

ОТЗЫВ

на автореферат диссертационной работы **Юшкова Юрия Георгиевича** «**Электронно-лучевое нанесение многофункциональных диэлектрических покрытий форвакуумными плазменными источниками**», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности **01.04.04 – физическая электроника**

Диссертационная работа посвящена **актуальной** проблеме исследования и разработки малогабаритных источников электронов, работающих при форвакуумном давлении и научных основ технологии электронно-лучевого синтеза многофункциональных покрытий на основе твердых соединений оксидов, боридов и нитридов, имеющих высокие эксплуатационные характеристики.

Полученные Юшковым Ю.Г. экспериментальные результаты отличаются существенной новизной и представляют интерес с точки зрения дальнейшего развития как малогабаритных и простых источников электронов, так и методов нанесения покрытий с испарением материала электронным пучком в форвакуумной области давлений.

Автором проведен большой объем экспериментальных исследований параметров электронного пучка, формируемой им плазмы. С использованием предложенного и разработанного масс-спектрометра в результате комплексного исследования установлены особенности и закономерности изменения концентрации и состава пучковой плазмы в зависимости от давления газа, энергии электронов, плотности мощности электронного пучка, материала облучаемой мишени. В зависимости от плотности мощности электронного пучка исследованы различные режимы электронно-лучевого испарения керамик. Впервые показано, что при определенных параметрах электронного пучка имеет место взрывное вскипание материала керамической мишени.

Определены условия эффективной нейтрализации заряда электронов на поверхности диэлектрической мишени в зависимости от давления газа в экспериментальной камере. Установлено, что при электронно-лучевом нагреве керамики в форвакуумной области давлений на начальных этапах роста температуры керамического образца вклад теплопроводности остаточного газа в тепловой баланс на облучаемой мишени соизмерим с тепловым излучением, что является основанием для управления режимами нагрева керамических изделий.

Показано, что при плотности мощности электронного пучка достигающей 10 кВт/см^2 скорость испарения керамики на основе оксида алюминия составляет 5 г/ч , что обеспечивает скорость нанесения покрытия $\sim 0,5 \text{ мкм/мин}$. Полученные покрытия отличаются низкой шероховатостью, высокой микротвердостью, улучшенными тепло- и электроизоляционными свойствами. Определены условия оптимального нанесения оксидных и борсодержащих покрытий электронно-лучевым испарением твердотельных мишеней.

Установлены закономерности азотирования технически чистого титана в плазме азота, формируемой электронным пучком в форвакуумной области давлений. Показано, что энергия электронов существенно влияет на соотношение атомарных и молекулярных ионов в плазме. Определены условия азотирования титана существенно улучшающие макроскопические свойства приповерхностных слоев.

В результате широкомасштабных исследований решена крупная научно-техническая задача, заключающаяся в разработке с использованием плазменных источников электронов в форвакуумной области давлений, научных основ технологии электронно-лучевого синтеза многофункциональных покрытий на основе твердотельных оксидов, боридов и нитридов, имеющих высокие эксплуатационные характеристики.

Достоверность результатов диссертационной работы **не вызывает сомнения** и подтверждается систематическим характером исследований,

использованием независимых дублирующих экспериментальных методик, сравнением полученных результатов с результатами других исследователей, широкой апробацией результатов работы на ряде международных конференций.

Результаты работы опубликованы в 50 статьях в хорошо известных рецензируемых научных журналах, в том числе в статьях, цитируемых в базах данных Web of Science и Scopus. По результатам исследований получено 6 патентов.

Исходя из содержания автореферата, можно сделать следующие замечания:

1. В автореферате говорится о высокой адгезии осаждаемых покрытий, однако, не приводятся конкретные значения и закономерности ее изменения в зависимости от разных условий осаждения.

2. На рисунке 10 представлено распределение плотности тока пучка электронов по поверхности диэлектрической мишени, но не указана методика измерения плотности тока. В форвакуумной области давлений нейтрализация заряда на поверхности мишени обеспечивается обратным током электронов в пучковой плазме. Соответственно, обратный ток будет влиять на измерение тока и плотности тока электронного пучка.

3. Демонстрируя существенное улучшение макроскопических свойств титана в результате электронно-лучевого азотирования (рис.19), автор указывает на рост протяженности модифицированного слоя и увеличения концентрации азота, как в приповерхностных слоях, так и в глубине образца. Однако в автореферате не приводятся конкретные распределения концентрации азота по глубине образца в зависимости от режимов азотирования. Учитывая специфические особенности титана, обусловленные его геттерными свойствами, на его азотирование оказывает существенное влияние формирование оксидов, блокирующих диффузию азота. Из автореферата не ясно, каким образом решается эта проблема при электронно-лучевом азотировании в форвакуумной области давлений.

Замечания не носят принципиального характера и не снижают ценности полученных результатов.

В целом, на основании анализа автореферата диссертации, считаю, что диссертационная работа **Юшкова Ю. Г. «Электронно-лучевое нанесение многофункциональных диэлектрических покрытий форвакуумными плазменными источниками»** по актуальности, объему экспериментального материала, важности полученных результатов, по уровню их обсуждения, научной новизне и практическому значению удовлетворяет всем требованиям, которые предъявляются к докторским диссертациям, а ее автор, **Юшков Юрий Георгиевич**, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.04 - физическая электроника.

Заведующий научной лабораторией
высокоинтенсивной имплантации ионов
д.ф.-м.н, профессор
ralex@tpu.ru
+7(3822)70-56-94
Россия, 634050, Томск,
пр. Ленина, 2 стр.4


Рябчиков Александр Ильич

Подпись Рябчикова А.И. заверяю,
Ученый секретарь Федерального
государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Национальный
исследовательский Томский политехнический
университет»




О.А. Ананьева