

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Золотухина Дениса Борисовича «Генерация и исследование пучковой и газоразрядной плазмы для модификации материалов и электрореактивного движения» на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника в виде научного доклада, представленной в диссертационный совет Д 003.031.01 при Институте сильноточной электроники СО РАН

### Актуальность темы

Низкотемпературная плазма и пучки ускоренных заряженных частиц нашли широкое применение во многих отраслях промышленности как эффективное средство модификации физических свойств материалов и изделий. Несмотря на глубокую степень изученности процессов и явлений, лежащих в основе механизмов структурно-фазовых превращений твёрдых тел, быстрыми темпами расширяется сфера применения технологий, основанных на пучках заряженных частиц и потоках плазмы. Это инициирует постановку новых задач, а также стимулирует расширение сферы применения пучково-плазменных технологий, развитие научного приборостроения, создание новых источников электронов, ионов, плазмы и т.д. Проблематика этих исследований настолько широка, что работы ведутся уже около 50 лет, и нет никаких признаков того, что они близки к завершению.

К категории наиболее интересных проблем данной группы относятся задачи о технологических возможностях пучковой и газоразрядной плазмы в области форвакуумных давлений. Её решение позволяет существенно снизить требования к вакуумным системам технологических установок, снять трудности, связанные с накоплением электростатических зарядов при работе с диэлектриками, повысить ускоряющие напряжения, мощность и плотность мощности пучка. Это заметно повысит функциональные характеристики и конкурентоспособность технологий, основанных на тепловых воздействиях электронных пучков. Стремление автора освоить область форвакуумных давлений понятно: возможность работы с диэлектрическими и полупроводниковыми средами существенно повышает востребованность этих результатов в промышленности.

Большой интерес представляет возможность применения полученных результатов для исследования и создания электроразрядных устройств, в частности, в миниатюрных реактивных двигателях, особенно в системах ориентации малых космических аппаратов.

Актуальность данной диссертационной работы не вызывает сомнений: результаты, приведённые в ней, существенно расширяют наши представления о технологических возможностях пучковой и газоразрядной плазмы в области форвакуумных давлений

### Анализ содержания работы

Диссертация написана в форме научного доклада, выглядит логично, последовательно, компактно, хорошо проиллюстрирована, тщательно отредактирована и в целом производит хорошее впечатление.

Структурно она состоит из введения (общая характеристика работы) и трёх разделов.

**Первый** посвящён особенностям взаимодействия электронного пучка с диэлектрической мишенью при повышенных (форвакуумных) давлениях. В нём представлены результаты исследований процессов генерации пучковой и газоразрядной плазмы в области среднего вакуума (1-100 Па) при взаимодействии электронного пучка с диэлектрической мишенью.

**Второй** раздел представляет собой описание пучково-плазменного синтеза покрытий при электронно-лучевом испарении диэлектрической мишени, причём тоже в форвакуумной области давлений. Полученные результаты позволили автору сформулировать научные основы технологий электронно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов, изделий и синтеза диэлектрических тонких плёнок.

**Третий** раздел отражает физические особенности импульсного вакуумного дугового разряда в плазменных двигателях малых космических аппаратов. В нём выполнены анализ и обобщение опыта использования этих знаний для изучения физических процессов в маломощных миниатюрных импульсных вакуумно-дуговых плазменных двигателях.

Завершается работа заключением, в котором в краткой форме приведены выводы, сформулированные по итогам выполненного исследования.

Диссертация написана на 63 страницах, содержит 42 рисунка, небольшой (13 наименований) список цитируемой литературы и библиографию статей автора, написанных в процессе её подготовки к защите (всего 35 наименований, в том числе 20 – в журналах уровня Q1 и 15 – в журналах уровня Q2) по Web of Science и Scopus.

### Научная новизна

Можно согласиться с автором, что ему удалось получить ряд результатов, которые, безусловно, обладают научной новизной и представляют ценность для развития радиационных и плазменных технологий. Прежде всего хотелось бы отметить следующие достижения.



1. Выявлен определяющий вклад в ионизационные процессы вторичной электронной и ионно-электронной эмиссии с поверхности мишени, облучаемой электронным пучком при форвакуумных давлениях.
2. Исследованы параметры пучковой плазмы при форвакуумных давлениях и определены условия инициирования пучково-плазменного разряда при распространении электронного пучка в свободном пространстве и его инжекции в диэлектрическую полость.
3. Установлена степень влияния давления и состава газа в форвакуумной области давлений на тепловой баланс диэлектрической мишени, облучаемой электронным пучком.

#### Достоверность и обоснованность полученных результатов

подтверждается тем, что они носят непротиворечивый характер, взаимно дополняют друг друга и соответствуют современным представлениям о физических основах рассматриваемых явлений.

Их высокое качество обусловлено систематическим характером исследований, использованием современных приборов и способов измерений, надёжных методик обработки результатов экспериментов.

Основные материалы диссертации хорошо представлены в научной литературе и были апробированы на крупных международных конференциях.

#### Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций

Научные положения и основные выводы, выполненные по итогам диссертационного исследования, сформулированы строго исходя из результатов, полученных в ходе выполнения работы.

Они подтверждены корректностью поставленных задач, сопоставлением их с надёжными литературными данными, современными представлениями о физических основах, механизмах и моделях рассматриваемых явлений.

#### Практическая ценность полученных результатов и рекомендаций по их использованию

1. Разработан метод получения многослойных диэлектрических или металлодиэлектрических покрытий с помощью электронно-лучевого испарения.
2. Показаны значительные возможности применения форвакуумных технологий обработки материалов с использованием пучковой и газоразрядной плазмы для обработки поверхности.
3. Продемонстрирована высокая эффективность осаждения боросодержащих защитных покрытий на элементы вакуумно-дуговых

двигателей малых космических аппаратов для повышения их функциональных параметров и надёжности.

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы при разработке технологий модификации материалов и изделий в области форвакуумных давлений.

### Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследований и научной новизне соответствует паспорту специальности 01.04.04 – физическая электроника, направления исследований:

п.1 - эмиссионная электроника, включая процессы на поверхности, определяющие явления эмиссии, эмиссионную спектроскопию и все виды эмиссии заряженных частиц;

п.3 - вакуумная электроника, включая методы генерирования потоков заряженных частиц, электронные и ионные оптические системы, релятивистскую электронику;

п.6 - изучение физических основ плазменных и пучковых технологий, в том числе модификации свойств поверхности, нанесение тонких пленок и пленочных структур.

### Замечания по работе

В целом работа производит очень хорошее впечатление. Но есть некоторые замечания, на которых хотелось бы остановиться.

1. Формат работы (т.е. диссертация в виде доклада) таков, что читатель вынужден задуматься о том, как убедиться в надёжности доказательств корректности защищаемых положений. В тексте диссертации нет комментариев на эту тему. Но защищаемые положения – это ключевой элемент работы. Их доказательство является критерием присуждения учёной степени. Было бы желательно, чтобы защищаемые положения формулировались там же, где обсуждаются результаты исследований, лежащие в их основе.
2. Хотелось бы видеть чётко сформулировать выводы по итогам обсуждения полученных результатов как в каждом из разделов, так и по диссертации в целом. Их отсутствие существенно мешает полноценному восприятию выполненной работы.



3. Не понятно, почему автор исключил из списка своих публикаций патенты, относящиеся к этой работе (их было немало!). Они бы не ухудшили её содержание.
4. Есть ощущение того, что слабо просматривается связь между исследованиями пучковой и газоразрядной плазмы с одной стороны и процессами в электрореактивных двигателях с другой. Поэтому третий раздел несколько выпадает из её контекста и выглядит как самостоятельная работа. Это обстоятельство нарушает единство работы.
5. Мне кажется, что раздел, посвящённый абляции вещества анода под действием электронного пучка, выглядел бы более убедительно, если бы автор начал с того, что попытался бы математически смоделировать этот процесс. Он бы убедился в том, что делать эти эксперименты на меди и латуни – не лучшая идея, так как эти металлы при весьма большом коэффициенте теплопроводности (из-за этого тепло быстро уходит из зоны воздействия электронов) испаряются не очень быстро, и не создают большого импульса отдачи.

Есть металлы, которые имеют гораздо более высокую массовую скорость испарения при тех же температурах (например, кадмий, примерно на 5-6 порядков). Их применение в качестве рабочего тела электрореактивного двигателя на первый взгляд выглядит более перспективным. Моделирование позволило бы выявить наиболее выгодные условия для проведения этих экспериментов и предсказать их результаты.

### Заключение

Необходимо отметить, что высказанные здесь замечания не влияют на нашу, в целом положительную, оценку этой работы.

Диссертация Золотухина Дениса Борисовича «**Генерация и исследование пучковой и газоразрядной плазмы для модификации материалов и электрореактивного движения**» в форме научного доклада, представленная на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04- физическая электроника, является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей большое значение для развития физических представлений о механизмах генерации и воздействия пучковой и газоразрядной плазмы на диэлектрики и элементы электрореактивных двигателей космических аппаратов.

Выполненный анализ показал, что по содержанию, объёму исследований, новизне, своей научной и практической значимости работа вполне соответствует

требованиям ВАК РФ, пп. 9-14 раздела II «Положения о присуждении учёных степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор Золотухин Денис Борисович заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04-физическая электроника

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, профессор, руководитель научно-образовательного центра Б.П. Вейнберга на правах кафедры Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета

*В. Кривобоков*

Кривобоков Валерий Павлович

15 августа 2022 г.

Юридический адрес: 634034, Томск, проспект Ленина 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

e-mail: [krivobokov@tpu.ru](mailto:krivobokov@tpu.ru) тел. +7 913 802 4801

Подпись проф. Кривобокова В.П. подтверждаю.

Проректор по науке и трансферу технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, доктор физико-математических наук

Сухих Леонид Григорьевич

17 августа 2022 г.

