

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.268.04,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФГБОУ ВО «ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕН-
НЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИ-
КИ» МИНОБРНАУКИ РОССИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 31.03.2021 г. № 207

О присуждении **Юшкову Юрию Георгиевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «**Электронно-лучевое нанесение многофункциональных диэлектрических покрытий форвакуумными плазменными источниками**» по специальности **01.04.04 – «Физическая электроника»** принята к защите 28 декабря 2020 г., протокол заседания № 202, диссертационным советом Д 212.268.04, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ФГБОУ ВО «ТУСУР»), Министерства науки и высшего образования РФ, 634050, Томск, пр. Ленина, д. 40, приказ о создании совета № 1030/нк от 30.12.2013 г.

Соискатель **Юшков Юрий Георгиевич**, 1986 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «**Форвакуумный импульсный плазменный источник электронов для модификации поверхности диэлектрических материалов**» защитил в 2012 году, в диссертационном совете, созданном на базе ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»; работает старшим научным сотрудником лаборатории плазменной электроники кафедры физики в ФГБОУ ВО «ТУСУР».

Диссертация выполнена на кафедре физики ФГБОУ ВО «ТУСУР».

Научный консультант – доктор технических наук, профессор **Окс Ефим Михайлович**, заведующий кафедрой физики ФГБОУ ВО «ТУСУР».

Официальные оппоненты:

Бурдаков Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, про-

фессор, советник дирекции Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск;
Гаврилов Николай Васильевич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник лаборатории пучков частиц Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург;

Ремнев Геннадий Ефимович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск,

дали **положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация – Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова», (АО «НИИЭФА»), г. Санкт-Петербург, в своем положительном отзыве, подписанном доктором технических наук, начальником лаборатории КЛ-8 НТЦ «Синтез» АО «НИИЭФА» Косоговым Сергеем Леонидовичем и доктором физико-математических наук, научным руководителем – заместителем генерального директора по технологиям электродвижения АО «НИИЭФА» Филатовым Олегом Геннадьевичем и утвержденном генеральным директором Сакадынцом Евгением Анатольевичем, указала, что диссертация Юшкова Ю.Г. является научно-квалификационной работой, в которой, на основании выполненных исследований, решена крупная научно-техническая проблема, заключающаяся в разработке научных основ технологии высокопроизводительного электронно-лучевого осаждения многофункциональных диэлектрических покрытий, включая покрытия на основе высокотемпературных керамик. Полученные результаты могут быть использованы для решения широкого круга задач при нанесении функциональных покрытий на поверхность материалов, важны и значимы для науки и практики. Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением правительства РФ от 24.09.13 №842 (ред. от

20.07.2014), а ее автор заслуживает присвоения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника».

Соискатель имеет 86 опубликованных работ, в том числе 50 работ по теме диссертации, из которых 34 работы в рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК, рекомендованных для публикации результатов диссертаций. При этом 18 статей в журналах, входящих в первый и второй квартили базы данных научного цитирования Web of Science. Общий объем публикаций составляет 32,3 печатных листа, из них личный вклад автора диссертации – 28,5 печатных листа.

Наиболее **значимые работы** по диссертации:

1. Different stages of electron-beam evaporation of ceramic target in medium vacuum / Yu.G. Yushkov, D.B. Zolotukhin, E.M. Oks, A.V. Tyunkov // Journal of Applied Physics. – 2020. – No 127. – P. 113303.
2. Effect of working gas on the electron-beam heating of a ceramic target in the forevacuum pressure range / D.B. Zolotukhin, E.M. Oks, A.V. Tyunkov, Yu.G. Yushkov, A.A. Zenin // Vacuum. – 2020. – Vol. 179. – P. 109500.
3. Ion composition of a multicomponent beam plasma formed by electron-beam evaporation of a boron-containing target in medium vacuum / Yury G. Yushkov, Efim M. Oks, Andrey V. Tyunkov, Denis B. Zolotukhin // Plasma Processes and Polymers. – 2020. – Vol. 17, Issue 9. – P. 2000057.
4. Improvement of Microcathode Arc Thruster Lifetime by Deposition of Boron-Containing Coating / Denis B. Zolotukhin, Andrey V. Tyunkov, Yury G. Yushkov, Efim M. Oks, and Michael Keidar // Journal of Propulsion and Power. – 2020. – Vol. 36, No 5. – P. 744–751.
5. On the effect of ceramic target composition on coatings deposited by electron-beam evaporation at forevacuum pressure / Yu.G. Yushkov, E.M. Oks, K.V. Oskomov, A.V. Tyunkov, E.V. Yakovlev, A.Yu. Yushenko, A.A. Plaskeev, D.B. Zolotukhin // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46, Issue 17. – P. 27641–27646.
6. Nitriding of titanium in electron beam excited plasma in medium vacuum / A.V. Tyunkov, D.A. Golosov, D.B. Zolotukhin, A.V. Nikonenko, E.M. Oks, Yu.G. Yushkov, E.V. Yakovlev // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 383. – P. 125241.

7. On the influence of electron-beam metal evaporation on parameters of beam plasma in medium vacuum / D.B. Zolotukhin, V.A. Burdovitsin, E.M. Oks, A.V. Tyunkov, Yu.G. Yushkov // *Physics of Plasmas*. – 2019. – Vol. 26. – P. 053512.
8. Modified quadrupole mass analyzer RGA-100 for beam plasma research in forevacuum pressure range / D.B. Zolotukhin, A.V. Tyunkov, Yu.G. Yushkov, E.M. Oks // *Review of Scientific Instruments*. – 2015. – Vol. 86, Issue 12. 10.1063/1.4937606.
9. Beam-plasma discharge in a dielectric cavity by electron beam injection / D.B. Zolotukhin, M.I. Lomaev, E.M. Oks, A.V. Tyunkov, Yu.G. Yushkov // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2019. – Vol. 28, No 3. – P. 035018 (1-11).
10. Электронно-лучевое испарение керамики в форвакуумном диапазоне давлений / А.С. Климов, А.А. Зенин, Е.М. Окс, М.В. Шандриков, Ю.Г. Юшков // *Прикладная физика*. – 2016. – № 3. – С. 40–45.

На диссертацию и автореферат поступило 10 отзывов. Все **отзывы положительные**.

1) Отзыв из «Института теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», подписанный заместителем директора по научной работе по ускорительному направлению, доктором технических наук Кулевым Тимуром Вячеславовичем. Замечаний в отзыве нет.

2) Отзыв из Национального Технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», подписанный доктором технических наук, профессором Кузьмичевым Анатолием Ивановичем. Замечания, сформулированные в виде вопросов:

Автор определил максимальные допустимые мощности нагрева отдельных материалов для испарения; по-видимому, это для случаев неподвижного места нагрева (места падения электронного луча). Но на практике предпочитают применять системы со сканированием по поверхности диэлектрического материала. В этом случае требуются или возможны более высокие мощности луча. Отсюда вопрос, какие максимальные мощность и ускоряющее напряжение могут быть получены в

потенциале с данным типом электронного источника? Интересно в связи с этим сравнение с процессами испарения диэлектриков другими типами электронных пушек, в частности, с холодным катодом на основе высоковольтного тлеющего разряда (последние также работают с форвакуумом, а их мощность может достигать сотни киловатт). Также имеется вопрос о дугообразовании в полном катоде и потенциальном сроке безотказной работы электронной пушки.

3) Отзыв из Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет», подписанный профессором кафедры физики, электротехники и электроники, доктором технических наук, доцентом Мартенсом Владимиром Яковлевичем. Замечание:

Не понятно, как получена формула (3) на с. 17. Нет расшифровки входящих в нее величин.

4) Отзыв из Национального исследовательского Томского политехнического университета, подписанный заведующим лабораторией высокоинтенсивной имплантации ионов, доктором физико-математических наук, профессором Рябчиковым Александром Ильичем. 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 при-

водятся 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.

5) Отзыв из Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, подписанный профессором, доктором технических наук Семеновым Александром Петровичем. Замечания:

1. Утверждение, "увеличение твердости поверхности образцов связано с формированием в приповерхностном слое фазы нитрида титана с кубической решеткой" (с. 22), представляется неубедительным, т.к. не приводится рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ покрытий TiN, так и покрытий Al₂O₃, AlN (с.20) и BN(с. 23);

2. В разделе "Список работ, опубликованных автором по теме диссертации" (с. 32) включена ссылка п. 54. "Пат. 175576 Российская Федерация. Установка для производства буронабивных свай / Юшков Ю.Г., и др., - Оpubл. 11.12.2017, Бюл. №35", не имеющая отношения к теме диссертации.

6) Отзыв из Научно исследовательского Томского государственного университета, подписанный профессором кафедры физической и коллоидной химии, доктором физико-математических наук Курзиной Ириной Александровной. Замечания: Из автореферата не совсем понятно, какого химического состава/соотношения элементов была использована керамика в экспериментах, описанных в 4 главе и чем обусловлен выбор именно такого состава керамических образцов. Влияет ли состав на качество получаемых переходных слоев? Согласно рисунку 13, толщина переходной зоны (зоны взаимодействия) составляет до 500 нм, в которой концентрация элементов достаточна для формирования новых фаз. Были ли обнаружены дополнительные фазы в переходной зоне или наблюдается ли формирование аморфного слоя с градиентом по концентрации элементов?

7) Отзыв из Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института физики прочности и материаловедения СО РАН, подписанный главным научным сотрудником, заведующим лабораторией физики наноструктурных биокomпозитов, профессором, доктором физико-математических наук, Шаркеевым Юрием Петровичем. Замечания: Замечаний нет.

8) Отзыв из Витебского государственного университета имени П.М. Машерова, подписанный доктором технических наук, профессором, лауреатом Государственной премии России, В.А. Груздевым и кандидатом технических наук, доцентом, первым проректором Д.А. Антоновичем. Замечания:

В то же время из текста автореферата не совсем понятна методика (возможность) отождествления потенциала плавающего зонда с потенциалом поверхности испарения керамического тела.

9) Отзыв из Университета Линчёпинг, Швеция, подписанный ассистентом профессора, кандидатом технических наук Жирковым Игорем Владимировичем. Замечания:

Из замечаний можно отметить неясность с описанием проведенной модификации квадрупольного масс-спектрометра. Указано, что в масс-спектрометре внутренний ионизатор был заменен на некую систему извлечения ионов из плазмы. Однако, что насчет зависимости эффективности работы квадруполья от энергии извлеченных ионов? На рис.5 обращает на себя внимание отсутствие так называемого «zeroblast» эффекта, заключающегося в наличии сигнала высокой интенсивности в области малых масс и высоком уровне шума. Проводилась ли какая-либо дополнительная работа с настройкой квадруполья на энергию извлекаемых из плазмы ионов? Проводилась ли оценка, либо измерение энергии этих ионов? Что означает «область масс-фильтра» на рисунке 11. Если на левых изображениях пучок розовый, то на правом, он синий. С чем это связано? С изменением в параметрах съемки? Или с изменением параметров самой плазмы? Так же можно отметить отсутствие описания на кривых рис. 22.

10) Отзыв из Иркутского государственного университета, подписанный заведующим кафедрой общей и космической физики, доктором физико-математических наук, профессором Паперным Виктором Львовичем. Замечания:

1. Рис. 10.б, касающийся «распределения плавающего потенциала зондов, установленных в диэлектрической мишени» требует пояснений: каким образом эти зонды измеряли потенциал диэлектрика, облучаемого высокоэнергичным электронным пучком.

2. Непонятен смысл рис.12, к которому, к тому же, отсутствуют пояснения.

3. Полученные в Главе 5 результаты показывают перспективность использования предложенного метода азотирования изделий из титана. Однако учитывая выраженный прикладной, технологический характер диссертации, автору следовало более обстоятельно сравнить этот метод с апробированными и широко используемыми в промышленности ионно-плазменными технологиями.

4. Из рис.12. неясно, в чем заключается эффект понижения скорости деградации поверхности керамического изолятора плазменного микродвигателя после нанесения покрытия на основе бора.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью своими достижениями в области физики газового разряда и низкотемпературной плазмы, включая технологические применения пучков заряженных частиц и плазмы, наличием публикаций в соответствующей сфере исследований и способностью определить научную и практическую ценность диссертации, а также дать рекомендации по использованию полученных в ней результатов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана научная концепция электронно-лучевого синтеза диэлектрических покрытий (оксидов, боридов, нитридов и др.) на основе использования форвакуумных плазменных источников электронов;

предложены оригинальные технические решения ключевых узлов форвакуумных плазменных источников электронов, а также определены оптимальные режимы работы электронного источника и параметры электронного пучка, обеспечивающие наибольшую скорость синтеза и достижение высоких параметров и характеристик покрытий;

доказана перспективность электронно-лучевой технологии создания диэлектрических покрытий;

введено новое понятие "электронно-лучевой синтез диэлектрических покрытий в форвакуумной области давлений".

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны положения о физических механизмах влияния параметров электронного пучка, плазмы, плазмообразующего газа и паров материала мишени на процессы при электронно-лучевом синтезе диэлектрических и металлических покрытий;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использован комплекс независимых методик исследований, включающий: масс-спектрометрию и зондовую диагностику плазмы; численные оценки и компьютерное моделирование процессов в плазме, на поверхности и в газе; электронную микроскопию, рентгенофазовый анализ и микротвердомерию и другие современные методы исследования поверхности, обеспечившие решение проблемы синтеза диэлектрических покрытий на основе керамики и бора;

изложены доказательства возможности электронно-лучевого синтеза диэлектрических покрытий при непосредственном нагреве и испарении материалов с низкой электрической проводимостью в форвакуумной области давлений газа;

раскрыты существенные проявления эффекта немонотонной зависимости температуры электронов плазмы от соотношения концентрации атомов металла и газа в нейтральной плазмообразующей среде;

изучены факторы, вносящие существенный вклад в механизм охлаждения нагреваемой электронным пучком диэлектрической мишени в форвакуумной области давлений;

проведена модернизация существующих физических моделей: нейтрализации отрицательного поверхностного заряда на мишени при облучении ее электронным пучком, а также влияния на параметры пучковой плазмы процесса испарения металлической мишени.

Значение полученных соискателем результатов исследования для прак-

тики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены: методики измерения параметров пучковой плазмы в условиях электронно-лучевого испарения металла и керамики, а также методики получения электроизоляционных и борсодержащих покрытий, использование которых подтверждено актами АО "НИИ ПП", ООО "НПК ТЭТа", ООО "Фотон", Университета им. Дж. Вашингтона, представленными в Приложении к диссертации;

определены перспективы использования форвакуумных плазменных электронных источников в технологиях электронно-лучевого нагрева и испарения диэлектрических материалов;

создана система практических рекомендаций для осуществления электронно-лучевого синтеза диэлектрических покрытий;

представлены методические рекомендации по способам и режимам нанесения покрытий электронно-лучевым методом в форвакуумной области давлений.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ исследования имеют систематический характер, а их результаты, полученные с использованием дублирующих методик измерений, характеризуются удовлетворительным совпадением с результатами численного моделирования и теоретическими оценками, а также при практической реализацией полученных научных положений и выводов;

теория описания процессов, реализуемых при электронном пучковом и плазменном воздействии на поверхность твердых тел, согласуется с экспериментальными результатами, полученными в диссертации;

идея базируется на анализе и обобщении передового опыта отечественных и зарубежных научных коллективов, а также на многолетних результатах исследований коллектива соискателя - кафедры физики "ТУСУР";

использованы сравнения авторских данных и данных, полученных ранее по исследованию и разработке плазменных источников электронов и получению диэлектрических покрытий другими плазменными методами;

установлено качественное совпадение полученных соискателем результатов с ли-

тературными данными, опубликованными в независимых источниках;
использованы апробированные экспериментальные методики, обеспечивающие получение достоверных результатов: измерение диаметра электронного пучка с помощью вращающегося диска, измерения параметров плазмы одиночными зондами Ленгмюра, пирометрические измерения температуры нагреваемой и испаряемой поверхности мишеней, масс-спектрометрия плазмы, электронная микроскопия и микротвердометрия.

Личный вклад соискателя состоит в его определяющей роли в формулировании целей и задач, создании экспериментальных установок, проведении экспериментов, анализе и интерпретации полученных результатов, подготовке публикаций по результатам исследования, использовании результатов исследования для решения ряда практических задач. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

На заседании 31.03.2021 г. диссертационный совет принял решение присудить Юшкову Юрию Георгиевичу ученую степень доктора технических наук.

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве **15** человек, из них **6** докторов наук по специальности 01.04.04, участвовавших в заседании, из **22** человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – **15**, против – **0**.

Зам. председателя

диссертационного совета



Михайлов М.М.

Учёный секретарь

диссертационного совета

Акулиничев Ю.П.

31 марта 2021