

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.

Низкоэнергетичные источники ускоренных электронов обладают широким диапазоном параметров генерируемого электронного пучка и находят практическое и научное применение в целях обработки различных органических материалов при выводе пучка в атмосферу, либо для обработки в вакууме различных неорганических материалов с целью изменения их эксплуатационных характеристик.

При этом глубокое изучение физики процессов, разработка и создание на этой основе источников электронов нового поколения с уникальными параметрами является одним из основных направлений в области экономически оправданных и целесообразных применений электронных пучков.

Диссертация М.С. Воробьева посвящена изучению физических процессов работы, разработке и совершенствованию конструкций, а в целом развитию таких источников электронов, и, в частности, источников с сеточными плазменными эмиттерами на основе дуги низкого давления с полым анодом, стабильно генерирующих пучки электронов, с совокупностью параметров, не достигавшимися ранее, что представляет научный и практический интерес, и позволяет расширить сферу возможных применений таких источников электронов. Такие источники электронных пучков обладают рядом преимуществ по сравнению как с источниками на основе термоэмиттеров (большой срок службы, нечувствительность к вакуумным условиям, высокая энергетическая эффективность, малое время готовности), так и с источниками на основе взрывоэмиссионных катодов (большая длительность импульсов, повышенный срок службы, высокая однородность плотности тока пучка, большая частота следования импульсов). Поэтому дальнейшее изучение и развитие такого оборудования, ориентированного на расширение параметров источников электронов и стабильность генерации

эмиссионной плазмы и электронного пучка безусловно является актуальной задачей.

Диссертация М.С. Воробьева 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 диссертационной работы, сформулированы цели и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов и представлены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава посвящена литературному обзору, в рамках которого автор показывает современные возможности источников электронов с катодами различного типа, а в результате обоснованно 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 или нивелирования этих проблем, включая 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 пучки с токами десятки и даже сотни ампер субмиллисекундной длительности, отличающиеся не только энергией электронов, но и такими параметрами как плотность тока, интегральная энергия, сечение пучка, частота следования импульсов и др. Общей особенностью всех источников электронов является применение сеточных плазменных эмиттеров на основе дуги низкого давления с полым анодом, а отличительной особенностью является не только электродная система сеточного плазменного эмиттера, но и принцип генерации, включая использование вакуумного диода с выводом пучка в атмосферу через выпускное фольговое окно и использование плазмонаполненного диода. 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 динамическим изменением амплитуды тока разряда за время импульса, а энергетическим спектром - изменением 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 эмиссионной 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 электрических пробоев даже при большей энергии электронного пучка, что также продемонстрировано в главе. Кроме этого, это позволяет повысить управляемость генерируемым электронным пучком, обеспечивая более высокую повторяемость результатов электронно-пучковой обработки изделия, что крайне важно при решении конкретных технологических задач.

Глава 5 посвящена вопросам снижения неоднородности плотности тока пучка по сечению, что крайне актуально для выбранных источников электронов, эмиттеры которых основаны на дуговом разряде, чаще всего отличающегося локальными экстремумами плотности тока разряда и соответствующей пространственной неоднородностью концентрации эмиссионной плазмы. При использовании многодугового режима генерации

эмиссионной плазмы продемонстрирована возможность генерации электронного пучка с высокой плотностью тока с энергией до 5 кДж в плазмонаполненном диоде с открытой границей анодной плазмы. Продемонстрирована возможность генерации широкого электронного пучка (750×150 мм) с неоднородностью распределения плотности тока по сечению менее 10% и его эффективного вывода в атмосферу 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 новые примеры использования источников электронов с сеточными плазменными эмиттерами, что подчеркивает практическую ценность диссертационной работы.

В заключении приведены основные результаты работы.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые определены, обоснованы и реализованы механизмы генерации электронного пучка, обеспечивающие увеличение электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка в источниках электронов с сеточными плазменными эмиттерами на основе дуги низкого давления, заключающиеся во введении отрицательной обратной связи по току пучка.

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.

Установлены основные физические принципы воздействия амплитудно- и широтно-модулированных интенсивных субмиллисекундных электронных пучков на поверхность неорганических материалов, заключающиеся в определении оптимальной скорости ввода энергии пучка в поверхность материала для целенаправленного формирования ее структуры, а также продемонстрирована возможность использования таких пучков для решения ряда научных и технологических задач, решение которых невозможно при использовании источников электронов другого типа.

Научная и практическая ценность работы заключается в следующем.

Результаты проведенных комплексных исследований вносят существенный вклад в понимание физических процессов генерации плазмы в

источниках электронов с сеточными плазменными эмиттерами на основе дуги низкого давления, имеющих амплитудную, широтную или частотную модуляцию в течение импульса субмиллисекундной длительности.

Созданные источники электронов с сеточными плазменными эмиттерами обеспечивают генерацию субмиллисекундных электронных пучков различных конфигураций с энергией в импульсе до 5 кДж и средней мощностью до 5 кВт и отличаются возможностью контролируемого изменения параметров пучка в течение импульса тока и не имеют по совокупности основных параметров мировых аналогов.

Существенно расширены возможности импульсных электронно-пучковых технологий модификации поверхности различных органических и неорганических материалов, в том числе заключающиеся в достижении новых режимов облучения таких материалов как в вакуумном пространстве (за счет управления скоростью ввода энергии в поверхность неорганического материала), так и в атмосфере (за счет управления шириной энергетического спектра электронного пучка).

При использовании источника электронов с сеточными плазменными эмиттерами 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 и формировать необходимое температурное поле поверхности для целенаправленного формирования ее структуры.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы на предприятиях Российской Федерации для решения прикладных задач по увеличению износостойкости пар трения, узлов машин и механизмов для предприятий нефтегазовой, авиакосмической, энергетической, атомной, медицинской и смежных областей, а также на инструментальных участках машиностроительных производств.

Научные положения, выносимые на защиту, выводы, сделанные в конце каждой главы, рекомендации научно обоснованы. В основе положений, выводов и рекомендаций лежат экспериментальные результаты, численные расчеты и ряд действующих ускорительных установок.

Достоверность научных результатов, полученных автором и приведенных в диссертации, подтверждается систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих современных методик измерений и их сравнением с теоретическими и численными моделями.

Результаты диссертационной работы М.С. Воробьева известны научной общественности, докладывались и обсуждались в научных учреждениях на 28 российских и международных научных конференциях, семинарах и опубликованы в 54 работах, из которых 21 статья в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 34 полных текста докладов в трудах международных и всероссийских конференций, симпозиумов и совещаний, 20 докладов из которых, цитируются в базах данных Web of Science и Scopus, что не оставляет сомнений в том, что представленные к защите результаты диссертации получены лично автором или при его определяющем участии.

Диссертация написана ясным языком, с использованием принятой терминологии, оформление диссертации замечаний не вызывает.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

По содержанию диссертации имеются следующие замечания.

1. Автор не объясняет экспериментально полученную зависимость максимальной величины ускоряющего напряжения U_0 от давления рабочего газа p (рис. 5.11 на стр. 188). Почему максимальная величина U_0 достигается лишь в достаточно узком диапазоне давлений равном (10÷20) мПа?
2. На стр. 230 давление приведено в Pa в английской транскрипции, а не как по всей диссертации в русской транскрипции, т.е. в Па.
3. На стр. 180 введен термин «пикированная форма плотности энергии пучка». Этот термин в литературе мне не встречался. Можно было бы, на мой взгляд, обойтись общеупотребляемыми словами при описании распределения плотности тока по сечению пучка. Мне кажется, что термин «пикирование» лучше оставить для военных летчиков.

Однако, указанные замечания не затрагивают сущность защищаемых научных положений, а также полученных в работе основных результатов, и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Резюмируя, можно сказать, что диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. 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. В работе приведены научные результаты, позволяющие ее квалифицировать 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, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а Воробьёв Максим Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника».

Официальный оппонент,
доктор технических наук,
начальник лаборатории КЛ-8 НТЦ «Синтез»
АО «НИИЭФА»



С.Л. Косогоров

Подпись С.Л. Косогорова удостоверяю
Научный руководитель АО «НИИЭФА»,
доктор физико-математических



О.Г. Филатов

«28» 10 2022 г.

Данные официального оппонента:

ФИО, степень, звание: Косогоров Сергей Леонидович, д.т.н.

Организация: Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» (АО «НИИЭФА»)

Должность: Начальник лаборатории НИЛ КЛ-8 НТЦ «Синтез»

Почтовый адрес: Россия, 196641, Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, д. 3

Телефон: 8(812) 464-89-63

Адрес электронной почты: kosogorov@niiefa.spb.su