



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИСЭ СО РАН

И. В. Романченко
И. В. Романченко

08 2022 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук
о диссертации Воробьёва Максима Сергеевича
«Развитие источников электронов с сеточными плазменными эмиттерами на основе
дугового разряда низкого давления с полым анодом»

Диссертация «Развитие источников электронов с сеточными плазменными эмиттерами на основе дугового разряда низкого давления с полым анодом» выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН).

В период подготовки диссертации соискатель Воробьёв Максим Сергеевич работал в ИСЭ СО РАН в должности старшего научного сотрудника в лаборатории плазменной эмиссионной электроники (ЛПЭЭ).

Воробьёв М.С. в 2009 году окончил с магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по специальности «Электроника и микроэлектроника». В 2012 году Воробьёв М.С. окончил аспирантуру ИСЭ СО РАН по направлению подготовки 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника и в 2015 году по этому направлению защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Источник электронов с многоапертурным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с эффективным выводом пучка большого сечения в атмосферу». Работа была выполнена в ИСЭ СО РАН.

Научный консультант – Коваль Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки Российской Федерации. Основное место работы консультанта: ИСЭ СО РАН, главный научный сотрудник ЛПЭЭ.

По итогам обсуждения диссертации, состоявшегося в ИСЭ СО РАН, принято следующее заключение:

Диссертация Воробьёва М.С. является законченной научно-исследовательской работой, в которой изложены результаты исследований генерации плазмы, генерации пучков большого сечения, их транспортировки и воздействию таких пучков на мишень в вакууме, а также их эффективному выводу в атмосферу через выпускное фольговое окно в источниках электронов с сеточными плазменными катодами на основе дугового разряда низкого давления с полым анодом. Используя три различных источника электронов, продемонстрирована возможность генерации электронных пучков, которые по совокупности параметров не имеют мировых аналогов. Такие источники обладают рядом преимуществ как перед ускорителями с термокатодом (большой срок службы,

некритичность к вакуумным условиям, высокая энергетическая эффективность, малое время готовности), так и перед ускорителями на основе взрывоэмиссионных катодов (большая длительность импульсов, повышенный срок службы, высокая однородность плотности тока пучка, большая частота следования импульсов). Необходимость создания таких источников электронов удовлетворяет пяти из семи приоритетных направлений Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, а именно, «Н1. Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования...», «Н2. Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике...», «Н3. Переход к персонализированной медицине, высокотехнологичному здравоохранению и технологиям здоровьесбережения...», «Н4. Переход к высокопродуктивному и экологически чистому агро- и аквахозяйству, разработка и внедрение систем рационального применения средств химической и биологической защиты сельскохозяйственных растений и животных, хранение и эффективную переработку сельскохозяйственной продукции, создание безопасных и качественных, в том числе функциональных, продуктов питания», «Н5. Противодействие техногенным, биогенным, социокультурным угрозам, терроризму и идеологическому экстремизму, а также киберугрозам и иным источникам опасности для общества, экономики и государства». Кроме этого, развитие 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.

Выполненные исследования имеют научную новизну и практическую значимость.

В диссертационной работе впервые получены следующие важные научные результаты:

- изучены физические процессы генерации эмиссионной плазмы в дуговых разрядах низкого давления, эмиссии из нее электронов в системах с сеточным плазменным эмиттером с полым анодом, формирование и транспортировка электронных пучков различных конфигураций и параметров;

- созданы или модернизированы источники электронов 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 сеточным плазменным эмиттером 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 источнике электронов с сеточным плазменным эмиттером на основе дугового разряда низкого давления, позволяющие осуществлять управление мощностью тока пучка в течение импульса субмиллисекундной длительности;

- выявлены и экспериментально продемонстрированы механизмы стабилизации тока электронного пучка в источниках электронов с сеточным плазменным эмиттером различной конфигурации, 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, формирования углеродных структур в пленках поливинилхлорида, обработки сельхоз продукции); 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 сеточным плазменным эмиттером на основе дуги низкого давления для удержания температуры плазмы в открытой магнитной ловушке на установке ГОЛ-3.

Теоретическая и практическая ценность работы состоит в том, что:

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

2. Решена крупная научно-техническая задача, заключающаяся в создании источников электронов с СПЭ нового поколения, обеспечивающих генерацию электронных пучков различных конфигураций с уровнем энергозапаса до 5 кДж и средней мощностью до 5 кВт, а также отличающихся возможностью контролируемого изменения параметров пучка в течение субмиллисекундной длительности импульса тока, которые по совокупности основных параметров не имеют мировых аналогов.

3. Существенно расширены возможности импульсных электронно-пучковых технологий с целью 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). В частности, предложенные, обоснованные и реализованные в работе способы генерации электронных пучков с широким диапазоном параметров 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 управляемого термоядерного синтеза, повысив его энергию с 1.6 кДж до 2.9 кДж.

4. При использовании источника электронов с сеточным плазменным эмиттером на основе дуги низкого давления продемонстрирован способ управления еще одним параметром пучка, а именно его мощностью 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 поверхности пар трения, узлов машин и механизмов для предприятий нефтегазовой, авиакосмической, энергетической, атомной, медицинской отраслей 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.

Достоверность и обоснованность полученных результатов диссертации подтверждается систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных методик, проведением измерений на различных экспериментальных установках, сопоставлением и удовлетворительным совпадением результатов экспериментов с результатами других исследователей в данной области науки, а также использованием современной сертифицированной приборной базы.

Основные материалы диссертации опубликованы в 54 работах, из которых 21 статья в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 33 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. Разработанные в результате выполнения работы технические решения защищены двумя Патентами РФ.

Статьи в научных журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций

1. **Источник электронов с многоугольным плазменным эмиттером для получения мегаваттных пучков субмиллисекундной длительности / М.С. Воробьев, 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.**
2. **Reconstruction of electron beam energy spectra for vacuum and gas diodes / A.V. Kozyrev, V.Yu. Kozhevnikov, M.S. Vorobyov, E.Kh. Baksht, A.G. Burachenko, N.N. Koval, V.F. Tarasenko // Laser and Particle Beams, 2015. P.1–10. Cambridge University Press. – 0263-0346/15. – doi:10.1017/S0263034615000324**
3. **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, В.В. Шугуров, В.В. Яковлев, К. Uemura, P. Raharjo // ХВЭ, 2015. – Т.49. – №3. – С. 169–172.
5. **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. – Is.1. – PP. 77–84.
6. **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. – Вып. 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, В.С. Солодовниченко, М.В. Тренихин, С.А. Сулакшин, В.А. Лихолобов // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42. – Вып. 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, N.N. Koval, V.V. Kurkuchekov, S.A. Sulakshin, Yu A. Trunev // Vacuum. – 2017. – Т. 138. – PP. 1–6.
10. **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. – PP. 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. Куркучеков // Известия РАН. Серия физическая. – 2019. – Т. 83. – № 11. – С. 1529–1533.
14. **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, В. Н. Девятков, С. Ю. Дорошкевич, Н. Н. Коваль // 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, Н.Н. Коваль, К.Т. Ашурова, С.Ю. Дорошкевич, В.Н. Девятков, М.С. Торба, В.А. Леванисов // Письма в ЖТФ. – 2021. – Т. 47. – Вып. 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, Е.Е. Акимова, О.М. Минаева, Е.А. Покровская, В.И. Шин, М.С. Торба, В.А. Леванисов // 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**, V.I. Shin, I.V. Lopatin, N.N. Koval, S. Yu. Doroshkevich, M.S. Torba // Vacuum. – 2021. – Vol. 191. – 110338
19. **Отрицательная обратная связь по току в ускоряющем промежутке в источниках электронов с плазменным катодом** / **M.C. Воробьев**, П.В. Москвин, В.И. Шин, Т.В. Коваль, В.Н. Девятков, С.Ю. Дорошкевич Н.Н. Коваль, М.С. Торба, К.Т. Ашурова // ЖТФ. – 2022. – Т. 92. – Вып. 6. – С. 883–888.
20. **Treatment of Silumin Surface by a Modulated Submillisecond Electron Beam** / **M.S. Vorobyov**, K.T. Ashurova, Yu.F. Ivanov, P.V. Moskvina, E.A. Petrikova, M.S. Petyukevich, M.E. Rygina, V.I. Shin, & S.Yu. Doroshkevich // High Temperature Material Processes. – 2022. – V. 26(4). – PP.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, P. Moskvina, My Kim An Tran, N. Koval, K. Ashurova, S. Doroshkevich, M. Torba // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2021. – V. 49. – №. 9. – PP. 2550 – 2553.

Диссертация является законченной и оригинальной научно-исследовательской работой, обладающей внутренним единством. Все представленные в диссертации результаты получены автором лично либо под его непосредственным руководством. Автором лично были определены научные направления исследований, сформулированы цели и задачи исследований, осуществлено планирование, подготовка и проведение экспериментов, сформулированы выводы и научные положения. Анализ, обсуждение, интерпретация результатов, подготовка научных статей и патентов осуществлены лично автором или с его ключевым участием.

В диссертации соблюдены требования п. 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 11.09.2021). Имеются необходимые ссылки на авторов и источники заимствования материалов или отдельных результатов. В диссертационной работе отмечено, что использованные результаты научных работ, получены соискателем Воробьевым М.С., в том числе, в соавторстве с Н.Н. Ковалем, В.Н. Девятковым, П.В. Москвиным, В.В. Шугуровым, С.А. Сулакшиным, а также другими соавторами из ИСЭ СО РАН, ИЯФ СО РАН, ВНИИРАЭ, НИ ТПУ и других российских и зарубежных организаций.

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие радиационных электронно-пучковых технологий для их применений в России и за рубежом.

Тема и содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 1.3.5 «Физическая электроника» по техническим наукам в части п. 1.1, п. 1.3, п. 1.4 и п. 3.

Диссертация Воробьева Максима Сергеевича «Развитие источников электронов с сеточными плазменными эмиттерами на основе дугового разряда низкого давления с полым анодом» рекомендуется к защите на соискание учёной степени доктора технических наук по научной специальности 1.3.5 – Физическая электроника.

Заключение принято на расширенном заседании лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН 19 августа 2022 г. На заседании присутствовали 51 человек (включая соискателя), из них с ученой степенью доктора наук – 11 человек, с ученой степенью кандидата наук – 17, без ученой степени – 22. Из 16 научных сотрудников лаборатории по списку участвовали в заседании 14 (включая соискателя), из них 2 с ученой

степенью доктора наук и 4 с ученой степенью кандидата наук (включая соискателя). Право решающего голоса имели 36 человек (13 научных сотрудников лаборатории плазменной эмиссионной электроники (не считая соискателя), 9 приглашенных научных сотрудников со степенью доктора наук и 14 приглашенных научных сотрудников со степенью кандидата наук). Результаты голосования: за принятие заключения – 36, против – нет, воздержавшихся – нет, протокол №_1_ от «19» августа 2022 г.

Организация, в которой выполнена диссертационная работа:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН).

Адрес: Россия, 634055, город Томск, проспект Академический, дом 2/3.

Тел. 8(3822)491-544, факс 8(3822)492-410, contact@hcei.tsc.ru, <https://www.hcei.tsc.ru>

Заключение оформили:

заведующий ЛПЭЭ, к.т.н.

главный научный сотрудник ЛПЭЭ, д.ф.-м.н.



Ю.Х. Ахмадеев

Ю.Ф. Иванов