

## Отзыв

### официального оппонента на диссертацию

Климова Александра Сергеевича

На тему «Генерация электронных пучков в форвакуумной области давлений на основе плазменно-эмиссионных разрядных систем с полым катодом», по специальности 01.04.04 – Физическая электроника на соискание степени доктора технических наук.

#### Актуальность избранной темы.

Интерес к плазменным источникам электронов поддерживается обнаружением у них все новых свойств, обеспечивающих применение таких источников в областях, ранее не доступных для электронно-лучевых технологий. Одной из таких областей является электронно-лучевая обработка диэлектрических материалов. Причем в полной мере возможность такой обработки реализуется использованием электронных пучков при давлениях газа, повышенных по сравнению с давлениями, традиционными для технологий, использующих электронный пучок. Процессы формирования, транспортировки и применения электронных пучков в таких условиях изучены недостаточно. В связи с вышеизложенным цель диссертационной работы Климова А.С., сформулированная как «комплексное изучение процессов эмиссии электронов, формирования и транспортировки непрерывных электронных пучков, генерируемых плазменно-эмиссионными разрядными системами на основе тлеющего разряда с полым катодом в форвакуумной области давлений, создание на основе этих исследований нового поколения форвакуумных плазменных источников электронов, способных формировать электронные пучки различной конфигурации с широким диапазоном интегральных и удельных параметров электронного пучка, обеспечивающих возможность эффективной электронно-лучевой обработки электрически непроводящих высокотемпературных керамик и других диэлектрических материалов», представляется актуальной.

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

Достижение поставленной цели потребовало решения ряда конкретных задач, среди которых особо следует выделить определение условий формирования однородной протяженной плазменной эмиссионной границы, исследование транспортировки электронного пучка в газе повышенного давления и образования пучковой плазмы, разработку плазменных источников, предназначенных для генерации электронных пучков в форвакууме, исследование возможностей таких источников применительно к обработке керамических материалов. Все перечисленные задачи успешно решены. По каждому из указанных направлений получены оригинальные результаты. В частности, показано, что формирование однородной плазмы необходимо, но не достаточно для формирования однородного по сечению электронного пучка, т.к. эмиссия электронов с протяженной плазменной границы приводит к появлению неустойчивостей, существенно изменяющих как распределение плазмы в катодной полости, так и распределение тока пучка по его сечению. Существенным вкладом в решение задачи о транспортировке ленточного электронного пучка стало определение геометрии эмиссионной системы, обеспечивающей формирование практически параллельного пучка без использования сопровождающего магнитного поля. Этот результат важен для генерации плазменных образований большой площади («плазменного листа») и последующего его использования как поставщика ионов. Несомненным достоинством диссертационной работы стала демонстрация возможности практического применения разработанных электронных источников для испарения керамики и осаждения покрытий, а также для сварки керамических деталей и спекания прессовок из оксидных порошков. Каждый из полученных результатов стал основой для формулировки выносимых на защиту научных положений, обоснованность которых подтверждается результатами экспериментов и не вызывает сомнений.



### Достоверность и новизна, полученных результатов.

Подтверждение достоверности сформулированных в диссертационной работе выводов состоит в тщательной отработке автором методики проведения экспериментов, а также в использовании параллельных методик, дополняющих друг друга. Примером такого дополнения могут быть измерения оптических спектров излучения плазмы и измерения ее масс-зарядового состава. В диссертационной работе приведен ряд новых результатов, к которым следует отнести следующее:

1. Определены условия возникновения неустойчивостей в разряде с протяженным полым катодом, приводящие к неоднородности в распределении тока по сечению электронного пучка.
2. Установлена решающая роль высоковольтного тлеющего разряда в ослаблении электрической прочности ускоряющего промежутка и в потере работоспособности плазменного электронного источника в целом.
3. Определен механизм установления потенциала изолированного коллектора, облучаемого электронным пучком.
4. Экспериментально продемонстрировано применение форвакуумного плазменного электронного источника для обработки диэлектриков, в частности, для сварки керамических деталей, испарения керамики и нанесения покрытий, спекания керамических компактов.

### Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов

Значимость исследований физических процессов генерации плазмы в разрядных системах с полым катодом, эмиссии электронов, формирования, ускорения и транспортировки электронных пучков в области повышенных давлений газа форвакуумного диапазона заключается в получении новых знаний, которые вносят существенный вклад в развитие физической электроники.

Кроме того, решена крупная научно-техническая задача создания форвакуумных плазменных источников электронов, которые имеют значительную область применений, включая обработку высокотемпературных керамик.

#### Оценка содержания диссертации, её завершенность

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Во введении обосновываются актуальность, цель, научная новизна и практическая ценность работы. Приводятся краткое содержание глав и научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе показана зависимость предельного рабочего давления газа от тока высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) в ускоряющем промежутке осесимметричного источника электронов. Найдена конфигурация электродов, при которой ток ВТР был снижен более чем в три раза. Это позволило уменьшить долю неуправляемого тока в пучке, повысить ресурс работы изоляторов и повысить давление рабочего газа. Предложен и обоснован механизм пробоя ускорительного зазора, составлена его теоретическая модель, проведены оценки для напряжения пробоя, хорошо согласующиеся с экспериментом. Показано существенное улучшение параметров источника пучка при использовании гелия в качестве рабочего газа. Разработаны методики измерения диаметра и энергетического спектра пучка, проведены измерения зависимости от параметров системы.

Во второй главе рассмотрены вопросы формирования ленточных электронных пучков, исследованы условия повышения плотности тока и однородности ее распределения по площади пучка. Проведен анализ пространственного распределения разрядных токов и плотности плазмы в источнике тока с катодной полостью, неоднородной по сечению, проведены измерения распределения плотности. Предложена качественная модель разряда, позволившая понять наблюдаемые зависимости характеристик разряда от параметров источника.



В третьей главе рассматривается генерация низкотемпературной плазмы пучком в области его транспортировки. Исследуется влияние параметров пучка и давления газа на плотность и температуру плазмы, а также на ее пространственное распределение. Исследована динамика распределения электронов пучка по энергии при транспортировке и условий зажигания плазменно-пучкового разряда.

В четвертой главе приведен ряд разработанных диссертантом конструкций форвакуумных источников электронного пучка разных конфигураций, в том числе рекордного по параметрам стационарного источника ленточного электронного пучка (10 кэВ, 0.8 А, 100х4 мм). Для них рассмотрено влияние геометрии ускоряющего промежутка на пространственные характеристики пучка.

Пятая глава содержит описание особенностей применения разработанных плазменных источников и технологий на их основе.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы и перспективы использования ее результатов.

В целом, диссертация представляет собой внутренне согласованный и завершённый труд.

#### Достоинство и недостатки в содержании и оформлении диссертации

Диссертация Климова Александра Сергеевича представляет собой подробный научный труд, имеющий несомненную ценность как для научного сообщества, так и для широкого применения полученных результатов в высоких технологиях. Тем не менее, имеются замечания по тексту диссертации.

1. В диссертации недостаточно внимания уделено описанию места проведенных работ в обширной области применения электронных пучков, в том числе с накаливаемыми катодами, в промышленности и научных исследованиях, а также сравнению с мировым уровнем.

2. На странице 41 (Рисунок 1.20) указывается, что в измеренном спектре существуют электроны с энергиями, превышающими приложенное напряжение. Это утверждение не обосновано, так как не обсуждены аппаратные функции анализатора, а объяснение дополнительного ускорения электронов в катодном падении потенциала представляется спорным.
3. В разделе 4.3(Страница 68) приведены результаты измерения потенциала изолированного металлического коллектора. При этом вопрос о допустимости переноса этих результатов на диэлектрические объекты не обсуждается.
4. В разделе 5.1.5 (Страница 204) « Расчет температурного поля...» в представленной модели не обсуждены ряд факторов, которые могут повлиять на результаты моделирования: зависимость теплопроводности от температуры, лучистая теплопроводность, охлаждение поверхности при испарении (уносе вещества) что делает модель скорее ориентиром в эксперименте, чем точным описанием процессов.

Отмеченные недостатки не затрагивают сущности научных положений, выносимых на защиту.

#### Соответствие автореферата основному содержанию диссертации.

Тематика диссертационной работы и ее содержание полностью соответствуют специальности 01.04.04 – Физическая электроника. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

#### Заключение

Диссертация Климова Александра Сергеевича на соискание ученой степени доктора технических наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований физических процессов генерации плазмы в разрядных системах с полым катодом, эмиссии электронов, формирования, ускорения и транспортировки



электронных пучков в области повышенных давлений газа форвакуумного диапазона получены новые знания, которые вносят существенный вклад в развитие физической электроники. Решена крупная научно-техническая задача создания форвакуумных плазменных источников электронов, которые имеют значительную область применений, включая обработку высокотемпературных керамик. Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

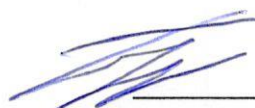
Официальный оппонент, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерной физики

им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, доктор физико-математических наук, Бурдаков Александр Владимирович.

630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

Телефон: +7 (383) 329-47-60, e-mail: A.V.Burdakov@inp.nsk.su

06. 12.2016 г.



Бурдаков А.В.

Подпись Бурдакова А.В. удостоверяю,

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, кандидат физико-математических наук,



Ракшун Я.В.