

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Юшкова Юрия Георгиевича** «**Электронно-лучевое нанесение многофункциональных диэлектрических покрытий форвакуумными плазменными источниками**», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника».

### Актуальность темы диссертации

Актуальность темы диссертационной работы определяется достаточно высоким потенциалом практической значимости разрабатываемой технологии формирования **диэлектрических покрытий при использовании форвакуумных плазменных источников**. Улучшение поверхностных свойств деталей механизмов и машин функционирующих в условиях интенсивных механических, тепловых и коррозионных воздействий является важной задачей. Особое место занимают покрытия на основе диэлектрических материалов: оксидов, нитридов или боридов, имеющие высокую твердость, температурную и коррозионную стойкость. В широко распространенных пучково-плазменных технологиях формирования покрытий, метод электронно-лучевого испарения обладает более высокой производительностью технологического процесса. Решение технологической проблемы зарядки поверхности испаряемой диэлектрической мишени при формировании покрытий позволяет решить развиваемый метод и расширить практическое использование таких покрытий..

### Содержание работы

Диссертация включает в себя введение, шесть глав, заключение, приложение список цитируемой литературы, состоящий из 427 источников наименования.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, формулируется цель и задачи диссертационной работы, ее научная новизна и практическая ценность, изложены защищаемые положения и, описана структура диссертации.

**В первой главе** приводится обзор современного состояния исследований в области создания диэлектрических покрытий с использованием низко-температурной плазмы, лазерного излучения и электронных пучков. На основании проведенного анализа обоснованы и сформулированы задачи исследования..

**Вторая глава** посвящена методике и технике проведения исследований, представлено описание экспериментального и диагностического оборудования, а также методов изучения свойств и измерения параметров покрытий. Представлены маршруты технологических операций. Созданные для проведения исследований экспериментальные установки оснащены форвакуумными плазменными источниками электронов, средствами именно «безмасляной» откачки рабочих камер, системой контроля напуска газов, стабилизированными источниками электропитания, системами линейного перемещения и вращения образцов, а также диагностическим оборудованием для контроля тепловых режимов электронно-лучевого воздействия и измерения параметров плазмы в

условиях интенсивного испарения диэлектрических материалов. Приводится описание методов повышения плотности мощности электронных пучков для обеспечения испарения высокотемпературных диэлектриков.

**В третьей главе** представлены результаты исследований процессов электронно-лучевого нагрева, плавления и испарения как проводящих, так и диэлектрических мишеней с использованием форвакуумного плазменного источника непрерывного пучка электронов. Обсуждаются вопросы генерации плазмы при распространении пучка к мишени с учетом присутствия в плазме ионов испаряемой мишени. Приведены результаты НИР по влиянию теплопроводности плазмы на тепловой баланс поверхности мишени в процессе её нагрева. Определена величина давления газа в рабочей камере когда снижается величина заряда на поверхности мишени.

**Четвертая глава** посвящена синтезу диэлектрических покрытий на металлической поверхности методом электронно-лучевого испарения твердотельных непроводящих мишеней в форвакуумной области давлений.

Уделено внимание результатам исследования свойств таких покрытий. Характерная скорость осаждения покрытий 0,5 мкм/мин при толщине в 10 –ки мкм.

В качестве мишеней использована алюмооксидная керамика, кристаллический бор, нитрид бора. Представлены результаты и формирования многослойных покрытий на основе керамики и металла.

**В пятой главе** представлены результаты исследований по азотированию поверхности металла в плазме формируемой электронным пучком в условиях форвакуумного давления. Изменение давления газа и плотности мощности пучка позволяет варьировать условия формирования азотированного слоя. Исследования процесса азотирования проведено при использовании титана в качестве азотируемого материала. В настоящей главе достаточно широко представлены результаты исследования параметров формируемой плазмы и их связь с параметрами пучка. Отмечается, что в форвакуумном диапазоне давлений повышенные значения микротвердости достигаются за более короткий временной промежуток азотирования (порядка 1 ч) чем в других методах азотирования. Сокращение времени азотирования авторы связывают с формированием более плотной плазмы и повышенным содержанием атомарного азота в ней.

**Шестая глава** посвящена примерам использования полученных в результате проведения диссертационных исследований покрытий, подтверждающие перспективность их практического использования. Сформировано борсодержащее покрытие на поверхности межэлектродного изолятора электрореактивного (микрокатодного) плазменного дугового

двигателя. Оно позволяет многократно увеличить время его безаварийной работы.

Покрyтия из алюмооксидной и алюмонитридной керамики на поверхности монолитных интегральных схем СВЧ-диапазона могут быть использованы в качестве изолирующих и теплопроводящих покрyтий.

Покрyтие из алюмооксидной керамики, нанесенное на торец потенциального электрода разрядной системы электрогидравлической установки, увеличивает вероятность инициирования разряда, снижает время запаздывания развития разряда, а также делает потенциальный электрод менее восприимчивым к ударному разрушению и эрозии.

**В разделе заключение сформулированы основные выводы по результатам выполнения диссертационного исследования.**

К основным результатам диссертационной работы, имеющим научную новизну, можно отнести следующие:

1. Определены основные физические механизмы, обуславливающие процессы генерации пучковой плазмы форвакуумными плазменными источниками непрерывных электронных пучков, а также нейтрализацию отрицательного заряда, вносимого ускоренными электронами на поверхность испаряемой диэлектрической мишени, что обеспечило возможность её эффективного электроннолучевого испарения, создания плазмы или нагрева поверхности при осуществлении электронно-лучевого азотирования.

2. Для источников электронов с плазменным катодом, функционирующих в форвакуумной области давлений, выявлены особенности процессов электронно-лучевого синтеза диэлектрических покрyтий, а также электронно-лучевого азотирования.

3. Определены и реализованы условия, обеспечивающие эффективное нанесение оксидных, боридных и нитридных покрyтий с наилучшими функциональными свойствами и характеристиками для их практического применения в технологиях модификации поверхности различных материалов, подверженной интенсивным механическим, тепловым и коррозионным воздействиям.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации обеспечиваются корректностью постановки цели и задачи исследования, комплексным подходом к их решению с использованием современных экспериментальных методик и аналитического оборудования. Достоверность полученных экспериментальных результатов обусловлена корректным применением современных диагностических методов и электрофизического оборудования. а также наличием публикаций в рецензируемых журналах входящих в список журналов рекомендованных ВАК РФ.**

**Научная и практическая значимость** диссертационной работы заключается в том, что решена крупная научно-техническая задача, заключающаяся в разработке научных основ технологии электронно-лучевого синтеза многофункциональных покрытий на основе твердых соединений оксидов, боридов и нитридов, с использованием форвакуумных плазменных источников электронов. При этом могут быть существенно расширены возможности нанесения покрытий методом электронно-лучевого испарения за счет включения в номенклатуру испаряемых мишеней диэлектрических материалов. Результаты проведенных исследований вносят также существенный вклад в понимание физических процессов генерации пучковой плазмы при взаимодействии пучков с диэлектрическими и металлическими мишенями.

Важным результатом диссертационного исследования, имеющим высокий потенциал практического использования является предложение и реализация электронно-лучевого азотирования поверхности изделий при использовании источников электронов работающих в форвакуумной области давлений.

### **Замечания по диссертационной работе**

- В главе 3 автор анализирует вопросы потоков энергии из облучаемой мишени при воздействии электронного пучка в форвакуумной области давления. В зависимости от температуры мишени рассматриваются потери энергии определяемые излучением из мишени и теплопроводностью плазмы формируемой электронным пучком без учета охлаждения мишени за счет интенсивного испарения мишени (см. например рис 3.28 диссертации и рис 9 автореферата). Необходимого обоснования этого в работе не приведено.

- Автор в качестве подтверждения положительного результата использования разрабатываемого метода осаждения высокопрочных покрытий приводит в ряде разделов сопоставление по увеличению твердости исходной мишени, вместо приведения данных по твердости именно этого типа покрытия и сопоставления данных с другими методами формирования покрытий (см. например вывод 1 к главе 4).

- Надписи на ряде рисунков автореферата (3,4,6 и др.) имеют очень маленький шрифт, затрудняющий их распознавание. Фотографии (рис 12, 17) автореферата требуют дополнительных пояснений по тексту для их понимания.

### **Заключение**

Однако эти замечания не снижают значимость полученных в диссертационной работе научных результатов.

Представленный автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Работа прошла апробацию на конференциях, опубликованы в рецензируемых журналах рекомендованных ВАК.

Диссертационная работа **Юшкова Юрия Георгиевича** выполнена на высоком научно-методическом уровне и представляет собой завершённое научное исследование, которая вносит вклад в развитие существующих

научное исследование, которая вносит вклад в развитие существующих экспериментальных и теоретических представлений о методах электронно-лучевого формирования покрытий в форвакуумной области давлений.

Диссертация отвечает требованиям п.9. «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор **Юшков Юрий Георгиевич** заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника».

Официальный оппонент,

заведующий Научно-производственной лабораторией "Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий" Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, профессор, доктор технических наук Ремнев Геннадий Ефимович

Адрес: 634000, Россия, г. Томск, проспект Ленина, д.2 стр.4, Инженерная школа новых производственных технологий, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Тел.: (3822) 606405

Факс: (3822) 606405

E-mail: remnev@tpu.ru

Подпись Г.Е. Ремнева заверяю:

Ученый секретарь ТПУ

Ананьева О.А.

