

материаловедения, д.ф.-м.н, профессор, заслуженный деятель науки РФ

Всего присутствовало – 13 человек, из них по специальности рассматриваемой диссертации докторов наук – 3

Повестка заседания:

Обсуждение диссертационной работы Сахарова Юрия Владимировича на соискание ученой степени доктора технических наук на тему: «Структура и свойства пористых оксидных пленок, модифицированных углеродом» по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

Сахаров Ю.В., родился 14 ноября 1976 года в г. Семипалатинске р. Казахстан. В 1994 году поступил в Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, в котором обучался на кафедре «Физическая электроника» по специальности «Микроэлектроника и полупроводниковые приборы». В 1999 году завершил нормативный срок обучения с присвоением диплома инженера электронной техники по специальности «Микроэлектроника и полупроводниковые приборы». После окончания поступил в очную аспирантуру ТУСУРа на кафедру «Физическая электроника». В 2002 году окончил аспирантуру с представлением диссертации на кафедру. С 2002 года работал в должности старшего преподавателя кафедры «Физическая электроника». В 2006 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Влияние примеси углерода на формовку и электрофизические параметры МДМ-структур». С 2007 работает на кафедре «Физическая электроника» в должности доцента. В 2010 году было присвоено звание доцента по кафедре «Физическая электроника». В период с 2008 по 2010 год обучался в очной докторантуре ТУСУРа на кафедре «Физическая электроника». Научная работа, представленная в диссертации, была выполнена на кафедре «Физическая электроника».

Научный консультант: заведующий кафедрой «Физическая электроника», д.т.н., профессор Троян П.Е.

Слушали:

С изложением основных итогов диссертационного исследования выступил соискатель Сахаров Ю.В. В ходе своего 30 минутного доклада он обозначил актуальность тем исследования, цели и задачи диссертационного исследования, теоретическую и практическую значимость работы. Основная часть доклада была посвящена доказательству 6 положений, выносимых на защиту. В завершении доклада были сформулированы основные выводы по диссертационному исследованию.

После заслушанного доклада были заданы следующие вопросы:

- д.т.н., профессор Смирнов С.В.: «Уточните режимы получения пленок»
- д.т.н., профессор Смирнов С.В.: «Использовались ли азотные ловушки для блокирования паров рабочей жидкости диффузионного насоса?»
- д.ф.-м.н, профессор Михайлов М.М.: «В чем заключается актуальность исследования?»
- д.ф.-м.н, профессор Михайлов М.М.: «Что такое самоорганизация пленок?»
- д.ф.-м.н, профессор Михайлов М.М.: «Как изменялись размеры образцов при исследовании оптической щели?»
- д.ф.-м.н, профессор Михайлов М.М.: «Почему уменьшается адгезия пленок при увеличении шероховатости?»
- д.ф.-м.н, профессор Михайлов М.М.: «Публикации, монографии, патенты?»
- д.т.н., профессор Троян П.Е.: «Для чего исследовались пленки различных материалов?»
- д.т.н., профессор Троян П.Е.: «Чем можно объяснить наличие ступенек на ВАХ?»
- д.т.н., профессор Давыдов В.Н.: «Размеры пор?»
- к.т.н., доцент Сальников А.С. : «Как можно использовать пористые пленки в качестве изоляционных материалов?».
- к.т.н., профессор Данилина Т.И. : «Каким методом оценивались размеры пор?»
- д.ф.-м.н, профессор Шандаров С.М.: «Доверительные интервалы?»
- д.ф.-м.н, профессор Шандаров С.М.: «Методика соединения точек?»
- д.ф.-м.н, профессор Шандаров С.М.: «Каким пунктам паспорта специальности 01.04.04 соответствует диссертационная работа?»

На все поставленные вопросы Сахаров Ю.В. дал развернутые ответы.

Выступили:

1. Выступил научный консультант, д.т.н., профессор Троян П.Е.:

Профессор Троян П.Е. высказал свое мнение о научно-педагогической деятельности, уточнив, что Сахаров Ю.В., работает на кафедре ФЭ с 1999 года в должности младшего научного сотрудника. В 2002 году избран по конкурсу на должность старшего преподавателя. В 2006 году защитил кандидатскую диссертацию. С 2007 года работает на кафедре в должности доцента. В 2010 году присуждена ученая степень доцента.

Сахаров Ю.В. отличается высокой работоспособностью, исполнительностью и ответственностью. Пользуется уважением среди студентов и коллег за добросовестное отношение к своим обязанностям.

Диссертационная работа Сахарова Ю.В. является логически завершенным, обоснованным научным исследованием и результатом его научной деятельности на кафедре ФЭ в период с 1999 по 2018 годы. Диссертационная работа Сахарова Ю.В. на тему «Структура и свойства пористых оксидных пленок, модифицированных углеродом» полностью соответствует паспорту специальности 01.04.04 «Физическая электроника» и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук».

2. д.т.н., профессор Давыдов В.Н.:

Профессор Давыдов В.Н. отметил ценность диссертационного исследования, особо выделив научную новизну и практическую значимость.

3. д.ф-м.н, профессор Михайлов М.М.:

Профессор Михайлов М.М. также выступил с поддержкой диссертационной работы, отметив научную новизну исследования.

4. д.ф-м.н., профессор Буримов Н.И.:

Профессор Буримов Н.И. выступил с рядом замечаний по представлению экспериментальных данных, а также с предложениями по корректировке научных положений выносимых на защиту.

5. д.т.н., профессор Смирнов С.В.:

Профессор Смирнов С.В. выступил с поддержкой диссертационной работы, отметив полноту представленных экспериментальных данных. В целом диссертационная работа оценена положительно. Основные замечания относятся к представленному докладу: «Необходимо более подробно остановиться на режимах получения пленок, при этом несколько сократив введение».

6. д.ф-м.н, профессор Шандаров С.М.

Профессор Шандаров С.М. выступил с критикой диссертационной работы, акцентировав на недостаточности публикаций в высокорейтинговых зарубежных журналах.

Постановили:

1. Рекомендовать диссертацию Сахарова Ю.В. на тему «Структура и свойства пористых оксидных пленок, модифицированных углеродом» к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.04 «Физическая

электроника».

2. Утвердить следующее заключение:

Научная новизна

1. Впервые установлено, что введение углерода в процессе формирования тонких пленок диоксида кремния методом реактивного катодного распыления в атмосфере кислорода приводит к изменению его морфологии и образованию самоорганизующейся мезопористой структуры, что придает пленкам новые полифункциональные свойства, которые невозможно сформировать традиционными способами.

2. Установленный механизм воздействия углерода на структуру, пористость, электрические, оптические и механические свойства оксидных диэлектриков на основе SiO_2 , TiO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 имеет универсальный характер, что позволяет распространить его на весь спектр оксидных диэлектриков, формируемых в плазме тлеющего разряда.

3. Разработана качественная модель пористой структуры тонких оксидных пленок, модифицированных углеродом, которая может быть представлена в виде плотно упакованных стержней исходного материала с различными координационными числами. Оценено распределение пор по размерам, проведено моделирование распределения электрических полей в области пор и смежных областях с учетом частичного проникновения пленки верхнего электрода вглубь пор.

4. Разработаны физико-химические основы синтеза пленок пористых оксидных диэлектриков, модифицированных углеродом, позволяющие управлять их структурой, составом, электрическими, оптическими и механическими свойствами.

5. Установлена роль углерода в процессе электрической формовки структур металл – диэлектрик – металл, заключающаяся в формировании мезопористой структуры.

6. Выявлено изменение кинетики развития процесса электрической формовки в самоорганизующихся мезопористых структурах, а также ее влияние на свойства формованных структур.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость

1. Разработаны физико-химические основы синтеза пористых пленок оксидных диэлектриков с возможностью варьирования параметров пористости в широких пределах, что расширяет существующие представления о механизмах формирования пористых материалов в условиях вакуума.

2. Разработана качественная модель пористой структуры тонких оксидных пленок, модифицированных углеродом, которая может быть представлена в виде плотно упакованных стержней исходного материала с различными координационными числами,

что расширяет научные знания о структуре пористых оксидных пленок, формируемых вакуумным способом.

3. Выявлены особенности протекания электрических процессов в самоорганизующихся пористых пленках, модифицированных углеродом, что расширяет существующие научные знания о механизмах токопереноса в пористых материалах.

4. Выявленное изменение кинетики процесса электрической формовки и пробоя пористых оксидных диэлектриков, модифицированных углеродом, дополняет фундаментальные знания о поведении неоднородных диэлектрических слоев в сверхсильных электрических полях.

Практическая значимость

1. Разработаны физико-химические основы синтеза пористых пленок в вакуумных условиях с возможностью варьирования параметров пористости в широких пределах, что позволяет получать пленки оксидных диэлектриков толщиной от 40 до 400 нм с заданными электрическими, оптическими и механическими свойствами.

2. Разработана методика по повышению плотности эмиссионного тока, а также снижению деградационных процессов в МДМ-катадах на основе формованных структур с пористым диэлектриком.

3. Использование пористых, самоорганизующихся оксидных пленок с развитой поверхностью в качестве активного элемента датчика влажности емкостного типа, позволяет значительно увеличить их быстродействие и расширить диапазон чувствительности.

4. Разработан способ повышения внешнего квантового выхода синих светодиодов на основе GaN. Разработаны технические решения по нанесению слоя растекания тока на основе оптически прозрачных электропроводящих покрытий индий – олово (ITO) на поверхность гетероструктуры, наносимого совместно с текстурированной пористой пленкой диоксида кремния.

5. Управление размерами пор и их плотностью в широких пределах позволяет расширить функционал и номенклатуру ассиметричных трековых мембран, применяемых для фильтров обратного осмоса. Разработаны технические решения по нанесению темплейтных шаблонов в виде пористых пленок, модифицированных углеродом, на легкоплавкие полиэтилентерефталатные пленки в плазме тлеющего разряда.

6. Разработана концепция по созданию совершенных волноводных радиаторов рентгеновского излучения на основе многослойных тонкопленочных структур Ta–C–Ta и W–C–W.

7. Разработана экспериментальная модель мемристорной структуры на основе

слоев пористого диоксида титана, модифицированного углеродом.

Результаты, полученные автором, значительно расширяют научные знания о механизмах формирования, структуре, электрических, оптических и механических свойствах самоорганизующихся пористых пленок, формируемых в плазме тлеющего разряда, что используется в учебном процессе при чтении лекций по основам нанотехнологии и постановке новых лабораторных работ. Понимание механизма самоорганизации и его влияния на свойства и структуру тонких оксидных пленок дает уникальную возможность точного прогнозирования свойств и структуры получаемых полифункциональных оксидных пленок с развитой пористой структурой.

Предложенные подходы и технические решения защищены патентами и внедрены в производственную и научную сферу для проведения дальнейших исследований в рамках НИОКР.

Личный вклад автора.

Личный вклад заключается в планировании экспериментов, приготовлении экспериментальных образцов, проведении экспериментов, выполнении большей части измерений, обработке результатов экспериментов. Автором проведен анализ, моделирование, интерпретация и обобщение полученных результатов.

Автором впервые предложен и реализован новый метод формирования пористой структуры тонких оксидных пленок в вакуумных условиях, путем их модификации углеродом в плазме тлеющего разряда, предложена, и экспериментально доказана гипотеза, объясняющая механизм протекающих процессов, проведены исследования состава, структуры, электрических, оптических и механических свойств полученных пористых пленок, доказана универсальность механизма воздействия углерода на структуру и свойства оксидных пленок, формируемых в плазме тлеющего разряда. Большая работа автором проделана по статистической обработке и обобщению экспериментальных данных. Основная проблема, стоящая перед автором, заключалась в малоизученности процессов протекающих в тонких и ультратонких пористых слоях. В связи, с чем автором проведен значительный литературный анализ свойств массивных пористых материалов и тонких пленок, что позволило провести анализ и интерпретацию экспериментальных данных.

На начальных этапах работы при исследовании электрического пробоя пленок, модифицированных углеродом (глава 3), в обсуждении принимал участие д-р техн. наук, заслуженный деятель науки и техники, профессор Воробьев Г.А; при обсуждении процессов формовки (глава 4) принимал активное участие д-р техн. наук, профессор Троян П.Е, при обсуждении оптических измерений принимал активное участие д-р техн. наук,

профессор Смирнов С.В.

Ввиду отсутствия у автора некоторого аналитического оборудования, а также опыта работы на нем, часть измерений была проведена сторонними лицами и организациями при непосредственном участии автора. В частности, в измерении механических свойств, состава (методом Оже) и шероховатости поверхности был задействован «Центр измерений свойств материалов» на базе Томского политехнического университета, измерения проводил ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук Шулепов И.А.; в исследовании поверхности с помощью электронного микроскопа серии Zeiss Supra 55 с блоком для электронно-лучевого экспонирования Raith 150TM был задействован научно-образовательный центр «Нанотехнологии» ТУСУРа, измерения проводил канд. техн. наук Ишуткин С.В.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается: корреляцией результатов теоретических и экспериментальных исследований с данными известных работ других авторов по аналогичной и смежной тематике; применением современного диагностического и измерительного оборудования, поверенного в установленном порядке; совпадением экспериментальных результатов, полученных на различном оборудовании с применением разных методик; сходимостью результатов моделирования с экспериментальными данными; сходимостью результатов косвенных экспериментов с визуальными данными (микрофотографии); статистически значимым объемом экспериментальных данных; близостью значений выборочной и генеральной дисперсии экспериментальных данных; апробацией теоретических и экспериментальных результатов на конференциях, семинарах; публикацией статей в рецензируемых журналах; наличием патентов; внедрением результатов работы в промышленное производство.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: IX международной конференции «Физика диэлектриков» (Диэлектрики-2000) (17–22 сентября 2000 г., Санкт-Петербург); V международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2000) (26–29 сентября 2000 г., Новосибирск); XII *International Vacuum Microelectronics Conference (IVMC-2000)* (14–17 August, 2000, Guangzhou, China); XIV *International Vacuum Microelectronics Conference (IVMC-2001)* (12–16 August, 2001, Davis, USA); VI международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2002) (23–26 сентября 2002 г., Новосибирск), VII международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2004) (21–24 сентября 2004 г., Новосибирск); IV международной конференции «Методы и средства управления технологическими процессами» (МСУТП-2007) (24–26

октября 2007 г., Саранск); международной научной конференции «Становление и развитие научных исследований в высшей школе», посвященной 100-летию со дня рождения профессора А.А. Воробьева (14–16 сентября 2009 г., Томск); XII международной конференции «Физика диэлектриков» (Диэлектрики-2011) (23–26 мая 2011 г., Санкт-Петербург); XI международной конференции «Пленки и покрытия-2013» (6–8 мая 2013 г., Санкт-Петербург); всероссийской научной конференции с международным участием «Полифункциональные химические материалы и технологии» (21–23 ноября 2013 г., Томск); международной конференции по применению технологий поверхности в науке и промышленности (30 июня – 4 июля 2014 г., Новосибирск); 2014 *IEEE 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2014)* (30 June 2014 – 4 July 2014, Altai); 24-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (7–14 сентября 2014 г., Севастополь); международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (25–26 сентября 2014 г., Саратов); V международной научно-практической конференции «Технология микро- и нанoeлектроники в наносистемной технике» (13–15 апреля 2016 г., Москва); XIII международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», посвященной 55-летию ТУСУРа (29 ноября – 1 декабря 2017 г., Томск).

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных автором

Всего по результатам исследований опубликовано 56 работ, из них 15 в рецензируемых изданиях из перечня ВАК (из них 1 статья индексируется базами данных *Scopus*), 3 статьи в журналах, не входящих в перечень ВАК, 7 докладов на российских конференциях, 23 доклада на международных конференциях (из них 7 индексируется базами данных *Scopus* и 1 – *Web of Science*), 1 монография, 6 патентов, 1 отчет по НИР.

Основное содержание диссертационной работы изложено в рецензируемых работах из перечня ВАК.

1. Ионно-плазменные методы получения наноструктур / Т.И. Данилина, П.Е. Троян, Ю.В. Сахаров, Ю.С. Жидик // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2017. – № 3 (20), октябрь. – С. 85–90.
2. 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.
3. 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

4. Сахаров Ю.В. Исследование свойств пленок пористого диоксида кремния нанометровой толщины / Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян, С.П. Усов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 1 (21), Ч. 2. – С. 118–122.
5. Сахаров Ю.В. Исследование пористых пленок диоксида кремния / Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 2 (24), Ч. 2. – С. 77–80.
6. Казимиров А.И. Исследование гетероструктур на основе слоев с широкой запрещенной зоной / А.И. Казимиров, Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2 (22), ч. 1. – С. 201–203.
7. Sakharov Yu.V. The effect of water vapor on the Conductivity and Emission Properties of the formed $\text{Mo-Si}_x\text{N}_y\text{O}_z\text{-Al}$ structure / Yu.V. Sakharov // Russian Physics Journal. – 2004. – Vol. 47, Iss. 1. – P. 69–74.
8. Троян П.Е. Роль углеводов в процессе электрической формовки МДМ-систем / П.Е.Троян, А.А. Жигальский, Ю.В. Сахаров // Изв. вузов. Физика. – 2003. – № 2. – С. 36–39.
9. Сахаров Ю.В. Прозрачные электропроводящие покрытия с контролируемыми значениями коэффициента пропускания и поверхностного сопротивления / Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян, Ю.С. Жидик // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 1(31). – Томск, 2014. – С. 99–102.
10. 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.
11. Контроль формовки МДМ-структур наноэлектроники в сильных электрических полях / П.Ю. Гуляев, В.И. Зеленский, Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян // Ползуновский вестник. – 2010. – № 2. – С. 68–71.
12. Сахаров Ю.В. Технология синтеза и свойства пористых оксидных пленок / Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян, Ю.С. Жидик // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015, декабрь. – № 4 (38). – С. 72–75.
13. Сахаров Ю.В. Исследование механизмов электропроводности пленок оксида

индия, легированного оловом / Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян, Ю.С. Жидик // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 3 (37). – С. 85–88.

14. Усов С.П. Датчик газообразных углеводородов на основе пористой пленки $\text{SiO}_2 + \text{C}$ нанометровой толщины / С.П. Усов, П.Е. Троян, Ю.В. Сахаров // Доклады ТУСУР. – 2010. – № 2(22). – Ч. 1. – С. 187–190.
15. Изготовление, анализ структуры и тестирование слоистых наноструктур для генерации острофокусных пучков рентгеновского излучения быстрыми электронами / В.В. Каплин, Ю.В. Сахаров, В.В. Сохорева, П.Е. Троян, С.Р. Углов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т.53, № 10. – С.247–251.

Соответствие диссертации специальности

Представленная Сахаровым Ю.В. диссертационная работа на тему «Структура и свойства пористых оксидных пленок, модифицированных углеродом» является фундаментальным научным исследованием в области разработки и исследования новых полифункциональных материалов и имеет важное прикладное значение для расширения электронной компонентой базы микро- и наноэлектроники. Диссертационное исследование включает в себя разработку физико-химических основ синтеза пористых пленок диоксида кремния путем их модификации углеродом в плазме тлеющего разряда, исследование эмиссионных свойств формованных МДМ-структур с пористым диэлектриком, установление связей между уровнем модификации пленок и их структурой, составом, электрическими, оптическими и механическими свойствами, а также оценку универсальности механизма воздействия углерода на пористость и электрофизические параметры пленок других оксидных неорганических диэлектриков, формируемых в плазме тлеющего разряда и имеющих большое прикладное значение в микроэлектронике, таких как TiO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 .

Указанная область исследований соответствует паспорту специальности 01.04.04 «Физическая электроника», а именно пунктам: 1 – Эмиссионная электроника, включая процессы на поверхности, определяющие явления эмиссии, эмиссионную спектроскопию и все виды эмиссии заряженных частиц; 4 – Физические явления в твердотельных микро- и наноструктурах, молекулярных структурах и кластерах; проводящих, полупроводниковых и тонких диэлектрических пленках и покрытиях; 6 – Изучение физических основ плазменных и лучевых (пучковых) технологий, в том числе модификации свойств поверхности, нанесение тонких пленок и пленочных структур.

Вывод

1. Диссертационная работа Сахарова Ю.В. на тему «Структура и свойства пористых оксидных пленок, модифицированных углеродом» соответствует паспорту специальности 01.04.04 «Физическая электроника» и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук

2. Диссертационная работа Сахарова Ю.В. на тему «Структура и свойства пористых оксидных пленок, модифицированных углеродом» может быть рекомендована к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.04 «Физическая электроника»

Результаты открытого голосования: За – 10, против – 1, воздержалось – 1.

Председатель заседания
д.т.н., профессор кафедры ФЭ



Троян П.Е.

Секретарь заседания
аспирант кафедры ФЭ



Жидик Ю.С.