

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.268.04,
созданного на базе ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники» Минобрнауки РФ, по диссертации на соискание
ученой степени доктора технических наук
по специальности 01.04.04 – физическая электроника

Аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета от 03.04.2019 № 158

О присуждении Сахарову Юрию Владимировичу ученой степени доктора технических наук.

Диссертационная работа Сахарова Ю.В. «Структура и свойства пористых оксидных пленок, модифицированных углеродом» по специальности 01.04.04 – физическая электроника на соискание ученой степени доктора технических наук принята к защите 22 ноября 2018 г. (протокол № 151) диссертационным советом Д 212.268.04, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) Министерства науки и высшего образования РФ (634050, Томск, пр-т Ленина, 40), приказ о создании совета № 1030/нк от 30.12.2013 г.

Соискатель Сахаров Юрий Владимирович 1976 года рождения защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Влияние примеси углерода на формовку и электрофизические параметры МДМ-структур» в 2006 году в диссертационном совете Д 212.268.04, созданным на базе ТУСУР. В 2010 году было присвоено звание доцента по кафедре физической электроники (ФЭ). В настоящее время работает доцентом на кафедре ФЭ ТУСУР.

Диссертация выполнена на кафедре ФЭ ТУСУР.

Научный консультант – заведующий кафедрой ФЭ ТУСУР, доктор технических наук, профессор Троян Павел Ефимович.

Официальные оппоненты:

Коваль Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники

Института сильноточной электроники Сибирского отделения РАН (ИСЭ СО РАН)
г. Томск;

Семенов Александр Петрович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заведующий лабораторией физического материаловедения ФГБУ Института физического материаловедения Сибирского отделения РАН, г. Улан-Удэ;

Домашевская Эвелина Павловна, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующая кафедрой физики твердого тела и наноструктур ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ВГУ»), г. Воронеж,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), в своем положительном отзыве, подписанном заместителем заведующего кафедрой микро- и наноэлектроники по научной работе, профессором, д.ф.-м.н. Мошниковым Вячеславом Алексеевичем и доцентом кафедры микро- и наноэлектроники Александровой Ольгой Анатольевной, утвержденным директором департамента науки СПбГЭТУ «ЛЭТИ» д.т.н., профессором В.В. Лучининым, указали, что диссертационная работа Сахарова Ю.В. представляет собой законченное научное исследование, содержащее решения актуальных научно-технических задач, имеющих новизну и практическую значимость. Исследования, изложенные в диссертационной работе Сахарова Ю.В., полностью соответствует паспорту специальности 01.04.04 – физическая электроника. По актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости, достоверности полученных результатов и обоснованности выводов диссертация Сахарова Юрия Владимировича соответствует требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

По результатам исследований соискателем опубликовано 57 работ, из них 16 – в рецензируемых изданиях из перечня ВАК (из них 1 статья индексирована в базе данных Scopus), 3 статьи в журналах, не входящих в перечень ВАК, 7 докладов на российских конференциях, 23 доклада на международных конференциях (из них 6 индексировано базами данных Scopus и 1 – Web of Science), 1 монография, 6 патентов, 1 отчет по НИР.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Троян П.Е. Электрическая формовка тонкопленочных структур металл – диэлектрик – металл в сильных электрических полях / П.Е. Троян, Ю.В. Сахаров. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2013. – 248 с.

2. Способ получения пористого диоксида кремния: патент на изобретение № 2439743 Рос. Федерация: МПК: H01L 21/316, B82B 3/00 / С.П. Усов, Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян; заявитель и патентообладатель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – № 2010118778/28; заявл. 11.05.2010; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.

3. Чувствительный элемент датчика углеводородов: патент на полезную модель № 101197 Рос. Федерация: МПК: G01N 27/12 / С.П. Усов, Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян; заявитель и патентообладатель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – № 2010116215/28; заявл. 23.04.2010; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.

4. Troyan P.E. An electron-microscopic study of SiO₂ films with a carbon impurity / P.E. Troyan, Yu.V. Sakharov, A.A. Zhigal'skii, A.S. Makrushin // Russian Physics Journal. – 2006. – February. – Vol. 49, Issue 2. – P. 219–220.

5. Сахаров Ю.В. Особенности синтеза и свойств формованной МДМ-структуры с пористым диэлектриком / Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян // Известия вузов. Электроника. – 2014. – № 6. – С. 9–13.

6. Сахаров Ю.В. Структура и свойства оксидных диэлектриков, модифицированных углеродом / Ю.В. Сахаров // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. – 2018. – Т. 10, № 2. – С. 12–19.

На диссертацию и автореферат поступили **18** отзывов, все положительные.

1. Отзыв из ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский «Московский институт электронной техники», подписан доктором технических наук, профессором кафедры интегральной электроники и микросистем М.Г. Путрей. В отзыве имеется замечание: в тексте автореферата сказано, что кинетика изменения электрофизических свойств структуры на ВЧ при сорбции/десорбции воды значительно выше, чем на более низких частотах, и время установления равновесия составляет 5 мин. Однако в явном виде частота, соответствующая данному времени, не указана.

2. Отзыв из ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», подписан заместителем заведующего кафедрой теоретическая и общая электротехника по научной работе, доктором технических наук, профессором А.И. Чивенковым. Сделаны следующие замечания:

1) в тексте автореферата приводятся доказательства гипотезы о том, что снижение электропроводности обусловлено захватом носителей ловушками, локализованными, преимущественно, на поверхности пор. При этом носители заряда, захваченные на ловушках, создают объемный заряд, приводящий к снижению электропроводности. Однако информация о его величине в явном виде отсутствует;

2) возможно ли применение управляемого эффекта создания объёмного заряда на поверхности оксидных плёнок структур полупроводниковых приборов и, в частности, полевых транзисторов?

3) на мой взгляд, упущена одна из актуальных сфер применения пористых материалов – в водородных топливных элементах (ячейках) в качестве протонообменной мембраны.

3. Отзыв из ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», подписан ведущим научным сотрудником института нефти и газа, доктором технических наук, профессором П.Ю. Гуляевым и кандидатом физико-математических наук, доцентом института нефти и газа В.И. Зеленским. Сделаны замечания:

1) в тексте автореферата не отражена методика определения пористости методом емкостной порометрии;

2) отсутствуют данные о том, как влияет модификация углеродом на эмиссионные свойства отдельно взятого формованного канала.

4. Отзыв из ФГБОУ ВО «Курский государственный университет», подписан научным руководителем НИЦ физики конденсированного состояния, доктором физико-математических наук, профессором Ю.А. Неручевым. В отзыве имеется замечание: проводя анализ зависимости пористости пленки от её толщины, автор не сообщает о минимальном размере толщины, при которой пористость существенно влияет на свойства пленки.

5. Отзыв из Башкирского государственного университета, подписан заведующим кафедрой физической электроники и нанофизики, доктором физико-математических наук, профессором, Р.З. Бахтизиным. Отзыв без замечаний.

6. Отзыв из ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», подписан членом-корреспондентом АЭН РФ, доктором технических наук, профессором кафедры электроники и наноэлектроники М.Д. Воробьевым. Сделаны замечания:

1) из текста автореферата непосредственно не следует неслучайный выбор направления работы – модификация пористых структур углеродом в плазме тлеющего разряда;

2) всесторонне рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с технологией получения, изучением и качественными объяснениями найденных свойств модифицированных структур. В то же время недостаточно внимания уделено тому, где и в какой мере полученные структуры по своим конкретным количественным параметрам могут составить конкуренцию известным и применяемым на практике. Так, например, показано, что модифицированные структуры МДМ позволяют существенно увеличить абсолютные значения эмиссионных токов, однако эффективность таких эмиттеров находится на уровне очень низких значений, не превышающих долей процента. Кроме того, в автореферате нет сведений о стабильности эмиссионных токов, о зависимости её от времени работы и об уровне шумов в стационарном режиме. Аналогичные замечания можно отнести и к работе структур в качестве газовых сенсоров;

3) в автореферате не нашло должного отражения такое важное свойство рассматриваемых объектов, как деградация полученных структур, от которого, в

целом, зависят перспективы практического использования. Отсутствуют её количественные оценки, механизмы существования и предложения по снижению.

7. Отзыв из ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э Баумана), подписан заведующим кафедрой «Электронные технологии в машиностроении», доктором технических наук, профессором Ю.В. Панфиловым. Сделано замечание: не представлено обоснование преимущества выбранного метода нанесения оксидного покрытия по сравнению с другими вакуумными методами, например, комбинированного ВЧ магнетронного распыления мишени из диоксида кремния и ионно-лучевого осаждения углерода с варьированием в широком диапазоне плотности потока и энергии.

8. Отзыв из ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», подписан доктором физико-математических наук, профессором, В.М. Березиным. Сделано замечание (вопрос): в главе 5, посвященной исследованию физических свойств образцов, отсутствует информация об их атомно-кристаллической структуре. Между тем параметры этой структуры позволили бы существенно помочь в понимании эффектов, исследуемых в диссертации.

9. Отзыв из ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный университет», подписан доктором технических наук, профессором кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники А.А. Величко. Сделаны замечания:

1) в автореферате не приводится прямое сравнение результатов предлагаемой качественной модели пористой структуры с экспериментальными данными;

2) в автореферате не приводятся конкретные (предполагаемые) параметры приборов, в которых планируется использование пористых диэлектриков;

3) из приведенных данных не ясно, какими преимуществами и по каким параметрам будут обладать приборы с использованием пористых диэлектриков.

10. Отзыв из Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, подписан доктором физико-математических наук, старшим научным сотрудником В.Г. Павловым. Отзыв без замечаний.

11. Отзыв из ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова», подписан заведующим кафедрой электроники и информационных технологий, доктором технических наук, профессором Р.Ш. Тешевым и заведующим лабораторией материалов и компонентов твердотельной электроники, кандидатом химических наук, доцентом Д.С. Гаевым. Сделаны замечания:

1) известно, что температура подложки играет существенную роль в формировании структуры пленки в процессе осаждения. К сожалению, в автореферате нет информации о результатах этих исследований;

2) на наш взгляд, полезным было бы рассмотрение структуры экспериментальных пористых пленок в приближении модели структурных зон (например, в рамках модели Торнтонна).

12. Отзыв из ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», подписан доктором технических наук, профессором кафедры «Медицинская кибернетика и информатика» В.П. Фандеевым. Сделаны замечания:

1) некорректно, слишком широко сформулирован объект исследования на с. 8 автореферата, не сформулирован предмет исследования;

2) цель работы содержит только постановку научной задачи исследования без указания ожидаемой пользы, ожидаемого эффекта от её решения;

3) не сформулирована решаемая научная проблема, не обоснованы противоречия, порождающие научную проблему;

4) соискателем не указаны критерии, которым отвечает диссертация, представленная на соискание учёной степени доктора технических наук, в соответствии с пунктом 9 «Положения о присуждении учёных степеней» и авторская оценка соответствия научно-квалификационной работы этим критериям.

13. Отзыв из ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого», подписан заведующим кафедрой проектирования и технологии радиоаппаратуры, заслуженным деятелем науки РФ, доктором

физико-математических наук, профессором М.И. Бичуриным и доктором технических наук, профессором кафедры проектирования и технологии радиоаппаратуры В.М. Петровым. Приведено одно замечание: в автореферате не приведены преимущества выбранного метода нанесения оксидного покрытия перед традиционными методами.

14. Отзыв из ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого», подписан доктором физико-математических наук, профессором кафедры общей и экспериментальной физики А.Ю. Захаровым. Сделано замечание: отсутствие как в автореферате, так и в тексте диссертации даже упоминания о фундаментальных теоретических и экспериментальных результатах, полученных в харьковской школе материаловедов и физиков. Эти результаты опубликованы в ряде журнальных статей, а также во многих монографиях (Л.С. Палатник, И.И. Папилов. Эпитаксиальные пленки, М.: Наука, 1971; Л.С. Палатник, П.Г. Черемской, М.Я. Фукс. Поры в пленках, М.: Энергоиздат, 1982; Я.Е. Гегузин. Физика спекания, М.: Наука, 1984 и др.).

15. Отзыв из ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА), подписан Президентом МИРЭА – Российского технологического университета доктором физико-математических наук, профессором, академиком РАН А.С. Сиговым. Сделаны замечания:

1) в автореферате нет достаточных сведений о структуре и механизмах модификации пленок углеродом (приведены только данные РЭМ): в каком виде и количестве углерод, наблюдаемый на ИК спектрах, остается в сформированных пленках (образует химические связи, остается на стенках и пр.), наблюдается ли дефицит кислорода, каков разброс размеров «стержней» матричного материала (из приведенного рис. 2 видно, что он очень велик) и какова дисперсия пор, наблюдается ли пространственное упорядочение? Изучались ли способы гидрофобизации пленок в связи с большим количеством в них остаточных гидроксидов?

2) одним из важнейших применений пористых пленок оксида кремния автор считает их использование в качестве изолирующего диэлектрика в системах многоуровневой металлизации. Материал для таких применений должен обладать не только низкой диэлектрической проницаемостью (менее 2,5), но и комплексом

физических параметров для его интеграции в полупроводниковые технологии: размер пор менее 1–1.5 нм, модуль Юнга более 5 ГПа, стойкость к воздействию плазмы, адгезия к барьерам и металлам, малые утечки, высокие напряжения пробоя и др. В автореферате нет сведений об исследовании подобных параметров полученных материалов.

3) электрические измерения были выполнены в вакуумной камере, видимо, из-за высокой гигроскопичности пористого материала. Остается неясным, как стабилизировать параметры материала в условиях реальных устройств.

16. Отзыв из ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», подписан доктором технических наук, ведущим научным сотрудником лаборатории аналитической спектроскопии и метрологии наночастиц А.Д. Левиным. Сделаны замечания:

1) на с. 34 указывается, что «разработанная технология является перспективной для создания просветляющих покрытий широкой номенклатуры». При этом не поясняются хотя бы кратко те преимущества, по сравнению с существующими способами создания таких покрытий, на которые можно рассчитывать;

2) в изложении материала имеется ряд терминологических неточностей, например, на с. 19 обсуждается «резкое увеличение поглощения на длине волны $\nu=2350 \text{ см}^{-1}$. Подобные утверждения встречаются в автореферате и дальше. Между тем, приведенные численные значения и размерность соответствуют не длине волны, а волновому числу (или частоте).

17. Отзыв из Белорусского государственного университета, подписан доктором физико-математических, профессором кафедры физики твердого тела В.М. Анищиком. Сделано замечание: неудачная формулировка основополагающего принципа при проведении исследований. Любое серьезное исследование должно быть объективным.

18. Отзыв из Национального университета «Львовская политехника», подписан кандидатом технических наук, доцентом кафедры защиты информации З.А. Шандрой. Отзыв без замечаний.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается

наличием ученой степени доктора наук, их широкой известностью своими достижениями по тематике исследований и опытом работы в данной области знаний, наличием публикаций, близких к проблемам работы соискателя, авторитетом в научном сообществе, способностью определить научную и практическую ценность диссертации, а также дать рекомендации по использованию ее результатов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны: основы синтеза пористых оксидных диэлектрических пленок на основе SiO_2 , TiO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 , модифицированных углеродом в плазме тлеющего разряда, с возможностью управления их структурой, составом, электрическими, оптическими и механическими свойствами; качественная модель формирования пористой структуры тонких оксидных пленок, модифицированных углеродом;

предложены научно-обоснованные гипотезы о роли углерода в формировании структуры пленок, а также о его влиянии на пористость, состав, электрические, оптические и механические свойства оксидных диэлектрических пленок на основе SiO_2 , TiO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 ;

доказана общность механизма воздействия углерода на пористость и электрофизические параметры пленок оксидных неорганических диэлектриков, формируемых в плазме тлеющего разряда.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны роль углерода в плазме тлеющего разряда в формировании структуры оксидных диэлектриков SiO_2 , TiO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 ;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использован:** новый подход к проблеме формирования пористых слоев неорганических диэлектриков;

изложены факторы и причинно-следственные связи влияния условий осаждения на структуру и свойства оксидных диэлектрических пленок на основе SiO_2 , TiO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 ;

раскрыты несоответствия: между химическим составом диэлектрических пленок на основе SiO_2 , TiO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 и степенью их модификации углеродом;

параметрами процесса электрической формовки и степенью модификации пленок оксидных диэлектриков SiO_2 , TiO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 углеродом;

изучены механизмы влияния углерода в плазме тлеющего разряда на формирование структуры оксидных диэлектриков SiO_2 , TiO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 ;

проведена модернизация существующих представлений о влиянии углерода на кинетику процесса электрической формовки структур металл – диэлектрик – металл.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены: метод формирования мезопористых оксидных пленок нанометровой толщины, позволяющий управлять их структурой, пористостью, электрическими, оптическими и механическими свойствами; конструкция датчика влажности с увеличенным быстродействием и расширенным диапазоном чувствительности;

определены перспективы применения пористых оксидных пленок в качестве просветляющих покрытий для синих светодиодов на основе GaN, ассиметричных мембран, применяемых для фильтров обратного осмоса, изолирующих слоев с низкой диэлектрической проницаемостью, активных слоев ненакаливаемых катодов на основе структур металл – диэлектрик – металл, а также датчиков влажности и углеводородов;

создана экспериментальная модель мемристорной структуры на основе слоев пористого диоксида титана, модифицированного углеродом;

представлены: методика повышения плотности эмиссионного тока при одновременном снижении деградиационных процессов в МДМ-катадах на основе формованных МДМ-структур; способ повышения внешнего квантового выхода синих светодиодов на основе GaN; новый подход к расширению функционала и номенклатуры ассиметричных мембран, применяемых для фильтров обратного осмоса; концепция по созданию совершенных волноводных радиаторов рентгеновского излучения на основе многослойных тонкопленочных структур.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ: результаты выполнены с применением современного сертифицированного диагностического и измерительного

оборудования, поверенного в установленном порядке; показана воспроизводимость экспериментальных результатов, полученных на различном оборудовании с применением разных методик;

теория согласуется с опубликованными ранее экспериментальными данными известных работ других авторов по аналогичной и смежной тематике;

идея базируется на обобщении передового опыта отечественных и зарубежных авторов, а также на многолетних наработках коллектива кафедры физической электроники;

установлено качественное совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными, а также с опубликованными ранее экспериментальными данными других авторов по аналогичной тематике; **качественное и количественное** совпадение результатов косвенных экспериментов с визуальными данными (микрофотографиями), а так же результатов, полученных на различном оборудовании с применением разных методик;

использованы статистическая обработка и статистически значимый объем экспериментальных данных, современные методики сбора и обработки экспериментальных данных.

Личный вклад соискателя состоит в:

планировании экспериментов, приготовлении экспериментальных образцов, проведении основной части экспериментов и измерений, анализе, сопоставлении, интерпретации и обобщении полученных экспериментальных результатов; формулировке целей и задач исследования, научных выводов по каждой главе диссертации, а также обобщенного вывода по диссертационной работе в целом; разработке качественной модели пористой структуры тонких оксидных пленок, модифицированных углеродом; статистической обработке экспериментальных данных, а также в построении теоретических моделей, моделировании и сопоставлении с экспериментальными данными; проведении литературного обзора по строению, параметрам, моделям и существующим технологиям изготовления массивных и ультратонких пористых материалов; подготовке основных публикаций по теме исследования, а также в выступлении на семинарах и конференциях различных уровней.

