

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Воробьева Максима Сергеевича «Развитие источников электронов с сеточными плазменными эмиттерами на основе дугового разряда низкого давления с полым анодом» по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника» на соискание ученой степени доктора технических наук.

Диссертационная работа Воробьева М.С. посвящена развитию концепции создания источников электронов с плазменным эмиттерами на основе дугового разряда низкого давления. Электронные ускорители или источники ускоренных электронов находят широкое применение для решения ряда фундаментальных и прикладных задач. В последние 30 лет наблюдается ежегодный прирост числа ускорителей в технологических процессах различных отраслей промышленности, сельском хозяйстве, обработке сельскохозяйственной продукции, медицине, решении экологических задач. Разработка и использование источников электронов как инструмента в новых технологических процессах присутствует в решении ряда задач, отраженных в нескольких приоритетных направлениях Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. Можно с полным основанием утверждать, что актуальность данной работы высока.

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 дано краткое обоснование актуальности проблем, затрагиваемых в диссертации, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена литературному обзору, в рамках которого автор показывает современные возможности источников электронов с катодами различного типа, в результате анализа выбирает объект и предмет исследований. В главе выделены проблемы источников электронов с сеточными плазменными катодами, с которыми сталкиваются разработчики такого оборудования, а также перечислены основные способы устранения этих проблем (вопросы неоднородности плотности тока пучка по его сечению, электрической прочности высоковольтного ускоряющего зазора и др.). В конце главы формулируются основные задачи исследований.

Вторая глава посвящена описанию экспериментального оборудования и методик проведения экспериментов. Описаны три источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления, позволяющие генерировать интенсивные (десятки-сотни ампер) пучки субмиллисекундной длительности, отличающиеся не только энергией электронов, но и другими параметрами пучка (плотностью тока пучка, энергией, переносимой пучком, сечением пучка, частотой следования импульсов и др.). Общей особенностью всех источников электронов является использование сеточных плазменных эмиттеров на основе дуги низкого давления с полым анодом, а отличительной особенностью источников является как электродная система сеточного плазменного эмиттера, так и принцип генерации пучка: на основе плазмонаполненного диода либо вакуумного диода с выводом пучка в атмосферу. Описано используемое в эксперименте диагностическое оборудование.

В главе 3 приведены способы управления параметрами электронного пучка, генерируемого в источниках с сеточными плазменными эмиттерами, а именно мощностью

пучка и его энергетическим спектром в течение импульса субмиллисекундной длительности. Управление мощностью пучка осуществляется за счет управления амплитудой тока разряда в течение импульса, а энергетическим спектром – за счет изменения ускоряющего напряжения в течение импульса тока пучка. Каждый из подходов подчеркивает уникальность источников электронов такого типа и открывает новые возможности для их использования при решении научных и технологических задач.

Глава 4 посвящена описанию механизмов неконтролируемого роста тока пучка и способам его стабилизации при использовании нескольких способов введения отрицательной обратной связи (ООС) по току в ускоряющем промежутке. Первый способ основан на снижении концентрации эмиссионной плазмы за счет снижения амплитуды тока разряда в течение импульса субмиллисекундной длительности, а второй – на возможности переключения электронов из эмиссионной границы плазмы на дополнительный электрод обратной связи, расположенный в пространстве сеточного плазменного эмиттера. Каждый из способов введения ООС приводит к снижению доли электронов, извлекаемых из плазменного эмиттера при возникновении роста тока в ускоряющем промежутке, что в итоге позволяет повысить электрическую прочность ускоряющего зазора и снизить количество его электрических пробоев даже при большей энергии электронного пучка, что также продемонстрировано в данной главе. Кроме этого, это позволяет повысить управляемость генерируемым электронным пучком, обеспечивая более высокую повторяемость параметров пучка, что крайне важно при решении конкретных технологических задач.

Глава 5 посвящена вопросам снижения неоднородности плотности тока пучка по его сечению, что является важным для выбранных источников электронов, эмиттеры которых основаны на дуговом разряде, которому свойственно формирование локальных неоднородностей плотности тока разряда и, соответственно, неоднородность концентрации плазмы в эмиссионной области. При использовании многодугового режима генерации эмиссионной плазмы продемонстрирована возможность генерации плотного электронного пучка с энергией до 5 кДж в плазмонаполненном диоде с открытой границей анодной плазмы. Продemonстрирована возможность генерации широкого электронного пучка (750×150 мм) с неоднородностью менее 10% и его энергоэффективного вывода в атмосферу (до 80%) при использовании многоапертурной электронно-оптической системы. Показано, что применение таких подходов также позволяет повысить электрическую прочность ускоряющего зазора в источниках электронов такого типа.

В Главе 6 приведены примеры использования источников электронов с сеточными плазменными эмиттерами в разных направлениях, Это усиливает и подчеркивает достаточно высокий уровень практической значимости диссертационной работы.

В заключении приведены основные результаты работы.

Все научные результаты, выносимые на защиту, являются новыми:

- установление условий, обеспечивающих увеличение электрической прочности ускоряющего промежутка, заключающиеся во введении отрицательной обратной связи по току пучка;
- определение условий модулирования интенсивных субмиллисекундных электронных пучков;

- установление основных физических принципов воздействия модулированных интенсивных субмиллисекундных электронных пучков на поверхность неорганических материалов и определение оптимальной скорости ввода энергии пучка для формирования ее структуры;
- разработку и создание нового поколения источников электронов с плазменными катодами на основе дуги низкого давления, обеспечивающие совокупность высоких эксплуатационных параметров чем аналоги при средней мощности до 5 кВт, созданные источники электронов не имеют прямых мировых аналогов и являются перспективными для их использования в научных и технологических целях.

Положения, выносимые на защиту научно обоснованы. В их основе лежат экспериментальные результаты, численные расчеты и действующие импульсные ускорители электронов. Достоверность научных результатов, полученных автором и приведенных в диссертации не противоречит теоретическим моделям. Результаты диссертационной работы Воробьева М.С. известны научной общественности, докладывались и обсуждались на семинарах в научных учреждениях, международных научных конференциях и опубликованы в **21 статье в журналах из перечня ВАК** и **33 докладах** трудов международных и всероссийских конференций, симпозиумов и совещаний,

Создание источников электронов с сеточными плазменными эмиттерами является заметным шагом на пути к практической реализации радиационных технологий в различных областях. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в ряде российских и зарубежных центров проводящих прикладные исследования в данной области

В моих встречах с руководством Института и соавторами работы подтвердилось то, что при определяющем участии автора диссертации получены и проанализированы результаты изложенные в диссертации, при его определяющем участии и руководстве проведена разработка, модернизация всех описанных экспериментальных установок, подготовка и проведение экспериментов, анализ и обработка экспериментальных результатов.

Диссертация изложена хорошим языком и легко читается. Следует отметить и некоторые недостатки.

1. В разделе 4.4.3 на стр. 173 диссертации приведены результаты экспериментов, якобы доказывающие существование ионного потока из ускоряющего промежутка в пространство СПЭ в источнике электронов «ДУЭТ». Однако эти доказательства, на мой взгляд, недостаточно убедительны, т.к. нет численных значений ионных токов в электродной системе СПЭ.
2. Не совсем удачно изложена вторая часть 2-го положения: «... обеспечивается возможность компенсации потерь электронного пучка в фольге за счет динамического изменения амплитуды тока разряда и, соответственно, амплитуды тока в ускоряющем промежутке...». Если утверждается что можно компенсировать потери энергии переносимой пучком в выводной фольге, то следует конкретизировать чем это достигается. Возможно, автор хотел сказать, что обеспечивается возможность стабилизации именно энергии электронов пучка проходящего через фольгу за счет изменения амплитуды и формы тока разряда.

3. Одним из важнейших выводов работы, научных результатов, на мой взгляд, является формирование доказательной базы по управлению током пучка, его энергетическим спектром, за счет использования отрицательной обратной связи тока пучка и «пропорциональном уменьшении амплитуды тока дуги и/или снижении коэффициента извлечения электронов в результате переключения доли тока дугового разряда на специальный электрод обратной связи». Каков может быть временной масштаб использования этого подхода?

Можно утверждать, что основные положения, выносимые на защиту, соответствуют выбранной теме и подробно обоснованы в диссертации. Основные результаты, полученные диссертантом, соответствуют, а по ряду позиций, определяют мировой уровень развития источников электронов с сеточными плазменными эмиттерами на основе дугового разряда низкого давления.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне. В ней приведены научные результаты, позволяющие ее квалифицировать в целом как новое научное достижение, имеющее важное фундаментальное и социально-экономическое значение.

Считаю, что рецензируемая диссертационная работа «Развитие источников электронов с сеточными плазменными эмиттерами на основе дугового разряда низкого давления с полым анодом» соответствует всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а Воробьёв Максим Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника».

Согласен на обработку персональных данных.

профессор, заведующий научно-производственной лабораторией «Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий» Томского политехнического университета, доктор технических наук

Ремнёв Геннадий Ефимович

Дата

21.11.2022

Подпись Ремнёва Г.Е. заверяю:
учёный секретарь ФГАОУ ВО НИ ТПУ



Кулинич Екатерина Александровна

Полное наименование организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Юридический адрес: г. Томск, проспект Ленина, 30.

e-mail: remnev@tpu.ru

Тел.: +7 (3822) 606405

Должность: профессор, заведующий научно-производственной лабораторией
"Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий" ТПУ

Ф.И.О. Ремнёв Геннадий Ефимович