

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.

Диссертационная работа посвящена исследованиям, направленным на изучение процессов получения защитных и функциональных покрытий при электронно-лучевом испарении мишеней из материалов, обладающих низкой электрической проводимостью, таких как керамика и бор, с использованием форвакуумных плазменных источников электронов. Покрытия на основе таких соединений, как правило, имеют высокую твердость, температурную и коррозионную стойкость, обладают хорошими электроизоляционными свойствами. Поэтому создание таких покрытий обеспечивает существенное повышение эксплуатационных характеристик различных изделий и деталей. Возможность создания покрытий обусловлена использованием электронного пучка, генерируемого при давлении газа, повышенном по сравнению с давлениями, традиционными для вакуумных электронно-лучевых технологий. В связи с этим цель диссертационной работы Юшкова Ю.Г., сформулированная как «комплексное изучение процессов создания защитных и функциональных оксидных, боридных и нитридных покрытий при электронно-лучевом испарении мишеней из материалов, обладающих низкой электрической проводимостью, с использованием форвакуумных плазменных источников электронов», представляется актуальной.

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, полученных результатов.

Подтверждение достоверности сформулированных в диссертационной работе выводов состоит в тщательной отработке автором методики проведения экспериментов, в

использовании параллельных методик, дублирующих и дополняющих друг друга. Например, исследование масс-зарядового состава пучковой плазмы проводилось как обращенным времяпролетным масс-спектрометром, так и модернизированным квадрупольным масс-спектрометром, или, для контроля температуры при нагреве керамики электронным пучком, использовались термопары, оптические пирометры и тепловизор.

В диссертационной работе приведены новые результаты, к которым можно отнести следующее:

1. Установлено, что в процессе взаимодействия электронного пучка с непроводящей керамической поверхностью при энергии электронного пучка уровня 10 кэВ повышение давления приводит к снижению абсолютного значения отрицательного потенциала поверхности от нескольких киловольт до ста вольт. Это позволяет обеспечить электронно-лучевой нагрев, плавление и испарение различных керамик.
2. Установлено, что при электронно-лучевом нагреве керамики в форвакуумной области давлений на начальных этапах роста температуры керамической мишени вклад теплопроводности остаточного газа в тепловом балансе процесса соизмерим с тепловым излучением, и в этих условиях реализуется возможность управления скоростью нагрева керамики в результате изменения давления и рода газа.
3. Выявлено, что в форвакуумном диапазоне давлений оптимальная для электронно-лучевого испарения диэлектрических материалов плотность мощности электронного пучка составляет, в зависимости от испаряемого материала, 1–30 кВт/см².
4. Экспериментально продемонстрировано применение полученных диэлектрических покрытий для ряда практических задач.

Значимость полученных автором результатов.

Исследования физических процессов, сопровождающих процессы нанесения диэлектрических многофункциональных покрытий, вносят существенный вклад в развитие новых методов получения покрытий в целом. Решена крупная научно-техническая задача, заключающаяся в разработке, с использованием форвакуумных плазменных источников электронов, научных основ технологии электронно-лучевого синтеза многофункциональных покрытий на основе твердых соединений оксидов, боридов и нитридов, имеющих высокие эксплуатационные параметры, характеристики и свойства. Расширены возможности нанесения покрытий методом электронно-лучевого испарения за счет использования в качестве испаряемых мишеней диэлектрических материалов, в том числе и высокотемпературных керамик.

Оценка содержания диссертации, её завершенность.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения. Полный текст диссертации включает 321 страницу, содержит 211 рисунков и 19 таблиц, а список литературы - 427 источников.

Во введении обоснованы актуальность, цель, научная новизна, научная и практическая ценность работы, приведены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава является обзорной и представляет собой рассмотрение современного состояния исследований в области создания неметаллических покрытий с использованием низкотемпературной плазмы, лазерного излучения и электронных пучков. В ней представлен критический анализ методов и оборудования для создания диэлектрических покрытий и азотсодержащих слоев, на основе которого сформулированы задачи исследований диссертации.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных установок, оснащенных форвакуумными плазменными источниками электронов, и диагностическому оборудованию, предназначенному для исследования электронного пучка и пучковой плазмы в процессах электронно-лучевого нанесения покрытий. Приводятся конструкции и характеристики созданного для исследования диагностического оборудования, масс-спектрометров и зондов.

Третья глава диссертационной работы посвящена детальным исследованиям процессов электронно-лучевого нагрева, плавления и испарения металлических и диэлектрических мишеней с использованием форвакуумного плазменного источника непрерывного пучка электронов. Показано, что при электронно-лучевом испарении металлической мишени в форвакуумном диапазоне давлений в области транспортировки электронного пучка генерируется многокомпонентная плазма, которая включает в себя ионы рабочего газа, ионы остаточной газовой атмосферы, а также ионы испаряемого металла. Выявлена немонотонная зависимость температуры электронов при испарении металлов электронным пучком в форвакуумной области давлений, предложено объяснение такой зависимости.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена электронно-лучевому синтезу диэлектрических покрытий на металлической поверхности, методом электронно-лучевого испарения твердотельных керамических и борсодержащих мишеней в форвакуумной области давлений. Определены оптимальные параметры электронного пучка для процесса электронно-лучевого синтеза покрытий, продемонстрировано повышение тепло- и электроизоляционных свойств, а также коррозионной стойкости изделий, на которые наносились покрытия.

Пятая глава диссертационной работы посвящена изучению процесса электронно-лучевого азотирования на примере титана, реализуемого в области форвакуумного диапазона давлений. Выявлены зависимости роста доли ионов атомарного азота в пучковой плазме с повышением давления азота и увеличением тока и энергии электронного пучка, получены слои нитрида титана с твердостью 13 ГПа, определены временные характеристики процесса азотирования.

В шестой главе представлено несколько примеров применений покрытий, полученных в результате электронно-лучевого испарения диэлектрических мишеней в форвакуумной области давлений, для задач практики, приведены результаты по улучшению параметров устройств, на которые наносились покрытия.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Достоинство и недостатки в содержании и оформлении диссертации.

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

1. В разделе 3.1.2 (стр. 106) в формуле 3.1 должно стоять Z_a^2 , а по физическому смыслу формула это длина свободного пробега, считать ее длиной релаксации электронного пучка можно при определенных условиях, которые в диссертации не указаны.
2. В разделе 3.2.2 (стр.121-124) рассматривается баланс энергии нагреваемой мишени, в котором учитывается только тепловое излучение поверхности. В этом рассмотрении не учитывается, что мишень интенсивно испаряется, и, следовательно, дополнительно охлаждается. Этот эффект может быть сильным. Кроме того, делается непонятное предположение, что температура всей мишени одинакова, а испарение идет лишь с площадки с диаметром, сравнимым с диаметром пучка. Эти вопросы в диссертации не разъяснены.
3. В таблице 3.1 (стр.110) не указана погрешность измерения изотопного состава ионов металлов в плазме. Далее говорится, что отклонение от природного распределения составляет 1%--3%, что может быть связано с индивидуальными особенностями материалов, определяемыми местом его добычи. Это утверждение без указания

точности измерений выглядит не убедительным.

4. Зависимости концентрации пучковой плазмы от давления газа, а также от энергии электронов, приведенные на рисунках 3.3 и 3.4, аппроксимируются нелинейными кривыми, а в выводах указывается, что упомянутые зависимости являются линейными. Что же правильно?
5. Имеются недостатки и в оформлении диссертации. Например, на стр.136 подпись на оси рисунка – сопротивление, хотя по смыслу это удельное сопротивление; на стр. 149 встречается английский язык; на стр.161 не описана часть рисунка 4.5.

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 правильно отражает содержание диссертации.

Заключение

Диссертация Юшкова Юрия Георгиевича, представленная на соискание ученой степени доктора технических наук, является научно-квалификационной работой, в которой, на основании выполненных автором исследований физических процессов создания многофункциональных диэлектрических покрытий, получены новые знания, которые вносят существенный вклад в развитие физической электроники. Решена крупная научно-техническая задача создания диэлектрических многофункциональных покрытий, которые имеют значительную область применения.

Диссертационная работа соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения ВАК РФ о присуждении ученых степеней», а ее автор, Юшков Юрий Георгиевич, заслуживает

присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук, профессор, советник дирекции Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

630090 Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 11, <http://www.inp.nsk.su>
+7 (383) 329-47-99, e-mail: a.v.burdakov@mail.ru

«12» марта 2021 года



Бурдаков Александр Владимирович

Подпись Бурдакова Александра Владимировича удостоверяю:

Учёный секретарь ИЯФ СО РАН, кандидат физико-математических наук

«12» марта 2021 года



Аракчеев Алексей Сергеевич