



Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
**ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ**  
Уральского отделения  
Российской академии наук  
(ИЭФ УрО РАН)

Амундсена ул., д.106, г.Екатеринбург, 620016  
Тел. (343) 267-87-96 Факс (343) 267-87-94  
ОКПО 04839716 ОГРН 1026604936929  
ИНН/КПП 6660007557/667101001

21.11. 2022 г. № 16346-1256 - 305

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Г \_\_\_\_\_ ]

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИЭФ УрО РАН

д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

С.А. Чайковский Чайковский С.А.

«21» 11 2022 г.



### ОТЗЫВ

ведущей организации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН) на диссертационную работу Воробьёва Максима Сергеевича «Развитие источников электронов с сеточными плазменными эмиттерами на основе дугового разряда низкого давления с полым анодом», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.5 – физическая электроника

#### Актуальность темы исследования

Источники электронов широко используются как в научных исследованиях, так и в практических применениях. Перспективной разновидностью источников электронов являются источники с плазменными эмиттерами на основе разнообразных газовых разрядов, в частности, дугового разряда низкого давления с полым анодом, положение эмиссионной поверхности плазмы в котором стабилизируется мелкоструктурной сеткой. Такие источники электронов обеспечивают эффективную генерацию электронных пучков в широком диапазоне параметров. Хотя основные принципы построения таких источников электронов были заложены еще во второй половине прошлого столетия, однако их возможности до сих пор не исчерпаны. Перспективы дальнейшего совершенствования и расширения сферы применений источников электронов связаны как с развитием элементной базы и схемотехники устройств силовой электроники, которое позволяет реализовывать более высокие параметры эмиссионной плазмы и электронного пучка, так и с появлением новых перспективных электронно-лучевых технологий полезной модификации свойств различных материалов. Это стимулирует дальнейшее развитие источников электронов, заключающееся не только в расширении диапазона параметров пучка, но и в повышении стабильности функционирования электронно-лучевых устройств и, соответственно, достижении высокой степени повторяемости результатов электронно-пучковой обработки. Для решения этих задач необходимы дальнейшие исследования механизмов отбора электронов из плазменного эмиттера, поиск способов стабилизации тока пучка, применение современных систем



электропитания и управления плазменного эмиттера, поиск способов снижения пространственной неоднородности плотности тока эмиссии и генерируемого пучка. Настоящая диссертационная работа посвящена решению перечисленных основных задач применительно к источникам электронов с сеточным плазменным эмиттером (СПЭ), что однозначно определяет актуальность данной темы исследования и ее востребованность как для научных целей, так и для технологических применений.

### **Оценка структуры и содержания работы**

Содержание и структура диссертации **соответствуют поставленным целям** исследования, которые заключались:

- в комплексном изучении процессов генерации и управления параметрами интенсивных субмиллисекундных электронных пучков в источниках с сеточным плазменным эмиттером на основе дугового разряда низкого давления с полым анодом;
- в создании на основе этих исследований новых источников электронов, способных формировать электронные пучки различной конфигурации с широким диапазоном интегральных и удельных параметров электронного пучка, контролируемых как в течение одного импульса, так и применительно к последовательности импульсов;
- в демонстрации возможности использования таких электронных пучков для обработки функциональных материалов и других научных и технологических применений.

Для реализации поставленных целей **были решены следующие 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 с различной конфигурацией и параметрами;
- создание или модернизация источников электронов с СПЭ на основе дугового разряда низкого давления с расширенным диапазоном параметров электронных пучков;
- разработка способа управления мощностью электронного пучка в течение импульса тока субмиллисекундной длительности (до 10 МВт при скорости изменения до 0,5 МВт/мкс) в низкоэнергетическом (5–25 кэВ) источнике электронов;
- предложены способы стабилизации тока электронного пучка в источниках электронов различной конфигурации, обеспечивающие расширение диапазона параметров генерируемых электронных пучков;
- определены способы снижения неоднородности плотности эмиссионного тока, обеспечивающие повышение электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка;
- продемонстрирована возможность управления температурой поверхности образцов, облучаемых низкоэнергетическим модулированным по мощности электронным пучком субмиллисекундной длительности;
- продемонстрированы новые возможности использования интенсивных импульсных электронных пучков большого сечения с выводом пучка в атмосферу (модификация натурального латекса, формирования углеродных структур в пленках поливинилхлорида, обработки сельхозпродукции); возможности использования модулированных электронных пучков субмиллисекундной длительности для обработки поверхности различных материалов и изделий с целью улучшения их эксплуатационных и функциональных свойств; показана перспективность использования источника электронов с СПЭ на основе дуги низкого давления для нагрева плазмы в открытой магнитной ловушке на установке «ГОЛ-3» (ИЯФ СО РАН).

**Научная новизна полученных результатов** заключается в следующем:

1. Определены, обоснованы и реализованы методы увеличения 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 прироста тока в ускоряющем промежутке; 2) в результате переключения тока дугового разряда на электрод обратной связи при его бомбардировке ионами из ускоряющего промежутка.

2. Выявлены условия генерации амплитудно- и широтно-модулированных интенсивных субмиллисекундных электронных пучков, основанные на характерной для источников электронов с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы слабой зависимости тока электронного пучка от величины ускоряющего напряжения, что позволило управлять как мощностью, так и шириной энергетического спектра пучка в течение импульса.

3. Показано, что применение амплитудно- и широтно-модулированных интенсивных субмиллисекундных электронных пучков для воздействия на поверхность неорганических материалов, позволяет обеспечивать оптимальную скорость ввода энергии в поверхность материала для целенаправленного формирования ее структуры, обеспечивающей повышенные прочностные свойства.

4. Разработано и создано новое поколение источников электронов с плазменными катодами на основе дуги низкого давления, обладающих более высокой стабильностью параметров и управляемостью процесса генерации электронных пучков, а также имеющих более широкий диапазон перестройки параметров пучка: энергия электронов (5÷200) кэВ, ток пучка (10÷1000) А, плотность тока эмиссии (0,01÷50) А/см<sup>2</sup> при сечении пучка (1000÷10) см<sup>2</sup>, плотность тока на мишени до 50 А/см<sup>2</sup>, длительность импульса (10÷1000) мкс, энергии пучка (десятки Дж ÷ единицы кДж), неоднородность плотности энергии по сечению пучка не хуже ± 15% от среднего значения. По совокупности основных параметров созданные источники электронов находятся на уровне лучших мировых образцов.

**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.

**Научная и практическая ценность** диссертационной работы М.С. Воробьева состоит в том, что:

1. Результаты проведенных комплексных исследований вносят существенный вклад в понимание физических процессов генерации плазмы в источниках электронов с плазменными эмиттерами на основе дуги низкого давления с амплитудной, широтной или частотной модуляцией тока разряда субмиллисекундной длительности, а также физических процессов генерации электронных пучков в таком модулированном режиме.

2. Созданы источники электронов, 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, 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 заключающееся 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).

4. Инжекция адиабатически сжимающегося в нарастающем магнитном поле электронного пучка субмиллисекундной длительности в магнитную пробку установки «ГОЛ-3» использована для целей управляемого инерциального термоядерного синтеза (УТС).

5. 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 оптимальной структуры и достижения нужных функциональных свойств.

6. Результаты диссертационной работы могут быть использованы для увеличения износостойкости пар трения, узлов машин и механизмов для предприятий нефтегазовой, авиакосмической, энергетической, атомной, медицинской отраслей и смежных областей, а также на инструментальных участках машиностроительных производств.

7. Результаты диссертационной работы, 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. 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.

### **Структура и содержание 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.

**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.

**Первая глава** носит обзорный характер и посвящена анализу известных сведений об особенностях формирования электронных пучков большого сечения (от единиц до тысяч квадратных сантиметров) источниками с отбором электронов из плазмы дугового разряда низкого давления с полым анодом. Рассмотрены преимущества использования дугового разряда для создания плотной эмиссионной плазмы, а также механизмы заполнения этой плазмой больших вакуумных объемов в условиях существования отрицательного анодного падения потенциала. Рассмотрено несколько типов дуговых плазмодгенераторов, используемых для генерации эмиссионной плазмы. Приведена общая схема источников электронов с сеточным плазменным эмиттером на основе дугового разряда, отличающихся как параметрами пучка, так и конфигурацией электродной системы. Отдельное внимание уделено механизмам электрических пробоев высоковольтного ускоряющего промежутка в источниках электронов при наличии анодной плазмы с открытой и подвижной границей. В заключении к главе сформулированы основные задачи исследований.

**Вторая глава** посвящена описанию экспериментального оборудования, используемого для генерации электронных пучков в вакууме, и в системах с выводом пучка в атмосферу. Описаны экспериментальные методики измерения параметров эмиссионной плазмы, а также параметров генерируемых электронных пучков.

**В третьей главе** приведены расчеты и проведены эксперименты по динамическому управлению мощностью электронного пучка в течение импульса субмиллисекундной длительности как за счет изменения амплитуды тока пучка при соответствующем малоинерционном изменении амплитуды тока разряда, так и за счет изменения напряжения на высоковольтной конденсаторной батарее. Теоретически и экспериментально продемонстрировано, что модулированные электронные пучки можно использовать для управления скоростью ввода энергии пучка в поверхность металлических материалов и формирования, тем самым, температурного поля в приповерхностной области, например, с целью выделения требуемой фазы и контролируемого изменения функциональных и эксплуатационных свойств поверхности. Определены физические ограничения такого способа управления электронным пучком.



Кроме этого, в главе представлены результаты расчетов и экспериментов, демонстрирующие возможность контролируемого изменения ширины энергетического спектра пучка, выведенного в атмосферу через фольговое окно. Прежде всего, такая возможность может быть востребована при решении радиационных задач, когда длина пробега электронов в веществе соизмерима с глубиной модифицированного слоя. В этом случае энергетический спектр пучка определяет качество обработки материалов. Теоретически и экспериментально показано, что при снижении ускоряющего напряжения в течение импульса с 200 кВ до 100 кВ ширина (на полувысоте) энергетического спектра пучка, выведенного в атмосферу, на расстоянии 30 мм от выводной фольги источника электронов может достигать 120 кэВ при минимальных потерях в фольге.

**Четвертая глава** посвящена способам повышения электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка в источниках электронов с СПЭ на основе дугового разряда низкого давления с полым анодом. Рассмотрены вопросы устойчивой генерации электронного пучка в условиях неконтролируемого увеличения тока в ускоряющем промежутке, обусловленного влиянием ускоренных ионов на процессы генерации эмиссионной и анодной плазмы. Предложено несколько способов снижения неустойчивости пучка как за счет устранения положительной обратной связи, приводящей к снижению импеданса дугового разряда и неконтролируемому росту его тока, так и за счет реализации нескольких способов введения отрицательной обратной связи (ООС) по величине тока в ускоряющем промежутке. Использование предложенных способов введения ООС позволило не только повысить стабильность работы источников электронов с СПЭ, но и обеспечить бóльшую повторяемость параметров пучка и управляемость процесса генерации, а также повысить энергию генерируемых электронных пучков.

**Пятая глава** посвящена снижению неоднородности плотности тока электронного пучка по его сечению как в области эмиссии, так и на мишени, что особенно актуально для дугового разряда и определяет возможность расширения предельных параметров генерируемых электронных пучков, таких как энергия электронов в пучке, его амплитуда, и, соответственно, мощность пучка, а также его длительность, и, соответственно, его энергия. Рассмотрена возможность использования многодуговых сеточных плазменных эмиттеров для снижения неоднородности электронной эмиссии при токах разряда килоамперного уровня. С использованием такого подхода продемонстрирована возможность генерации широкого ( $\leq 50 \text{ см}^2$ ) субмиллисекундного электронного пучка ( $E_b \leq 100 \text{ кэВ}$ ) с энергией до 5 кДж, а также способы снижения неоднородности плотности тока пучка, повышения энергетической эффективности и стабильности работы широкоапертурного ( $\approx 1000 \text{ см}^2$ ) высокоэнергетического ( $E_b \leq 200 \text{ кэВ}$ ) источника электронов с СПЭ при использовании многоапертурной электронно-оптической системы с переменным диаметром отверстий в маске СПЭ, расположенных соосно с отверстиями в выпускном фольговом окне.

**Шестая глава** посвящена использованию источников электронов рассматриваемого типа в научных и технологических целях. Рассмотрены следующие применения: 1) повышение твердости и износостойкости поверхности металлических материалов, облученных импульсным модулированным электронным пучком субмиллисекундной длительности; 2) демонстрация перспективности использования источника электронов с СПЭ и плазменным анодом с открытой границей плазмы в экспериментах по удержанию плазмы в открытой магнитной ловушке установки «ГОЛ-3» (ИЯФ СО РАН); 3) электронно-пучковая модификация натурального латекса с целью увеличения прочности на разрыв; 4) формирование углеродных структур в пленках поливинилхлорида в результате его радиационно-химического превращения в атмосфере воздуха для демонстрации низкотемпературной обработки органического сырья, позволяющей осуществлять 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.

В **приложениях** представлены акты внедрения и использования результатов диссертационной работы М.С. Воробьева, а также два патента на изобретения.

**Личный вклад** автора, судя по многочисленным публикациям в научных периодических изданиях и выступлениям на конференциях различного уровня, является определяющим в данной работе. Диссертационная работа содержит только те результаты, в которых соискателю принадлежит основная роль. Соавторы, принимавшие участие в выполнении экспериментов и обсуждении результатов работы, не только приведены в списке основных публикаций по теме диссертации, но и отмечены в самой работе.

#### **Апробация работы и публикации по теме диссертации**

Основные материалы диссертации опубликованы в 54 печатных работах, из которых 21 статья в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ. Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 31 российских и международных научно-практических конференциях, где получили одобрение со стороны научной общественности.

#### **Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации**

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

#### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Полученные Воробьевым М.С. в процессе диссертационного исследования результаты и выводы можно рекомендовать для использования в организациях, таких как Институт электрофизики УрО РАН (г. Екатеринбург), Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск), Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (г. Томск), Объединенном институте высоких температур РАН (г. Москва) и других ВУЗах и НИИ, а также на предприятиях Российской Федерации для решения научных и прикладных задач, описанных в части отзыва о научной и практической ценности работы.

#### **Замечания по диссертационной работе:**

1. Научный стиль изложения результатов исследования предполагает использование кратких, ясных и четких формулировок. К сожалению, стиль соискателя далек от совершенства. Например, раздел автореферата «Степень достоверности и апробация работы» начинается фразой «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». Почему в этом разделе речь идет об оригинальности и новизне? Написано много, но так и остается неясным, в чем заключается принципиальное отличие данной работы от прочих исследований и как это связано с ее достоверностью и апробацией.

2. Стр. 7 диссертации. Определение понятия сеточного плазменного эмиттера соискателем: «Термином «сеточный плазменный эмиттер» обозначается электродная система плазменного источника электронов, внутри которой генерируется плазма какого-либо типа разряда, из которой осуществляется эмиссия электронов. Одна или более сторон СПЭ выполнены с использованием мелкоструктурной сетки, отбор электронов в ускоряющий промежутки осуществляется через ячейки этой сетки». Принципиально не согласен. СПЭ -это не конструкция, это физический объект. Мой вариант: «Поверхность плазмы, ограниченная мелкоструктурной сеткой, для которых выполняется соотношение между размером ячейки



сетки  $d$  и толщиной  $l$  ионного слоя в отверстии сетки  $d \sim 2l$ , обеспечивающее стабильную эмиссию электронов из плазмы при приложении электрического поля».

3. Стр. 11 диссертации. Обоснование научной новизны работы. В тексте: «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...». Точнее было бы писать не о механизмах генерации пучка, а о способах увеличения электрической прочности.

4. Стр. 12 диссертации. Обоснование научной новизны работы. В тексте: «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 уникальное свойство ранее использовалось для изменения тока пучка и длительности импульсов в широких пределах. Вы это делаете в течение импульса. В чем заключается принципиальная научная новизна?

5. Стр. 12 диссертации. Обоснование научной новизны работы. В тексте: «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...». Точнее было бы написать: «Показано, что применение амплитудно- и широтно-модулированных интенсивных субмиллисекундных электронных пучков позволяет оптимизировать скорость ввода энергии пучка в поверхность материала для целенаправленного формирования ее структуры». И обязательно дать пример на конкретной структуре. Какие физические принципы имел в виду автор, мне не ясно.

6. Стр. 35 диссертации. Текст: «... в отличие от других типов разряда, дуговой разряд имеет самый низкий импеданс промежутка «катод–анод», что позволяет эффективно (с минимальным напряжением горения разряда) ионизовать газ и испаренный с катода материал со степенью ионизации близкой к 100 %, что в ряде задач является его существенным преимуществом». Не совсем так. Эффективность ионизации газа определяется не напряжением горения разряда, а энергетическими затратами в целом, то есть, величиной, обратной цене иона. Низкое напряжение дуги с катодным пятном приводит к необходимости использования больших токов разряда, что снижает эффективность генерации ионов. Высокая степень ионизации металлических паров обусловлена малой длиной свободного пробега атомов металла в плотном электронном потоке вблизи катода.

7. Стр. 61 диссертации. Приведен перечень задач развития, первым пунктом среди которых значится: «изучить физические процессы генерации эмиссионной плазмы в дуговых разрядах низкого давления в системах с СПЭ с полым анодом, эмиссии из нее электронов, формирование и транспортировку электронных пучков различных конфигураций». В последнем абзаце раздела, после перечисления всех задач исследования утверждается, что «постановка и решение вышеперечисленных задач ранее не выполнялись», с чем я категорически не согласен.

8. Стр. 61 диссертации. Формулировка соискателя: «...основная энергия пучка выделяется в конце экстраполированного пробега электронов». Определение «экстраполированный» здесь явно излишне, лучше было бы сказать «в конце пути».

9. Часто в тексте используется определение «конструктивный», например, «конструктивные особенности» вместо более правильного определения «конструкционные особенности».



