

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Воробьева 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 избранной темы

Актуальность избранной темы диссертации Воробьева Максима Сергеевича определяется широким использованием электронных пучков в фундаментальных и прикладных исследованиях, а также в промышленности для выпуска мелких партий и массового производства различных изделий. Поэтому развитие новых направлений исследования методов формирования и использования источников электронов представляется чрезвычайно важным. В диссертации разработаны как физические основы источников с плазменным эмиттером, так и экспериментально на трех установках продемонстрированы уникальные свойства источников с сеточным плазменным эмиттером и представлены способы их применения. Все это и дает основания для заключения об актуальности избранной темы диссертации.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Выдвинутые автором научные положения, выводы и рекомендации четко сформулированы и надежно обоснованы в тексте диссертации. Полученные результаты хорошо известны научной общественности, опубликованы в рецензируемых журналах, докладывались на многочисленных конференциях.

Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность полученных результатов обеспечивается их согласованностью с имеющимися в литературе данными, а также совпадением результатов, полученных разными методами. Они были подтверждены как данными других авторов, на что в диссертации имеются соответствующие ссылки, так и применением комплекса стандартных аттестованных методов исследования. Основные научные выводы, сформулированные в диссертации, основываются на положениях плазменной эмиссионной электроники, достаточно аргументированы и тщательно проверены на большом количестве экспериментов. Критерием достоверности следует признать и хорошую воспроизводимость результатов, особенно когда речь идет о стабильности работы как эмиттеров, так и источников электронов в целом. Основные результаты диссертационной работы достаточно полно представлены в 54 публикациях, 21 из которых в изданиях, рекомендованных ВАК, а также доложены и обсуждены на многочисленных Международных и Всероссийских конференциях. Разработанные в результате выполнения работы технические решения защищены двумя Патентами РФ, а также приведены акты использования/внедрения, что также говорит о востребованности разрабатываемых источников электронов.

В диссертационной работе приведены новые результаты, к которым можно отнести следующие.

Определены, обоснованы и реализованы механизмы генерации электронного пучка с применением отрицательной обратной связи по току пучка двумя новыми способами, обеспечивающие увеличение электрической прочности ускорительного промежутка источника.

Используя слабую зависимость тока пучка от ускоряющего напряжения в источниках с сеточными плазменными эмиттерами, автор выявил условия генерации амплитудно- и широтно-модулированных пучков, позволивших управлять их мощностью и шириной энергетического спектра в течение импульса.

Автором установлены основные физические принципы воздействия на материалы амплитудно- и широтно-модулированных пучков для целенаправленного формирования структуры их поверхности.

Разработано и создано новое поколение источников импульсных пучков электронов с плазменными катодами с большим диапазоном параметров, чем существующие, и по совокупности параметров не имеющие мировых аналогов.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов

Полученные автором результаты значимы для науки и практики.

1. Результаты проведенных комплексных исследований вносят существенный вклад в понимание физических процессов генерации плазмы в источниках электронов с СПЭ на основе дуги низкого давления, имеющего амплитудную, широтную или частотную модуляцию в течение импульса тока разряда субмиллисекундной длительности, а также физических процессов генерации электронных пучков в таком модулированном режиме.
2. Созданы источники электронов с СПЭ, 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 тока, 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). В частности, предложенные в работе способы генерации электронных пучков 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

4. 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 структуры.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

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 пар трения, узлов машин и механизмов для предприятий нефтегазовой, авиакосмической, энергетической, атомной, медицинской отраслей и смежных областей, а также на инструментальных участках машиностроительных производств.

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. 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.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность

По структуре, содержанию и изложению материала диссертационная работа Воробьева М.С. является законченным научным трудом. Работа имеет структуру, соответствующую рекомендациям ВАК. Она состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 253 страницы текста, 120 рисунков, библиографический список из 258 наименований, шесть приложений.

Во введении обоснована актуальность исследований по теме диссертационной работы, указаны её цели и задачи, сформированы научная новизна и положения, выносимые на защиту, кратко показана практическая значимость полученных результатов.

Первая глава диссертации посвящена литературному обзору известных способов генерации широкого электронного пучка в источниках с различными типами катодов. На основе изучения и критического анализа отечественных и зарубежных литературных источников сделан вывод о том, что источники электронов с сеточными плазменными катодами на основе дугового разряда низкого давления обладают преимуществами, недостижимыми или сложно реализуемыми в других источниках электронов. В этой же главе отмечается необходимость дальнейшей разработки и совершенствования таких источников электронов как с целью расширения предельных параметров генерируемого электронного пучка, так и для их стабилизации и управления.

Во второй главе диссертации приведено описание экспериментальных установок, методов и методик исследования. Следует отметить, что автор проводил эксперименты на трех экспериментальных стендах, прежде всего формально отличающихся энергией электронов в пучке: низкоэнергетический пучок (до 25 кэВ), электронный пучок средних энергий (до 100 кэВ) и высокоэнергетический электронный пучок (до 200 кэВ), а также плотностью тока пучка и способом его генерации (вакуумный и плазмонаполненный диод). Данное

обстоятельство существенно усиливает диссертационную работу, поскольку позволяет рассматривать физические процессы, происходящие как в пространстве сеточного плазменного эмиттера, так и в области ускорения и транспортировки пучка в отдельности в широком диапазоне его параметров, используя как известное (стандартное), так и уникальное диагностическое оборудование и системы электропитания и управления плазменными эмиттерами источников электронов.

В третьей главе, имеющей практическую направленность, автор продемонстрировал возможность управления мощностью электронного пучка в течение импульса субмиллисекундной длительности, что позволяет не только управлять скоростью ввода энергии в материал, облучаемый электронным пучком, но и управлять шириной энергетического спектра пучка, выведенного в атмосферу. Оба фактора крайне важны для достижения желаемого эффекта облучения различных материалов (как органических, так и неорганических).

В четвёртой главе диссертации, представляющейся для меня наиболее интересной, были экспериментально продемонстрированы способы управления электронным пучком, нивелирующие дестабилизирующие процессы в ускоряющем зазоре, обусловленные возникновением в нем несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда. Оба способа (как за счет снижения концентрации эмиссионной плазмы в течение импульса, так и за счет переключения электронов эмиссионной плазмы на специальный электрод обратной связи) позволяют повысить электрическую прочность ускоряющего зазора и, тем самым, не только расширить предельные параметры пучка, но и повысить его управляемость и стабильность генерации. Последний факт крайне важен для практического внедрения оборудования такого класса в технологический процесс практически любого производства.

Пятая глава посвящена вопросам повышения удельной энергии электронного пучка и его средней мощности в источниках электронов с сеточными плазменными эмиттерами на основе дуги низкого давления за счет снижения или управления неоднородностью плотности тока электронного пучка.

Снижение неоднородности достигается при переходе к многодуговой системе генерации эмиссионной плазмы, что позволило в условиях эксперимента достичь высокой удельной энергии интенсивного (уровня 1 кА) пучка субмиллисекундной длительности в источнике электронов «КИЛОАМПЕР», а также кратно (в ≈ 2 раза) повысить эффективность вывода пучка в атмосферу в источнике электронов «ДУЭТ», обеспечив при этом снижение неоднородности пучка менее 10% как по его длинной, так и короткой сторонам. Надо отметить, что эти вопросы наиболее актуальны для источников электронов с плазменными эмиттерами на основе дугового разряда, однако использование таких сравнительно простых подходов позволило вывести оборудование на новый научный и технологический уровень, поскольку, в частности, позволило повысить стабильность работы этих источников (обеспечить снижение количества электрических пробоев ускоряющего зазора), что также приближает это оборудование к созданию технологий на его основе.

В шестой главе представлены возможные способы использования рассматриваемых электронных пучков в научных и технологических целях.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации

Диссертация Воробьева М.С. представляет собой подробный научный труд, имеющий несомненную ценность, как для научного сообщества, так и для широкого применения полученных результатов. Тем не менее, имеются замечания по тексту диссертации.

1. На рис. 5.8 (стр. 186) диссертации приведена зависимость максимального ускоряющего напряжения U_0 от величины продольного магнитного поля B_0 , которая демонстрирует наличие оптимальной величины $B_0=(375\div 450)$ Гс для получения максимальной электрической прочности ускоряющего промежутка. К сожалению, автор не комментирует возможные причины наблюдаемой зависимости.

2. На стр. 170 раздела 4.4.1 говорится о рекомендациях по повышению эффективности отрицательной обратной связи (ООС) для повышения стабильности работы электронного источника, работающего в условиях интенсивной бомбардировки электродов ионами из анодной плазмы, генерируемой пучком в пространстве дрейфа пучка. Однако эти рекомендации, к сожалению, носят довольно общий характер. Например, «В этом случае к перераспределяющему электроду предъявляется еще одно дополнительное требование, заключающееся в необходимости увеличения его площади таким образом, чтобы его сторона, обращенная к эмиссионной сетке, могла перехватить максимально возможное количество ионов, влетающих из ускоряющего промежутка в пространство СПЭ, не ограничивая в то же время ток эмиссии электронов из плазмы СПЭ». Хотелось бы в данной рекомендации больше конкретики, основанной на оценочных расчетах.

3. На стр. 159 делается «Предположение о прекращении эмиссии электронов из СПЭ после выключения тока разряда», что позволяет оценить в общем токе в ускоряющем промежутке долю электронов, извлекаемых из сеточного плазменного эмиттера. В этом случае возникает два вопроса: 1) отсутствует ли эмиссия из катодной плазмы в отсутствие тока разряда? 2) как изменяются параметры анодной/пучковой плазмы за время выключения импульса тока разряда?

4. На стр. 126 путаются обозначения как «теплопроводность» и «проводимость».

5. Замечания по оформлению. На некоторых рисунках надписи выполнены на английском языке или смеси русского и английского языков (см., например, рисунки 2.8, 2.17, 3.9, 4.15). На Рис.3.20 не прорисована ось, на Рис.5.31 надпись обрезана.

Однако, отмеченные недостатки не снижают ценности диссертационной работы. Работа представляет собой законченное исследование, научная новизна и значимость которого не вызывают сомнений.


Соответствие автореферата основному содержанию диссертации

Тематика диссертационной работы и её содержание полностью соответствуют специальности 1.3.5 – «Физическая электроника». Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Заключение

Диссертация Воробьева Максима Сергеевича «Развитие источников электронов с сеточными плазменными эмиттерами на основе дугового разряда низкого давления с полым анодом» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную автором лично на высоком научном уровне, в которой на основании проведенных автором исследований разработаны положения, совокупность которых можно квалифицировать как важное научное достижение. Диссертационная работа по актуальности избранной темы, степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, их достоверности и новизне, соответствует критериям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» правительства РФ, а её заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника».

Главный научный сотрудник, советник
дирекции Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук
доктор физико-математических наук

 / Бурдаков А.В./

Подпись Бурдакова А.В. заверяю:

Ученый секретарь
ИЯФ СО РАН, к.ф.-м.н.



 / Резниченко А.В. /