

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института физического
материаловедения Сибирского отделения
Российской академии наук (ИФМ СО РАН),

д.ф.-м.н.



Номоев А.В.

« 22 » февраля 2019 г.

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию САХАРОВА Юрия Владимировича «Структура и свойства пористых оксидных пленок, модифицированных углеродом», на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.04 - физическая электроника.

Изучение диссертации и публикаций в рецензируемых научных журналах подтверждает, что диссертация является научно-квалификационной работой. В полной мере соответствует требованиям и критериям, установленным действующим постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» с изменениями постановления Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. № 335 "О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней».

Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. В диссертации приводятся сведения о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов. Предложенные автором диссертации решения строго аргументированы и оценены по сравнению с известными техническими решениями. Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Диссертацию Ю.В. Сахарова можно признать научным трудом, в котором изложены новые научно обоснованные технические, технологические решения и разработки, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие Российской Федерации. В частности, физико-химических основ синтеза пористых пленок SiO_2 , TiO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 посредством ионного распыления составной мишени из Si, Ti, Ta либо Nb и графита в кислородной плазме тлеющего разряда, на принципе самоорганизации синтеза твердой фазы SiO_2 , TiO_2 , Ta_2O_5 либо Nb_2O_5 и газообразных фаз CO и CO_2 , разрыхляющих твердую структуру с образованием пор, установлении связей между концентрацией осаждаемого

углерода и образованием разных модификаций пористой структуры. Выяснения строения, состава, электрических, оптических и механических свойств пористых пленок толщиной 40-400 нм. В оценке универсальности механизма воздействия углерода на пористость и электрофизические параметры пленок оксидных неорганических диэлектриков, формируемых в кислородной плазме тлеющего разряда и имеющих важное прикладное значение в микро- и нанoeлектронике. Кроме того, характер результатов диссертации имеет важное значение для развития критических технологий Российской Федерации, в частности, «Технологии получения и обработки функциональных наноматериалов» и приоритетного направления Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации «Переход ... к новым материалам и способам конструирования...».

Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 09-08-99072-р_офи и № 11-08-98056-р_сибирь_a. В рамках Постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 "О мерах государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Актуальность избранной темы обуславливается неослабевающим интересом исследователей к поиску и изучению физико-химических процессов формирования пористых пленок неорганических оксидных диэлектриков, подходящих к применению в микро- и нанoeлектронике, фотонике, оптоэлектронике в качестве изоляционных, просветляющих, антиотражающих покрытий солнечных батарей, световодов, интерференционных фильтров, датчиков влажности, газовых, химических и биологических сенсоров. Притом, представляет важный научный и практический интерес понимание процессов формирования пористой структуры с развитой поверхностью.

К началу выполнения настоящей работы оставались недостаточно изученными особенности процессов создания пористых неорганических оксидных пленок с возможностью реализации новых подходов в типовых технологических операциях изготовления интегральных схем, расширению электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники, получению новых научных знаний о структуре и свойствах пористых оксидных пленок, формируемых в вакуумных условиях. Целесообразность исследований подтверждается обстоятельным критическим анализом реальной ситуации, сложившейся в последнее время при нанесении пористых пленок с регулируемыми размерами и плотностью пор, их новых физических качеств.

Диссертация Ю.В. Сахарова, строго соответствует требованиям, предъявляемым к научным работам, направляемым в печать, содержит совокупность новых результатов и научных положений, обоснованность и достоверность которых сомнений не вызывает.

К наиболее значимым относятся:

Доказательство формирования самоорганизующейся мезопористой структуры неорганических оксидных диэлектриков с эффективным характерным размером пор 10-40 нм и выраженной пористостью в диапазоне 10-75 %.

Выявление отсутствия углерода в объеме пленки диэлектрика как в чистом виде, так и в виде соединений (карбидов), вследствие его выделения в газовую фазу в составе соединений CO и CO₂, приводящему к разрыхлению пленки и формированию развитой самоорганизующейся пористой структуры.

Утверждение, что уменьшение эффективной диэлектрической проницаемости в 1,6–2, тангенса угла диэлектрических потерь в 3–5, проводимости в 5–10, электрической прочности в 4–10 раз, с изменением механизма электропроводности и чувствительности к внешним факторам является следствием образования в пленках мезопористой структуры, что расширяет существующие научные знания о механизмах токопереноса в пористых материалах.

Установление комплексности характера процесса электрической формовки и основной причины изменения кинетики образования формованных каналов термоионизационным расширением газа в порах дополняет фундаментальные знания о поведении неоднородных диэлектрических слоев в сверхсильных электрических полях. Высвобождение газового компонента оксидной пленки приводит к увеличению давления на наноразмерный толщиной 30 нм верхний электрод. В результате происходит снижение времени образования формованных каналов до 10–20 мкс из локальных шарообразных вздутий с начальным диаметром порядка 10–50 нм, плотность и диаметр которых определяется параметрами пористости диэлектрической пленки.

Выявление роста плотности эмиссионного тока в 5–15 раз, с формованных структур металл – диэлектрик – металл. Уменьшение оптической щели Тауца на 5-7 % и снижение механических напряжений в 1,5-2 раза связано с наличием пористой структуры у оксидных пленок SiO₂, TiO₂, Ta₂O₅, Nb₂O₅. Наряду с этим установлено снижение износостойкости в 1,5-2, микротвердости и модуля Юнга в 1,2-1,4 и адгезии в 1,5-1,8 раз.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается систематическим характером исследований, применением независимых экспериментальных методик, сопоставлением эксперимента и расчета, сравнением полученных результатов с уже признанными результатами других исследователей, созданием слоистых наноструктур полифункционального назначения, используемых в устройствах микро- и нанoeлектроники.

Значима практическая ценность работы. Предложенные Ю.В. Сахаровым технологические процессы формирования пористых оксидных пленок SiO₂, TiO₂, Ta₂O₅, Nb₂O₅ при относительно низких парциальных давлениях кислорода ~1,3 Па, строго аргументированы и критически оценены по сравнению с известными принципиальными техническими решениями. На основе формованных структур с пористым диэлектриком

проведена разработка высокоэффективных металл-диэлектрик-металл катодов, быстродействующих с расширенным диапазоном чувствительности датчиков влажности емкостного типа, «синих» светодиодов с высоким квантовым выходом, ассиметричных трековых мембран с односторонней диффузией (осмосом), темплейтных шаблонов на термически нестойких полиэтилентерефталатных пленках, волноводных радиаторов рентгеновского излучения, мемристорных структур. При этом, как свидетельствуют прилагаемые акты, результаты исследований использованы в АО «НПФ «Микран» (Томск), АО «НПП «Восток» (Новосибирск), АО «НИИПП» (Томск), АО «СКТБ РТ» (Великий Новгород), ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), ФГНУ НИИ ЯФ (Томск), ФГНУ СФТИ (Томск).

Наряду с достаточным изложением в диссертации новых научно обоснованных технических и технологических решений, внедрение которых вносит заметный вклад в развитие страны, обеспечивающих разработку физико-химических основ синтеза пористых пленок SiO_2 , TiO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 в плазме тлеющего разряда, установление связей между структурой, составом, электрическими, оптическими и механическими свойствами и имеющих значительное прикладное значение их применения в микро- и наноэлектронике, - в диссертации обнаруживаются следующие замечания:

- раздел «*Степень разработанности темы исследования*» (с. 7-8) чрезмерно перегружен перечислением фамилий исследователей, развивающих знания в области пористых материалов, и занимает две страницы текста, правильнее привести в списке литературы (с. 258-294) библиографические ссылки на работы, упоминаемых на (с. 7-8) по фамилиям исследователей;

- степень модификации пленок представляется не концентрацией (количеством) распыленных атомов углерода, а площадью S_c распыляемого графита (с. 43, абзац 3), выраженной в процентах, такое представление допустимо при условии, если плотность тока распыляющих ионов одинакова на всех графитовых дисках с равной по площади их распыляемой поверхностью;

- требует пояснения особый подход к распылению составной мишени (с. 44, рисунок 2.1), по-видимому, уменьшение S_c достигается выниманием графитовых дисков, неясно заполняются ли места выемок дисков и расширяется ли при этом площадь распыления ионами основы Si, Ta, Ti или Nb, т.к. может привести к увеличению толщины пленок и, как следствие, к снижению их пористости (с. 255, п. 2);

- в автореферате (с. 14-15, рисунок 1), исходя из методики образования паров углерода, указано «*Шаг изменения относительной площади графита на составной мишени составлял 6 %, что соответствовало одному углеродному диску...*», непонятно 6 % принимается от площади составной мишени, либо от площади зоны распыления;

- требует пояснения (с. 55, рисунок 2.9) - обрыв хода зависимости диаметра пор в модифицированных пленках SiO_2 от степени их модификации

углеродом при $S_c < 20\%$;

- неубедительно выглядит (с. 45, строка 10 сверху) высказывание «...магнитная отклоняющая система позволяет отвести плазму от подложки...», численное значение индукции магнитного поля не указано, скорее отводятся плазменные и быстрые вторичные электроны, - ионы, вряд ли;

- в автореферате (с. 11, абзац 3) фраза «Ввиду отсутствия у автора некоторого аналитического оборудования, а также опыта работы на нем, часть измерений была проведена сторонними лицами и организациями...» указана не к чему, необходимость сторонних измерений очевидно.

Несмотря на отмеченные замечания. Принимая во внимание наукометрические показатели Ю.В. Сахарова (российский индекс научного цитирования – 153, научную продуктивность ученого, индекс Хирша – 6), высокий научный уровень коллективной монографии и 57 печатных работ по теме диссертации, из них 16 в рецензируемых изданиях из перечня ВАК с импакт-фактором 0,268 - 0,424. Апробацию результатов диссертации на 30 представительных научных форумах, в том числе на 23 международных, из них 7 индексировано на поисковых платформах Web of Science и Scopus. Достаточную степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации и выдвигаемых автором для публичной защиты, их достоверность и новизну. Предложенные автором новые принципиальные технические решения строго аргументированы и критически оценены по сравнению с другими известными решениями, защищены 6 патентами на изобретения и используются на 4 промышленных предприятиях и в 3 научных и образовательных учреждениях с приложением актов внедрения.

Считаю, диссертационная работа «Структура и свойства пористых оксидных пленок, модифицированных углеродом» полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, ее автор САХАРОВ Юрий Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Заведующий лабораторией физического материаловедения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФМ СО РАН), доктор технических наук по специальности 01.04.04 - физическая электроника, профессор по специальности 01.04.04 - физическая электроника,

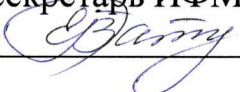
Семенов Александр Петрович.

670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6,

телефон: 8(3012)433184,

e-mail: semenov@ipms.bscnet.ru

А.П.Семенов

подпись А.П.Семенова удостоверяю
Ученый секретарь ИФМ СО РАН,
к.ф.-м.н.  Е.В.Батуева

« 22 » февраля 2019 г.