

На правах рукописи



Воробьёв Максим Сергеевич

**Источник электронов с многоапертурным плазменным катодом  
на основе дугового разряда низкого давления  
с эффективным выводом пучка большого сечения в атмосферу**

05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск 2015

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

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор,  
Коваль Николай Николаевич

**Официальные оппоненты:** Бурдовицын Виктор Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (г. Томск)

Косогоров Сергей Леонидович, доктор технических наук, начальник лаборатории Л-2 АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» (г. Санкт-Петербург)

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

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 003.031.01, в Институте сильноточной электроники СО РАН по адресу: 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института сильноточной электроники СО РАН и на сайте <http://www.hcei.tsc.ru/ru/cat/dissertations/dissertations.html>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор физико-математических наук

Рыков В.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Облучению электронными пучками большого сечения (ПБС) больших поверхностей и значительных газовых объемов в настоящее время посвящено уже достаточно большое количество литературы, но интерес к данной тематике продолжает расти. ПБС, выведенные в атмосферу или газ высокого давления через выпускные фольговые окна (ВФО), применяют для полимеризации мономеров, очистки атмосферы и сточных вод от загрязнений, в плазмохимии и радиационной химии, для накачки мощных газовых лазеров, для коммутации больших токов, стерилизации пищевых продуктов и медицинского инструмента и др. Подобные задачи можно рационально решить, используя ускорители с плазменными катодами с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы, обладающие слабой взаимозависимостью параметров пучка и рядом преимуществ как перед ускорителями с термокатодом (большой срок службы, не критичность к вакуумным условиям, высокая энергетическая эффективность), так и перед ускорителями на основе взрывоэмиссионных катодов (большая длительность импульсов, повышенный срок службы, высокая однородность плотности тока пучка, большая частота следования импульсов). Поэтому исследования в настоящей работе направлены на создание источника электронов, стабильно генерирующего ПБС, с совокупностью параметров, не достигавшимися ранее, что представляет научный и практический интерес, и позволяет расширить сферу возможных применений таких источников электронов.

**Цель работы** состояла в исследованиях процессов извлечения электронов из многоапертурного плазменного катода на основе дуги низкого давления с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы, формирования, транспортировки и вывода многоэлементного электронного пучка большого сечения через выпускное фольговое окно, а также исследованиях стабильности работы и энергетической эффективности такого источника электронов.

### **Основные задачи исследований:**

1. Разработка катодного узла с увеличенным ресурсом работы, способного обеспечивать стабильные параметры тока разряда без обрывов и модуляций в диапазоне тока разряда  $I_p=(10\div 100)$  А, длительности импульсов  $t=(5\div 100)$  мкс при частоте их следования до  $f=50$  с<sup>-1</sup> в отсутствие капельной фракции катодной дуги на эмиссионной сетке.
2. Исследование процессов формирования, транспортировки и вывода электронного ПБС в атмосферу в источнике с многоапертурным плазменным катодом.
3. Разработка источника электронов с плазменным катодом на основе дуги низкого давления, генерирующего ПБС с эффективным выводом в атмосферу, работающего в импульсно-периодическом режиме.

**Научная новизна работы** заключается в том, что:

1. Разработаны новые катодные узлы, обеспечивающие генерацию эмиссионной плазмы, с увеличенным ресурсом работы в отсутствие капельной фракции катодной дуги на эмиссионной сетке, в сравнении с катодными

узлами с иницированием катодного пятна электрическим пробоем по поверхности диэлектрика, и обеспечивающие более широкий диапазон тока разряда без его обрывов, в сравнении с традиционно используемыми катодными узлами на основе ячейки Пеннинга.

2. Показано, что при организации двухэлектродной многоапертурной электронно-оптической системы с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы, стабильность работы плазменного катода повышается как за счет обеспечения дополнительного перепада давлений между областями генерации плазмы и ускорения электронов, так и за счет снижения влияния на генерацию эмиссионной плазмы высокоэнергетического ионного потока, образующегося при ионизации электронным пучком десорбированного с поверхности выпускного фольгового окна газа.

3. Показано, что применение многоапертурного плазменного катода позволяет увеличить коэффициент вывода тока пучка из вакуума в атмосферу через выпускное фольговое окно, геометрическая прозрачность опорной решетки которого 56%, с  $\beta=0,4$  до  $\beta=0,75$ , обеспечить за счет этого более высокий КПД источника электронов, а также расширить диапазон его основных характеристик (увеличить ток пучка в атмосфере) и повысить моноэнергетичность пучка во времени за счет снижения просадки напряжения конденсаторной батареи.

**Научная и практическая ценность работы** состоит в том, что:

1. При использовании плазменных катодов с большой эмиссионной площадью для генерации ПБС предложены конструктивные решения, обеспечивающие достижение высокого коэффициента вывода тока пучка из вакуума в атмосферу, определяемого только энергией электронного пучка и не зависящий от геометрической прозрачности и конструкции опорной решетки, что открывает новые возможности для источников электронов на основе таких катодов.

2. На основании проведенных исследований создан автоматизированный широкоапертурный ( $75 \times 15$ ) см<sup>2</sup> источник электронов с плазменным эмиттером, который по совокупности основных параметров и диапазону их независимой перестройки (энергия пучка (100÷200) кэВ, амплитуда тока пучка, выведенного в атмосферу, (2÷30) А, длительность импульсов тока пучка (10÷100) мкс, частота следования импульсов (1÷50) с<sup>-1</sup>), подходит для использования в научных и промышленных целях.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. В плазменном источнике импульсного широкоапертурного электронного пучка на основе дугового разряда низкого давления с полым катодом и полым анодом с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы удержание магнитным полем катодного пятна на торце полого катода и отсечка капельной фракции катодной дуги дополнительным диафрагмированным электродом существенно ослабляет процесс запыления эмиссионной сетки продуктами испарения катодного пятна, что обуславливает более высокую стабильность параметров электронного пучка и обеспечивает больший ресурс сетчатого плазменного катода.

2. При использовании в широкоапертурном источнике электронов с сеточным плазменным катодом двухэлектродной многоапертурной электронно-оптической системы, в которой на эмиссионную сетку, фиксирующей границу плазмы, со стороны разрядного промежутка укладывается металлическая маска, а ускоряющий электрод является соосным выпускным фольговым окном за счет увеличения эффективной площади анода, перераспределения тока разряда в ячейки эмиссионной сетки при увеличении их размера и обеспечения дополнительного перепада давлений между областью генерации плазмы и ускорения электронов повышается стабильность работы плазменного катода и электрическая прочность ускоряющего промежутка, а также обеспечивается повышение коэффициента прохождения тока пучка через выпускное фольговое окно до величины  $\beta=0,75$ , превышающего геометрическую прозрачность опорной решетки в  $\approx 1,5$  раза.

3. Создан автоматизированный источник электронов с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с полыми катодом и анодом, обеспечивающий генерацию широкоапертурного электронного пучка с площадью поперечного сечения  $S_n=(75 \times 15) \text{ см}^2$ , энергией  $E_0=(100 \div 200) \text{ кэВ}$ , амплитудой тока пучка, выведенного в атмосферу,  $I_n=(2 \div 30) \text{ А}$ , при длительности импульсов тока пучка  $t_n=(10 \div 100) \text{ мкс}$ , частоте их повторения  $f=(1 \div 50) \text{ с}^{-1}$  и КПД ( $\eta \approx 0,65$ ). По совокупности основных параметров, диапазону их независимой перестройки, а также ресурсу созданный электронный источник является перспективным для его использования в научных и технологических целях.

**Достоверность и обоснованность** результатов диссертационной работы подтверждаются удовлетворительным совпадением экспериментальных и расчетных зависимостей, систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных и расчетных методик, практической реализацией научных положений и выводов при проектировании и создании автоматизированного источника электронов, генерирующего ПБС с выводом его в атмосферу.

**Публикации.** Основные материалы диссертационной работы опубликованы в 18 работах, из которых **7 статей** в отечественных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, а также **10 полных текстов докладов** в трудах международных и всероссийских конференций, симпозиумов и совещаний.

Результаты работ докладывались и обсуждались на 16-ой международной конференции по сильноточной электронике (Томск, Россия, 2010), 4-ом международном Крейнделевском семинаре «Плазменная эмиссионная электроника» (Улан-Удэ, Россия, 2012), 5-ой Всероссийской 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), международной конференции по энергетическим потокам и радиационным эффектам (EFRE-2014) (Томск, Россия, 2014), 5-ом международном Крейнделевском семинаре «Плазменная эмиссионная электроника» (Улан-Удэ, Россия, 2015),

12-ой международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применения» (Томск, Россия, 2015), 11-ой международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, Беларусь, 2015), 8-ой международной конференции «Физика плазмы и плазменные технологии» (Минск, Беларусь, 2015).

**Личный вклад** автора состоит в создании экспериментальной установки, выборе методик экспериментов, проведении исследований, анализе и обобщении их результатов. Автором самостоятельно выдвинуты защищаемые научные положения, сделаны выводы и даны рекомендации по внедрению результатов работы при создании автоматизированного широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом. Обсуждения задач исследований и, методов их решения и результатов анализа экспериментальных данных проводились совместно с соавторами, фамилии которых указаны в опубликованных по теме диссертации работах.

Диссертационная работа выполнена в рамках выполнения проекта №14-29-00091 Российского научного фонда.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений с общим объемом 197 страниц, содержит 76 рисунков и 1 таблицу. Список цитируемой литературы включает 166 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность исследований, сформулированы цели и задачи работы, представлена научная новизна и практическая ценность результатов, приведены основные защищаемые научные положения и сведения о публикациях автора по теме диссертации.

**Первая глава** посвящена анализу электронно-оптических систем на основе различных типов эмиттеров, использующихся для генерации ПБС. Рассмотрены ускорители электронов на основе взрывной, ионно-электронной и термоэлектронной эмиссии, а также эмиссии из плазменных катодов с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы.

Сделан вывод, что для генерации ПБС наиболее перспективными являются источники с плазменными катодами с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы. Поскольку от энергии и вектора скорости электронов, поступающих в ускоряющий промежуток, зависит угловая расходимость пучка, отмечено, что имеется два вида таких электронов: термализованные ( $< 30$  эВ) и быстрые электроны ( $\sim 100$  эВ), хотя последних существенно меньше ( $\approx (10 \div 20)\%$ ).

Рассмотрены предварительные результаты испытаний многоапертурных систем и способов генерации в них эмиссионной плазмы.

В заключении к главе сформулированы основные задачи исследований.

**Во второй главе** приведены методики и техника экспериментов. Описана конструкция макета источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления и основные схемы электропитания такого

источника электронов. Рассмотрены особенности измерения энергетического спектра электронов пучка, выведенного в атмосферу, его калориметрия и способы измерения распределения плотности тока по сечению пучка.

Упрощенная схема макета источника электронов, на котором проводились экспериментальные исследования, представлена на рис. 1. В вакуумной камере 1 диаметром 800 мм и длиной 1300 мм, выполненной из нержавеющей стали, на проходном высоковольтном изоляторе, представляющим из себя полиэтиленовый цилиндр с внешним диаметром 475 мм и высотой 240 мм с развитой поверхностью, закреплен сеточный плазменный катод 2. Плазменный катод представляет собой полый полуцилиндр из нержавеющей стали диаметром 300 мм и длиной 800 мм, на торцах которого закреплены два катодных узла на основе дугового разряда низкого давления с инициированием катодного пятна электрическим пробоем по поверхности диэлектрика. Импульсы поджига от генератора поджигающих импульсов 10 поступают на поджигающий электрод 3 катодного узла и инициируют электрический пробой по поверхности диэлектрика (капролона), что приводит к появлению на магниевом катоде 4, диаметром 5 мм, катодного пятна.

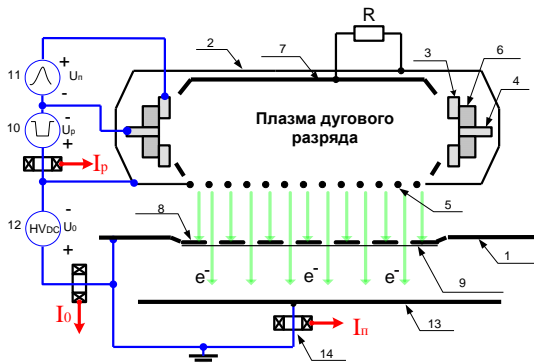


Рисунок 1 – Упрощенная схема макета широко-апертурного источника электронов с плазменным катодом: 1 – вакуумная камера; 2 – плазменный катод; 3 – поджигающий электрод; 4 – цилиндрический магниевый катод; 5 – эмиссионная сетка; 6 – изолятор; 7 – полый анод; 8 – опорная решетка; 9 – выводная фольга; 10 – источник электропитания разряда; 11 – источник электропитания поджига; 12 – высоковольтный источник электропитания; 13 – коллектор; 14 – пояс Роговского

Основной импульсный дуговой разряд с амплитудой тока до 150 А и длительностью импульса до 100 мкс зажигается между катодами 4 двух катодных узлов и общим полым анодом 7, роль которого играет коробчатая вставка из нержавеющей стали с размерами (750×150×120) мм, расположенная внутри полуцилиндрического корпуса плазменного катода с размерами (850×250×180) мм. Таким образом, обеспечивается зажигание

и горение объемного дугового разряда, который генерирует эмиссионную плазму, заполняющую анодную полость 7 электродной системы разряда. Граница этой плазмы стабилизируется мелкоструктурной металлической сеткой 5, перекрывающей эмиссионное окно прямоугольной формы с размерами (750×150) мм. Размеры ячейки эмиссионной сетки 5 варьировались в пределах (0,4÷1) мм с примерно одинаковой геометрической прозрачностью ≈50%.

Для переключения и горения тока разряда в область эмиссионной сетки 5 последняя электрически соединена с источником питания разряда напрямую, а с полым анодом 7 основной разрядной системы через сопротивление  $R$ , которое варьировалось в диапазоне  $R=(1\div 100)$  Ом.

Под действием постоянного ускоряющего напряжения величиной до  $U_0=200$  кВ, приложенного между плазменным катодом и ВФО 8,9, расстояние между которыми менялось в диапазоне  $(70\div 200)$  мм, с площади плазменной эмиссионной поверхности осуществляется отбор электронов и их ускорение до энергии, соответствующей приложенному ускоряющему напряжению  $U_0$ . В медной опорной решетке 8 толщиной 20 мм с общей геометрической прозрачностью 56% имеется 344 отверстия диаметром 15 мм. ВФО перекрыто фольгой 9 толщиной 30 мкм из алюминий-магниевого сплава АМГ-2н. Измерение тока пучка  $I_p$ , выведенного в атмосферу, осуществлялось поясом Роговского 14 в цепи коллектора 13 размером  $(800\times 200)$  мм, который устанавливался на расстоянии 20 мм от выводной фольги ВФО.

Управление эмиссией электронов осуществляется путем изменения амплитуды тока разряда (рис. 2 а). Из зависимости, представленной на рис. 2 б видно, что при фиксированном токе разряда  $I_p$  ускоряющее напряжение  $U_0$  слабо влияет на величину тока в ускоряющем промежутке  $I_0$ . На рис. 3 представлены характерные осциллограммы импульсов тока разряда  $I_p$ , тока в ускоряющем промежутке  $I_0$  и тока пучка  $I_n$ , выведенного в атмосферу,

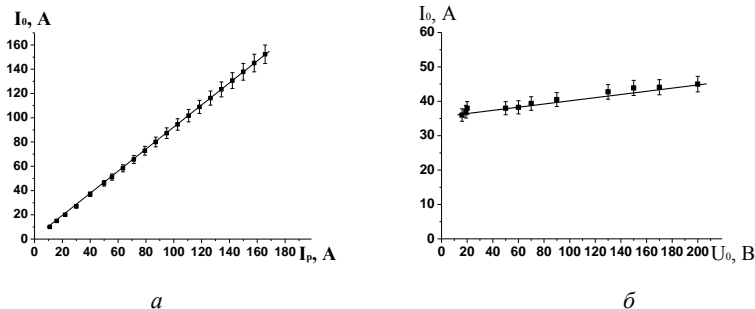


Рисунок 2 – Зависимости тока в ускоряющем промежутке  $I_0$  от тока разряда  $I_p$  при  $U_0=150$  кВ (а) и тока  $I_0$  от напряжения  $U_0$  при  $I_p=50$  А (б): длина ускоряющего промежутка  $d_0=140$  мм;  $p=30$  мПа ( $N_2$ ); размер ячейки эмиссионной сетки  $(0,4\times 0,4)$  мм

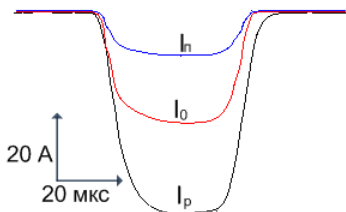


Рисунок 3 – Характерные осциллограммы импульсов токов  $I_p$ ,  $I_0$  и  $I_n$ , при  $U_0=150$  кВ и давлении  $p=50$  мПа (Ar):  $R=10$  Ом; размер ячейки эмиссионной сетки  $(0,4\times 0,4)$  мм; высоковольтный зазор  $d_0=140$  мм

Для уменьшения вероятности электрического пробоя ускоряющего промежутка на выводную фольгу более оптимальной является конфигурация



опорной решетки с перфорацией круглыми отверстиями, а для увеличения геометрической прозрачности опорной решетки – их сотовая система размещения. Для определения максимального диаметра отверстий в опорной решетке ВФО в среде Elcut был произведен оценочный тепловой расчет фольги из сплава АМг-2н толщиной 30 мкм в зависимости от диаметра отверстий в опорной решетке (рис. 4 а). В расчетах была принята плотность мощности электронного пучка, падающего на фольгу, равная  $200 \text{ кВт/м}^2$  при условии, что ускоренный электронный пучок не попадает на опорную решетку ВФО, тем самым не вызывая ее нагрева. Рассматривался установившийся режим работы макета источника электронов, в котором температура опорной решетки была принята постоянной, равная 300 К. Поскольку при  $U_0=150 \text{ кВ}$  половина мощности пучка рассеивается в выводной фольге, к ее нагреву будет приводить половина от принятой плотности мощности пучка, равная  $100 \text{ кВт/м}^2$ .

Расчеты показали, что при диаметре отверстий в опорной решетке ВФО, равным 15 мм, максимальная температура фольги  $T_\phi$  достигает значения  $T_{\max}=460 \text{ К}$  (рис. 4 б) и приводит к снижению ее прочности до 230 МПа, что допустимо для применения такой фольги в конструкции описанного ВФО.

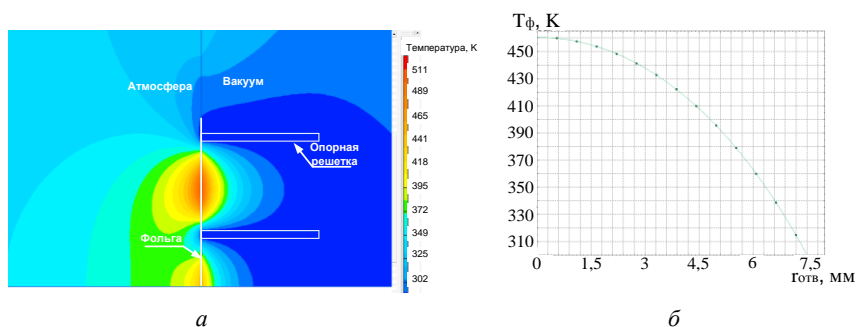


Рисунок 4 – Моделирование в среде Elcut нагрева выводной фольги толщиной 30 мкм из сплава АМг-2н под действием электронного пучка при выводе его в атмосферу (а) и распределение температуры фольги  $T_\phi$  по радиусу отверстия в опорной решетке  $r_{\text{отв}}$  (б) при плотности мощности пучка, рассеиваемой в фольге, равной  $100 \text{ кВт/м}^2$  и фиксированной температуре опорной решетки, равной 300 К

**В третьей главе** получено экспериментальное подтверждение недостатков катодных узлов описанных в Главе 2, связанных с высоким значением капельной фракции материала катода на эмиссионной сетке (рис. 5), а также низким ресурсом такого катодного узла и высокой скоростью эрозии катода, которые составили  $N \approx 10^5$  импульсов (при  $I_p=60 \text{ А}$ ,  $t=40 \text{ мкс}$  и  $f=20 \text{ с}^{-1}$ ) и  $M \approx 2 \text{ мкг/Кл}$ , соответственно.

Из рис. 5 б видно, что размер микрокапель достигает  $\approx(5 \div 10) \text{ мкм}$ . Результаты исследований элементного состава (рис. 6), свидетельствуют о наличии на поверхности коллекторной пластины высокого содержания магния.

Такие микрокапли могут оседать на эмиссионной сетке, что приводит к усилению на них электрического поля, инициированию на сетке катодного пятна с неограниченной эмиссионной способностью и к электрическому пробою высоковольтного ускоряющего промежутка.

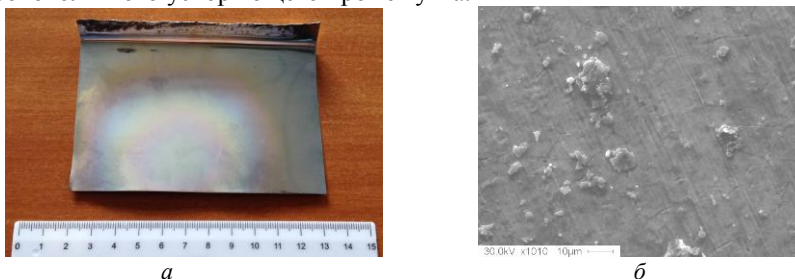
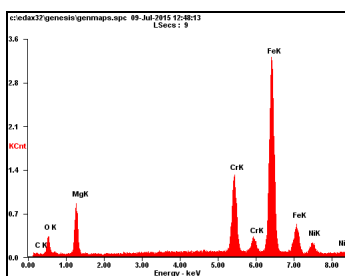


Рисунок 5 – Фотография отпечатка (а) и его увеличенный вид (б), оставленного на пластине из нержавеющей стали размером (90×100×0,2) мм, установленной на расстоянии 100 мм от катодного узла с инициированием катодного пятна электрическим пробоем по поверхности диэлектрика и находящейся под потенциалом полого анода, после прохождения  $N=10^5$  имп. при  $I_p=60$  А,  $t=40$  мкс,  $f=20$  с<sup>-1</sup>



Element	Wt%	At%
CK	09.80	22.72
OK	13.51	23.53
MgK	23.46	26.88
CrK	10.67	05.72
FeK	39.38	19.64
NiK	03.18	01.51
Matrix	Correction	ZAF

Рисунок 6 – Энергодисперсионный микроанализ отпечатка, оставленного на коллекторной пластине после работы катодного узла с инициированием катодного пятна электрическим пробоем по поверхности диэлектрика

Для уменьшения количества микрокапель на электродах разрядной системы была предложена новая конструкция катодного узла, конструкция которого и его внешний вид представлены на рис. 7. Иницирование катодного пятна в данном случае происходит в результате «прямого» электрического пробою в газе, что исключает промежуточные электроды и изоляторы. При подаче высоковольтного импульса напряжения амплитудой до  $\approx 10$  кВ между полым катодом 4 и поджигающим электродом 1, в газе, напускаемом через отверстие в электроде 1, зажигается тлеющий разряд. Поскольку схема электропитания данной ячейки выполнена без стабилизации тока разряда, рост плотности тока на катоде приводит к инициированию на его поверхности катодного пятна и тлеющий разряд переходит в другую стадию горения – дуговую с катодным пятном.

Максимум напряженности магнитного поля величиной  $\approx 50$  мТл находится в области полого поджигающего электрода 1 (рис. 8), что позволяет удерживать

живать катодное пятно на внутреннем торце полого катода 4. В случае ухода катодного пятна с рабочего торца катода на боковую поверхность разряд не прекращается, поскольку магнитное поле возвращает катодное пятно обратно на торец катода. Особенность такого удержания катодного пятна характеризуется стабильным горением разряда при токе дуги до  $I_{\min} \approx 10$  А.

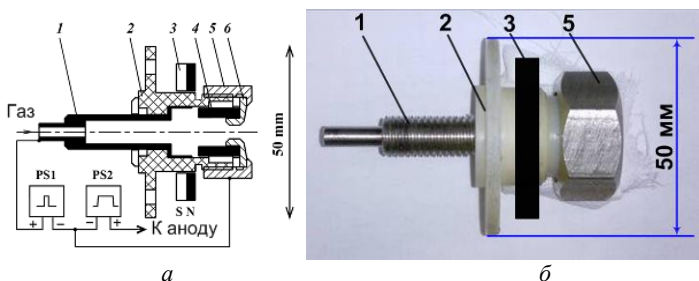


Рисунок 7 – Конструкция катодного узла (а) и его внешний вид (б): 1 – поджигающий электрод; 2 – изолятор; 3 – кольцевой магнит; 4 – магниевый полый катод; 5 – гайка из нержавеющей стали; 6 – ферромагнитная вставка

Для определения количества микрокапель материала катода на электродах разрядной системы был проведен эксперимент, аналогичный описанному

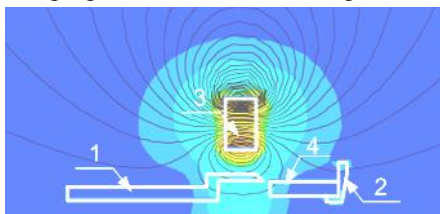


Рисунок 8 – Распределение магнитного поля, обеспечиваемого кольцевым магнитом, в новом катодном узле: 1 – поджигающий электрод; 2 – ферромагнитная вставка; 3 – кольцевой магнит; 4 – полый катод

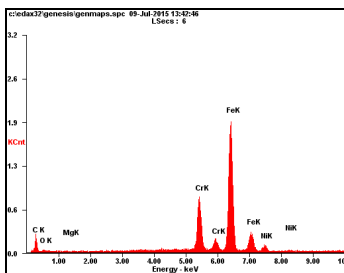
выше, где напротив нового катодного узла на расстоянии 100 мм была установлена коллекторная пластина из нержавеющей стали размером (90×100×0,2) мм (рис. 9 а). Увеличенный вид полученного отпечатка (рис. 9 б) показал, что на поверхности коллекторной пластины, обращенной к новому катодному узлу, отсутствуют микрокапли, а энергодисперсионный микроанализ этой поверхности показал практически полное отсутствие магния (рис. 10).

При проектировании нового катодного узла был выбран сравнительно большой диаметр контрагирующего отверстия, равный 4 мм, что позволяет обеспечивать через его сечение большие плотности тока разряда (до  $I_p \approx 1$  кА/см<sup>2</sup>) при длительности импульса до  $t=100$  мкс без обрывов тока дуги, наблюдающихся в катодных узлах на основе ячейки Пеннинга. Если сравнить ВАХ дуговых разрядов низкого давления в электродных системах с катодными узлами на основе ячейки Пеннинга (рис. 11, кривая 1), с открытой дугой (рис. 11, кривые 3,4), и дугой, обеспечиваемой предложенным катодным узлом (рис. 11, кривые 2,5), видно, что разряд, генерируемый новым катодным узлом, имеет пониженное напряжение горения. Это связано, как с отсутствием влияния внешнего магнитного поля на основной разряд за счет введения ферромагнитной вставки б (рис. 7) (в

сравнении с кривой 1), позволяющей исключить магнитный поток от постоянного магнита в пространстве полого анода основного разряда, так и, вероятно, с ионизационными процессами, происходящими в катодном узле, а именно увеличенным за счет внешнего магнитного поля количеством взаимодействий первичных замагниченных электронов с рабочим газом при неизменной длине их свободного пробега, что приводит к снижению напряжения в прикатодном слое (в сравнении с кривыми 3,4). В отсутствие внешнего магнитного поля в новом катодном узле напряжение горения разряда возрастает (рис. 11, кривая 2), превышая напряжение «открытой» дуги, поскольку количество взаимодействий первичных электронов с рабочим газом при той же длине свободного пробега электронов в этом случае уменьшается.



Рисунок 9 – Фотография отпечатка (а) и его увеличенный вид (б), оставленного на пластине из нержавеющей стали, установленной на расстоянии 100 мм от нового катодного узла и находящейся под потенциалом полого анода, после прохождения  $N=10^5$  имп. при  $I_p=60$  А,  $t=40$  мкс,  $f=20$  с<sup>-1</sup>



Element	Wt%	At%
CK	47.18	77.48
OK	03.94	04.85
MgK	00.40	00.32
CrK	09.90	03.75
FeK	36.22	12.79
NiK	02.36	00.79
Matrix	Correction	ZAF

Рисунок 10 – Энергодисперсионный микроанализ отпечатка, оставленного на коллекторной пластине после работы нового катодного узла

Диаметр отверстия в предложенном катодном узле, равный 4 мм, был выбран для экранирования анодных электродов плазменного катода от образующихся при функционировании катодного пятна микрокапель катодной дуги, которые в таком случае имеют низкую вероятность попадания на эмиссионную сетку. Таким образом, новый катодный узел позволяет исключить обрывы тока разряда, связанные с его контрагированием, при пониженном напряжении горения разряда, а также существенно уменьшить количество микрокапель катодной дуги на электродах разрядной системы.

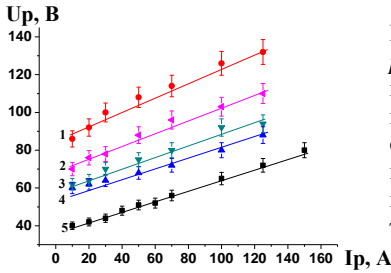


Рисунок 11 – ВАХ дуговых разрядов при  $p=50$  мПа и  $R=0$  Ом при работе различных катодных узлов: 1 – катодный узел на основе ячейки Пеннинга; 3,4 – катодный узел с открытой дугой с вольфрамовым и магниевым катодом, соответственно; 2,5 – новый катодный узел без магнита и с кольцевым магнитом, соответственно

В новом катодном узле перепыление катода позволило уменьшить износ катода до  $M=0,5$  мкг/Кл, а отсутствие диэлектрической вставки и увеличенная масса катода позволили достичь ресурса катода более  $N=10^7$  имп. при амплитуде и длительности импульсов тока разряда  $I_p=60$  А и  $t=40$  мкс, соответственно.

Часть главы посвящена исследованиям работы многопертурного плазменного катода. Для этого на эмиссионную сетку 5 (рис. 12) с габаритными размерами (750×150) мм и размером ячейки (0,4×0,4) мм укладывалась маска 6 из нержавеющей стали

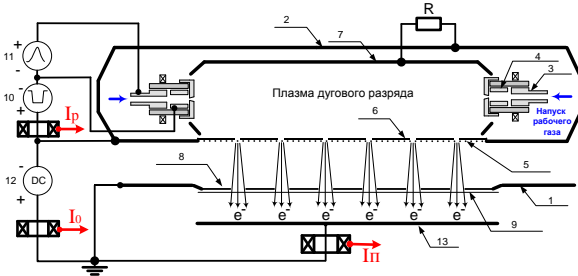


Рисунок 12 – Схема макета широкопертурного источника электронов с многопертурным плазменным катодом: 1 – вакуумная камера; 2 – плазменный катод; 3 – поджигающий электрод; 4 – цилиндрический магниевый катод; 5 – эмиссионная сетка; 6 – металлическая маска; 7 – полый анод; 8 – опорная решетка; 9 – выводная фольга; 10 – источник электропитания разряда; 11 – источник электропитания поджига; 12 – высоковольтный источник электропитания; 13 – коллектор

толщиной 0,2 мм, фотография которой представлена на рис. 13 а. Маска была перфорирована круглыми отверстиями диаметром (8÷12)мм. Такой способ организации эмиссионной поверхности позволяет разделить последнюю на 344 круглых ячейки, которые являются отдельными эмиссионными структурами плазменного катода. Поскольку влияние начальных тепловых скоростей электронов пучка наиболее заметно на краях ПБС, то для учета расхождения крайних электронных пучков, отверстия, расположенные по периметру маски, были выбраны меньшего диаметра (на  $\approx(1\div 4)$  мм) по сравнению с остальными отверстиями маски. В этом случае под действием приложенного ускоряющего напряжения эмиссия электронов осуществляется дискретно с площади плазменной поверхности этих струк-

туры плазменного катода. Поскольку влияние начальных тепловых скоростей электронов пучка наиболее заметно на краях ПБС, то для учета расхождения крайних электронных пучков, отверстия, расположенные по периметру маски, были выбраны меньшего диаметра (на  $\approx(1\div 4)$  мм) по сравнению с остальными отверстиями маски. В этом случае под действием приложенного ускоряющего напряжения эмиссия электронов осуществляется дискретно с площади плазменной поверхности этих струк-

тур, формируя многоапертурную эмиссионную структуру. Таким образом, широкий электронный пучок представляет суперпозицию элементарных пучков, сформированных отдельными эмиссионными структурами, плазменная граница которых стабилизирована мелкоструктурной металлической сеткой.

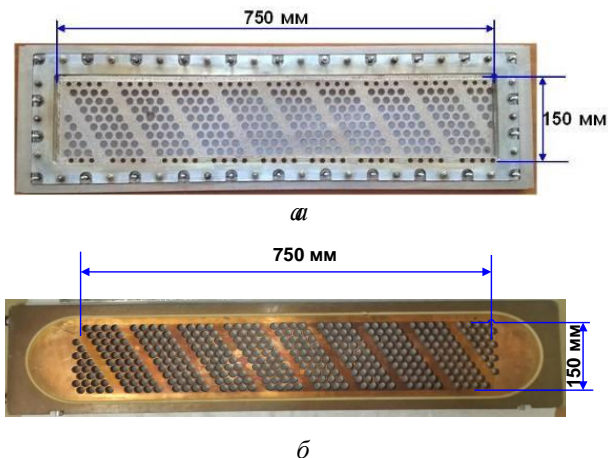


Рисунок 13 – Фотографии маски, приваренной точечной сваркой к эмиссионной сетке плазменного катода (а), и опорной решетки (б)

При извлечении электронов из плазменного катода в ускоряющий промежуток в отсутствие маски 5 и использовании сетки с ячейкой (0,4×0,4) мм с общей геометрической прозрачностью равной 44% экспериментально было получено, что максимальный коэффициент извлечения электронов  $\alpha \approx 0,6$  достигается при величине сопротивления в цепи полого анода  $R \geq 10$  Ом (рис. 14 а). Кроме этого

из представленной зависимости видно, что коэффициент  $\alpha$  увеличивается по мере увеличения амплитуды тока разряда  $I_p$ , что можно объяснить увеличением концентрации плазмы, уменьшением приэлектродного слоя и увеличением площади открытой плазменной поверхности при незначительном увеличении напряжения горения разряда (рис. 14 б).

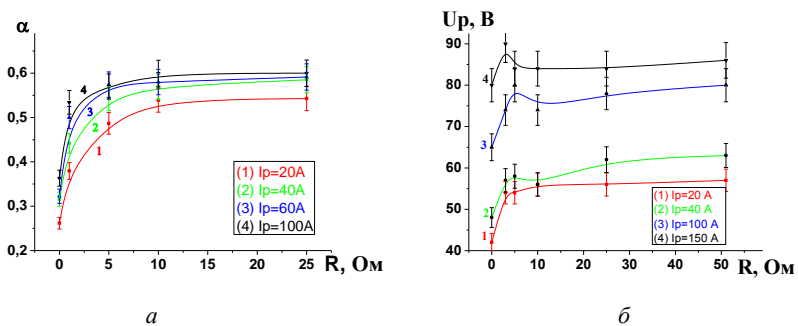


Рисунок 14 – Зависимости коэффициента извлечения  $\alpha$  электронов из плазменного катода в отсутствие маски при  $U_0=160$  кВ (а) и напряжения горения разряда  $U_p$  от сопротивления в цепи полого анода  $R$ , размер ячейки сетки (0,4×0,4) мм

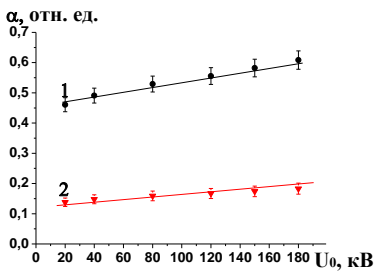


Рисунок 15 – Зависимость коэффициента извлечения электронов  $\alpha$  от ускоряющего напряжения  $U_0$  при токе разряда  $I_p=40$  А: 1 – в отсутствие маски; 2 – с установленной в плазменный катод маской с диаметром отверстий 12 мм: размер ячейки эмиссионной сетки (0,4×0,4) мм;  $d_0=140$  мм;  $p=50$  мПа (аргон);  $R=10$  Ом уменьшены до диаметра 8 мм, а для облегчения переключения тока разряда в ячейки эмиссионной сетки и, тем самым, увеличения коэффициента извлечения  $\alpha$ , эмиссионная сетка была заменена на сетку с размером ячейки (0,6×0,6) мм.

При установке в плазменный катод сетки с размером ячейки (0,6×0,6) мм, но в отсутствие маски, источник электронов работает нестабильно (рис. 16 а). При появлении высокого ускоряющего напряжения и зажигании разряда на импульсах токов как разряда, так и эмиссии появляются высокочастотные модуляции с частотой около (1÷2) МГц. Обнаруживается влияние высокого напряжения на форму и амплитуду тока разряда, снижение электрической прочности ускоряющего промежутка и стабильности работы источника электропитания плазменного катода вплоть до выхода из строя элементов его электрических схем.

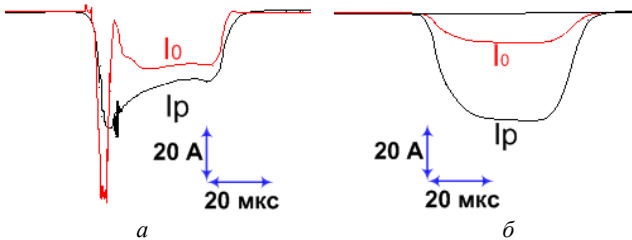


Рисунок 16 – Характерные осциллограммы токов разряда  $I_p$  и тока в ускоряющем промежутке  $I_0$  при  $U_0=150$  кВ: (а) – в отсутствие маски; (б) – с маской с отверстиями диаметром 8 мм и геометрической прозрачностью 13%, размер ячейки эмиссионной сетки (0,6×0,6) мм

При введении в плазменный катод металлической маски 6 (рис. 12) с диаметром отверстий 12 мм и общей геометрической прозрачностью  $\approx 30\%$ , уложенной на эмиссионную сетку с размером ячейки (0,4×0,4) мм, коэффициент извлечения электронов  $\alpha$  уменьшается прямо пропорционально геометрической прозрачности маски и при  $U_0=160$  кВ и  $I_p=60$  А составляет  $\alpha \approx 0,6 \times 0,3 \approx 0,2$  (Рис. 15).

Для облегчения юстировки отверстий в маске и опорной решетке при наличии эффекта переключения тока разряда в ячейки эмиссионной сетки был поставлен эксперимент, в котором отверстия в маске были

При этом наблюдается увеличение коэффициента извлечения  $\alpha$  (рис. 17 а), который при  $I_p=20$  А,  $U_0=160$  кВ и длине ускоряющего зазора  $d_0=120$  мм был равен около  $\alpha=0,75$ . Это также можно объяс-

нить увеличением площади открытой плазменной эмиссионной поверхности при том же пристеночном слое, что и при ячейке сетки (0,4×0,4) мм, поскольку измерения осуществлялись при одинаковом токе разряда и давлении рабочего газа (аргона) в камере, равным  $p=50$  мПа. При введении в плазменный катод маски с диаметром отверстий 8 мм и геометрической прозрачностью равной 13%, уложенной на эмиссионную сетку с размером ячейки (0,6×0,6) мм, на импульсах токов разряда и эмиссии прекращаются высокочастотные модуляции, а ускоряющее напряжение перестает влиять на форму и амплитуду импульса тока разряда (рис. 16 б). В этом случае при  $I_p=100$  А,  $U_0=160$  кВ достигается коэффициент извлечения  $\alpha \approx 0,2$  (рис. 17 б) при суммарной геометрической прозрачности эмиссионного электрода  $\approx 7\%$ .

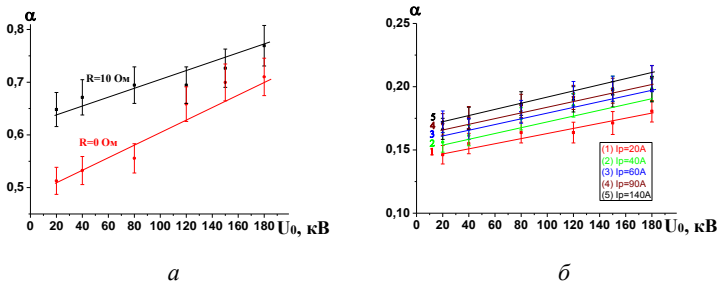


Рисунок 17 – Зависимости коэффициента извлечения  $\alpha$  от ускоряющего напряжения  $U_0$ : (а) – в отсутствие маски при  $I_p=40$  А; (б) – с маской с отверстиями диаметром 8 мм и геометрической прозрачностью 13% при  $R=10$  Ом: размер ячейки эмиссионной сетки (0,6×0,6) мм,  $d_0=140$  мм,  $p=50$  мПа (аргон)

Экспериментально установлено, что при введении в плазменный катод металлической маски с общей геометрической прозрачностью  $\approx 13\%$ , при напуске рабочего газа (аргона) с расходом  $Q \approx 0,1$  м<sup>3</sup>·Па·с<sup>-1</sup> и давлении рабочего газа в ускоряющем промежутке 20 мПа, в плазменном катоде давление было в  $\approx 1,5$  раза выше и составляло  $\approx 30$  мПа, что позволяет работать при пониженном напуске рабочего газа (с  $Q \approx 0,1$  м<sup>3</sup>·Па·с<sup>-1</sup> без маски до  $Q \approx 0,07$  м<sup>3</sup>·Па·с<sup>-1</sup> с маской).

В экспериментах было показано, что совокупность таких мер как применение новых катодных узлов, исключающих попадание микрокапель от катодной дуги на электроды основной разрядной системы, и использование двухэлектродной многоапертурной ускоряющей системы, позволяют повысить стабильность работы источника электронов, определяемую количеством пробоев ускоряющего промежутка на 1000 импульсов тока пучка, в  $\approx 6$  раз.

При использовании многоапертурного плазменного катода были поставлены эксперименты по выводу электронного ПБС в атмосферу через описанное ВФО (рис. 12).

Из зависимости на рис. 18 (кривая 1) видно, что в отсутствие в плазменном катоде маски, по мере роста ускоряющего напряжения происходит увеличение коэффициента вывода электронного пучка из ускоряющего промежутка в атмосферу  $\beta$ , который при  $U_0=200$  кВ не превышает  $\beta=0,4$ . Слабая



зависимость коэффициента  $\beta$  от момента его фиксации по длительности импульса  $t$  (рис. 18, кривая 3) подтверждает стабильность работы источника электронов во всем временном диапазоне импульса тока пучка, даже при допущении, что параметры эмиссионной плазмы несколько меняются во времени.

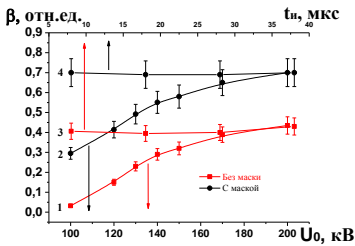


Рисунок 18 – Зависимости коэффициента  $\beta$  от величины ускоряющего напряжения и момента фиксации коэффициента  $\beta$  по длительности импульса  $t_n$ : 1,3 – без маски; 2,4 – с маской с отверстиями диаметром 12 мм.

В экспериментах по минимизации потерь в опорной структуре ВФО с установленной в плазменный катод маской с отверстиями диаметром 12 мм, были получены зависимости, представленные на рис. 18 (кривые 2, 4). В этом случае потери тока в опорной структуре ВФО при  $U_0=200$  кВ были уменьшены с 60% до 30%. Из данных [S.M. Seltser, M.J. Berger // Nucl. Instrum. And Methods, 1974], при  $U_0=200$  кВ в алюминиевой фольге толщиной 30 мкм теряется около 12% тока пучка. Можно предположить, что остальные 18% приходятся как на высокоэнергетические электроны, отраженные от выпускной фольги и коллектора, ионы, образующиеся в результате взаимодействия отраженных электронов с десорбированным газом, так и на потери тока пучка на опорной решетке ВФО, вызванные неидеальностью юстировки отверстий в маске и опорной решетке. При уменьшении диаметра отверстий в маске до 8 мм коэффициент вывода  $\beta$  при  $U_0=200$  кВ был увеличен до  $\beta=0,75$ .

Измерения средней мощности пучка, выведенного в атмосферу с использованием водоохлаждаемого коллектора показали, что при ускоряющем напряжении  $U_0=200$  кВ, токе в ускоряющем промежутке  $I_0=16$  А, длительности импульса  $t=40$  мкс, частоте следования импульсов  $f=50$  с<sup>-1</sup> и средней мощности пучка в ускоряющем промежутке около  $P_0 \approx 6,4$  кВт мощность выведенного через ВФО пучка достигала  $P_n \approx 4$  кВт. Дальнейшее увеличение мощности пучка было ограничено мощностью используемого в экспериментах регулятора высоковольтного источника электропитания.

Для выравнивания распределения плотности тока по сечению пучка маска была выполнена с переменным диаметром отверстий: увеличенного до 12 мм диаметра в областях минимальной плотности плазмы и уменьшенного до 8 мм диаметра в областях с ее максимальной плотностью, что позволило добиться неоднородности распределения плотности тока в атмосфере не выше  $\pm 10\%$  и  $\pm 5\%$  от средней плотности тока по длинной и короткой сторонам сечения пучка, соответственно, при площади пучка  $S_n \approx 1000$  см<sup>2</sup> (рис. 19)

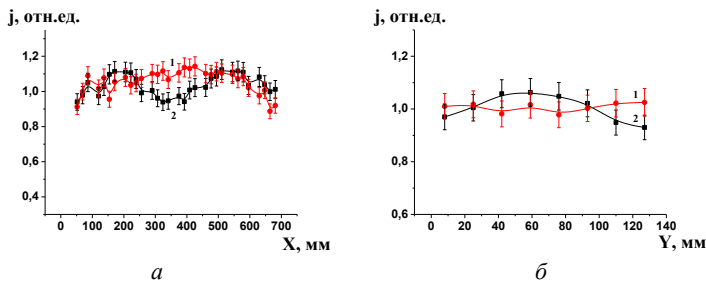


Рисунок 19 – Распределения плотности тока пучка по длинной (а) и короткой (б) сторонам выпускного фольгового окна, полученные в источнике электронов с многоапертурным плазменным катодом с размером ячейки эмиссионной сетки (0,6×0,6) мм: 1 – маска с дискретно изменяющейся прозрачностью; 2 – маска с постоянной геометрической прозрачностью и отверстиями диаметром 8 мм.

**Четвертая глава** посвящена вопросам разработки источников электронов, генерирующих ПБС. Описаны особенности конструкции разработанного источника электронов и ключевые моменты его автоматизации.

Основные этапы разработки и создания лабораторного образца широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом, блок-схема и конструкция которого представлены на рис. 20, а общий вид на рис. 21, заключались в следующем: 1) разработан и создан блок автоматизации вакуумной системы источника электронов; 2) произведена автоматизация высоковольтной системы электропитания; 3) организована система электропитания плазменного эмиттера, обеспечивающая дистанционное управление параметрами тока разряда; 4) разработана и создана система, обеспечивающая безопасность технического персонала, обслуживающего источник электронов.

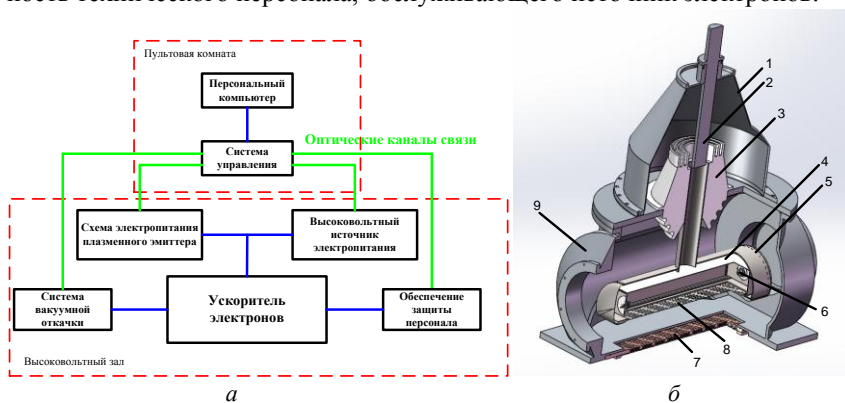


Рисунок 20 – Блок-схема (а) и конструкция (б) разработанного широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом: 1 – колпак высоковольтного изолятора; 2 – высоковольтный кабель; 3 – высоковольтный полиэтиленовый изолятор; 4 – полый анод; 5 – корпус плазменного катода; 6 – разработанный катодный узел; 7 – ВФО; 8 – маска, приваренная к эмиссионной сетке; 9 – вакуумная камера

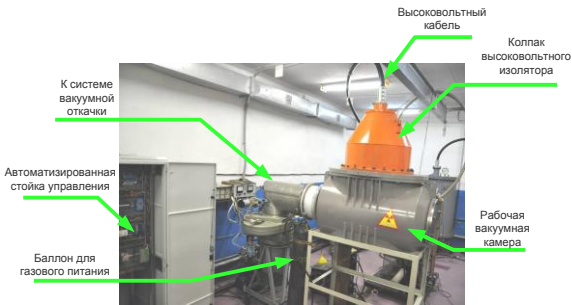


Рисунок 21 – Внешний вид разработанного широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом

Параметры пучка, которые способен обеспечивать созданный лабораторный образец широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом, сведены в таблицу 1. Средняя мощность схемы электропитания плазменного катода при этом не превышает 100 Вт.

Таблица 1

Энергия электронов, кэВ	(100÷200)
Амплитуда тока пучка (в атмосфере), А	(5÷30)
Длительность импульсов тока пучка, мкс	(10±100)
Частота следования импульсов, с <sup>-1</sup>	(1÷50)
Размеры пучка, мм	750×150
Неоднородность плотности тока по сечению пучка, %	±10
Максимальная средняя мощность пучка, кВт	4

Представлены некоторые применения источника электронов с плазменным катодом и выводом ПЭС в атмосферу.

Показана принципиальная возможность разложения молекулы тетрафторида кремния (ТФК) с помощью импульсного электронного пучка, генерируемого источником электронов с плазменным катодом, и конденсации на подложках кремния как в виде порошка, так и в виде пленки толщиной от 100 до 300 нм.

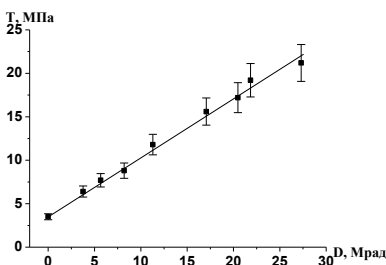


Рисунок 22 – Зависимость прочности на разрыв образцов  $T$  от введенной в латекс дозы облучения  $D$  при  $U_0=160$  кВ,  $I_n=12$  А,  $t=35$  мкс и  $f=10$  с<sup>-1</sup>

Кроме этого, используя разработанный широкоапертурный источник электронов с плазменным катодом, проведены эксперименты по модификации натурального латекса. При введении в натуральный латекс дозы облучения, равной  $D \approx 27$  Мрад, максимальное значение прочности на разрыв каучуковых образцов, изготовленных из обработанного латекса,

составило  $T=21$  МПа, что является рекордным для процессов обработки натурального латекса без дополнительных веществ и катализаторов.

Оценки показывают, что при использовании всей площади электронного пучка при его средней мощности в атмосфере  $P_n=4$  кВт производительность обработки натурального латекса может составлять  $\approx 20$  кг/час, что является приемлемым для применения созданного источника электронов в производственных целях.

**В заключении** сформулированы основные результаты исследований:

1. Создан катодный узел плазменного генератора на основе дугового разряда низкого давления, стабильно работающий в диапазоне токов разряда  $I_p=(10\div 100)$  А без его обрывов, при длительности импульсов  $t=(10\div 100)$  мкс и частоте их следования до  $f=50$  с<sup>-1</sup> с ресурсом, превышающим  $N=10^7$  имп. Диафрагмирование выходного электрода разработанного катодного узла позволяет практически полностью исключить попадание микрокапель материала катода на эмиссионную сетку.

2. Показано, что для повышения устойчивости работы сеточного плазменного катода целесообразно плазменную эмиссионную поверхность разделить на множество эмиссионных участков меньшей площади путем установки на эмиссионную сетку перфорированной металлической маски, переменная прозрачность которой, обратно пропорциональная плотности эмиссионной плазмы, позволяет выравнивать распределение плотности тока по сечению пучка. Показано, что использование в плазменном катоде новых катодных узлов и многоапертурной маски позволяет кратно увеличить электрическую прочность ускоряющего промежутка.

3. Показано, что в многоапертурной двухэлектродной электронно-оптической системе, формирующей многоэлементный электронный пучок, возможно обеспечить траекторию и вывод электронного пучка большого сечения в атмосферу с минимальными потерями тока пучка на опорной решетке ВФО.

4. На основании проведенных исследований создан автоматизированный широкоапертурный  $(75\times 15)$  см<sup>2</sup> источник электронов с многоапертурным сеточным плазменным катодом, который по совокупности основных параметров и диапазону их независимой перестройки (энергия пучка  $(100\div 200)$  кэВ, амплитуда тока пучка, выведенного в атмосферу  $(2\div 30)$  А, длительность импульсов тока пучка  $(10\div 100)$  мкс, частота следования импульсов  $(1\div 50)$  с<sup>-1</sup>), коэффициенту вывода тока пучка из ускоряющего промежутка в атмосферу ( $\beta=0,75$ ) и КПД ( $\chi\approx 0,65$ ) подходит для применения его в промышленных целях.

5. Экспериментально показана принципиальная возможность разложения молекулы ТФК под действием низкоэнергетичного (до 200 кэВ) электронного пучка, выведенного через ВФО в атмосферу газообразного ТФК, с образованием на выходе реакции пленочного кремния и свободного фтора, а также возможность эффективного использования широкоапертурного импульсного электронного пучка в процессах радиационной сшивки натурального латекса без добавок, ускоряющих процесс вулканизации.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК

1. Шугуров, В.В. **A silicon films deposition in the process of SiF<sub>4</sub> decomposition in pulsed glow discharge** / В.В. Шугуров, В.В. Денисов, А.А. Калушевич, В.В. Яковлев, М.С. Воробьёв, А.И. Суслов, Н.Н. Коваль // Известия ВУЗов. Физика, 2012. – Т.55. – №12/3. – С. 123–127.
2. Воробьёв, М.С. **Источник электронов с многодуговым плазменным эмиттером для получения мегаваттных пучков субмиллисекундной длительности** / М.С. Воробьёв, С.А. Гамермайстер, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, П.М. Щанин // Письма в ЖТФ, 2014. – Т.40. – Вып.12. – С. 24–30.
3. Воробьёв, М.С. **Восстановление спектров электронов электронных пучков из кривых ослабления для вакуумных и газовых диодов** / М.С. Воробьёв, Е.Х. Бакшт, Н.Н. Коваль, А.В. Козырев, В.Ф. Тарасенко // Изв. ВУЗов. Физика, 2014. – Т.57. – №11/3. – С. 189–194.
4. Воробьёв, М.С. **Ускоритель электронов с многоапертурным плазменным эмиттером** / М.С. Воробьёв, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, В.В. Шугуров // Изв. ВУЗов. Физика, Т.57. – №11/3. – 2014. – С. 194–199.
5. Воробьёв, М.С. **Источник электронов с сетчатым плазменным эмиттером для генерации интенсивного пучка субмиллисекундной длительности** / М.С. Воробьёв, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, П.М. Щанин // Изв. ВУЗов. Физика, 2014. – Т.57. – №11/3. – С. 204–209.
6. Воробьёв, М.С. **Источник электронов с многоапертурным плазменным эмиттером и выводом пучка в атмосферу** / М.С. Воробьёв, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин // ПТЭ, 2015. – №5. – С. 112–120.
7. Воробьёв, М.С. **Радиационная обработка натурального латекса с использованием широкоапертурного ускорителя электронов с плазменным эмиттером** / М.С. Воробьёв, В.В. Денисов, Н.Н. Коваль, В.В. Шугуров, В.В. Яковлев, K. Uemura, P. Raharjo // ХВЭ, 2015. – Т.49. – №3. – С. 169–172.

### Статьи в сборниках статей и трудов конференций

1. Денисов, В.В. **Вулканизация натурального каучука с использованием ускорителя электронов с плазменным катодом** / Денисов В.В., М.С.Воробьёв, 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.
2. **Koval, N.N. 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, G.P. Khandorin, A.K. Ledovskikh, A.A. Galata, A.P. Murlyshev, V.S. Volchkov // Proc. 10 Intern.Conf. on Modif. of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk, 2010. – P. 687–690.
3. **Koval, N.N. 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, G.P. Khandorin, A.K. Ledovskikh, A.A. Galata, A.P. Murlyshev, and V.S. Volchkov // Proc. 16 Intern. Symp. on High Current Electronics. – Tomsk, 2010. – P. 545–548.

4. Vorobyov, M.S. **The multiarc plasma cathode electron source** / M.S. Vorobyov, V.V. Denisov, V.N. Devyatkov, S.A. Gamermaister, N.N. Koval, V.V. Shugurov, S.A. Sulakshin, V.V. Yakovlev // Proc. XXVth Intern. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2012. – P. 615–618.

5. 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.

6. Воробьёв, М.С. **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.

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

8. Нгуен, Б.Х. **Исследование основных механизмов энергетических потерь в источнике электронов с плазменным эмиттером и выводом пучка большого сечения в атмосферу** / Б.Х. Нгуен, Т.В. Коваль, М.С. Воробьёв // Труды V Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника», 2015. – С. 30–36.

9. Vorobyov, M.S. **On improvement of the current density distribution in large-cross-section beams produced by a multi-aperture plasma electron source** / M.S. Vorobyov, N.N. Koval // Proc. VIII Intern. Conf. on Plasma Physics and Plasma Technology. – Minsk, 2015. – P. 238–241.

10. Koval, T.V. **Application of the plasma grid emitter in the large-aperture electron source** / T.V. Koval, M.S. Vorobyov, Nguyen Bao Hung // Proc. VIII Intern. Conf. on Plasma Physics and Plasma Technology. – Minsk, 2015. – P. 250–253.