

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.382; 621.315

ЛАЗАРУК
Сергей Константинович

**ПОРИСТЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ФОРМИРУЕМЫЕ
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ АНОДИРОВАНИЕМ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

по специальности 05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Минск, 2008

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный консультант - Борисенко Виктор Евгеньевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой микро- и нано-электроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Официальные оппоненты - Комаров Фадей Фадеевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, чл.-кор. НАН Беларуси, заведующий лабораторией элионики НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ

Говор Геннадий Антонович, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению»

Курмашев Виктор Иванович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных информационных систем частного учреждения образования «Минский институт управления»

Оппонирующая организация – Государственное научное учреждение «Институт физики им. Б.Н. Степанова НАН Беларуси»

Защита состоится 11 декабря 2008 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу; 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, БГУИР, ауд. 232, 1 уч. корп., тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Автореферат разослан 6 ноября 2008 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
д-р техн. наук, профессор

Бордусов С.В.

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития естественных наук пристальное внимание уделяется изучению эффектов и явлений в наноразмерных структурах. Полученные знания призваны обеспечить развитие качественно новых технологий, так называемых нанотехнологий, в различных областях науки и техники. Особенно это касается твердотельной электроники, где с возникновением новых перспективных областей, таких, как наноэлектроника, нанофотоника, спинтроника, появляются принципиально новые возможности для обработки и передачи информации.

К таким перспективным направлениям относится развитие кремниевой оптоэлектроники. Кремний, будучи основным материалом микроэлектроники, не нашел широкого применения в оптоэлектронных интегральных схемах из-за непрямозонного характера его запрещенной зоны. Однако после обнаружения эффективной фото- и электролюминесценции в наноструктурированном пористом кремнии (ПК) появилась перспектива развития и кремниевой оптоэлектроники.

Отдельно следует отметить новые возможности нанотехнологий по модернизации существующих технологических процессов изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем (ИС). Так, использование наноструктурированного пористого оксида алюминия в качестве разделительного диэлектрика с низкой диэлектрической проницаемостью способно повысить быстродействие существующих ИС за счет снижения паразитных резистивно-емкостных задержек в системе металлических межсоединений.

В последние годы мировое научное сообщество уделяет особое внимание исследованию возможности применения наноструктурированных оксидов тугоплавких металлов (титана и вольфрама) в качестве материала анода фотоэлектролизной ячейки, что позволяет расщеплять воду на кислород и водород за счет солнечного света. Этот процесс обеспечивает источник энергии, альтернативный углеводородам. Однако для практического использования таких устройств нужны проведение исследований по увеличению удельной поверхности материала анода и поиск научно-технических решений, позволяющих наиболее эффективно использовать весь спектр солнечного света на поверхности земли.

Упомянутые наноструктурированные материалы формируются электрохимическим анодированием кремния, алюминия и тугоплавких вентильных металлов. В связи с вышеотмеченным значительный практический интерес представляет проведение исследований по получению новых наноструктурированных материалов методом электрохимического анодирования, изучение их электрофизических свойств и изготовление на их основе приборов для твердотельной электроники. Решение названных проблем позволит не только создавать наноструктурированные

материалы с новыми свойствами, но и разработать научные основы технологии производства приборов и устройств интегральной электроники и оптоэлектроники.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема диссертации утверждена Советом учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (протокол № 9 от 01.06.2007 г.) и соответствует подразделам 7.5 «Материалы с новыми свойствами, обеспечивающие создание опто-, микро- и нанoeлектронных устройств, схемотехнические решения для построения таких устройств» и 7.6 «Оптические, электронные приборы и оборудование, включая лазерно-оптические оборудование и технологии; аналитическое оборудование и приборы контроля качества и сертификации; опто-, микро- и нанoeлектронные системы и устройства» приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований республики Беларусь на 2006-2010 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 17 мая 2005 г. № 512.

Диссертационная работа выполнялась в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники в рамках заданий Республиканских научно-технических программ, проектов, финансируемых Фондом фундаментальных исследований Республики Беларусь, а также международных проектов:

1. Программа «Белэлектроника», х/д - 98-1083 «Разработка процесса анодирования А1 с минимальным боковым уходом для формирования алюминиевых столбиков» (1998 г., № ГР 1999217).

2. Программа «Белэлектроника», х/д - 99 -1061 «Разработка процесса формирования алюминиевых столбиков на основе электрохимического анодирования алюминия для многоуровневых межсоединений СБИС.» (1999 г., № ГР 19991604).

3. Межвузовская республиканская программа «Низкоразмерные системы», НИР – «Исследовать фундаментальные закономерности излучательной рекомбинации в низкоразмерном кремнии при лавинной генерации электронно-дырочных пар и разработать теоретические основы их использования для оптоэлектронных приборов» (2000-2005 гг., № ГР 20005238).

4. Межвузовская республиканская программа «Нанoeлектроника», НИР – «Исследовать фундаментальные закономерности электролюминесценции, распространения света и фотоэффекта в нанокристаллическом кремнии и разработать принципы построения внутрочиповых оптических межсоединений на его основе» (2000-2005 гг., № ГР 20011523).

5. Программа «Электроника», НИР – «Разработать научные основы управления электрофизическими свойствами анодного оксида алюминия путем регулирования его пористости и создать технологию формирования планарной алюмооксидной металлизации с низкой диэлектрической проницаемостью изолирующих слоев для ИС с субмикронными проектными нормами» (2000-2005 гг., № ГР 2002954).

6. Программа «Наноматериалы и нанотехнологии», НИР – «Разработать и исследовать интегрированные на кремниевой пластине электронно-оптические системы, включающие светоизлучающие, фотоприемные устройства, волноводные разветвители и соединения на основе наноструктурированных кремния и Al_2O_3 » (2000-2005 гг., № ГР 20042514)

7. Программа «Наноматериалы и нанотехнологии», НИР – «Исследование явления микровзрыва наноструктурированного кремния и разработка микросистем, использующих либо преобразующих энергию микровзрыва в другие виды энергии» (2000-2005 гг., № ГР 20032792).

8. Проект БРФФИ № Т00-204 «Исследовать закономерности излучения, распространения и поглощения света в наноструктурированных алюмооксидных пленках с оптически активными кластерами и разработать принципы построения интегральных устройств на их основе» (2001-2003 гг., № ГР 20014312).

9. Проект БРФФИ № Т02-092 «Исследовать закономерности взрывной реакции в пленках наноразмерного пористого кремния и разработать научные основы её применения в электронике» (2003-2005 гг., № ГР 20032790).

10. Программа «Электроника 1.14», НИР - "Исследовать закономерности формирования диэлектрических слоев окисленного пористого кремния и анодного оксида алюминия и разработать технологию создания межкомпонентной и внутриуровневой изоляции полупроводниковых приборов и интегральных схем на основе этих материалов" (2005-2008 гг. , № ГР 20061885).

11. Программа «Наноматериалы и нанотехнологии», НИР – «Разработка оптических межсоединений, включающих светоизлучающие, фотоприемные, волноводные структуры на основе наноструктурированного кремния и Al_2O_3 и интеграция их с электронными межсоединениями ИС» (2005-2008 гг. , № ГР20061887).

12. Программа «Наноматериалы и нанотехнологии», НИР – «Исследование закономерностей протекания процессов горения и взрыва в пленках наноструктурированного пористого кремния и разработка микроактюаторов на основе энергии этих процессов» (2005-2008 гг. , № ГР 20061077).

13. Проект по программе ЕС INCO-COPERNICUS № 97-7032 «Кремниевые светодиоды для оптических межсоединений» (1998-2000 гг., № ГР 20003430).

14. Проект ИНТАС № 03-51-6486 «Эрбий в гетерогенных системах на кремнии» (2004-2006 гг.).

15. Проект МНТЦ В-276.2 «Мезоскопические светоизлучатели, переключатели и трансформаторы» (2003-2006 гг.).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы явилось установление закономерностей и механизмов формирования наноструктурированных пористого кремния и пористых оксидов вентильных металлов электрохимическим анодированием соответственно кремния, алюминия, титана, вольфрама, ниобия и композиционных пленок на их основе, определение структурных, электрофизических и оптических свойств этих материалов и создание на их основе приборов твердотельной электроники.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Провести анализ известных закономерностей процессов электрохимического анодирования кремния и металлов, сопровождающихся образованием наноструктурированных пленок, электрофизических свойств этих пленок и перспективных областей их применения в твердотельной электронике.

2. Исследовать механизмы образования наноструктурированных пористого кремния и пористых оксидов металлов в процессе электрохимической анодной обработки монокристаллического кремния, вентильных металлов (алюминия, титана, вольфрама, ниобия) и тонкопленочных композиций на их основе.

3. Исследовать структурные, электрофизические и оптические свойства наноструктурированных материалов: пористого кремния и пористых оксидов вентильных металлов.

4. Разработать, изготовить и исследовать приборы твердотельной электроники и элементы интегральных микросхем на основе пористого кремния и пористых оксидов вентильных металлов.

В качестве объекта исследования выбраны наноструктурированные пленки, получаемые электрохимическим анодированием кремния, алюминия, титана, вольфрама, ниобия и тонкопленочных композиций на их основе. Предмет исследования – физико-химические свойства получаемых анодных пленок и закономерности изменения этих свойств в зависимости от условий изготовления, последующих технологических обработок и их эксплуатации в приборах интегральной электроники.

Положения, выносимые на защиту

1. Формирование пористого оксида алюминия анодированием алюминия в областях, ограниченных поверхностной маской, происходит по механизму электрохимического окисления металлов, контролируемому неоднородными напряженностью электрического поля и температурой в ячейках пористого оксида, образующе-

гося под маской, и под свободной от маски поверхностью, что при плотностях анодного тока более 10 мА/см^2 обеспечивает преимущественный рост оксида в направлении перпендикулярном поверхности образца, с анизотропией, достигающей 80 %, и позволяет создавать алюминиевые элементы с боковым уходом размеров до 0,2 мкм в пленках толщиной до 1 мкм.

2. Анодная обработка монокристаллического и поликристаллического кремния в растворах плавиковой кислоты в переходном режиме, характеризуемом сочетанием порообразования и электрополировки, приводит к формированию слоев пористого кремния по механизму первоначального окисления кремния и последующего локального травления оксида в местах увеличения электрического поля, в результате чего образуются кремниевые наноструктуры с характерным размером менее 5 нм, обеспечивающие фото- и электролюминесценцию этого нанопористого материала в диапазоне длин волн от 510 до 800 нм с временами затухания от 0,1 до 20 мкс.

3. Совместное магнетронное напыление алюминия и одного из тугоплавких металлов – Ti, W, Nb, при доле тугоплавкого металла 14 - 60 ат.% приводит к формированию на подложке композиционной пленки, включающей связанные кристаллические элементы из тугоплавкого металла с размерами от 0,5 нм до 20 нм, а последующее анодное окисление такой пленки в электролитах на основе серной кислоты и селективное удаление оксида алюминия химическим травлением обеспечивают формирование нанопористого оксида тугоплавкого металла с размерами пор от 0,5 нм до 50 нм с удельной площадью поверхности $100 - 400 \text{ м}^2/\text{см}^3$.

4. Разработанная конструкция светодиода на лавинном умножении носителей заряда включает в качестве оптически активного материала наноструктурированный пористый кремний, пассивированный анодным оксидом кремния и анодным оксидом алюминия, и алюминиевый инжектирующий контакт, создающий барьер Шоттки с пористым кремнием. Такая конструкция позволяет повысить внешнюю квантовую эффективность кремниевых светодиодов до 1,4 %, быстродействие до 2 нс при стабильности светоизлучения не менее 1000 часов, что обеспечивает создание микродисплеев с размером пикселей 1 мкм и более и интегрированных в кремнии оптоэлектронных пар для оптических межсоединений с коэффициентом преобразования по току до 10^{-2} . Электролюминесценция в таких светодиодах контролируется генерацией электронно-дырочных пар при обратном смещении барьера Шоттки, излучательной и безызлучательной рекомбинацией в кремниевых кристаллитах с размером менее 4 нм, что объясняет рост эффективности светоизлучения при увеличении концентрации нанокристаллитов и ее уменьшение при увеличении рабочей температуры светодиодов.

5. Пористые оксиды титана и вольфрама, формируемые из композиционных пленок алюминий - титан и алюминий - вольфрам, обладают полупроводниковыми

свойствами, характеризуемыми шириной запрещенной зоны 3,0 эВ и 2,7 эВ соответственно и удельным сопротивлением $(0,1 - 10) \cdot 10^6$ Ом·см, что позволяет создавать на их основе низковольтные электрохромные элементы (напряжение питания 1,5 В) с диффузионным рассеянием света, достигающим 60 %, и углом пространственного обзора, увеличенным до 40 градусов.

6. Анодный оксид алюминия с пористостью, доведенной химическим травлением до 70 %, обладает диэлектрической проницаемостью, сниженной по сравнению с объемным материалом в 3 - 4 раза, что позволяет создавать на его основе систему многоуровневых межсоединений элементов интегральных микросхем с пониженными паразитными емкостями, которая за счет высокой теплопроводности оксида алюминия способна работать при плотностях токов свыше 10^7 А/см².

7. Быстрое окисление пористого кремния, наполненного твердым окислителем, характеризуется следующими закономерностями: при толщинах менее 60 мкм процесс развивается в течение временных интервалов более 1 мс, что соответствует горению; при больших толщинах, вследствие экспоненциального увеличения скорости окислительной реакции из-за ухудшенного теплоотвода выделяющейся энергии и дополнительного разогрева пористого слоя, процесс сокращается до 1 мкс и менее, что соответствует взрыву. Использование горения и взрыва пористого кремния позволяет создавать миниатюрные источники энергии и микроактюаторные устройства по стандартной технологии изготовления кремниевых интегральных микросхем.

Личный вклад соискателя

Личный вклад соискателя заключается в выборе направления и постановке задач исследований, анализе и интерпретации результатов, а также в непосредственном выполнении основных исследований. Все основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены соискателем самостоятельно. Выбранная тема потребовала различных междисциплинарных знаний и не могла быть изучена без участия специалистов различных областей. Автор глубоко признателен своим коллегам и соавторам, без помощи которых выполнение работы было бы невозможно.

Научный консультант В.Е. Борисенко принимал участие в обсуждении задач и полученных результатов, оказывал консультативную помощь в процессе выполнения и оформления работы. Технология формирования наноструктурированных алюмооксидных пленок для металлизации ИС была разработана совместно с В.А. Лабунным, И.Л. Барановым, В.Н. Пономарем, В.Б. Высоцким, В.В. Становским и А.В. Демьяновичем. Технология формирования наноструктурированных пленок для микродисплейных технологий была разработана совместно с А.Г. Смирновым, Х.С. Квоком, А. Феррари, В. Чигриновым и А. Муравским. Изготовление образцов

пористого кремния и пористых анодных оксидов вентильных металлов осуществлялось при участии А.А. Лешка, А.В. Долбика, Т.И. Ореховской, Д.А. Сасиновича, и П.В. Жагиро. Анализ образцов методами масс-спектропии вторичных ионов, растровой и просвечивающей электронной микроскопии, рентгеновского микроанализа и атомно-силовой микроскопии А. Томлинсона, В.А. Ухова, А.И. Иванова и Г.П. Неделькиной. Оптический анализ образцов и их теоретическая обработка проводился с участием А.В. Мудрого, Л. Павези, Е.В. Луценко и Н.М. Казючица.

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований, включенные в диссертацию, докладывались автором на следующих конференциях:

Международная конференция «Microelectronic'90» (Минск, 1990), Международный симпозиум материаловедческого общества (Лос-Анжелес, США, 1993, Бостон, США, 1996), Международная конференция по полупроводниковым материалам CAS-1994 (Бухарест, Румыния, 1994), Международные конференции по физике, химии и применению наноструктур: «Nanomeeting-95», «Nanomeeting-97», «Nanomeeting-99», «Nanomeeting-2001», «Nanomeeting-2003», «Nanomeeting-2005», «Nanomeeting-2007» (Минск), Международные симпозиумы европейского материаловедческого общества (Страсбург, Франция, 1995, 1996, 1997, 1999, 2002, 2008), Международная конференция электрохимического общества (Чикаго, США, 1996), Международная конференция по излучению света низкоразмерными кремниевыми структурами (Лагонисси, Греция, 1997), Международные конференции по отображению информации (2000; Раубичи, 2001, 2004, Ялта, Украина, 2003, Москва, Россия, 2007), Международные конференции по современным средствам связи (Нарочь, 1999-2007), Международная конференция “Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники” (Дивноморское, Россия, 2000), Международные конференции по нанофотонике (Нижний Новгород, Россия, 2001, 2002, 2004, 2005), Международный семинар по лазерам на кремнии (Тренто, Италия, 2002), Международные конференции “Аморфные и микрокристаллические полупроводники” (Санкт-Петербург, Россия, 2004, 2006, 2008.), Международная конференция по наноструктурным материалам (Минск 2008).

Результаты работы также докладывались и обсуждались на семинарах в университете Ла Сапиенца (Рим, Италия, 1994), Институте передовых дисплейных технологий Самсунг (Сувон, Южная Корея, 1997), Техническом мюнхенском университете (Мюнхен, Германия, 2001), Гонконгском университете науки и технологий (Гонконг, КНР, 2005, 2006).

Опубликованность результатов

По материалам диссертации опубликованы 54 статьи в рецензируемых научных журналах, 23 статьи в сборниках материалов конференций, 7 тезисов докладов конференций, 21 статья в научных сборниках.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 420 страниц (23 авторских листа).

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений. Логика построения работы заключается в последовательно представленных анализе проблемы (глава 1), описании используемых методик (глава 2), результатов исследований механизмов формирования наноструктурированных материалов и их электрофизических свойств (главы 3, 4), а также разработок компонентов и приборов твердотельной электроники (глава 5). Общий объем диссертационной работы составляет 324 страницы, из которых 167 страниц основного текста, 117 рисунков на 117 страницах, 11 таблиц на 11 страницах, библиография из 314 наименований на 27 страницах и два приложения на 2 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении и в общей характеристике работы обоснована актуальность темы диссертации, показана связь работы с научными программами и темами, сформулированы цели и задачи исследований, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, сформулированы положения диссертации, выносимые на защиту. Приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации, их опубликованности, а также о структуре и объеме диссертации.

Первая глава посвящена обзору электрохимически наноструктурированных материалов - их получению, свойствам и применению в твердотельной электронике. Отмечено, что для развития нанотехнологий требуется поиск новых методов получения наноструктурных материалов, которые обладают новыми свойствами по сравнению с обычными массивными аналогами. Электрохимическое анодирование позволяет формировать регулярные структуры с размерами нанометрового диапазона. В частности, за счет выбора кремниевых подложек и режимов их анодной обработки можно получать пористые структуры с диаметром пор от 1 нм до нескольких мкм.

Пористый кремний, получаемый электрохимическим анодированием, обладает новыми свойствами по сравнению с объемно-однородным материалом. Особо следует отметить изменение оптических свойств. По мере увеличения пористости получаемых пленок ширина запрещенной зоны увеличивается от 1,1 эВ, свойственной монокристаллическому кремнию, до 2,4 эВ, что соответствует зеленой полосе видимого диапазона. Так называемый голубой сдвиг происходит за счет уменьшения размеров кремниевых нанокристаллитов. В зависимости от режимов формирования пленок ПК можно получать эффективную фотолюминесценцию как инфракрасного, так и ультрафиолетового диапазонов.

В дополнение к вышеописанным свойствам, следует отметить недавно обнаруженные окислительные свойства ПК, в частности, способность его гореть и даже взрываться при окислительной реакции. Процессы горения и взрыва в пленках ПК происходят только в микро- и мезапористых структурах с размерами кремниевых нанокристаллитов нанометрового диапазона. Энергетический выход при этом превышает аналогичный параметр всех известных углеводородных материалов. Однако механизмы развития процессов горения и взрыва в наноструктурированных пленках не установлены, что ограничивает их практическое использование.

Первые патенты по использованию ПК в интегральной электронике связаны с его высокой реакционной способностью, в частности, при окислении, что позволяет формировать изолирующие пленки толщиной более 1 мкм. Много публикаций и патентов посвящено созданию светоизлучающих структур на основе этого наноструктурированного материала. Анализ параметров светодиодов на основе пористого кремния показывает существенный прогресс, достигнутый за последние годы, однако, единственной нерешенной проблемой, препятствующей их практическому использованию, является низкая эффективность светоизлучения.

При пористом анодировании алюминия получают самоупорядоченные гексагональные ячейки из оксида алюминия с порами в их центрах. Долгое время считалось, что способность алюминия при анодировании формировать упорядоченные гексагональные ячейки является уникальной. При этом постоянно шел поиск электролитов и режимов анодирования, обеспечивающих формирование подобных пористых структур и при анодировании других вентильных металлов. И только недавно было обнаружено, что при использовании электролита на основе плавиковой кислоты с концентрацией в несколько весовых процентов удается получить упорядоченные гексагональные структуры оксида титана, вольфрама, ниобия и других вентильных металлов. Размер ячеек определяется режимами анодирования и находится в диапазоне 40 - 200 нм, толщина стенок составляет 17 - 100 нм. При этом постоянно ведутся поиски способов уменьшения размеров стенок пор для увеличения удельной поверхности наноструктурированного материала.

Наноструктурированные оксиды вентильных металлов демонстрируют новые свойства по сравнению с гомогенными аналогами. В частности, в таких структурах наблюдается двулучепреломление и анизотропное рассеивание света.

Пористые оксиды вентильных металлов используются в гибридных интегральных схемах для электрических межсоединений, в микроэлектромеханических системах. Пористый оксид алюминия может быть использован при изготовлении автоэмиссионных устройств. В таких устройствах внутри пор формируются наноразмерные катоды из никеля либо углерода, что обеспечивает высокую плотность эмиттеров на единицу площади.

Наноструктурированные пористые пленки оксидов тугоплавких вентильных металлов были получены сравнительно недавно, но уже нашли применение в различных устройствах. Прежде всего, в солнечных батареях и в фотоэлектролизных устройствах, использующих энергию солнца для получения водорода. Главной рабочей частью в этих приборах является пористый слой оксидов тугоплавких металлов с шириной запрещенной зоны, позволяющей поглощать высокоэнергетическую часть солнечного спектра земной поверхности. Больше всего публикаций посвящено оксидам вольфрама и титана, ширина запрещенной зоны которых составляет 2,5 - 2,7 эВ и 3,0 - 3,2 эВ соответственно. В лучших фотоэлектролизных устройствах на основе пористых оксидов титана и вольфрама была достигнута эффективность преобразования солнечной энергии в химическую энергию водорода 4,5 % для солнечного света и 16 % для света ультрафиолетового диапазона. Для увеличения эффективности необходимо проведение исследований по изучению механизмов формирования наноструктурированных материалов для увеличения их удельной поверхности, а также требуется поиск научно-технических решений, позволяющих наиболее эффективно использовать весь спектр солнечного света на поверхности земли.

На основе анализа литературных источников в конце главы сформулирована цель работы и поставлены задачи исследований.

Во второй главе описаны методики приготовления экспериментальных образцов и методы исследования их структурных и электрофизических свойств. Особое внимание уделено методам формирования наноструктурированных пленок. В частности, разработан оригинальный метод формирования нанокompозитных пленок алюминий - тугоплавкий металл и алюминий - кремний за счет совместного магнетронного осаждения упомянутых материалов. Для магнетронного осаждения использовали алюминиевые мишени со вставками соответствующего материала ряда Ti, W, Nb, Si. Процентное содержание используемых металлов регулировалось изменением соотношения площади, покрываемой вставками, к общей площади эрозии мишени.

Наноструктурированные пленки тугоплавких вентильных металлов и их оксидов получали селективным травлением алюминия или его оксида из магнетронно осажденных нанокompозитных пленок.



а



б

а - рабочая камера установки; б – анод-держатель

Рисунок 1 - Фотографии установки анодирования

Для процессов электрохимического анодирования в условиях серийного производства полупроводниковых приборов и интегральных схем была разработана и изготовлена полуавтоматическая установка групповой анодной обработки кремниевых пластин. Общий вид установки показан на рисунке 1. Установка состоит из стойки с блоками питания и управления, а также из рабочей камеры (рисунок 1,а), в которой размещаются ванны для анодирования и отмывки пластин и десять анод-держателей. Рабочая камера располагается в зоне обеспыливания. Анод-держатель (рисунок 1,б) состоит из фторопластового корпуса с кольцевым каналом, соединенным с источником сжатого воздуха. Поступающий через кольцевой зазор между пластинами и корпусом поток сжатого воздуха препятствует попаданию электролита на обратную сторону пластины и на анод и эффективно перемешивает электролит. Таким образом, обеспечивается надежная защита обратной стороны пластины, а лицевая сторона подвергается анодной обработке полностью без каких-либо потерь. Установка имеет десять позиций для анодирования, что позволяет осуществлять процесс и контроль десяти кремниевых подложек.

Разработана методика неразрушающего экспресс-контроля толщины и плотности слоев пористого кремния по их интерференционным цветам. Получено аналитическое выражение для показателя преломления пористого кремния, учитывающее структуру пор и дающее согласие с экспериментальными результатами:

$$n_1 = n \frac{\sqrt{(2\chi + 2)(nn_m)^2 + (n_m^4 + n^4)(1 - \chi)}}{(1 + \chi)n^2 + (1 - \chi)n_m^2}, \quad (1)$$

где n , n_1 , n_m – соответственно показатели преломления кремния, пористого кремния и заполняющей среды (воздуха для сухих слоев и воды – для измерений в процессе анодирования),

χ – пористость формируемых пленок.

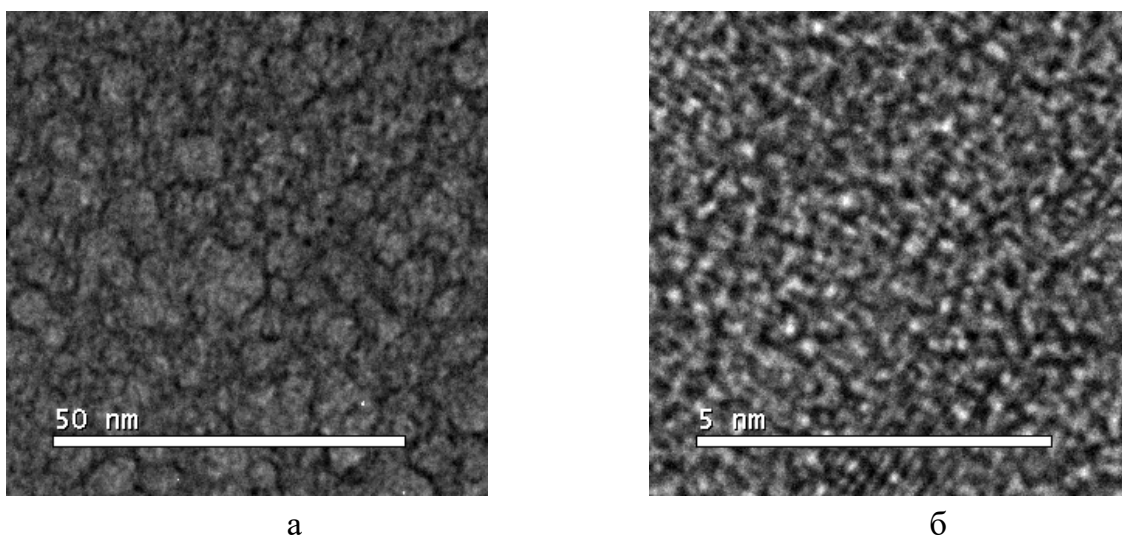
Методика, учитывающая структуру пор и оптическое поглощение в слое, доведена до простых в использовании цветowych диаграмм и монограмм, рассчитанных на основе формул Френеля для коэффициента отражения. Расчеты показывают, что оттенки цвета пористого кремния по мере увеличения толщины меняются от желтого до сине-пурпурного, а при дальнейшем увеличении толщины изменение оттенков происходит по линии зеленый - красный, причем насыщенность цвета монотонно уменьшается.

Данная методика позволяет при известной толщине пленки определить пористость или при известной пористости определить толщину. Путем сравнения цветов сухой и мокрой пленки можно определить и толщину, и пористость.

В третьей главе приведены результаты исследований закономерностей формирования наноструктур на основе кремния, их структурных, электрофизических и оптических свойств.

Исследование влияния выбора кремниевых подложек и режимов их анодной обработки на структурные и электрофизические свойства получаемых пористых пленок показали, что минимальные размеры кремниевого «скелета», обеспечивающие эффективную люминесценцию видимого диапазона, наблюдаются при анодировании кремния в переходном режиме между стационарным режимом формирования пор и электрополировкой. На рисунке 2 представлены микрофотографии пористого кремния, полученного в 1 %-ном водном растворе плавиковой кислоты при плотности анодного тока 4 мА/см².

Как видно из рисунка 2, стенки пор сохраняют кристаллическую структуру и их размер составляет 2 - 3 нм. Исследования спектров комбинационного рассеивания таких пленок показали, что размер стенок пор составляет $2,5 \pm 0,4$ нм при сохранении кристаллической структуры внутри них. Исследования инфракрасной спектроскопии этих же пленок показали наличие пиков в диапазоне волнового числа от 967 до 1105 см⁻¹, что свидетельствует о наличии в исследуемой структуре субоксидов кремния SiO_{0,5}, SiO, SiO_{1,5}. Гравиметрические измерения показали, что толщина этого оксида составляет 3 - 5 нм, что превышает толщину естественного оксида. Поэтому полученный оксид способен пассивировать поверхность пористого кремния от дальнейшего окисления в атмосфере воздуха.



а - увеличение 900 000; б - увеличение 9 000 000

Рисунок 2 - ПЭМ микрофотографии ПК, сформированного анодированием в переходном режиме при плотности тока формовки 4 мА/см² в 1 %-ном водном растворе плавиковой кислоты

Проведенные исследования позволили установить механизм формирования пористого кремния при анодировании в переходном режиме, согласно которому первоначально имеет место окисление поверхности кремния и затем следует травление сформированного окисла в местах увеличения электрического поля. Далее процессы идут одновременно с одинаковыми скоростями. На рисунке 3 схематично показана структура пористого кремния, получаемого анодированием в переходном режиме. Из рисунка видно, что кремниевые стенки пор являются встроенными в оксид, что обеспечивает минимальные размеры кремниевого «скелета» при достаточной его механической прочности. Описанный механизм имеет место при анодировании всех типов кремниевых подложек, включая поликристаллические.

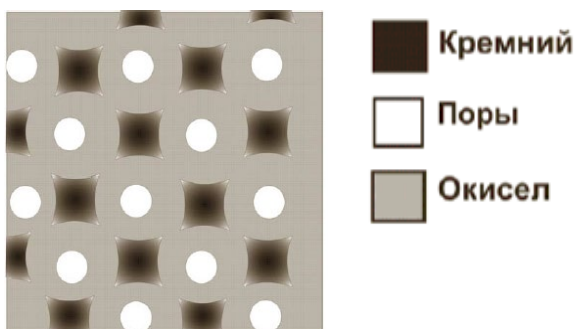


Рисунок 3 – Схематичное представление пористого кремния, сформированного в переходном режиме

Исследование электрических свойств наноструктурированного пористого кремния показало, что при уменьшении размеров стенок пор до единиц нанометров сопротивление пористого слоя на 3 - 4 порядка превышает сопротивление исходных кремниевых подложек, что объясняется уменьшением концентрации легирующей примеси в наноструктурированном слое.

Исследование люминесцентных свойств наноструктурированного пористого кремния показало, что слои, сформированные в режимах переходной области, де-

монстрируют эффективную фотолюминесценцию с максимумом в диапазоне от 510 до 800 нм с временами затухания от 0,1 до 20 мкс. Фотолюминесценция с максимумом в зеленой области наблюдается в свежеприготовленных образцах.

При хранении исследуемых образцов в воздушной атмосфере пик фотолюминесценции смещается в красную область видимого диапазона, после чего наблюдается относительная стабильность фотолюминесценции в зависимости от условий хранения.

Для стабилизации фотолюминесценции в зеленой области было предложено проводить пассивацию пористой структуры, включающую внутреннюю пассивацию во внутрипоровом пространстве и внешнюю при помощи пленок, толщина которых позволяет полностью перекрыть устья пор.

Исследования электролюминесценции (ЭЛ) наноструктурированного пористого кремния при обратном смещении барьера Шоттки между алюминиевым электродом и пористым слоем показали, что спектры имеют два пика 650 и 1150 нм, перекрывая как видимый (рисунок 4), так и ближний инфракрасный диапазоны.

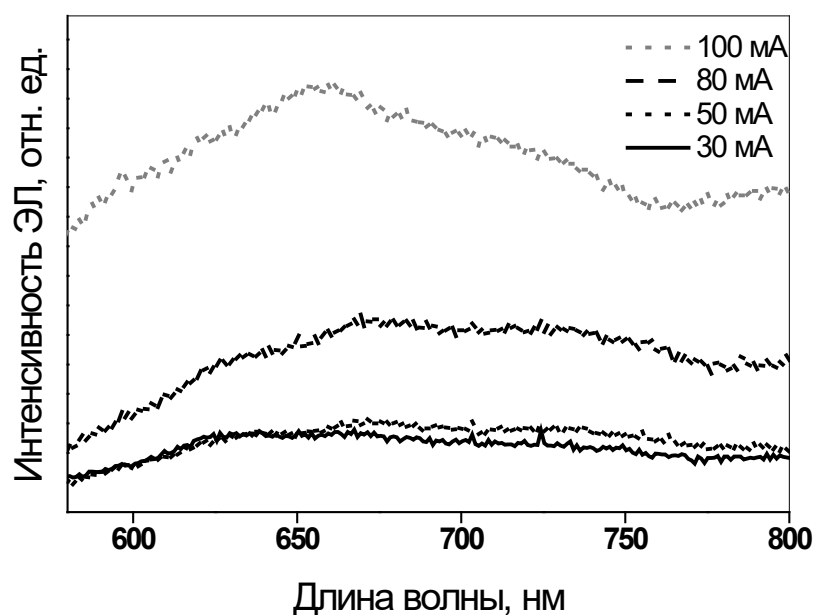


Рисунок 4 - Спектры электролюминесценции при различных значениях обратных токов через слой пористого кремния

Измерения спектров электролюминесценции при различных обратных токах показали, что интенсивность светоизлучения в видимом диапазоне пропорциональна току в степени n , где $n > 1$, в то время как интенсивность электролюминесценции в инфракрасном диапазоне линейна току. Эта особенность еще раз под-

тверждает предположение о различных механизмах светоизлучения в видимом и инфракрасном диапазонах.

Измерения интенсивности светоизлучения показали, что зависимость интенсивности электролюминесценции I_{EL} от величины плотности тока при обратном смещении барьера Шоттки носит степенной характер. Результаты измерений для видимого диапазона представлены на рисунке 5. На этом же рисунке для сравнения показаны прямые линии, соответствующие кубической и линейной зависимостям электролюминесценции от плотности тока - (J^3) и (J^1) соответственно.

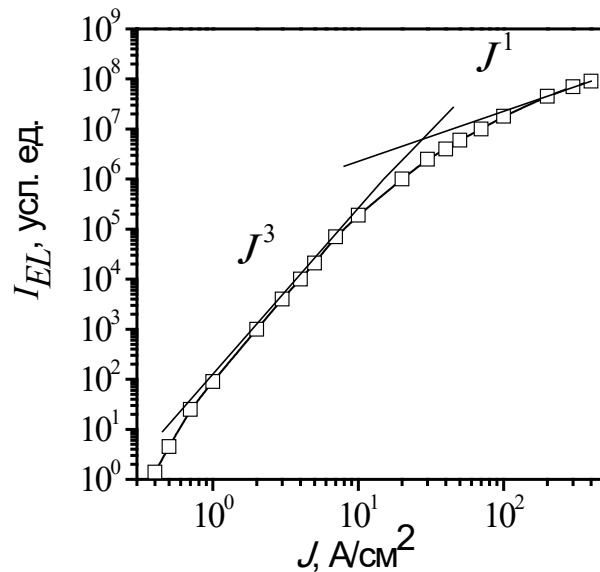


Рисунок 5 - Зависимость интенсивности электролюминесценции (I_{EL}) от плотности тока (J), протекающего через структуру Al/por-Si/n-Si

Для объяснения нелинейной зависимости интенсивности электролюминесценции I_{EL} от плотности тока было проведено моделирование переноса носителей заряда и их излучательной рекомбинации в исследуемой структуре с учетом нескольких основных механизмов генерации-рекомбинации носителей заряда, преобладающих в режиме лавинного пробоя.

Для описания поведения носителей заряда в нанокристаллитах кремния N_{SUM} использовали систему уравнений непрерывности, описывающую процесс инжекции носителей заряда, изменение их концентрации вследствие лавинного умножения, оже- и/или излучательную рекомбинацию носителей заряда в нанокристаллитах с различным числом инжектированных носителей заряда. Вкладом нанокристаллитов, содержащих более трех носителей заряда, мы пренебрегали и ограничивались рассмотрением лишь нанокристаллитов, не содержащих носителей заряда N_0^0 , имеющих один электрон N_0^n или дырку N_p^0 , два носителя заряда противополо-

ложного знака N_p^n , а также два электрона и одну дырку N_p^{2n} или две дырки и один электрон N_{2p}^n . Тогда темп рекомбинации носителей заряда ($R(n^I, p^I)$), интенсивность электролюминесценции (I_{EL}) и эффективность излучательной рекомбинации (η) в слое пористого кремния могут быть записаны следующим образом:

$$R(n^I, p^I) = \frac{N_p^n}{\tau_{R0}} + \frac{N_p^{2n}}{\tau_A} + \frac{N_{2p}^n}{\tau_A}, \quad (2)$$

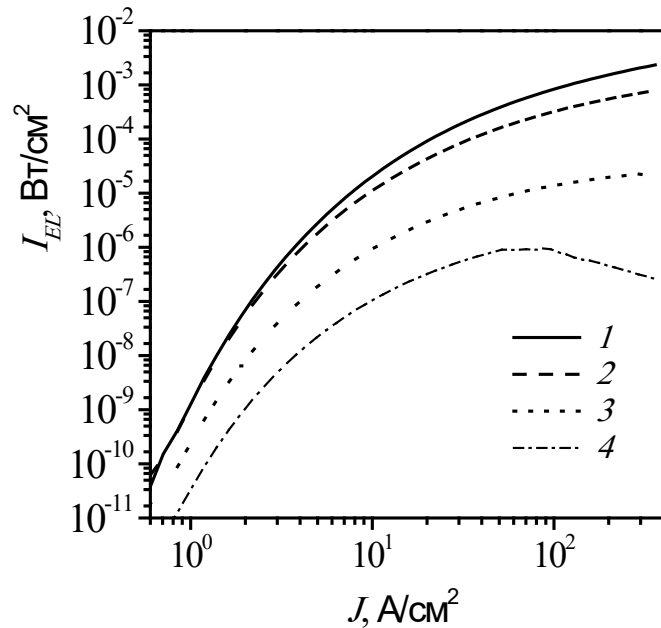
$$I_{EL} \equiv \frac{N_p^n \hbar \omega}{\tau_{R0}} = \frac{G_p N_{SUM} \hbar \omega}{1 + G_n \tau_{R0}}, \quad (3)$$

$$\eta = I_{EL} / \hbar \omega / R(n^I, p^I), \quad (4)$$

$$N_{SUM} = N_0^0 + N_0^n + N_p^0 + N_p^n + N_p^{2n} + N_{2p}^n, \quad (5)$$

где τ_{R0} и τ_A – времена излучательной и оже-рекомбинаций,
 $\hbar \omega$ – энергия излучаемого фотона.

Результаты моделирования электролюминесценции исследуемых структур, представленные на рисунке 6, демонстрируют качественное согласие с экспериментальными данными и показывают, что увеличение количества нанокристаллитов в пористом слое повышает эффективность излучательной рекомбинации в результате снижения вероятности попадания третьего носителя в нанокристаллиты N_p^n , уже содержащие электронно-дырочную пару.



1 - 10^{18}см^{-3} ; 2 - 10^{16}см^{-3} ; 3 - 10^{14}см^{-3} ; 4 - 10^{13}см^{-3}
Рисунок 6 - Результаты расчетов зависимости I_{EL} от J при различных концентрациях нанокристаллитов

Таким образом, разработанная модель генерации - рекомбинации носителей заряда в пористом кремнии использована для моделирования закономерностей процессов переноса и излучательной рекомбинации носителей заряда в Al/por-Si/n-Si структуре при обратном смещении в режиме лавинного пробоя. Установлено, что лавинное умножение основных носителей заряда на границе раздела por-Si/n-Si приводит к нелинейному росту концентрации неосновных носителей заряда, контролирующей интенсивность электролюминесценции. Обнаружено, что относительное снижение вклада безызлучательной оже-рекомбинации, которая подавляет излучательную рекомбинацию, достигается увеличением концентрации нанокристаллитов в пористом кремнии свыше 10^{14}см^{-3} , а также уменьшением температуры рабочей структуры.

Развитая внутрислоевая поверхность наноструктурированного кремния может достигать $1000\text{ м}^2/\text{см}^3$, что определяет его необычные свойства, одним из которых является каталитическое поддержание окислительных реакций, приводящее к горению и даже взрыву исследуемых наноструктур.

Исследования процессов горения и взрыва в наноструктурированном пористом кремнии позволили определить режимы формирования пористых слоев, обеспечивающие протекание данных процессов. На рисунке 7 представлена зависимость размеров вспышки, возникающей при горении и взрыве слоев пористого кремния, пропитанного KNO_3 , от толщины пористого слоя и времени хранения образцов после операции анодирования и пропитки. На этом же рисунке показаны границы между областями, где наблюдались процессы горения и взрыва в исследуемых слоях.

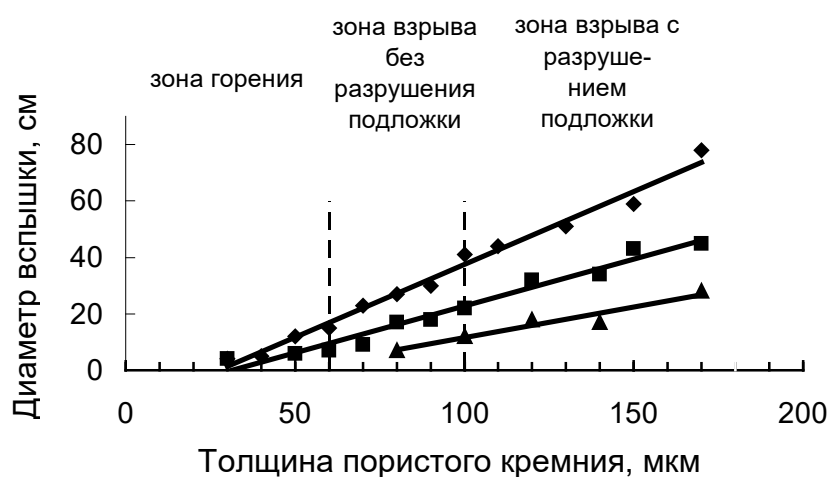


Рисунок 7 - Зависимость размера вспышки при горении и взрыве пористого кремния, пропитанного KNO_3 , от его толщины: ромбы – свежеприготовленные образцы, квадраты и треугольники – образцы после одних и двух суток хранения

Процессы горения наноструктурированного кремния наблюдались в слоях толщиной до 60 мкм, в то время как взрывные процессы происходят при толщинах пористого слоя более 60 мкм. Важно отметить, что размер световой вспышки, наблюдаемый при горении и взрыве пористого кремния максимален для свежеприготовленных образцов, что объясняется наличием водорода в виде Si-Hx групп на формируемой пористой поверхности.

Выделение тепла во взрывообразном процессе может быть описано как:

$$Q^+ = V_q A \exp(-E/RT), \quad (6)$$

где Q^+ - выделяемое тепло,

V_q – тепловой эффект реакции,

A – предэкспоненциальный множитель,

E – энергия активации реакции,

R – газовая постоянная,

T – абсолютная температура.

Отводимое тепло может быть рассчитано по формуле:

$$Q^- = (\lambda/d) (T - T_s) S, \quad (7)$$

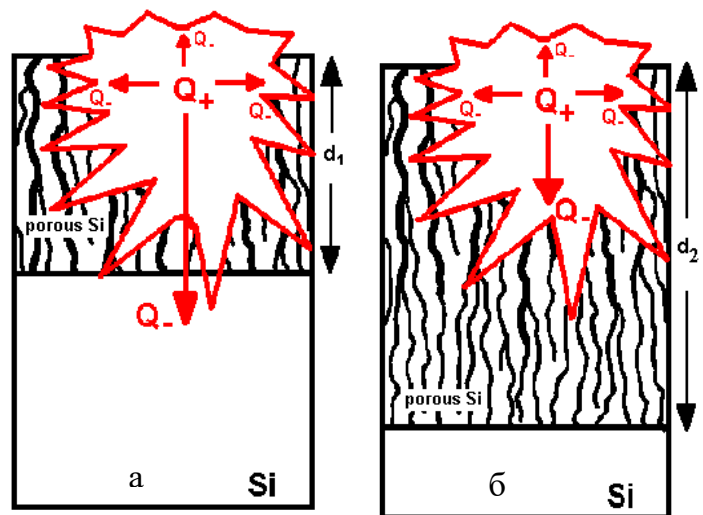
где λ – коэффициент теплопроводности,

d – толщина пористого кремния,

S – площадь реакции,

T, T_s – температура в зоне реакции в окружающей среде, соответственно.

Предложена модель, объясняющая развитие взрывного процесса в пленочных структурах за счет дисбаланса выделяемого и отводимого тепла, приводящего к резкому увеличению температуры и, как следствие, к экспоненциальному увеличению скорости окислительной реакции. Механизмы развития процессов горения и взрыва в исследуемых пленках схематично представлены на рисунке 8.



а - малые толщины пористого слоя – горение,

б - большие толщины пористого слоя – взрыв

Рисунок 8 - Выделение и отвод тепла в ПК при быстром окислении

Следует отметить, что процессы горения и взрыва наблюдаются и в случае других диспергированных материалов, таких как угольная пыль или алюминиевая пудра, однако только в случае пористого кремния удается получить взрыв в пленке толщиной несколько микрон с массой взрываемого материала менее миллиграмма. Поэтому можно говорить о получении взрыва на микронном уровне, то есть микровзрыва.

В четвертой главе приведены результаты исследований формирования наноструктурированных пористых оксидов вентильных металлов и их свойств. При локальном пористом анодировании алюминия исследована анизотропия процесса, определяемая отношением скоростей роста пор в вертикальном и горизонтальном направлениях относительно внешней поверхности алюминиевых пленок. Исследования показали, что анизотропия локального анодирования увеличивается при повышении напряжения и тока анодного процесса, как это показано на рисунке 9.

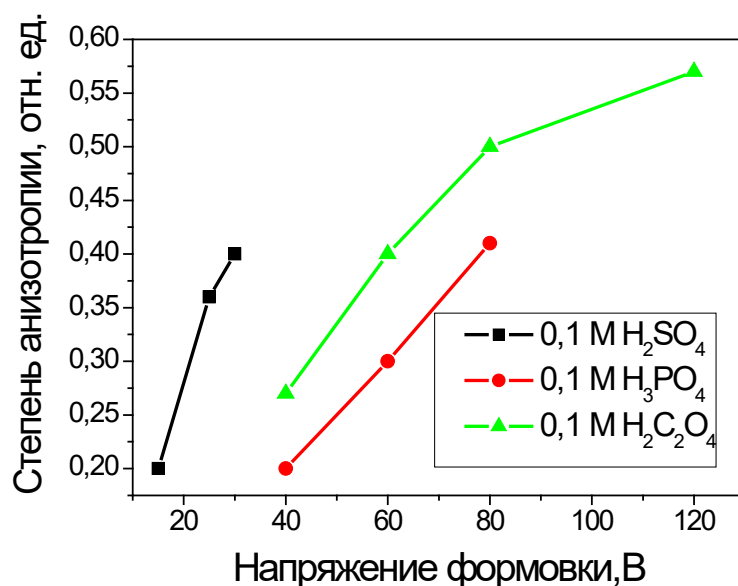
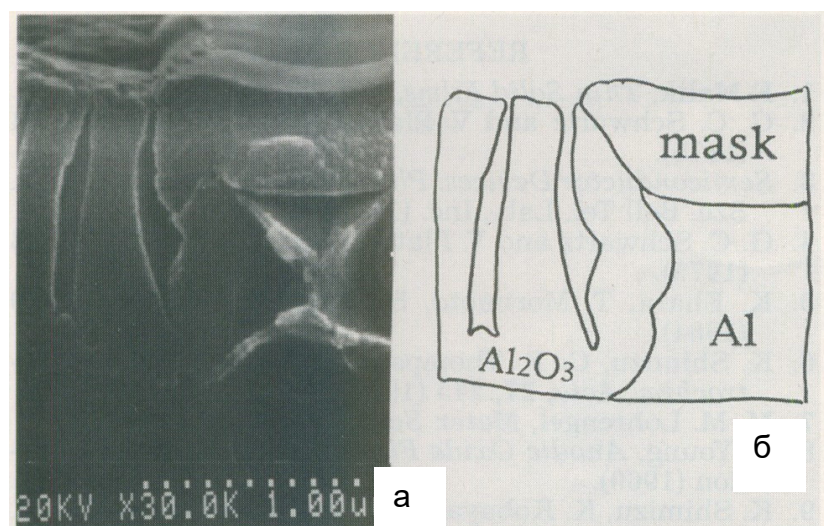


Рисунок 9 - Зависимость степени анизотропии пористого анодирования алюминия от напряжения формовки для различных типов электролитов

Преимущественный рост пор в вертикальном направлении по отношению к горизонтальному (рисунок 10) наблюдается при плотности анодного тока более 10 мА/см² и обусловлен различием напряженности электрического поля и температуры в ячейках пористого оксида, образующихся под маской и за пределами маски. Благодаря установленным механизмам удалось достичь степени анизотропии 80 %, на основе чего были сформированы алюминиевые дорожки с боковыми уходами размеров до 0,2 мкм в пленках толщиной до 1 мкм.



а – микрофотография поперечного сечения; б – схема поперечного сечения
Рисунок 10 - Аллюминиевая дорожка, полученная анодированием в 0,01 М водном растворе щавелевой кислоты при анодном напряжении 200 В

Электрофизические параметры и свойства пористого оксида алюминия находятся в прямой зависимости от его пористости. Поэтому измерения показателя преломления (n) и диэлектрической проницаемости (ϵ) в исследуемых пленках сопровождалось измерениями их пористости. В целях получения воспроизводимости результатов измерений использовали исходные аллюминиевые пленки толщиной до 1 мкм.

Исследования пористого анодирования алюминия в водных растворах серной, ортофосфорной, щавелевой и лимонной кислот показали, что наибольшая пористость получаемых пленок наблюдается для электролитов на основе ортофосфорной кислоты, наименьшая для электролитов на основе лимонной кислоты. Поэтому наименьшие значения показателя преломления и диэлектрической проницаемости соответствуют оксидам, сформированным в электролите на основе ортофосфорной кислоты. За счет выбора электролита можно варьировать значение показателя преломления в диапазоне от 1,37 до 1,58, а значение диэлектрической проницаемости в диапазоне от 5,8 до 8,2.

Другим способом управления электрофизическими параметрами пористого оксида алюминия является использование в качестве исходных пленок аллюминиевых сплавов и нанокмползитов. В частности, при анодировании аллюминиево-кремниевом сплава получают пористые пленки с показателем преломления и диэлектрической проницаемостью значения которых меньше, чем в случае чистых аллюминиевых пленок. При анодировании аллюминиево-титановых пленок получают пористые пленки с параметрами, значения которых превышают аналогичные величины, соответствующие чистым аллюминиевым пленкам.

Еще одним способом управления электрофизическими параметрами пористых алюмооксидных пленок является анодирование при высоких плотностях анодного тока, которые достигаются за счет проведения анодного процесса в менисковой области. В этом случае удается достичь величин плотности тока более 1 А/см^2 и рекордно низкой пористости формируемых пленок менее 1 %, что обеспечивает максимальные значения показателя преломления и диэлектрической проницаемости.

Увеличение пористости за счет химического травления до 70 % приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости такой структуры до 2,4, что делает возможным использование такого материала в качестве «лоу-кей» разделительного диэлектрика межсоединений ИС.

Таким образом, электрофизические параметры пористого оксида алюминия могут варьироваться благодаря выбору исходного анодируемого материала, режимов электрохимической обработки и пористости формируемой наноструктуры.

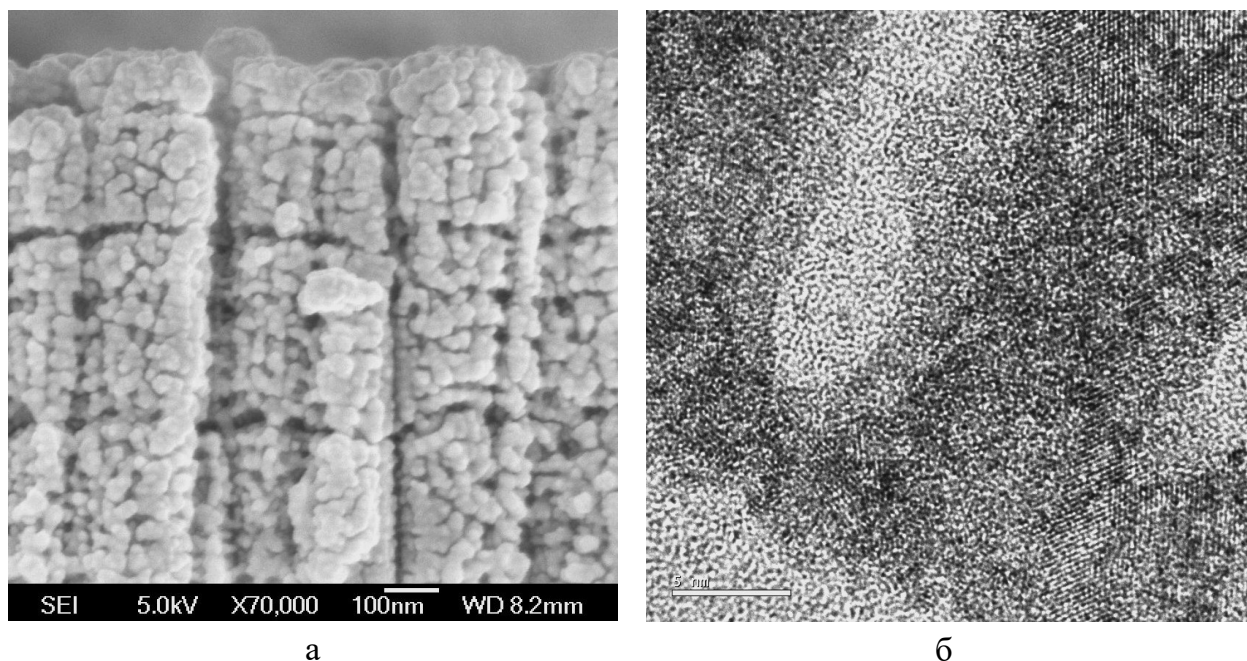
Исследование люминесцентных свойств наноструктурированного пористого оксида алюминия показало наличие фотолюминесценции в голубой области видимого диапазона и также в ближней области ультрафиолетового диапазона, что объясняется наличием F^+ - центров, обусловленных наличием кислородных вакансий, занимаемых анионными комплексами во время анодирования. Эта люминесценция определяется дефектами структуры формируемых оксидов, и после температурных отжигов ее интенсивность в значительной мере снижается.

Для практических применений наиболее интересна люминесценция, вызываемая за счет встраивания внутрь стенок пор других материалов, таких как нанокристаллический кремний либо атомы редкоземельных металлов лантаноидов. Кремниевые наночастицы, встроенные в пористый оксид алюминия, обеспечивают фотолюминесценцию видимого диапазона, практически не отличающуюся от светозлучения пористого кремния. Встраивание внутрь стенок пор атомов эрбия обеспечивает эффективную фотолюминесценцию Er^{3+} -центров на длине волны 1,54 мкм.

Наноструктурированные оксиды тугоплавких вентильных металлов ряда Ti, W, Nb получали как анодированием чистых металлических пленок, так и анодированием нанокompозитных пленок алюминий - тугоплавкий вентильный металл с процентным содержанием последнего 14 - 60 ат.%. Использование нанокompозитных пленок имеет ряд преимуществ, среди которых выделим высокую удельную площадь получаемой поверхности, достигающую $400 \text{ м}^2/\text{см}^3$ за счет формирования пор как нанометрового, так и субнанометрового диапазонов, и возможность получения наноструктурированных пленок с толщинами более 1 мкм.

На рисунке 11 представлены микрофотографии пористых структур вольфрама, полученных химическим вытравлением алюминия в нанокompозитных пленках.

Снимок высокого разрешения показывает, что отдельные фрагменты структуры имеют размеры менее 1 нм.

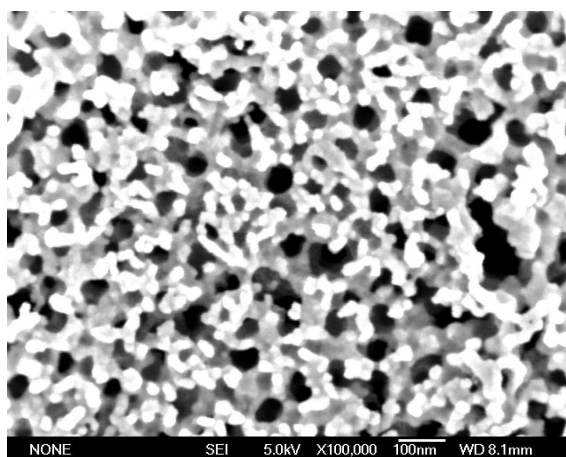


а – поперечное сечение пористого вольфрама (увеличение 50 000); б - ПЭМ снимок поперечного сечения пористого вольфрама (увеличение 3 000 000)

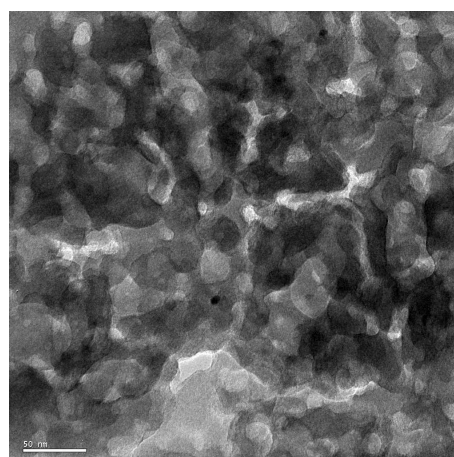
Рисунок 11 - Микрофотографии пористых структур, полученных химическим травлением алюминия в композитных пленках алюминий – тугоплавкий металл

На рисунке 12 представлены микрофотографии алюминиево-титановых нанокompозитных пленок после их пористого анодирования и селективного вытравливания оксида алюминия. Полученная структура включает в себя два типа пор. Первый тип пор составляют вертикальные поры диаметром около 50 нм, второй тип это поры размером 20 - 30 нм с изотропной ориентацией внутри пленки. Вертикальные поры формировались в процессе пористого анодирования алюминиево-титановой нанокompозитной пленки, в то время как малые поры с изотропной ориентацией были сформированы при селективном вытравливании оксида алюминия. Отметим, что похожая пористая структура была получена при селективном вытравливании алюминиевой фазы из нанокompозитной пленки.

Таким образом, был разработан метод формирования пористых оксидов тугоплавких металлов, позволяющий формировать структуры с размерами нанометрового диапазона. Данный метод имеет ряд преимуществ, среди которых отметим использование электролитов, не содержащих ионы фтора, что обеспечивает сохранность формируемой наноструктуры, а также универсальность метода, позволяющая формировать пористые структуры для различных тугоплавких металлов.



а



б

а – РЭМ снимок (увеличение 50 000); б – ПЭМ снимок поверхности (увеличение 250 000)

Рисунок 12 - Микрофотографии поверхности композитных алюминиево-титановых пленок после пористого анодирования в 10 %- ном растворе H_2SO_4 и селективного вытравливания оксида алюминия

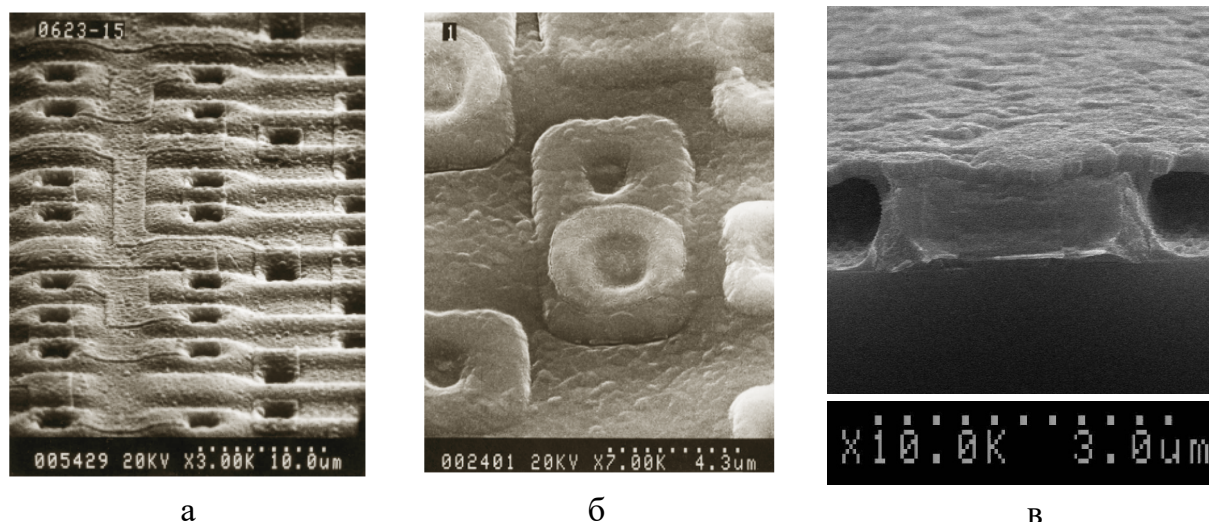
Измерения спектров фотонапряжения в наноструктурированных пористых пленках оксидов титана, вольфрама и ниобия показали, что ширина их запрещенной зоны составляет 3,0, 2,7 и 3,4 эВ соответственно. Удельное сопротивление этих пленок составило $(0,1 - 10) \cdot 10^6$ Ом·см. Исследования вольт-амперных характеристик системы оксид титана – электролит при воздействии ультрафиолетового света показали значительное увеличение фототока в наноструктурированных пленках по сравнению с гомогенно однородными пленками, что объясняется развитой поверхностью исследуемых наноструктур.

Таким образом, исследование электрофизических свойств и параметров наноструктурированных оксидов тугоплавких вентильных металлов ряда Ti, W, Nb показало, что исследуемые материалы обладают новыми свойствами и перспективны для нанотехнологий, в частности, для разработки и изготовления новых устройств интегральной электроники.

Пятая глава посвящена применению электрохимически наноструктурированных пористых пленок в изделиях интегральной электроники.

Электрохимическое анодирование позволяет создавать планарные электрические межсоединения, обладающие высокой надежностью из-за их пассивации «собственным» окислом вентильных металлов. Разработка процесса анизотропного пористого анодирования алюминия обеспечила формирование алюминиевых межсоединений с субмикронными проектными нормами. Разработанная технология использовалась при изготовлении как одноуровневой, так и многоуровневой металлизации ИС на изделиях серии К 565 РУ5, К 565 РУ7, КА 1843 ИР1, КА 1843 ВГ1 и др.

На рисунке 13 представлены фотографии алюмооксидной металлизации. Алюминиевые дорожки, встроенные в оксид алюминия, показаны на рисунке 13,а. Встроенные алюминиевые столбики для межуровневых соединений показаны на рисунке 13,б. Для скоростных ИС была разработана система межсоединений с комбинированным разделительным диэлектриком на основе воздушного зазора (рисунок 13,в). Травление оксида алюминия через наноструктурированные пористые пленки позволяет создавать «лоу кей» - разделительный диэлектрик с диэлектрической проницаемостью менее 2.



а - алюминиевые дорожки, встроенные в оксид алюминия (изделие серии К 565 РУ5); б - встроенные алюминиевые столбики (изделие серии КА 1843 ИР1); в - комбинированный диэлектрик на основе воздушного зазора (тестовый образец)

Рисунок 13 - Микрофотографии встроенной алюминиевой металлизации на различных этапах разработанных маршрутов

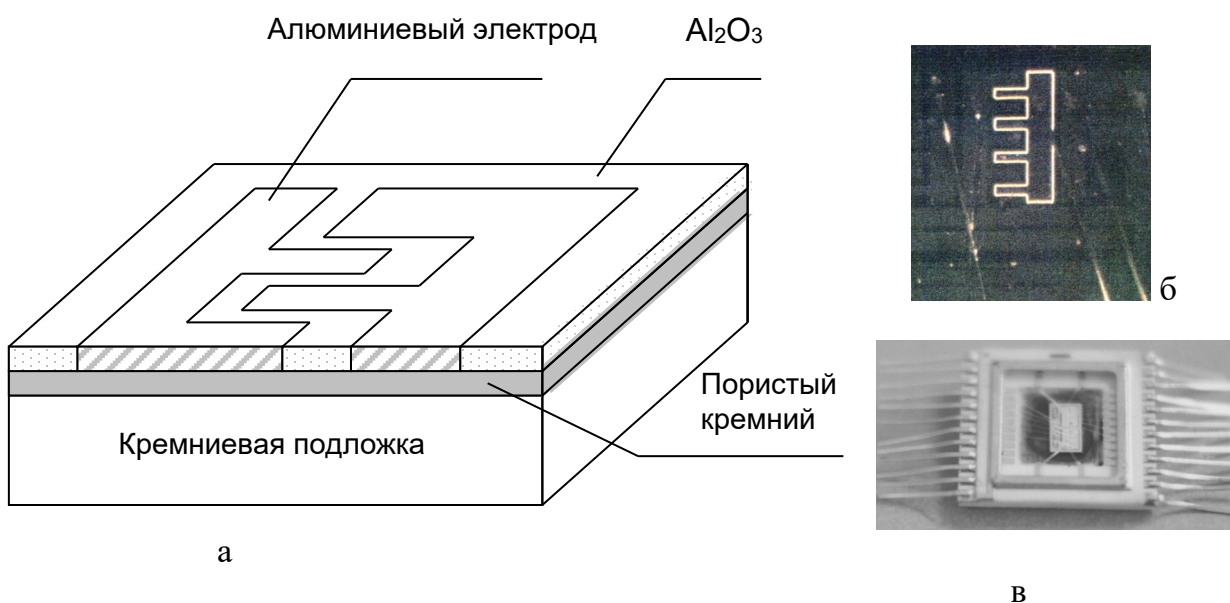
Встроенная алюмооксидная металлизация ИС обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с базовыми аналогами, использующими в качестве пассивирующего диэлектрика двуокись кремния либо ее производные. Среди преимуществ отметим способность работать при высоких плотностях токов, превышающих 10^7 А/см^2 , за счет высокой теплопроводности оксида алюминия, а также планарность формируемой конструкции за счет отсутствия операций травления алюминия.

Около 90 % микроэлектронных изделий изготавливаются на основе кремниевой технологии. Тем не менее, проблема создания эффективных кремниевых источников света до сих пор остается нерешенной. Обнаружение эффективной фото- и электролюминесценции в наноразмерном кремнии послужило толчком для разработки светодиодов на основе наноструктурированного пористого кремния.

В ходе выполнения диссертационной работы была разработана конструкция светодиодов на основе пористого кремния, сформированного в переходном режиме, характеризуемом сочетанием порообразования и электрополировки. На рисун-

ке 14,а представлено схематичное изображение разработанной конструкции светодиода, микрофотография светоизлучающей зоны показана на рисунке 14,б, а фотография светодиода в керамическом корпусе показана на рисунке 14,в. Как показано на рисунке 14,а, пористый кремний защищен от окружающей атмосферы слоем оксида алюминия, прозрачного для света видимого и инфракрасного диапазонов, что обеспечивает надежность функционирования светодиода.

Испытания светодиодов на надежность при непрерывном светоизлучении в диапазоне токов от 400 мА/см^2 до 40 А/см^2 показали, что ни один из десяти диодов не имел заметного ухудшения параметров при 1000 часах наработки. Результаты исследования быстродействия светодиодов свидетельствуют о способности работать на частоте до 200 МГц при временной задержке светового сигнала около 1 нс. Отметим, что полученные временные значения не являются предельными, и дальнейшие исследования позволят достичь работы светодиодов в субнаносекундном диапазоне.



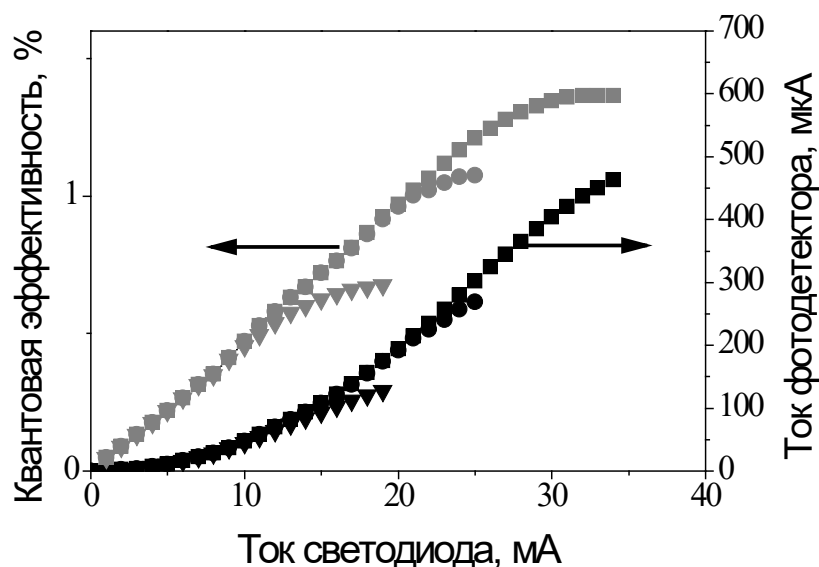
а - схематичное изображение разработанной конструкции светодиода с гребенчатыми алюминиевыми электродами; б - фотография светоизлучающего электрода при отрицательном электрическом смещении; в - фотография светодиода в керамическом корпусе

Рисунок 14 - Светодиод на основе наноструктурированного пористого кремния

Разработанные светодиоды на основе наноструктурированного пористого кремния способны как излучать световой сигнал, так и принимать его, поэтому была разработана интегральная оптоэлектронная ячейка, состоящая из двух смежных светодиодов, соединенных между собой волноводом на основе анодного оксида алюминия с сердцевинкой, содержащей наночастицы оксида титана. Схематичное изображение разработанной конструкции оптоэлектронной ячейки представлено на рисунке 15. Один из диодов Шоттки при смещении, превышающем пороговую ве-

личину лавинного пробоя, работает как светодиод, второй, при смещении менее напряжения лавинного пробоя, функционирует как фотодетектор. Анодный оксид алюминия выполняет двойную роль. С одной стороны, он защищает пористый слой от атмосферного кислорода, а с другой стороны, он выполняет функции световода. То есть свет, излучаемый светодиодом, проходит внутри слоя анодного оксида алюминия как по оптическому волноводу.

Кроме оптических межсоединений светодиоды на ПК могут быть использованы для микродисплейных устройств. В этом случае реализуются следующие преимущества: возможна интеграция схем управления и светоизлучающей матрицы на одном кремниевом кристалле; высокая плотность светоизлучающих пикселей, потому что размер самого пикселя может быть несколько микрон; низкая стоимость и простота изготовления таких микродисплейных устройств.



квадраты - импульсный режим со скважностью 100; точки - импульсный режим со скважностью 10; треугольники - режим постоянного смещения

Рисунок 16 - Зависимость тока фотодетектора и квантовой эффективности светодиодов от входных токов при различных режимах питания

Исследования процессов горения и взрыва наноструктурированного кремния позволили разработать и изготовить прототипные микросистемные устройства. Кремниевые микроактюаторы, использующие энергию горения пористого кремния для передвижения в пространстве, способны преодолевать расстояние в несколько метров. Оценочные расчеты показали, что эффективность преобразования энергии горения в кинетическую энергию достигает 5 %.

Процессы горения и взрыва различаются величиной энергии, выделяемой в единицу времени. Более высокая удельная энергия при взрыве открывает принципиально новые возможности для его практического использования. Так процесс взрыва пористого кремния был использован для разделения кремниевых пластин на отдельные чипы. По сравнению с традиционными методами лазерного и алмазного разделения кремниевых пластин данный метод имеет ряд преимуществ. В

частности, ширина разделительной дорожки может быть уменьшена до 40 мкм. При помощи этого метода можно вырезать кремниевые кристаллы любой формы, в том числе круглые и овальные, так как линия разреза формируется при помощи операций фотолитографии. К другим возможным практическим применениям процесса взрыва пористого кремния следует отнести изготовление самоуничтожающихся кремниевых чипов. В наших экспериментах при толщинах пористого кремния более 100 мкм взрыв приводил к полному разрушению нижележащей кремниевой подложки.

Наноструктурированный оксид титана, получаемый на основе нанокompозитной алюминиево-титановой пленки, использовали при изготовлении электрохромных дисплейных устройств. Изготовленные электрохромные ячейки демонстрировали многократные переключения из бесцветного (просветленного) серого состояния в цветное синее благодаря электрическому смещению 1,5 В на катоде.

Разработанный метод изготовления электрохромных устройств обладает рядом преимуществ по сравнению с известными методами. Во-первых, диффузионное отражение (более 60 %) в изготовленных электрохромных ячейках превосходит аналогичную величину для известных конструкций за счет развитой внутренней поверхности. Во-вторых - это более широкий угол наблюдения электрохромного эффекта (40°) в разработанных ячейках за счет более высокой пористости используемых наноструктурированных оксидов.

На основе наноструктурированного оксида вольфрама с площадью внутренней поверхности более $200 \text{ м}^2/\text{см}^3$ были изготовлены фотоэлектролизные ячейки для получения водорода под действием солнечного света. Отличительной особенностью ячеек является интеграция наноструктурированного оксида с кремниевой поверхностью, позволяющая использовать большую часть солнечного спектра на поверхности земли, что в конечном счете обеспечило снижение энергетических затрат при фотостимулированном электролизе воды, при которых для получения 1 см^3 водорода требуется электроэнергия менее 10 Вт·с.

В приложениях представлены акты об использовании результатов диссертационной работы в производстве интегральных микросхем и в учебном процессе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Экспериментально установлено, что электрохимическое анодирование монокристаллического и поликристаллического кремния в водных растворах фтористоводородной кислоты при электрических режимах, соответствующих переходу от образования пор к электрополировке, приводит к формированию слоев пористо-

го кремния по механизму первоначального окисления кремния и последующего локального травления в местах увеличения напряженности электрического поля. Сформированный пористый кремний демонстрирует эффективную и стабильную фотолюминесценцией видимого диапазона (с пиком в области от 510 до 800 нм и с временами затухания от 0,1 до 20 мкс). Показано, что стабильная люминесценция в сформированных пористых структурах имеет место при размерах стенок пор менее 5 нм. При этом стенки пор состоят из нанокристаллического кремния, покрытого слоем оксида кремния, свойственного структурам, полученным при анодировании в переходном режиме [3-А, 11-А, 20-А, 21-А, 49-А, 56-А, 88-А].

2. Разработана модель генерации электронно-дырочных пар в наноструктурированном кремнии при обратном смещении сформированного на его поверхности барьера Шоттки, которая учитывает структурные особенности этого материала и связанные с ними процессы излучательной и безызлучательной рекомбинаций. Проведенные расчеты интенсивности электролюминесценции в зависимости от концентрации кремниевых нанокристаллитов и плотности электрического тока, проходящего через исследуемые структуры, показали, что максимальная эффективность электролюминесценции достигается при увеличении концентрации нанокристаллитов и электрического поля в структуре, в то время как увеличение температуры в результате выделения джоулева тепла приводит к росту вклада безызлучательной оже-рекомбинации [24-А, 25-А, 31-А, 44-А].

3. Разработана конструкция светодиодов на основе наноструктурированного кремния, встроенного в оксидную матрицу, изготовлены их опытные образцы, на которых получены следующие параметры: внешняя квантовая эффективность при импульсном режиме накачки достигает 1,4 %, что превышает аналогичные параметры известных зарубежных аналогов; время отклика светового сигнала при уменьшении резистивно-емкостных задержек составляет 1,2 нс; стабильность светоизлучения достигает 1000 часов непрерывного светоизлучения. Разработана конструкция оптоэлектронной пары на основе светодиодов на пористом кремнии и алюмооксидного волновода с сердцевиной, легированной оксидом титана. Продемонстрировано преобразование входного электрического импульса в световой, передача его по волноводу с конверсией в электрический сигнал при помощи фотоприемника с коэффициентом преобразования по току 10^{-2} [4-А, 5-А, 8-А, 10-А, 12-А, 15-А, 18-А, 28-А, 32-А, 36-А, 50-А, 53-А, 95-А, 98-А].

4. Установлено, что при плотностях анодного тока более 10 мА/см^2 возникает анизотропия процесса локального пористого анодирования алюминия в структурах с поверхностной маской. Она обусловлена действием двух механизмов анодного окисления, определяемых локальной напряженностью электрического поля и температурой в ячейках пористого оксида, образующихся под маской, и в ячейках, находящихся за пределами маски. Установлены условия анодного процесса, позво-

ляющие достичь степени анизотропии до 80 %, что позволило сформировать элементы алюминиевых межсоединений с боковыми ухватами размеров, сниженными до 0,2 мкм в пленках толщиной до 1 мкм [1-А, 2-А, 55-А, 63-А, 83-А, 85-А].

5. Показано, что выбором различных режимов анодирования и последующей обработки формируемых алюмооксидных пленок можно получать наноструктурированные пленки с диэлектрической проницаемостью, сниженной до 2,4. Разработана конструкция разделительного диэлектрика внутриуровневой изоляции алюминиевых межсоединений с использованием воздушного зазора, что позволило изготовить тестовые структуры с диэлектрической проницаемостью до 1,6. Установлено, что напряжение пробоя и токи утечки между алюминиевыми дорожками тестовых структур удовлетворяют требованиям СБИС. Показано, что алюмооксидная изоляция обладает высокой теплопроводностью, что позволяет алюминиевым межсоединениям работать при плотностях тока до $1,8 \cdot 10^7$ А/см², в то время как аналогичные межсоединения, пассивированные оксидом кремния, при токах $1,2 \cdot 10^7$ А/см² перегорают из-за джоулева перегрева [19-А, 22-А, 30-А, 34-А, 43-А].

6. Показано, что электрохимическое анодирование алюминивно-эрбиевых нанокomпозитных пленок обеспечивает оптическую активацию ионов эрбия в алюмооксидной матрице без дополнительных термических обработок. Интенсивная фотолюминесценция эрбиевых ионов с максимумом на длине волны 1,53 мкм в температурном диапазоне 4,2-300 К обусловлена оптически активными атомами эрбия в анодном оксиде алюминия, сформированном при комнатной температуре. Показано, что за счет встраивания в анодный оксид кремниевых наночастиц интенсивность эрбиевой фотолюминесценции увеличивается в несколько раз, что обусловлено дополнительным возбуждением люминесценции через кремниевые наночастицы. Получена электролюминесценция ионов эрбия на длине волны 1,53 мкм в структурах на основе оксида алюминия с кремниевыми наночастицами [16-А, 39-А, 40-А, 58-А, 65-А, 92-А, 101-А].

7. Установлено, что процессы горения и взрыва пористого кремния наблюдаются при толщинах стенок пор менее 10 нм, причем горение происходит в пористых слоях толщиной до 60 мкм, а взрыв – в слоях толщиной свыше 60 мкм. Предложена модель развития процессов горения и взрыва в пленках пористого кремния, основанная на тепловом механизме развития процессов. Показано, что удельная энергия, выделяемая при окислении пористого кремния в процессе горения или взрыва, превышает аналогичную величину для известных углеводородных видов топлива. Разработаны конструкции микроактюаторов, использующих энергию горения и взрыва пористого кремния [29-А, 33-А, 35-А, 37-А, 38-А, 47-А, 51-А, 64-А, 69-А, 74-А, 100-А].

8. Разработан метод формирования нанопористых композитных пленок, состоящих из оксида алюминия и оксида тугоплавкого вентильного металла ряда Ti,

W, Nb. Метод использует магнетронное совместное напыление алюминия и тугоплавкого металла с процентным содержанием последнего от 14 до 60 ат.%, после чего осуществляют пористое анодирование этих пленок в электролите на основе серной кислоты. Размер элементов структуры каждого из составляющих композит материалов находится в пределах от 0,5 до 20 нм, что при селективном вытравливании оксида алюминия обеспечивает формирование пористого оксида тугоплавкого металла с удельной поверхностью от 100 до 400 м²/см³. Получены анодные пленки пористых оксидов тугоплавких вентильных металлов ряда Ti, W, Nb толщиной более 3 мкм. Пористые оксиды титана и вольфрама обладают полупроводниковыми свойствами, характеризуемыми шириной запрещенной зоны 3,0 эВ и 2,7 эВ соответственно и удельным сопротивлением (0,1 - 10)·10⁶ Ом·см [43-А, 48-А, 54-А, 66-А, 73-А, 76-А, 77-А, 84-А, 105-А].

9. Изготовлены электрохромные дисплейные устройства на основе нанопористых оксидов титана и вольфрама, полученных из композитных пленок алюминий-титан и алюминий-вольфрам. Электрохромные устройства переключаются из затемненного в просветленное состояние при напряжении 1 - 1,5 В, обеспечивая диффузионное рассеивание отраженного света до 60 % и угол пространственного обзора до 40 град за счет высокой пористости наноструктурированного оксида тугоплавкого металла. Устройства изготовлены на кремниевой подложке по технологии, совместимой с кремниевой технологией изготовления К-МОП интегральных микросхем [46-А, 48-А, 54-А, 97-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанный метод определения толщины и пористости пленок пористого кремния по их интерференционным цветам может быть использован и для других пористых материалов, используемых в твердотельной электронике. Метод позволяет оценивать параметры пористых пленок непосредственно в процессе их формирования в электрохимической ячейке [9-А].

Предложенная технология формирования алюмооксидных систем межсоединений элементов интегральных микросхем была опробована в условиях серийного производства ПО «Интеграл» на изделиях серий К565РУ5, КА 1843 ВГ1, КА 1843 ВГ2, КА 1843 ИР1. В 2004 г. она включена в информационный бюллетень разработок Государственной научно-технической программы «Белэлектроника». Технология предназначена для изготовления интегральных микросхем с субмикронными топологическими нормами, в частности, для планаризации рельефа металлизации и обеспечения заполнения контактных окон субмикронных размеров между уровнями алюминиевых межсоединений (акт использования результатов докторской дис-

сертации в НТЦ «Белмикросистемы» НПО Интеграл от 06.07.2008) [1-А, 2-А, 55-А, 79-А, 85-А].

Разработаны конструкция и технология изготовления лавинных светодиодов на основе наноструктурированного пористого кремния, которые могут использоваться при изготовлении источников света на кремниевых чипах для оптических межсоединений, а также для микродисплейных устройств. Разработанная конструкция и технология ее изготовления были использованы НТЦ «Белмикросистемы» ПО Интеграл для изготовления опытных образцов светодиодов по заданию программы «INCO-COPERNICUS», финансируемой Европейскими комиссиями (акт использования результатов докторской диссертации в НТЦ «Белмикросистемы» НПО Интеграл от 06.07.2008) [4-А, 5-А, 8-А, 10-А, 12-А, 13-А, 36-А, 53-А].

Разработан метод получения наноструктурированных оксидов тугоплавких металлов ряда Ti, W, Nb путем анодирования композитных пленок алюминий-тугоплавкий металл. Разработанный метод может использоваться при изготовлении электро-оптических устройств. Изготовлены фотоэлектролизные ячейки на основе пористого оксида вольфрама на кремнии с эффективностью преобразования солнечного света около 10 % [48-А, 54-А, 84-А].

Результаты работы образуют физическо-технологические основы разработки новых изделий твердотельной электроники с улучшенными параметрами на основе электрохимически наноструктурированных материалов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1-А. Формирование алюминиевых межсоединений субмикронных размеров анодным окислением / С.К. Лазарук, И.Л. Баранов, М.Ю. Гарус, Е.В. Сочивец // Электронная техника. Сер. 2, Полупроводниковые приборы. – 1988. – Вып. 6. – С. 37 - 40.

2-А. Anisotropy of aluminium porous anodization process / S. Lazarouk, I. Baranov, G. Maello, E. Proverbio, G. De Cesare, A Ferrari // Journal of Electrochemical Society. – 1994. – Vol. 141. – P. 2556-2559.

3-А. Porous silicon obtained by anodization in the transition regime / M. Bertoloti, F. Carassiti, E. Fazio, A. Ferrari, S. La Monica, S. Lazarouk, G. Liakhov, G. Maello, E. Proverbio, L. Schirone // Thin Solid Films. – 1995. – Vol. 255. – P. 152-154.

4-А. Visible light from aluminum-porous silicon Schottky Junctions / S. Lazarouk, P. Jaguiro, S. Katsouba, S. La Monica, G. Maiello, G. Masini, A. Ferrari // Thin Solid Films. – 1996. – Vol. 276. – P. 168-170.

5-A. Electroluminescence from aluminum-porous silicon reverse bias Schottky diodes formed on the base of highly doped n-type polysilicon / S. Lazarouk, V. Bondarenko, S. La Monica, G. Maiello, G. Masini, P. Pershukevich, A. Ferrari // *Thin Solid Films*. – 1996. – Vol. 276. – P. 296-298.

6-A. Electrical characterization of visible emitting electroluminescent Schottky diodes based on n-type porous silicon and on highly doped n-type porous polysilicon / S. Lazarouk, V. Bondarenko, P. Jaguiro, N. Lacquaniti, S. La Monica, G. Maiello, G. Masini, A. Ferrari // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 1996. – Vol. 198-200. – P. 973-976.

7-A. White light emission from porous silicon aluminum Schottky junctions / G. Masini, S. La Monica, G. Maiello, S. Lazarouk // *Nuovo Cimento Soc. Ital. Fis.* – 1996. – Vol. 18. – P. 1205-1212.

8-A. Stable electroluminescence from reverse biased n-type porous silicon-aluminum Schottky junction device / S.K. Lazarouk, P. Jaguiro, S. Katsouba, G. Masini, S. La Monica, G. Maiello, A. Ferrari // *Applied Physics Letters*. – 1996. – Vol. 68. – P. 2108-2110.

9-A. Visual determination of thickness and porosity of porous silicon layers / S. Lazarouk, P. Jaguiro, S. Katsouba, G. Maiello, S. La Monica, G. Masini, E. Proverbio, A. Ferrari // *Thin Solid Films*. – 1997. – Vol. 297. – P. 97-101.

10-A. Progress in the field of integrated optoelectronics based on porous silicon / S. La Monica, G. Maiello, A. Ferrari, G. Masini, S. Lazarouk, P. Jaguiro, S. Katsouba // *Thin Solid Films*. – 1997. – Vol. 297. – P. 261-264.

11-A. Lazarouk, S.K. Formation of pillared arrays by anodization of silicon in the boundary transition region: an AFM and XRD study // S.K. Lazarouk, A.A.G. Tomlinson // *Journal of Materials Chemistry*. – 1997. – Vol. 7, № 4. – P. 667-673.

12-A. Silicon Emitting Device Will Knock Down Communication Bottleneck? / M. Balucani, S. La Monica, S. Lazarouk, G. Maiello, G. Masini and A. Ferrari // *Solid State Phenomena*. – 1997. – Vol. 54. – P. 8-12.

13-A. Characterization of Porous Silicon Light Emitting Diodes in High Current Density Conditions / S. La Monica, M. Balucani, S. Lazarouk, G. Maiello, G. Masini, P. Jaguiro and A. Ferrari // *Solid State Phenomena*. – 1997. – Vol. 54. – P. 21-26.

14-A. Light Emission Characterization of Al-Porous Silicon Schottky Junction / S. La Monica, M. Balucani, G. Castaldo, S. Lazarouk, G. Maiello, G. Masini and A. Ferrari // *Solid State Phenomena*. – 1997. – Vol. 54. – P. 27-36.

15-A. Lazarouk, S. Integrated Optoelectronic Unit Based on Porous Silicon / S. Lazarouk, P. Jaguiro, V. Borisenko // *Physica of Status Solidi (a)*. – 1998. – Vol. 165. – P. 87-90.

16-A. Lazarouk, S.K. Room-Temperature Formation of Erbium-Related Luminescent Centers in Anodic Alumina / S.K. Lazarouk, A.V. Mudryi, V.E. Borisenko // Applied Physics Letters. – 1998. – Vol. 73. – P. 2272-2274.

17-A. Лазарук, С.К. Перспективы лавинных светодиодов на основе пористого кремния для кремниевых оптических межсоединений / С.К. Лазарук, А.Г. Батуревич // Известия Белорусской инженерной академии. – 1999. – №1(7)/2. – С. 147-149.

18-A. On the Route Towards Si-based Optical Interconnects / S.K. Lazarouk, A.A. Leshok, V.E. Borisenko, C. Mazzoleni, L. Pavesi // Microelectronic Engineering. – 2000. – Vol. 50.– P. 81-86.

19-A. Porous alumina as low- ϵ insulator for multilevel metallization / S. Lazarouk, S. Katsouba, A. Leshok, A. Demianovich, V. Stanovski, S. Voitech, V. Vysotski, and V. Ponomar // Microelectronic Engineering. – 2000. – Vol. 50.– P. 321-327.

20-A. Optical characterization of reverse biased porous silicon light emitting diode / S. Lazarouk, S. Katsouba, A. Tomlinson, S. Benedetti, C. Mazzoleni, V. Mulloni, G. Mariotto, L. Pavesi // Materials Science and Engineering. – 2000. – Vol. B69-70. – P. 114-117.

21-A. Photophysical properties of nano Si/SiO_x composites in Al/composite mono Si structures for green light emitting and photodetector-Schottky diodes / E. Buzaneva, A. Gorchinsky, G. Popova, T. Veblaya, S. Zankovych, Yu. Boiko, P. Zolotarenko, V. Pogorelov, V. Bukalo, A. Benilov, S. Lazarouk // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2000. –Vol. 3. – P. 529-537.

22-A. Reliability of built in aluminum interconnection with low- ϵ dielectric based on porous anodic alumina / S. Lazarouk, S. Katsouba, A. Demianovich, V. Stanovski, S. Voitech, V. Vysotski, and V. Ponomar // Solid-State Electronics. – 2000. – Vol. 44.– P. 815-818.

23-A. Светодиоды на основе пористого кремния для внутричиповых оптических межсоединений / С.К. Лазарук, П.В. Жагиро, С.М. Мельников, А.П. Прохоренко // Известия Белорусской инженерной академии. – 2000. – №1(9)/2. – С. 69-71.

24-A. Лазарук, С.К. Генерация электронно-дырочных пар и их излучательная рекомбинация при обратном смещении барьера Шоттки в пленках пористого кремния / С.К. Лазарук, Ю.А. Берашевич // Известия Белорусской инженерной академии. – 2001. – № 1(11)/3. – С. 48-51.

25-A. Физические явления в лавинных светодиодах на основе пористого кремния / С.К. Лазарук, П.В. Жагиро, А.А. Лешок, В.Е. Борисенко // Известия РАН. Сер. Физическая. - 2002. – Т.66. – С. 178-181.

26-А. Лазарук, С.К. Увеличение эффективности лавинных светодиодов на основе пористого кремния при импульсном режиме работы / С.К. Лазарук, П.В. Жагиро, А.А. Лешок // Известия Белорусской инженерной академии. – 2002. – №2 (14)/2. – С. 26-28.

27-А. Лазарук, С.К. Электролюминесцентные структуры на основе кремниевых наночастиц, встроенных в анодный оксид алюминия / С.К. Лазарук, А.А. Лешок, В.Е. Борисенко // Известия РАН. Сер. Физическая. - 2003. – Т.67. – С. 178-180.

28-А. Reverse biased porous silicon light-emitting diodes for optical intra-chip interconnects / S.K. Lazarouk, P.V. Jaguiro, A.A. Leshok and V.E. Borisenko // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2003. – Vol. 16. – P. 495-498.

29-А. Особенности взрывной реакции в пленках пористого кремния при механическом инициировании / А.В. Долбик, А.А. Ковалевский, С.К. Лазарук, В.А. Лабунов, Д.Н. Унучек // Известия Белорусской инженерной академии. – 2003. – № 1(15)/4. – С. 41-43.

30-А. Лазарук, С.К. Термический разогрев алюминиевой металлизации при различных типах внутриуровневой изоляции / С.К. Лазарук, П.С. Кацуба, А.А. Лешок // Известия Белорусской инженерной академии. – 2003. – № 1(15)/4. – С. 14-16.

31-А. Лазарук, С.К. Светоизлучающие структуры на основе кремниевых наночастиц в анодном оксиде алюминия / С.К. Лазарук, А.А. Лешок, В.Е. Борисенко // Микросистемная техника. – 2003. – № 3. – С. 16-18.

32-А. Светоизлучающие диоды на основе пористого кремния / С.К. Лазарук, А.А. Лешок, П.В. Жагиро, В.Е. Борисенко // Доклады БГУИР. – 2004. – № 3. – С. 27-37.

33-А. Исследование степени ионизации газа при взрывной реакции в пленках пористого кремния / С.К. Лазарук, А.В. Долбик, П.С. Кацуба, В.А. Лабунов // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – № 2(18)/2. – С. 10-12.

34-А. Лазарук, С.К. Разделительный диэлектрик с низкой диэлектрической проницаемостью на основе пористого анодного оксида алюминиево-титанового сплава и алюминия / С.К. Лазарук, А.А. Лешок, П.С. Кацуба // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – № 2 (18)/2. – С. 16-18.

35-А. Термодинамическая оценка реакций в поровом пространстве, ответственных за загрязнение пористого слоя кремния / А.А. Ковалевский, А.В. Долбик, С.К. Лазарук, В.А. Лабунов // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – № 2(18)/2. – С. 47-49.

36-А. Эффективность лавинных светодиодов на основе пористого кремния / С.К. Лазарук, А.А. Лешок, В.А. Лабунов, В.Е. Борисенко // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39. – С. 149-152.

37-А. Термодинамическая оценка накопления продуктов электрохимической реакции в поровом пространстве пористого слоя кремния / А.А. Ковалевский, А.В. Долбик, С.К. Лазарук, В.А. Лабунов // Доклады НАНБ. – 2005. – Т. 49, № 3. – С. 103-106.

38-А. Быстрые экзотермические процессы в пористом кремнии / С.К. Лазарук, А.В. Долбик, П.В. Жагиро, В.А. Лабунов, В.Е. Борисенко // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39. – С. 917-919.

39-А. Фотолюминесценция легированных эрбием алюмооксидных пленок со встроенными кремниевыми наночастицами / С.К. Лазарук, А.В. Мудрый, А.В. Иванюкович, А.А. Лешок, Д.Н. Унучек, В.А. Лабунов // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39. – С. 927-930.

40-А. Электролюминесцентные структуры на основе наноразмерного кремния, легированного кремнием / Д.Н. Унучек, С.К. Лазарук, А.В. Мудрый, А.А. Лешок, В.А. Лабунов, В.Е. Борисенко // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. - № 1(19)/2. - С. 184-187.

41-А. Стабилизация зеленой фотолюминесценции в пористом кремнии при его кислородной пассивации / Д.Н. Унучек, С.К. Лазарук, Е.В. Луценко, В.Н. Павловский, В.А. Лабунов // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. – № 1(19)/5. – С. 33-35.

42-А. Исследование вольт-амперных характеристик контакта алюминий-пористый кремний при различных температурах кремниевой подложки / П.С. Кацуба, Д.Н. Унучек, А.А. Румянцев, С.К. Лазарук, В.А. Лабунов // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. - № 1(19)/5. - С. 36-38.

43-А. Пористый оксид титана, сформированный анодированием алюминиево-титанового сплава с последующим селективным травлением оксида алюминия / С.К. Лазарук, А.А. Лешок, А.А. Ларченко, В.А. Ухов // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. – № 1(19)/5. – С. 61-63.

44-А. Berashevich, J.A. Electroluminescence in Porous Silicon at a Reverse Bias Voltage Applied to the Schottky Barrier / J.A. Berashevich, S.K. Lazarouk, and V.E. Borisenko // Semiconductors. – 2006. – Vol. 40. – P. 234-239.

45-А. Сасинович, Д.А. Пористый оксид алюминия с регулируемым наклоном пор / Д.А. Сасинович, П.С. Кацуба, С.К. Лазарук // Инженерный вестник. – 2006. – № 1(21)/1. – С. 175-179.

46-А. Сасинович, Д.А. Анодный пористый оксид титана для электрохромных дисплеев / Д.А. Сасинович, П.С. Кацуба, С.К. Лазарук // Инженерный вестник. – 2006. – № 1(21)/1. – С. 172-175.

47-А. Шарообразные плазмоиды, образующиеся при горении и взрыве наноструктурированного гидрогенизированного кремния / С. К. Лазарук, В.А. Долбик, В.А. Лабунов, В.Е. Борисенко // Письма в ЖЭТФ. – 2006. – Т. 84. – С. 695-699.

48-А. Anodic nanoporous titania for electro-optical devices / S.K. Lazarouk, Z. Xie, V. Chigrinov, H.S. Kwok // Japanese Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 46. – P. 4390-4394.

49-А. Fluorescence of porous silicon filled with liquid crystal 5CB / Yu.P. Piryatinski, L.O. Dolgov, O.V. Yaroschuk, S.K. Lazarouk // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 2007. – Vol. 467. – P. 195-202.

50-А. Электролюминесценция наноструктурированного кремния в матрице анодного оксида алюминия / С.К. Лазарук, Д.А. Сасинович, П.С. Кацуба, В.А. Лабунов, В.Е. Борисенко // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41. – С. 1126-1129.

51-А. Использование процессов горения и взрыва наноструктурированного пористого кремния в микросистемных устройствах / С.К. Лазарук, В.А. Долбик, В.А. Лабунов, В.Е. Борисенко // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41. – С. 1130-1134.

52-А. Porous and pillar structures by anodization for vertical alignment of nematic liquid crystal / S. Lazarouk, A. Muravski, D. Sasinovich, V. Chigrinov, and H.S. Kwok // Japanese Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 46. – P. 6889-6892.

53-А. Porous Silicon Avalanche LEDs and their Application in Optoelectronics and Information Displays / P. Jaguiro, P. Katsuba, S. Lazarouk, A. Smirnov // Acta Physica Polonica. – 2007. – Vol. 112. – P. 1037-1042.

54-А. Lazarouk, S.K. Nanoporous oxides of refractory metals: fabrication and properties / S.K. Lazarouk, D.A. Sasinovich, V.E. Borisenko // Physica Status Solidi (c). – 2008. – Vol. 5. – P. 3690-3693.

Статьи в материалах конференций, семинаров

55-А. Металлизация СБИС / В.А. Лабунов, И.Л. Баранов, С.К. Лазарук, М.Ю. Гарус, О.А. Воробьев // VII междунар. конф. по микроэлектронике, Минск, 16-18 окт. 1990 г.: в 2 т. / ВИНТИ; редкол.: К.А. Валиев [и др.]. – Люберцы, Московская обл., 1990. – Т.2. – С.146-148.

56-A. Photoluminescence and structural features of porous silicon produced in transition regime / V. Chumash, I. Cojocaru, M. Popescu, F. Tudorica, S. Lazarouk, S. La Monica, G. Maello, L. Schirone, A Ferrari // CAS-1994: Proc. 17th Annual Semiconductor Conf., Bucharest, Romania, 18-20 February 1994. / National Institute for Research and development in Microtechnologies; editors: D. Dascalu [et al.]. – Bucharest, 1994. – P. 202-207.

57-A. Lazarouk, S.K. Light Emitting Devices Based on Al / Porous Silicon Schottky Junctions on Sapphire Substrates for Display Applications / S.K. Lazarouk // Proc. of the 7-th International Symposium Advanced Display Technologies, Minsk, 1-5 December 1998. / SID Belarusian Chapter; edited by A. Smirnov. – Minsk, 1998. - P. 193-196.

58-A. Er-doped Anodic Alumina Films with Embedded Si Nanoparticles – New Promising Material for Optoelectronics / S.K. Lazarouk, A.V. Mudryi, A.A. Leshok, V.E. Borisenko // Mixed Design of Integrated Circuits and Systems: Proc. of the 6-th International Conference, Krakow, Poland, 17-19 June 1999. / Technical University of Lodz; edited by A. Napieralski. – Lodz, 1999. - P. 271-273.

59-A. Integration of Porous Silicon Light Emitting Diode and Photodetector with a Waveguide Based on Multilayer Alumina Structure / S.K. Lazarouk, P.V. Jaguiro, A.A. Leshok, V.E. Borisenko // Mixed Design of Integrated Circuits and Systems: Proc. of the 6-th International Conference, Krakow, Poland, 17-19 June 1999. / Technical University of Lodz; edited by A. Napieralski. – Lodz, 1999. - P. 275-277.

60-A. Разработка процесса формирования алюминиевых столбиков на основе электрохимического анодирования алюминия для многоуровневых межсоединений СБИС / В.Н. Пономарь, В.Б. Высоцкий, С.К. Лазарук, Н.Я. Ларина, А.В. Демьянович, В.В. Становский // Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники: Труды седьмой международной научно-технической конференции, Дивноморское, Россия, 12-17 сент. 2000 г. : в 2 ч. / Таганрогский гос. радиотехн. ун-т; редкол.: Б.Г. Коноплев [и др.]. - Таганрог, 2000. – Ч.1. - С. 112-114.

61-A. Эффект усиления фототока в структурах Шоттки на пористом кремнии / В.И. Блынский, С.К. Лазарук, С.А. Малышев, Т.П. Мацкевич // Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники: Труды седьмой международной научно-технической конференции, Дивноморское, Россия, 12-17 сент. 2000 г.: в 2 ч. / Таганрогский гос. радиотехн. ун-т; редкол.: Б.Г. Коноплев [и др.]. - Таганрог, 2000. – Ч.2. - С. 209-211.

62-A. Лазарук, С.К. Лавинные светодиоды на основе пористого кремния для внутричиповых оптических межсоединений / С.К. Лазарук, А.А. Лешок, П.В. Жагино // Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники: Труды седьмой международной научно-технической конференции, Дивноморское, Россия, 12-17 сент. 2000 г.: в 2 ч. / Таганрогский гос. радиотехн. ун-т; редкол.: Б.Г. Коноплев [и др.]. - Таганрог, 2000, – Ч.2. - С. 212-214.

63-А. Electroluminescence in porous silicon films of reverse biased Schottky junctions / P. Jaguiro, S. Lazarouk, A. Smirnov // Proc. of the 10-th International Symposium Advanced Display Technologies, Minsk, 18-21 September 2001. / SID Belarusian Chapter; edited by A. Smirnov. – Minsk, 2001. - P. 112-115.

64-А. Исследование процессов горения и взрыва в пленках наноструктурированного пористого кремния / С.К. Лазарук, А.В. Долбик, П.С. Кацуба, В.А. Лабунов // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: Сборник трудов IV Междунар. конф., Санкт-Петербург, 5-7 июля 2004 г. / ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН; редкол.: Е.И. Теруков [и др.]. – Санкт-Петербург, 2004. – С. 122-123.

65-А. Легированные эрбием алюмооксидные пленки со встроенными кремниевыми наночастицами / С.К. Лазарук, А.В. Мудрый, А.А. Лешок, Д.Н. Унучек, А.Г. Смирнов, В.А. Лабунов // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: Сборник трудов IV Междунар. конф., Санкт-Петербург, 5-7 июля 2004 г. / ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН; редкол.: Е.И. Теруков [и др.]. – Санкт-Петербург, 2004. – С. 116-117.

66-А. Лазарук, С.К. Структурные и электрофизические свойства анодного оксида алюминиево-титанового сплава / С.К. Лазарук, А.А. Лешок, Д.Н. Унучек // Новые технологии изготовления многокристалльных модулей: Междунар. науч.-техн. конференция, Минск-Нарочь, 27 сент. – 1 октяб. 2004 г. / Белорусский гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: В.А. Ивкович [и др.]. – Минск, 2004. - С. 64-67.

67-А. Smirnov, A. Silicon based integrated LED microdisplay / A. Smirnov, V. Labunov, S. Lazarouk // Proceeding of the XIV-th International Symposium “Advanced Display Technologies”, Crimea, Ukraine, 10-14 October 2005. / SID Ukrainian chapter; editors: V.M. Sorokin [et al.]. - Kyiv, 2005. - P. 182-188.

68-А. Формирование пористого анодного оксида алюминия с регулируемым наклоном пор / С.К. Лазарук, Д.А. Сасинович, П.С. Кацуба, А.Г. Смирнов, В.А. Лабунов // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: Сборник трудов V Междунар. конф., Санкт-Петербург, 19-21 июня 2006 г. / ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН; редкол.: Е.И. Теруков [и др.]. – Санкт-Петербург, 2006. – С. 230-231.

69-А. Использование процессов горения и взрыва наноструктурированного пористого кремния в микросистемных устройствах / С.К. Лазарук, А.В. Долбик, В.А. Лабунов, В.Е. Борисенко // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: Сборник трудов V Междунар. конф., Санкт-Петербург, 19-21 июня 2006 г. / ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН; редкол.: Е.И. Теруков [и др.]. – Санкт-Петербург, 2006. – С. 289-290.

70-А. Увеличение чувствительности датчиков скорости потока газа за счет использования наноструктурированных алюмооксидных мембран / В.Б. Высоцкий, С.Н. Войтех, Э.В. Лобко, С.К. Лазарук // Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров: сборник материалов междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1, Минск, 10-11 апр. 2007 г. / Минский гос. высш. радиотехн. колледж; редкол.: Н.А. Цырельчук [и др.]. – Минск, 2007. – С. 113-116.

71-А. Si based avalanche LEDs for passive addressed NTE microdisplay / P. Jaguiro, S. Lazarouk, A. Berezovik, A. Smirnov // Proc. of the 27-th International Display Research Conference, Moscow, 18-20 September 2007. / Lebedev Physics Institute of RAS; editors: O. Krokhin [et al.]. – Moscow, 2007. – P. 60-64.

72-А. Anodizing Technique for Liquid Crystal Displays / S. Lazarouk, P. Jaguiro, V. Labunov, D. Sasinovich, A. Smirnov, A. Muravski, V. Chigrinov, H. Kwok // Proc. of the 27-th International Display Research Conference, Moscow, 18-20 September 2007. / Lebedev Physics Institute of RAS; editors: O. Krokhin [et al.]. – Moscow, 2007. – P. 410-413.

73-А. Лазарук, С.К. Пористые оксиды тугоплавких металлов получение, свойства и применение в электронике / С.К. Лазарук // Наноструктурные материалы – 2008: Материалы Первой междунар. конф. Беларусь – Россия – Украина, Минск, 22-25 апр. 2008 г. / НАНБ; редкол.: П.А. Витязь [и др.]. – С.541-542.

74-А. Лазарук, С.К. Влияние структурных параметров пористого кремния на процессы горения и взрыва / С.К. Лазарук, А.В. Долбик, В.А. Лабунов // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: Сборник трудов VI Междунар. конф., Санкт-Петербург, 7-9 июля 2008 г. / ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН; редкол.: Е.И. Теруков [и др.]. – Санкт-Петербург, 2008. – С. 110-111.

75-А. Стабильность электролюминесценции пористого кремния, встроенного в алюмооксидную матрицу / С.К. Лазарук, П.С. Кацуба, П.В. Жагино, А.А. Лешок, А.Г. Смирнов // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: Сборник трудов VI Междунар. конф., Санкт-Петербург, 7-9 июля 2008 г. / ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН; редкол.: Е.И. Теруков [и др.]. – Санкт-Петербург, 2008. – С. 126-127.

76-А. Формирование пористого оксида титана при высоких плотностях анодного тока / С.К. Лазарук, Д.А. Сасинович, Т.И. Ореховская, В.Е. Борисенко // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: Сборник трудов VI Междунар. конф., Санкт-Петербург, 7-9 июля 2008 г. / ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН; редкол.: Е.И. Теруков [и др.]. – Санкт-Петербург, 2008. – С. 128-129.

77-А. Формирование наноструктур на базе пленок Al/Nb сплавов / С.К. Лазарук, А.А. Лешок, Н.Г. Циркунова, Л.В. Кухаренко // Материалы XII Ежегодного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника», Н.Новгород, 10-14 марта

2008 г.: в 2 т. / Инс-т физики микроструктур РАН; редкол.: С.В. Гапонов [и др.]. - Н.Новгород, 2008. – Т. 1 - С. 449-450.

Тезисы докладов на научных конференциях

78-А. Саморазрушающиеся кремниевые чипы при попытке несанкционированного доступа к ним / А.В. Долбик, С.К. Лазарук, П.С. Кацуба, А.А. Румянцев, В.А. Лабунов // Технические средства защиты информации: Материалы докладов и краткие сообщения II Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск – Нарочь, 23-27 мая 2005 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: М.П. Батура [и др.]. – Минск, 2005. - С. 87.

79-А. Ларченко, А.А. Закономерности роста плотного анодного оксида Al-Ti сплавов // А.А. Ларченко, Д.А. Сасинович, С.К. Лазарук // Современные средства связи: Тезисы докладов XI международной научно-технической конференции, Минск - Нарочь, 25-29 сент. 2006 г. / Белорусский гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.М. Лыньков [и др.]. – Минск, 2006. - С. 48.

80-А. Интеграция оптических и электронных межсоединений на кремниевых чипах с целью защиты обрабатываемой информации / С.К. Лазарук, А.А. Лешок, П.С. Кацуба, Д.А. Сасинович, А.А. Ларченко // Технические средства защиты информации: Материалы докладов и краткие сообщения V Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск – Нарочь, 28 мая - 1 июня 2007 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: М.П. Батура [и др.]. – Минск, 2007. - С. 85.

81-А. Кремниевые диоды с изоляцией на основе окисленного пористого кремния / С.К. Лазарук, Н.Я. Ларина, С.Н. Войтех, В.Б. Высоцкий // Современные средства связи: Тезисы докладов XII международной научно-технической конференции, Минск - Нарочь, 24-28 сент. 2007 г. / Белорусский гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.М. Лыньков [и др.]. – Минск, 2007. - С. 59.

82-А. Сасинович, Д.А. Получение пленок пористого оксида титана при повышенных напряжениях формовки / Д.А. Сасинович, Т.И. Ореховская, С.К. Лазарук // Современные средства связи: Тезисы докладов XII международной научно-технической конференции, Минск - Нарочь, 24-28 сент. 2007 г. / Белорусский гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.М. Лыньков [и др.]. – Минск, 2007. - С. 72-73.

83-А. Лазарук, С.К. Способы увеличения анизотропии локального пористого анодирования алюминия / С.К. Лазарук, Д.А. Сасинович, П.С. Кацуба // Современные средства связи: Тезисы докладов XIII международной научно-технической

конференции, Минск - Нарочь, 22-26 сент. 2008 г. / Белорусский гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.М. Лыньков [и др.]. – Минск, 2008. - С. 137.

84-А. Электрофизические свойства наноструктурированных оксидов титана и вольфрама, получаемых пористым анодированием нанокompозитных пленок алюминий-титан и алюминий-вольфрам / С.К. Лазарук, Д.А. Сасинович, Т.И. Ореховская, О.В. Купреева // Современные средства связи: Тезисы докладов XIII международной научно-технической конференции, Минск - Нарочь, 22-26 сент. 2008 г. / Белорусский гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.М. Лыньков [и др.]. – Минск, 2008. - С. 137.

Статьи в научных сборниках

85-А. Anisotropy of aluminum porous anodization process for VLSI Planar metallization / S. Lazarouk, I. Baranov, G. Maello, E. Proverbio, G. De Cesare, A Ferrari // MRS proc. – Vol.337. / editors: A. Boer [et al.]. – Los Angeles, 1994. – P. 651-656.

86-А. Fabrication of pillar silicon structure / S. Lazarouk, G. Maiello, E. Proverbio, L. Schirone, G. de Cesare, F. Carassiti // Adv. Sci. Technol. (Advanced Materials in Optics, Electrooptics and Communication Technologies) - Vol. 11. / editors: M. Bertolotti [et al.]. – Rome, 1995. – P. 347-350.

87-А. Fabrication of photoluminescent amorphous pillar silicon structures / S. Lazarouk, S. Katsuba, N. Kazuchits, G. De Cesare, S. La Monica, G. Maello, E. Proverbio, A. Ferrari // MRS proc. – Vol. 358. / editors: A. Koch [et al.]. – Boston, 1995. – P. 93-97.

88-А. Pecularity porous silicon formed in transition regime / S. Lazarouk, V. Chumash, E. Fazio, S. La Monica, G. Maello, E. Proverbio // MRS proc. - Vol.358. / editors: A. Koch [et al.]. – Boston, 1995. - P. 357-362.

89-А. Visible electroluminescence from Al - porous silicon reverse bias diodes / S. Lazarouk, V. Bondarenko, P. Pershukevich, S. La Monica, G. Maello, A. Ferrari // MRS proc. - Vol. 358. / editors: A. Koch [et al.]. – Boston, 1995. – P. 659-664.

90-А. Porous Silicon Optoelectronic: Dream or Reality? / V. Bondarenko, A. Dorofeev, N. Kazuchits, S. Lazarouk // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures / Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; editors: V.E. Borisenko [et al.].- Minsk, 1995. - P. 211-214.

91-А. Electroluminescence from porous silicon formed on the transparent sapphire substrates / S. Lazarouk, V. Bondarenko, P. Jaguiro, S. La Monica, G. Maiello, G. Masini, A. Ferrari // Advanced Luminescent Materials / Electrochemical Society; editors: D. J. Lockwood [et al.]. - Pennington, NJ, 1996. - P. 67-72.

92-A. Lazarouk, S.K. Luminescent Properties of Er-doped Anodic Alumina Films with Embedded Si Nanoparticles / S.K. Lazarouk, A.V. Mudryi, A.A. Leshok // *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures* / World Scientific; editors: V.E. Borisenko [et al.]. - Singapore, 1999. – P. 48-51.

93-A. Porous Silicon Light Emitting Diode and Photodetector Integrated with a Multilayer Alumina Waveguide / S.K. Lazarouk, P.V. Jaguiro, A.A. Leshok, V.E. Borisenko // *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures* / World Scientific; editors: V.E. Borisenko [et al.]. - Singapore, 1999. – P. 370-373.

94-A. Lazarouk, S.K. Electroluminescent microdisplays based on Al/porous silicon Schottky junctions / S. Lazarouk, A. Smirnov // *Advanced Display Technologies: Basic Studies of Problems in Information Display: Proc. of SPIE.* - Vol. 4511. / The International Society for Optical Engineering; editors: V.V. Belyaev [et al.]. – Washington, 2000. – P. 65-68.

95-A. Lazarouk, S.K. Reverse biased porous silicon light emitting diodes for optoelectronics / S.K. Lazarouk // *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures* / World Scientific; editors: V.E. Borisenko [et al.]. - Singapore, 2001. – P. 441-449.

96-A. Особенности микроплазменного пробоя в светодиодах на основе пористого кремния / С.К. Лазарук, Е.Л. Петрович, Д.Н. Унучек, А.В. Долбик, А.А. Лешок // *Сборник научных работ: «Низкоразмерные системы-2».* – Вып. 3. / Гродненский гос. ун-т; редкол.: С.А. Маскевич [и др.]. - Гродно, 2003. - С. 127-133.

97-A. Lazarouk, S. Porous anodic oxide of aluminium – titanium alloys / S. Lazarouk, A. Leshok // *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures* / World Scientific; editors: V.E. Borisenko [et al.]. - Singapore, 2003. – P. 249-252.

98-A. Lazarouk, S. Reverse biased porous silicon light-emitting diodes / S. Lazarouk // *Towards the First Silicon Laser: Mathematics, Physics and Chemistry.* – Vol. 93. / Kluwer Academic Publishers; editors: L. Pavesi [et al.]. – Dordrecht, Netherland, 2003. - P. 61-68.

99-A. 1.53 μm electroluminescence of Er-doped nanosize silicon structures / S.K. Lazarouk A.V. Mudryi, A.A. Leshok, D.M. Unuchak, V.A. Labunov // *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures* / World Scientific; editors: V.E. Borisenko [et al.]. - Singapore, 2005. – P. 174-177.

100-A. Combustion and explosion processes in porous silicon / S.K. Lazarouk, A.V. Dolbik, P.V. Jaguiro, V.A. Labunov // *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures* / World Scientific; editors: V.E. Borisenko [et al.]. - Singapore, 2005. – P. 378-381.

101-A. Влияние кремниевых наночастиц на фотолуминесценцию эрбия в алюмооксидных пленках / С.К. Лазарук, А.В. Мудрый, Д.Н. Унучек, А.А. Лешок,

В.А. Лабунюв // Сборник научных работ «Низкоразмерные системы-2». – Вып. 3. / Гродненский гос. ун-т; редкол.: С.А. Маскевич [и др.]. - Гродно, 2005. - С. 85-91.

102-A. Smirnov, A.G. On the route towards Si-based full color LED microdisplays for NTE applications / A. Smirnov, V. Labunov, S. Lazarouk // Proceeding of IMID 05 Digest / editors: E. Lee [et al.]. - Seoul, S. Korea, 2005. – P. 727-731.

103-A. Anodic porous and pillar structures for vertical alignment of nematic liquid crystals / S.K. Lazarouk, D. Sasinovich, P. Katsuba, A. Smirnov, A. Muravski, V. Chigrinov, H. S. Kwok // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures / World Scientific; editors: V.E. Borisenko [et al.]. - Singapore, 2007. – P. 470-474.

104-A. Artificial ball lightning formed by explosion of nanostructured silicon / S.K. Lazarouk, A.V. Dolbik, V.A. Labunov, V.E. Borisenko // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures / World Scientific; editors: V.E. Borisenko [et al.]. - Singapore, 2007. – P. 223-228.

105-A. Кацуба, П.С. Магнетронное осаждение алюминий-вольфрамовых сплавов и их пористое оксидирование / П.С. Кацуба, Д.А. Сасинович, С.К. Лазарук // Физика конденсированного состояния в 2 ч. / Гродн. гос. ун-т; редкол.: Е.А. Ровба (отв. ред.) [и др.]. – Гродно, 2007. – Ч. 1. - С. 259-262.

РЭЗІЮМЭ

Лазарук Сяргей Канстанцінавіч

Порыстыя паўправадніковыя і дыэлектрычныя нанаструктураваныя матэрыялы, фармаваныя электрахімічным анадзіраваннем

Ключавыя словы: электрахімічнае анадзіраванне, порысты крэмній, порысты аксід алюмінія, порыстыя аксіды тугаплаўкіх металаў, люмінесцэнцыя, міжзлучэнні інтэгральных мікрасхем.

Мэта работы – устанаўленне заканамернасцяў і механізмаў фармавання нанаструктураваных порыстага крэмнію і порыстых аксідаў вентыльных металаў электрахімічным анадзіраваннем адпаведна крэмнію, алюмінію, тытану, вальфраму, ніобію і кампазіцыйных пленак на іх аснове, даследаванне структурных, электра-фізічных і аптычных уласцівасцяў гэтых матэрыялаў і стварэнне на іх прыбораў цвердацельнай электронікі.

Эксперыментальныя даследаванні праводзіліся з выкарастаннем наступнага абсталявання: растравы і прасвечваючы электронныя мікраскопы, ДІМС- і ажэ-аналізатары, рэнтгенаўскі дыфрактаметр, комплекс люмінесцэнтных вымярэннеў і інш..

Даследаванні механізмаў фарміравання электрахімічна нанаструктураванага порыстага крэмнію і яго электрафізічных уласцівасцяў дазволілі распрацаваць канструкцыю і тэхналогію выраба светладыдаў на аснове гэтага матэрыялу с параметрамі, перавышаючымі зарубежныя аналагі: эфектыўнасць святлавыпраменьвання 1,4 %, хуткадзейнасць 2 нс, стабільнасць святлавыпраменьвання не меней 1000 гадзін. На аснове распрацаваных светладыдаў зроблена сістэма аптычных міжзлучэнняў на крэмніевым крышталі.

Даследаванні механізмаў анізатрапіі лакальнага порыстага анадзіравання алюмінію дазволілі распрацаваць тэхналогію фарміравання убудаванай алюмааксіднай металізацыі с субмікроннымі праектнымі нормамаі. Распрацаваная тэхналогія была апрабавана у умовах серыйнага выраба інтэгральных мікрасхем. Упершыню распрацаван метады атрымання порыстых аксідаў тугаплаўкіх металаў рада Ti, W, Nb з субнанаметровымі размерамі элементаў. Выраблены розныя электрааптычныя устраванні, выкарастаючыя развітую паверхню порыстых матэрыялаў.

Вобласці прымянення вынікаў: фізіка паўправаднікоў, матэрыялазнаўства, тэхналогія цвердацельнай электронікі, фізіка і тэхналогія тонкіх пленак.

РЕЗЮМЕ

Лазарук Сергей Константинович

Пористые полупроводниковые и диэлектрические наноструктурированные материалы, формируемые электрохимическим анодированием

Ключевые слова: электрохимическое анодирование, пористый кремний, пористый оксид алюминия, пористые оксиды тугоплавких металлов, люминесценция, межсоединения интегральных микросхем.

Цель настоящей работы - установление закономерностей и механизмов формирования наноструктурированных пористого кремния и пористых оксидов вентильных металлов электрохимическим анодированием соответственно кремния, алюминия, титана, вольфрама, ниобия и композиционных пленок на их основе, определение структурных, электрофизических и оптических свойств этих материалов и создание на них приборов твердотельной электроники.

Экспериментальные исследования проводились с использованием следующего оборудования: растровый и просвечивающий электронные микроскопы, оснащенные рентгеновским микроанализатором, ВИМС- и оже- анализаторы, комплексы люминесцентных измерений и др..

Исследования механизмов формирования электрохимически наноструктурированного пористого кремния и его электрофизических свойств позволили разработать конструкцию и технологию изготовления светодиодов на основе этого материала с параметрами, превосходящими зарубежные аналоги: эффективность светоизлучения 1,4 %, быстродействие 2 нс, стабильность светоизлучения не менее 1000 часов. На основе разработанных светодиодов изготовлена система оптических межсоединений на кремниевом кристалле.

Исследования механизмов анизотропии локального пористого анодирования алюминия позволили разработать технологию формирования встроенной алюмооксидной металлизации с субмикронными проектными нормами. Разработанная технология была опробована в условиях серийного производства интегральных микросхем. Впервые разработан метод получения пористых оксидов тугоплавких металлов ряда Ti, W, Nb с субнанометровыми размерами элементов. Созданы различные электрооптические устройства, использующие развитую поверхность пористых материалов.

Область применения результатов: физика полупроводников, материаловедение, технология твердотельной электроники, физика и технология тонких пленок.

SUMMARY

Lazarouk Serguei Konstantinivich

Porous semiconductor and dielectric nanostructured materials forming by electrochemical anodization

Keywords: electrochemical anodization, porous silicon, porous alumina, porous oxides of refractory metals, nanocomposites, luminescence, interconnects of integrated circuits.

The aim of the work is determination of features and mechanisms of porous anodization processes on silicon, aluminum, refractory metals (Ti, W, Nb) and composite films based on this materials, study of structure, electrophysical and optical properties of formed materials, and development of the components and devices for integrated electronics.

Experimental investigations were performed with the use of the following equipment: scanning and transmission electron microscopes, SIMS- and Auger- analysers, X-ray diffractometer, luminescence measurement equipment, etc.

The studying of formation mechanisms of electrochemical nanostructured porous silicon and its electrophysical properties has allowed developing the design and technology of light emitting diodes with parameters exceeding the known foreign analogues: efficiency 1,4 %, time response 2 ns, stability more than 1000 hours. Optical interconnect systems have been fabricated on the base of developed light emitting diodes.

The studying of anisotropy mechanisms of local porous aluminum anodization has allowed developing the formation technology of built in aluminum metallization with submicron project norms. The developed technology has been test in industry serial production of integrated circuits. For the first time the fabrication approach for porous oxide of refractory metals (Ti, W, Nb) with submicron scale element sizes has been developed. The different electrooptical devices using the high specific surface of porous material have been fabricated.

The fields of result applications are material science, VLSI technology, physics and technology of thin films.

Научное издание

ЛАЗАРУК СЕРГЕЙ КОНСТАНТИНОВИЧ

**ПОРИСТЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ФОРМИРУЕМЫЕ
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ АНОДИРОВАНИЕМ**

Специальность 05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Подписано в печать
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд.л.

Формат 60x84 ¹/₁₆.
Печать ризографическая.
Тираж 60 экз.

Бумага офсетная
Усл. печ. л.
Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6.