформированных отдельными эмиссионными структурами, плазменная граница которых стабилизирована сеткой.

При извлечении электронов из СПЭ в ускоряющий промежуток в отсутствие маски 6 и использовании сетки с $h=0,4$ мм с общей геометрической прозрачностью равной 44% экспериментально было получено, что максимальный коэффициент извлечения электронов при $R_{HA}=10$ Ом достигает $\alpha \approx 0,6$ (рисунок 25). При введении в СПЭ металлической маски 6 (рисунок 4) с постоянным диаметром отверстий 12 мм и общей геометрической прозрачностью $\approx 30\%$, уложенной на эмиссионную сетку с $h=0,4$ мм, коэффициент α уменьшается прямо пропорционально геометрической прозрачности маски и при $U_0=160$ кВ и $I_d=60$ А составляет $\alpha \approx 0,6 \times 0,3 \approx 0,2$. Используя эмиссионную сетку с $h=0,4$ мм в диапазоне токов разряда $I_d=(10 \div 100)$ А при длительности импульса тока разряда на полувысоте $t=40$ мкс, длине ускоряющего зазора $d_0=(70 \div 200)$ мм, давлении рабочего газа $p=(20 \div 60)$ мПа невозможно было получить коэффициент извлечения α , по абсолютной величине превышающий значение геометрической прозрачности маски.

Для облегчения юстировки отверстий в маске и опорной решетке при наличии переключения тока разряда в ячейки эмиссионной сетки, а также с учетом необходимости снижения неоднородности плотности тока пучка по его сечению отверстия в маске были выполнены с переменным диаметром отверстий в диапазоне $\varnothing(7 \div 12)$ мм, а для облегчения переключения тока разряда в ячейки эмиссионной сетки, и тем самым, увеличения коэффициента извлечения α размер ячейки сетки был выбран $h=0,6$ мм.

При установке в СПЭ сетки с $h=0,6$ мм, но в отсутствие маски, при появлении ускоряющего напряжения и зажигании разряда коэффициент извлечения электронов может достигать $\alpha=0,75$, что связано с увеличением площади открытой плазменной эмиссионной поверхности при том же пристеночном слое, однако на осциллограммах импульсов токов как разряда, так и эмиссии появляются высокочастотные модуляции с частотой около $(1 \div 2)$ МГц. Обнаруживается влияние высокого напряжения на форму и амплитуду тока разряда, снижение электрической прочности ускоряющего промежутка и стабильности работы источника электропитания СПЭ вплоть до выхода из строя элементов его электрических схем.

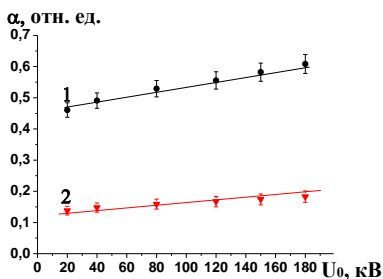


Рисунок 25 – Зависимость коэффициента α от напряжения U_0 при $I_d=40$ А: 1 – в отсутствие маски; 2 – с установленной в СПЭ маской с диаметром отверстий 12 мм: $h=0,4$ мм; длина ускоряющего зазора $d_0=140$ мм; $p=50$ мПа; $R_{HA}=10$ Ом

коэффициент $\alpha \approx 0,2$. Коэффициент α увеличивается по мере увеличения амплитуды тока I_d , что согласно формуле (2) связано с уменьшением ширины слоя l_i . Форма импульса тока I_0 в этом случае имеет слегка нарастающую плоскую вершину при фиксированном токе разряда (рисунок 27).

На рисунке 28 (кривая 1) представлена зависимость коэффициента β , равного отношению тока I_0 к току пучка I_b , выведенного в атмосферу, без установленной в СПЭ маски. Сравнивая результаты эксперимента с данными [S.M. Seltser, M.J. Berger], можно констатировать, что в отсутствие маски при увеличении U_0 рост коэффициента β происходит только за счет увеличения прозрачности фольги для высокоэнергетических электронов. Слабая зависимость коэффициента β от момента его фиксации по длительности импульса тока пучка t_i (рисунок 28, кривая 3) подтверждает стабильность работы источника электронов во всем временном диапазоне импульса тока пучка, даже при допущении, что параметры эмиссионной плазмы могут меняться во времени.

В экспериментах по минимизации потерь в опорной решетке с установленной в СПЭ маской с отверстиями диаметром 12 мм, были получены зависимости, представленные на рисунке 28 (кривые 2, 4). В этом случае потери тока в опорной решётке при $U_0=200$ кВ были уменьшены с 60% до 30% (без учета отражения электронов от алюминиевого коллектора).

В завершение экспериментов с многоапертурной ЭОС, для снижения пространственной неоднородности плотности тока по сечению пучка отверстия в маске были выполнены с переменным диаметром отверстий. Так, отверстия в маске должны иметь максимально возможный диаметр (12 мм) в местах с минимальной плотностью тока пучка, и минимальный диаметр (7 мм) – в участках с максимальной плотностью тока пучка. Важно отметить, что такой подход позволяет организовать одновременно переменный диаметр отверстий как в продольном, так и в поперечном направлениях апертуры пучка.

При введении в СПЭ маски с диаметром отверстий 8 мм и общей геометрической прозрачностью $\approx 13\%$, уложенной на эмиссионную сетку с $h=0,6$ мм, на импульсах токов разряда и эмиссии прекращаются все высокочастотные модуляции, а ускоряющее напряжение перестает влиять на форму и амплитуду импульса тока I_d . В этом случае были получены зависимости коэффициента α от напряжения U_0 при разных токах I_d (рисунок 26). Например, при $I_d=100$ А, $U_0=160$ кВ и геометрической прозрачности маски 13% достигается коэффициент

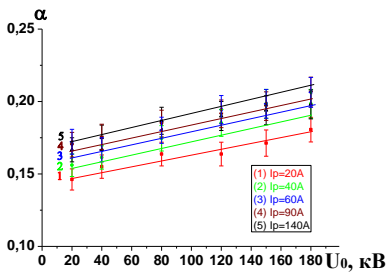


Рисунок 26 – Зависимости коэффициента α от напряжения U_0 с маской с отверстиями диаметром 8 мм и геометрической прозрачностью 13% при $R_{HA}=10$ Ом: $h=0,6$ мм, $d_0=140$ мм, $p=50$ МПа

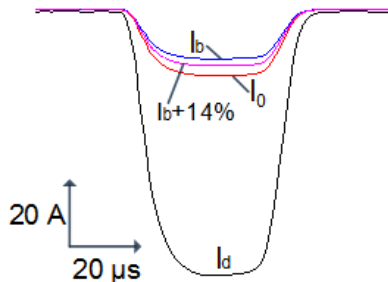


Рисунок 27 – Характерные осциллограммы импульсов токов I_d , I_0 , I_b , а также I_b с учетом отражения электронов от алюминиевого коллектора в экспериментах с маской с отверстиями диаметром 8 мм с $h=0,6$ мм при $U_0=160$ кВ, $R_{HA}=10$ Ом, $d_0=140$ мм и $p=50$ МПа

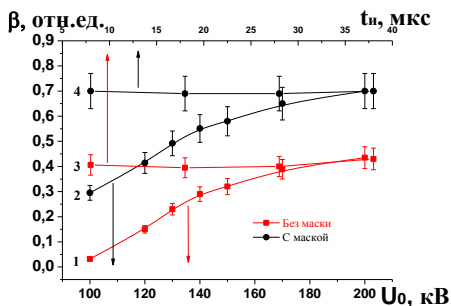


Рисунок 28 – Зависимости коэффициента β от напряжения U_0 и момента фиксации коэффициента β по длительности импульса t_n : 1,3 – без маски; 2,4 – с маской с отверстиями диаметром 12 мм

хуже $\pm 10\%$ и $\pm 5\%$ от средней плотности тока по длинной и короткой сторонам пучка, соответственно. При этом использование описанной маски позволяет сохранить высокий коэффициент $\beta \approx (0,7 \div 0,8)$ при $U_0=200$ кВ.

Если ввести количественный показатель стабильности работы источника электронов S , обратно пропорциональный количеству электрических пробоев $N_{пр}$ на 1000 импульсов тока пучка ($S=1/N_{пр}$), то по предварительным оценкам величина S увеличилась обратно пропорционально геометрической прозрачности маски, установленной в СПЭ с $S \approx 2$ до $S \approx 12$.

Распределение плотности тока по сечению пучка, полученное в экспериментах с маской с переменным диаметром отверстий, представлено на рисунке 29. Видно, что увеличение отверстий в маске приводит к увеличению плотности тока по сечению пучка в местах, где плотность тока была минимальна, и уменьшению – на участках, где плотность тока была максимальна. Тем самым, показано, что в многоапертурной ЭОС с переменным диаметром отверстий возможно добиться неоднородности не

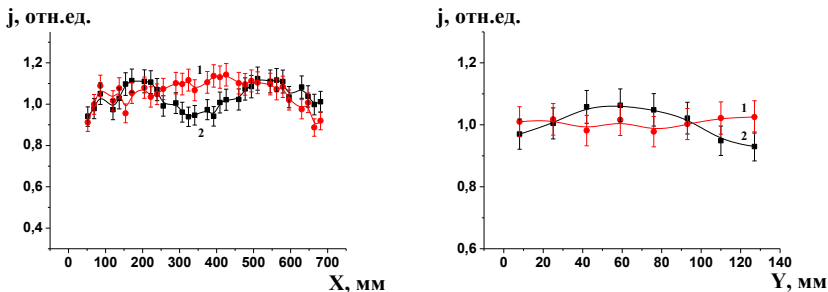


Рисунок 29 – Распределения плотности тока по длинной (а) и короткой (б) сторонам пучка, полученные в источнике электронов «ДУЭТ» с многоапертурным СПЭ: 1 – маска с переменной прозрачностью; 2 – маска с отверстиями диаметром 8 мм и $h=0,6$ мм. $U_0=150$ кВ, $I_0=7$ А, $t_n=40$ мкс

Измерения мощности пучка, выведенного в атмосферу, используя водоохлаждаемый коллектор, показали, что при напряжении $U_0=200$ кВ, токе $I_0=16$ А, длительности импульса $t_n=40$ мкс, частоте следования импульсов $f=50$ с $^{-1}$ и средней мощности пучка в ускоряющем промежутке около $P_0 \approx 6,5$ кВт из ускоряющего промежутка через выпускное фольговое окно был выведен пучок средней мощностью около $P_b \approx 5$ кВт. Генерация пучка осуществлялась в течение нескольких часов. Дальнейшее увеличение мощности пучка было ограничено мощностью используемого в экспериментах регулятора высоковольтного источника электропитания.

Шестая глава посвящена вопросам использования источников электронов с СПЭ на основе дуги низкого давления в научных и технологических целях. Отдельно освещены следующие применения: 1) изменение функциональных свойств поверхности металлических материалов, облученных импульсным модулированным электронным пучком субмиллисекундной длительности с целью повышения ее твердости и износостойкости; 2) демонстрация перспективности использования источника электронов с СПЭ и плазменным анодом с открытой границей плазмы для экспериментов по удержанию температуры плазмы в открытой ловушке установки «ГОЛ-3»; 3) электронно-пучковая модификация натурального латекса с целью увеличения прочности на разрыв облученных образцов; 4) формирование углеродных структур в пленках поливинилхлорида в результате его радиационно-химического превращения в атмосфере воздуха с целью демонстрации возможности низкотемпературной обработки органического сырья, позволяющей осуществлять, например, его бездиоксиновую утилизацию; 5) предпосевная обработка семян яровой пшеницы импульсным электронным пучком, выведенным в атмосферу, с целью их обеззараживания с сохранением и даже повышением всхожести.

В **Заключении** сформулированы основные результаты исследований, обсуждаются перспективы использования источников электронов с СПЭ на

основе дугового разряда низкого давления в научных и технологических целях.

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

- выявлены и экспериментально продемонстрированы механизмы стабилизации тока электронного пучка в источниках электронов с СПЭ различной конфигурации, обеспечивающие расширение диапазона параметров генерируемых электронных пучков;

- определены механизмы и условия генерации модулированного электронного пучка субмиллисекундной длительности в низкоэнергетическом (до 25 кэВ) источнике электронов с СПЭ на основе дугового разряда низкого давления, позволяющие осуществлять управление мощностью пучка в течение импульса субмиллисекундной длительности, а, следовательно, управлять скоростью ввода энергии пучка в поверхность металлических материалов, что крайне важно при решении многих материаловедческих задач;

- определены способы снижения неоднородности плотности эмиссионного тока, в том числе ответственные за повышение электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка в источниках электронов с СПЭ на основе дугового разряда низкого давления;

- продемонстрирована возможность управления шириной энергетического спектра электронного пучка, выведенного в атмосферу в условиях отсутствия потерь тока пучка в выводной фольге источника электронов ниже пороговой энергии электронного пучка, определяемой материалом и толщиной этой фольги;

- разработано и модифицировано диагностическое оборудование для различных источников электронов с СПЭ на основе дугового разряда низкого давления для исследования параметров генерируемых электронных пучков, а в частности: общей энергии пучка; распределения плотности энергии и тока пучка по его сечению; определения энергетического спектра электронов в пучке, выведенном в атмосферу; измерения параметров эмиссионной плазмы; измерения температуры поверхности мишени, облучаемой интенсивным электронным пучком;

- разработаны современные и модифицированы ранее используемые системы электропитания разработанных и модернизированных источников электронов с СПЭ на основе дугового разряда низкого давления;

- разработаны, созданы и/или модернизированы источники электронов с СПЭ на основе дугового разряда низкого давления, способные генерировать электронные пучки в широком диапазоне параметров (энергия электронов десятки – сотни кэВ, амплитуда импульса тока пучка единицы – сотни ампер, длительность импульса тока пучка единицы – сотни микросекунд, частота следования импульсов от одиночных импульсов до десятков импульсов в секунду), которые по совокупности параметров, технологическим возможностям, надежности автоматизации и сроку службы превосходят известные мировые аналоги;

– продемонстрирована возможность управления температурой поверхности образцов, облучаемых низкоэнергетическим модулированным электронным пучком субмиллисекундной длительности в источнике с СПЭ на основе дугового разряда низкого давления;

– продемонстрированы возможности использования модулированных электронных пучков субмиллисекундной длительности для обработки поверхности различных материалов и изделий с целью улучшения их эксплуатационных и функциональных свойств;

– продемонстрированы перспективности использования источника электронов с СПЭ на основе дуги низкого давления для удержания температуры плазмы в открытой магнитной ловушке на установке «ГОЛ-3»;

– продемонстрированы новые возможности использования интенсивных импульсных электронных пучков большого сечения с выводом пучка в атмосферу (модификация натурального латекса, формирования углеродных структур в пленках поливинилхлорида, предпосевной электронно-пучковой обработки семян).

Разработано и создано новое поколение источников электронов с плазменными катодами на основе дуги низкого давления, имеющих широкий диапазон перестройки параметров генерируемого электронного пучка: энергия электронов ($5 \div 200$) кэВ, ток пучка ($10 \div 1000$) А, плотность тока эмиссии ($0,01 \div 50$ А/см²) при сечении пучка ($1000 \div 10$) см², плотность тока на мишени до 20 А/см², длительность импульса ($10 \div 1000$) мкс, энергии пучка (десятки Дж \div 5 кДж), неоднородность плотности энергии по сечению пучка не хуже ± 15 от среднего значения. По совокупности основных параметров, диапазону их независимой перестройки, а также ресурсу, составляющему $\geq 10^7$ имп. при средней мощности до 5 кВт, созданные источники электронов не имеют прямых мировых аналогов и являются перспективными для их использования в научных и технологических целях.

Указанные выше параметры электронных источников с СПЭ на основе дугового разряда низкого давления с полым анодом нельзя считать предельными. Есть все основания полагать, что при совершенствовании элементов конструкции СПЭ, схем электропитания и управления таких источников электронов могут быть достигнуты еще более высокие параметры генерируемых пучков, а, соответственно, расширится сфера их возможных применений. Безусловно, это по-прежнему стимулирует исследования в этих направлениях и ведет к дальнейшему прогрессу в совершенствовании перспективных источников электронов такого типа.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ АВТОРА, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. 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 ЖТФ. – 2014. – Т.40, № 12. – С. 24–30.
2. Reconstruction of electron beam energy spectra for vacuum and gas diodes / A.V. Kozyrev, V.Yu. Kozhevnikov, **M.S. Vorobyov** [et al.] // Laser and Particle Beams. – 2015. P.1–10. Cambridge University Press. – 0263-0346/15. – doi:10.1017/S0263034615000324
3. **Воробьев, М.С.** Источник электронов с многоапертурным плазменным эмиттером и выводом пучка в атмосферу / М.С. Воробьев, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин // ПТЭ. – 2015. – № 5. – С. 112–120.
4. Радиационная обработка натурального латекса с использованием широкоапертурного ускорителя электронов с плазменным эмиттером / **М.С. Воробьев**, В.В. Денисов, Н.Н. Коваль [и др.] // ХВЭ. – 2015. – Т.49, № 3. – С. 169–172.
5. Koval, T.V. Wide-aperture electron source with a plasma grid emitter / T.V. Koval, **M.S. Vorobyov**, N.B. Hung // High Temperature Material Processes. – 2015. – V.19, № 1. – P. 77–84.
6. **Воробьев, М.С.** Распределение плотности тока в пучке большого сечения в ускорителе электронов с многоапертурным плазменным катодом / М.С. Воробьев, Н.Н. Коваль // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, № 11. – С. 41–47.
7. «Холодный» синтез углерода из поливинилхлорида с использованием электронного пучка, выведенного в атмосферу / Ю.Г. Кряжев, Н.Н. Коваль, **М.С. Воробьев** [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, № 19. – С. 13–19.
8. Формирование и транспортировка интенсивного субмиллисекундного пучка в продольном магнитном поле в источнике электронов с сетчатым плазменным катодом / **М.С. Воробьев**, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин // Известия ВУЗов. Физика. – 2017. – Т. 60, № 8. – С. 109–114.
9. Generation and transport of submillisecond intense electron beams in plasma cathode vacuum diodes / V.T. Astrelin, I.V. Kandaurov, **M.S. Vorobyov** [et al.] // Vacuum. – 2017. – Т. 138. – P. 1–6.
10. **Воробьев, М.С.** Автоматизированная система измерения плотности тока импульсно-периодического пучка большого сечения, выведенного в атмосферу / М.С. Воробьев, С.С. Ковальский, Н.Н. Коваль // ПТЭ. – 2018. – № 6. – С. 91–97.
11. Generation, transport, and efficient extraction of a large cross-section electron beam into an air in an accelerator with a mesh plasma cathode /

T.V. Koval, **M.S. Vorobyov**, N.N. Koval, Nguen Bao Hung // *Lasers and Particle Beams*. – 2018. – V. 36, № 1. – P. 22-28.

12. 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 // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2019. – Т.60, № 5. – С. 3–12.

13. Численное моделирование формирования электронных пучков в источниках двух типов с плазменным катодом и их транспортировки в магнитном поле / В.Т. Астрелин, **М.С. Воробьев**, И.В. Кандауров, В.В. Куркучев // *Известия РАН. Серия физическая*. – 2019. – Т. 83, № 11. – С. 1529–1533.

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

15. Повышение электрической прочности ускоряющего зазора в источнике электронов с плазменным катодом / В.И. Шин, П.В. Москвин, **М.С. Воробьев** [и др.] // *ПТЭ*. – 2021. – № 2. – С. 69–75.

16. 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 ЖТФ*. – 2021. – Т. 47, № 10. – С. 38-42.

17. Предпосевная обработка семян яровой пшеницы импульсным электронным пучком в атмосфере / С.Ю. Дорошкевич, К.П. Артёмов, Н.Н. Терещенко, Т.И. Зюбанова, **М.С. Воробьев** [и др.] // *ХВЭ*. – 2021. – Т. 55, № 4. – С. 326–332.

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

19. Отрицательная обратная связь по току в ускоряющем промежутке в источниках электронов с плазменным катодом / **М.С. Воробьев**, П.В. Москвин, В.И. Шин [и др.] // *ЖТФ*. – 2022. – Т. 92, № 6. – С. 883–888.

20. Treatment of Silumin Surface by a Modulated Submillisecond Electron Beam / **M.S. Vorobyov**, K.T. Ashurova, Yu.F. Ivanov [et al.] // *High Temperature Material Processes*. – 2022. – V. 26, №4. – P. 1–10.

21. Controlling the Specimen Surface Temperature During Irradiation With a Submillisecond Electron Beam Produced by a Plasma-Cathode Electron Source / **M. Vorobyov**, T. Koval, V. Shin [et al.] // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2021. – V. 49, № 9. – P. 2550 – 2553.

Публикации в сборниках статей и трудов конференций

22. Efficiency of electron beam extraction to the ambient atmosphere in an electron accelerator based on ion-electron emission / S.Yu. Doroshkevich, **M.S. Vorobyov**, M.S. Torba [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – 2064. –012116.

23. Increasing the Operation Stability of the Electron Accelerator Based on Ion-Electron Emission / M.S. Torba, S.Yu. Doroshkevich, V.A. Levamisov, **M.S. Vorobyov** [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – 2064. – 012122.

24. Источник электронов с сетчатым плазменным эмиттером для генерации интенсивного пучка субмиллисекундной длительности / **М.С. Воробьев**, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль [и др.] // Изв. ВУЗов. Физика. – 2014. – Т.57, № 11/3. – С. 204–209.

25. A silicon films deposition in the process of SiF₄ decomposition in pulsed glow discharge / В.В. Шугуров, В.В. Денисов, А.А. Калушевич, В.В. Яковлев, **М.С. Воробьев** [и др.] // Известия ВУЗов. Физика. – 2012. – Т.55, № 12/3. – С. 123–127.

26. A Study of Si Film Deposition under the Action of a Pulsed E-beam / N.N. Koval, V.V. Shugurov, A.I. Suslov, V.V. Denisov, V.V. Yakovlev, **M.S. Vorobyov** [et al.] // Proc. 10th Intern.Conf. on Modif. of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk. – 2010. – P. 687–690.

27. The obtainment of silicon from silicon tetrafluoride under the impact of the high-energy electron beam / N.N. Koval, V.V. Shugurov, A.I. Suslov, V.V. Denisov, V.V. Yakovlev, **M.S. Vorobyov** [et al.] // Proc. 16 Intern. Symp.on High Current Electronics. – Tomsk. – 2010. – P. 545–548.

28. Modernization of cathode assemblies of electron sources based on low pressure arc discharge / **M.S. Vorobyov**, V.N. Devyatkov, N.N. Koval, V.V.Shugurov // IOP Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 652. – 012066(1–6).

29. Moskvina, P.V. Investigation of a plasma potential in the plasma emitter of electrons under the influence of an ion flow / P.V. Moskvina, S.S. Kovalsky, **M.S. Vorobyov** // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – 1115. –022004.

30. Ускоритель электронов с многоапертурным плазменным эмиттером / **М.С. Воробьев**, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, В.В. Шугуров // Изв. ВУЗов. Физика. – 2014. – Т.57, № 11/3. – С.194–199.

31. Increasing Stability of Operation of an Electron Source with Plasma Cathode by Means of Beam Deflecting by Using a Leading Magnetic Field. V.I. Shin, V.N. Devyatkov, P.V. Moskvina, **M.S. Vorobyov** [et al.] // IEEE2020, Proceedings of 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE) – Tomsk. – 2020. – P. 484–487.

32. Methods of increasing the dielectric strength of the accelerating gap in an electron source with a plasma cathode / P.V. Moskvina, V.N. Devyatkov, V.I. Shin, **M.S. Vorobyov** [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – 2064. – 012119.

33. Автоматизация широкоапертурного ускорителя электронов с плазменным катодом и выводом пучка в атмосферу / **М.С. Воробьев**, В.В. Денисов, Н.Н. Коваль [и др.] // Известия ВУЗов. Физика. – 2016. – Т. 59, № 9/3. – С. 49–52.

34. **Vorobyov, M.S.** Investigation of the space-time stability of a large cross section electron beam generated by an accelerator with a grid plasma cathode / M.S. Vorobyov, S.S. Kovalsky, S.Yu. Doroshkevich // Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – 1115. – 022022.
35. Восстановление спектров электронов электронных пучков из кривых ослабления для вакуумных и газовых диодов / **М.С. Воробьёв**, Е.Х. Бакшт, Н.Н. Коваль [и др.] // Изв. ВУЗов. Физика. – 2014. – Т.57, №11/3. – С. 189–194.
36. Measurement of plasma parameters in an electron source with a plasma cathode based on a low-pressure arc discharge / S.Yu. Doroshkevich, **M.S. Vorobyov**, S.S. Kovalsky [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – 1393. – 012006.
37. **Vorobyov, M.S.** Simulation of electron beam generation with a constant, rising and falling beam power during its pulse / M.S. Vorobyov, S.S. Kovalsky // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – 1393. – 012035.
38. Surface structure and properties of high-chromium steel irradiated with a submillisecond pulsed electron beam / **M.S. Vorobyov**, Yu.F. Ivanov, Yu.H. Akhmadeev [et al.] // Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – 1115. – 032064.
39. **Воробьёв, М.С.** Формирование плоской вершины импульса тока пучка в источнике электронов с плазменным катодом // М.С. Воробьёв, Н.Н. Коваль, В.В. Яковлев // Известия ВУЗов. Физика. – 2017. – Т. 60, № 10/2. – С. 20-24.
40. Мультидуговой плазменный эмиттер для генерации субмиллисекундного электронного пучка с энергией до 100 кэВ и током до 1 кА / **М.С. Воробьёв**, С.В. Григорьев, П.В. Москвин, С.А. Сулакшин // Изв. ВУЗов. Физика. – 2014. – Т.57, №11/3. – С. 199–204.
41. Electron beam generation with variable current amplitude during its pulse in a source with a grid plasma cathode / **M.S. Vorobyov**, N.N. Koval, P.V. Moskvina [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – 1393. – 012064.
42. Energy Spectrum of an Electron Beam Outputted into Ambient Air on an Electron Accelerator with a Grid Plasma Cathode / **M.S. Vorobyov**, E.Kh. Baksht, N.N. Koval, V.F. Tarasenko [et al.] // IEEE2018, Proceedings 20th International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE). – 2018. – P. 209 – 213.
43. Doroshkevich, S.Yu. Stabilization of the pulse current in the electron accelerator with a grid plasma emitter / S.Yu. Doroshkevich, **M.S. Vorobyov**, V.V. Yakovlev // Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – 1115. – 022017.
44. Исследование стабильности работы плазменного эмиттера для широкоапертурного источника электронов / **М.С. Воробьёв**, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, В.В. Шугуров // Труды V Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника». – 2015. – С. 61–69.
45. **Воробьёв, М.С.** Исследование энергетической эффективности источника электронов с многоапертурным плазменным эмиттером и выводом пучка большого сечения в атмосферу / М.С. Воробьёв, Н.Н. Коваль,

- С.А. Сулакшин // Труды V Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника». – 2015. – С. 145–152.
46. Хынг, Н.Б. Исследование основных механизмов энергетических потерь в источнике электронов с плазменным эмиттером и выводом пучка большого сечения в атмосферу / Н.Б. Хынг, Т.В. Коваль, **М.С. Воробьев** // Труды V Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника», Улан –Удэ. – 2015. – С. 45–50.
47. Формирование и транспортировка пучков большого поперечного сечения в газе низкого давления / Н.Б. Хынг, Т.В. Коваль, **М.С. Воробьев**, Н.Н. Коваль // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 9/2. – С. 213–217.
48. Astrelin, V. Numerical model of EOS with large-area plasma cathode with mesh stabilization of the emission plasma boundary / V. Astrelin, **M. Vorobyov** // Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – 1115. – 022001.
49. Surface modification of hypereutectic silumin subjected to a millisecond modulated electron beam treatment / K.T. Ashurova, **M.S. Vorobyov**, E.A. Petrikova [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – 2064. – 012045.
50. Вулканизация натурального каучука с использованием ускорителя электронов с плазменным катодом / В.В. Денисов, **М.С. Воробьев**, В.В. Шугуров, В.В. Яковлев // Сборник материалов V Всероссийской конференции молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем». – Томск: ТМЛ-Пресс, 2009. – С. 622-625.
51. Evaluation of the effect of pre-sowing electron irradiation of barley seeds on plant development and disease incidence / N.N. Loy, N.I. Sanzharova, S.N. Gulina, **M.S. Vorobyov** [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. – 2019. – V. 1393. – 012107.
52. 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, E. Pokrovskaya, K. Artyomov // Proceedings of 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE) – 21st International Symposium on High-Current Electronics, Tomsk. – 2020. – P. 310–314.
53. Evaluation of the effect of pre-sowing electron irradiation of barley seeds on plant development and disease incidence / N.N. Loy, N.I. Sanzharova, S.N. Gulina, O.V. Suslova, T.V. Chizh, **M.S. Vorobyov** [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – 2064. – 012101.
54. Effectiveness of Electron Radiation Application for Preseep Treatment of Spring Wheat / N. Loy, S. Doroshkevich, N. Sanzharova, O. Suslova, **M. Vorobyov** [et al.] // IEEE2020, Proceedings of 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE) - 15th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows - Tomsk – 2020. – P. 750–755.

Тираж 100 экз. Заказ № 240.
Отпечатано в Томском государственном университете
систем управления и радиоэлектроники.
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.
Тел. (3822) 533018