TAIO- & MYKPOCYCETEMHAA TEXTYYA

№ 7 � 2006

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве

Отделения информационных технологий и вычислительных систем

СОДЕРЖАНИЕ _

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Российской Академии наук

Издается с 1999 г.

2

5

11

17

21

35

40

42

45

49

54

58

Главный редактор Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора Лучинин В. В.

Редакционный совет:

Аристов В. В. Асеев А. Л. Гапонов С. В. Каляев И. А. Климов Д. М. Ковальчук М. В. Лифшиц В. Г. Мокеров В. Г. Никитов С. А. Сигов А. С Чаплыгин Ю. А. Шевченко В. Я. Редакционная коллегия: Абрамов И. И. Антонов Б. И. Астахов М. В. Быков В. А. Волчихин В. И. Гоев А. И. Горнев Е. С Градецкий В. Г. Гурович Б. А. Журавлев П. В. Захаревич В. Г. Кальнов В. А. Карякин А. А Квардаков В. В. Кузин А. Ю. Мокров Е. А. Норенков И. П. Панич А. Е Панфилов Ю. В. Петросянц К. О. Петрунин В. Ф. Путилов А. В. Пятышев Е. Н. Сауров А. Н. Сухопаров А. И. Телец В. А. Тодуа П. А. Отв. секретарь Лысенко А. В. Редакция: Безменова М. Ю.

Григорин-Рябова Е. В. Чугунова А. В. Учредитель: Издательство "Новые технологии"

элементы мнст и микросистемы
лшин К. Д., Осинович Б. С., Золотой С. А., лацаниев Е. Б. Микрокосмические
Тимошенков С. П., Зотов С. А., Калугин В. В., Бритков О. М., Рубчиц В. Г.,
Воротников А. А., Светлов-Прокопьев Е. П. Влияние пор и нанослоев на
изгибную жесткость подвеса кремниевого чувствительного элемента МЭМС Белоненко М. Б., Сасов А. С. Динамика поляризации в сегнетоэлектриках типа
порядок—беспорядок" с релаксационным типом поглощения
МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ
Самойлович М. И., Белянин А. Ф. Формирование наноструктурированных
иленок алмазоподобных материалов. Часть 1
њезоэлектрического отклика анизотропных 1—3-композитов
сегнетопьезокерамика — полимер"
зосстановления поверхности кремниевых пластин в технологии создания
Груктур кремний-на-изоляторе
изко- и инфранизкочастотного диэлектрического отклика тонких пленок BST,
изготовленных при различных температурах отжига
ИОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ
Галушков А. И., Панкратов О. В., Погалов А. И., Сауров А. Н., Суханов В. С.,
Гольников С. В. Методы проектирования и калибровки микроэлектронных
њезорезистивных преобразователей ускорения
икромеханического гироскопа с тремя осями чувствительности
НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ
оршенина Т. А., Шмелев Г. М. Неравновесный квазидвумерный электронный
аз как сегнетоэлектрик
СПРАВОЧНЫЕ СТРАНИЦЫ
Яшин К. Д., Лацапнев Е. В. Англо-русский терминологический словарь по
икро- и наносистемной технике
ЛРАНИЧКА РФФИ
100001μ παποτελπυμοιμμ
Contents
Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России
Аннотации статей журнала на русском и английском языках и требования к оформлени
статей доступны на сайте журнала: http://www.microsystems.ru. E-mail:nmst@zknet.ru

Балахонова М. Л. Проблемы реализуемости инновационных проектов в сфере

- по каталогу Роспечати (индекс 79493);
 - по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)
 - в редакции журнала (тел./факс: 269-55-10)

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2006.

•

Общие вопросы

УДК 06.54.31

М. Л. Балахонова,

Московский государственный технологический университет "СТАНКИН"

ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗУЕМОСТИ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ В СФЕРЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ РАЗРАБОТОК

Показаны роль и значение инновационных проектов в области создания и совершенствования научно-технического потенциала государства, сформулированы основные проблемы реализуемости инновационных проектов в сфере НИОКР и разработаны предложения по их решению. Проведен анализ структуры и объемов внутренних затрат на исследования и разработки по различным источникам финансирования и разработан комплекс мероприятий, направленный на создание условий для нормального развития инновационной среды и повышения уровня реализуемости инновационных проектов в сфере НИОКР.

Научно-технические исследования и опытно-конструкторские разработки на протяжении ХХ века занимали главенствующие роли в экономической деятельности практически каждой организации, учреждения и государства в целом. Государство, понимая всю значимость научных учреждений и организаций, деятельность которых в основном была направлена на создание и совершенствование научно-технического потенциала, поддерживало их своим финансированием, продвижением и возможностью реализации важных для страны инновационных проектов.

Однако, начиная с 1991 г., большинство предприятий и организаций лишились поддержки со стороны государства, что оказало значительное негативное воздействие на их возможности и перспективы развития и привело к оттоку наиболее высококвалифицированных научных кадров в другие сферы деятельности. В основном, это произошло из-за финансовой несостоятельности государства, системного кризиса, в котором оказалась Российская Федерация со всеми научными организациями (научноисследовательские институты, конструкторские бюро, проектные организации и другие научные учреждения различных министерств и ведомств) и, значит, с отдельными инновационными проектами, возможность внедрения которых заметно снизилась.

В целом следует отметить, что несмотря на произошедшее в 1990-х годах XX века сокращение научно-производственного потенциала, в РФ сохранились значительные фундаментальные и технологические заделы, уникальная научно-производственная база и большая часть производственных мощностей. Однако в основном это были устаревшие технологии, мировые технологии в этот же период вышли на совершенно новый уровень развития, что привело к проблеме реализуемости инновационных проектов в сфере НИОКР. Для сокращения возникшего отставания и повышения уровня реализуемости проектов возникла необходимость привлечения больших инвестиций в наиболее значимые и перспективные инновационные проекты, что является одной из основных проблем современного научного развития.

В настоящее время перед РФ стоит задача отказаться от пре-

имущественно топливно-сырьевой ориентации экономики страны и начать объективно назревавший ускоренный перевод отечественной экономики на инновационный путь развития, основу которого должны составить высокие технологии и наукоемкие производства. В современных условиях доля России в мировом производстве наукоемкой продукции по различным оценкам составляет не более 0,5 % его объема, что вызвано проблемами, связанными в основном с недостаточным ресурсным обеспечением инновационных проектов. Основными причинами сложившейся ситуации являются следующие:

- недостаточное финансовое обеспечение, включая низкий процент вложений в финансово рискованные инновационные проекты;
- отсутствие необходимого интереса к инновационным проектам со стороны частного капитала;
- слабая государственная поддержка и низкая эффективность мер, направленных на удержание в наукоемких отраслях промышленности высококвалифицированного кадрового потенциала и др.

Совершенно очевидно, что назрела необходимость активизации инновационной деятельности, в том числе и оптимизация числа научных организаций, занимающихся разработкой и внедрением инновационных проектов. Динамика состава научных организаций, выполняющих исследования и разработки в области инновационных проектов с начала 90-х годов по настоящее время, представлена в табл. 1 [1].

В условиях сокращения числа научных организаций на первый план выходит разработка и внедрение передовых технологий, которые становятся главной ареной конкуренции. Кроме того, до 2010 г. го-

– НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 7, 2006 –

Число организаций, выполнявших исследования и разработки												
Организации	1992 г.	1993 г.	1994 г.	1995 г.	1996 г.	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2001 г.	2002 г.	2003 г.
Научно-исследова- тельские организации	2077	2150	2166	2284	2360	2528	2549	2603	2686	2676	2630	2564
Конструкторские бюро	865	709	545	548	513	438	381	360	318	289	257	228
Проектные и проектно-	495	395	297	207	165	135	108	97	85	81	76	68
изыскательские организации												
Опытные заводы	29	17	19	23	24	30	27	30	33	31	34	28
Высшие учебные заведения	446	456	400	395	405	405	393	387	390	388	390	393
Промышленные организации	340	299	276	325	342	299	240	289	284	288	255	248
Прочие научные организации	303	243	265	277	313	302	321	323	303	284	264	268
Все организации	4555	4269	3968	4059	4122	4137	4019	4089	4099	4037	3906	3797

Наукоемкост	ь и наукоо	тдача на	циональн	ых	экономик	,	
расходы промышленно	развитых	стран на	науку (п	по д	анным на	2003	год)

Страна	ВВП на одного занятого, тыс. долл.	Доля расходов на исследования и разработки в ВВП, %	Текущий индекс конкуренто- способности	Доля высокотех- нологичной про- дукции в товарном экспорте, %	Доля в мировом экспорте инфор- мационного оборудования, %
США Китай Япония Индия Германия Франция Великобритания Италия Россия Канада	73,1 7,2 56,0 4,9 56,0 56,5 54,5 56,5 18,0 60,0	2,64 1,00 3,04 2,44 2,17 1,87 1,04 1,01 	2 47 15 36 4 12 7 24 58 11	28,2 16,7 26,3 3,2 15,3 19,4 26,2 7,9 3,1	16,3 4,6 11,5 4,8 3,4 5,3 1,1 0,2 2,2

сударство должно ориентироваться на увеличение доли внутренних затрат на науку в валовом внутреннем продукте (ВВП) до 2 %.

Количественные показатели ресурсного обеспечения науки Российской Федерации и ведущих зарубежных стран, показатели наукоемкости и наукоотдачи национальных экономик, расходы промышленно развитых стран на науку представлены в табл. 2.

Причина отставания России заключается прежде всего в том, что в то время, когда западные государства наращивали свой научный потенциал, финансируя и развивая наиболее перспективные инновационные проекты, РФ сохраняла финансирование науки на достаточно низком уровне. Кроме того, не было долгосрочной программы развития ключевых направлений и внедрения возможных результатов инновационных проектов. До настоящего времени был только краткосрочный годовой научнотехнологический прогноз, который входил составной частью в социально-экономический прогноз развития страны, а научно-технологического прогнозирования на средне- и долгосрочную перспективу в РФ не существовало.

В течение 2005 г. впервые в нашей стране в рамках целевой научно-технической программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям науки и техники" на 2002—2006 гг. был осуществлен системный подход к формированию инновационной экономики в стране от самой идеи разработки технологий и проектов до создания прототипа продукта и уже непосредственно к коммерциализации самих разработанных проектов.

Основные проблемы, связанные с сохранением и развитием научно-технологичного потенциала государства, вызваны недостаточным финансовым обес-

Таблица 3

Таблица 1

Таблица 2

Структура внутренних затрат на исследования и разработки по источникам финансирования

Источники финансирования	2003 год, %
Средства бюджета	57,8
Средства внебюджетных фондов	4,1
Средства организаций предпринимательского сектора	20,8
Средства высших учебных заведений	0,1
Средства частных бесприбыльных организаций	0,3
Средства иностранных источников	7,2
Собственные средства научных организаций	9,7
Итого:	100

Таблица 4

Внутренние затраты на исследования и разработки по секторам деятельности (млн руб.; 1995 г. — млрд руб.)

Сектор деятельности	1995 г.	2000 г.	2001 г.	2002 г.	2003 г.
Государственный Предпринимательский Высшее образование Частный бесприбыльный	3165,4 8323,9 657,4 2,7	18748,6 54288,8 3489,3 170,4	25580,3 73976,2 5487,7 216,5	33020,0 94336,3 7322,9 325,3	42944,9 116247,9 10297,7 371,9
Всего	12149,5	76697,1	105260,7	135004,5	169862,4

печением разработки инновационных проектов, а также физическим и моральным старением и выбыванием значительной части материально-технической базы науки, потерей привлекательности и престижа научной деятельности и сопряженной с этим социальнопсихологической деградацией научных кадров [2]. Несмотря на то, что в настоящее время при государственной поддержке реализуются проекты национального значения (в настоящий момент — 38 критических технологий и 8 приоритетных направлений, среди информационно-телекоторых коммуникационные технологии, индустрия наносистем и материалов, живые системы, рациональное природопользование, энергетика и энергосбережение, транспортные и авиационно-космические системы, безопасность и противодействие терроризму, перспективные вооружения и специальная военная техника), в ходе выполнения которых доля вложений государства составила около 2,8 млрд руб., а доля привлеченных внебюджетных средств около 3,6 млрд руб., недостаток заинтересованности частного бизнеса в привлечении финансовых средств в проекты создает предпосылки для того, чтобы зачастую значимые проекты еще на стадии разработки отсеивались. Это происходит потому, что государство способно профинансировать только избранные инновации, внедрение которых послужит развитием отраслей экономики общегосударственного масштаба. Естественно, что в данной ситуации лишь частный капитал способен создать предпосылки для масштабного развития и вне-

дрения инновационных проектов. Структура внутренних затрат на исследования и разработки по источникам финансирования по состоянию на 01.01.2004 г. представлена в табл. 3 и 4 [1].

Ситуация может измениться коренным образом лишь в том случае, если частный бизнес поймет необходимость инноваций и убедится в эффективности вложений в такие инновационные проекты, которые способны принести реальный результат. Необходимо понимание того, что вложение в инновационные проекты сегодня экономически выгодно. Кроме того, толчком такого интереса должна стать поддержка со стороны государства предприятий и организаций, осуществляющих или поддерживающих инновационную деятельность.

Создание условий для нормального развития инновационной среды и условий реализуемости проектов в сфере НИОКР требует проведения комплекса мероприятий, направленного на:

- налоговое стимулирование, уменьшение налогооблагаемой базы на сумму текущих затрат на НИОКР и введение налоговых льгот при увеличении таких расходов;
- повышение эффективности использования научных разработок;
- внедрение результатов фундаментальных и прикладных исследований в производство;
- активную протекционистскую политику по отношению к экспорту наукоемкой продукции;
- подготовку профессиональных кадров для коммерциализации научных разработок;

- выделение средств на инновационные проекты и внедрение системы беспроцентного кредитования учреждений на реализацию инновационных проектов;
- страхование частных инвесторов, вкладывающих средства в малые наукоемкие фирмы;
- поддержку совместных исследовательских центров, создаваемых частными фирмами и университетами;
- поддержку молодых научных кадров, создание условий для их работы и обеспечение их социальных потребностей и др.

В настоящее время дефицит финансовых средств является одним из главных, но не единственным фактором слабой инновационной активности в Российской Федерации. Большинство научных учреждений и организаций оказалось не подготовленными к работе в новых экономических условиях. Следствием этого отечественные разработки лишь в единичных случаях становятся инновационным продуктом, готовым для производства и эффективной реализации в РФ, поэтому большинство из них оказываются востребованными в ведущих зарубежных странах. Необходима, в первую очередь, разработка современной нормативно-правовой базы, стимулирующей инновационную активность всех научных организаций, занимающихся разработкой инновационных проектов и их успешным продвижением.

Список литературы:

1. Россия в цифрах. 2005. Краткий статистический сборник. М.: Росстат. 2005. 477 с.

2. Инновационный тип развития экономики России: Учеб. пос. М.: Изд-во РАГС, 2005. 584 с.

Элементы МНСТ и микросистемы

УДК 629.7 + 621.391.23

К. Д. Яшин, канд. техн. наук, доц., В. С. Осипович, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, С. А. Золотой, канд. техн. наук, Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие "Геоинформационные системы", г. Минск, Е. В. Лацапнёв, Национальный прессинговый центр

МИКРОКОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ И КВАНТОВЫЕ КЛЮЧИ

Представлен обзор современных научно-технических публикаций по микрокосмическим аппаратам и квантовой криптографии. Приведена начальная концепция и схема продвижения информации в космической квантовой криптографии, отличающаяся использованием орбитальных групп микрокосмических аппаратов в качестве ретрансляторов для передачи квантовокриптографических ключей между наземными станциями, космическими станциями и рабочими спутниками. Описаны основные этапы продвижения информации при организации космической связи с применением квантовых ключей.

Информационные микрокосмические аппараты на основе изделий микросистемной техники

В работе [1] изложены идеи создания информационных микрокосмических аппаратов (МКА) на основе микросистемной техники. Автор сформулировал основные черты МКА. Аппараты в микроисполнении имеют унифицированную космическую платформу и сменные модули специального назначения. В качестве последних могут служить обнаружители различных физических полей и радиопередатчики получаемой информации. Представлен МКА — модуль ориентации и модуль служебных систем. В модуль ориентации входят микродвигатели коррекции положения МКА на орбите и система контроля положения на микрогироскопах. В модуль служебных систем входят бортовой микрокомпьютер, микрорадиолиния управления, микроисточники питания и другие системы. Появляется специализация МКА — метеорологический МКА, оптический МКА, радиолокационный МКА и др. [1].

В многочисленных Интернет-публикациях, посвященных развитию МКА, приводится описание разработок в этой области [2]. Лидерами в разработке и эксплуатации космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли являются

три группы американских компаний: Space Imaging-EOSAT, Or-blmage и EarthWatch. Они создали целые серии перспективных спутников Ikonos, Orbview, QuckBird. В список разработчиков следует ввести и английскую компанию SSTL (Surrey Satellite Technology Ltd) при университете Суррей (Великобритания). Крупнейшими производителями МКА на сегодняшний день являются компании США, Великобритании, Франции, Германии и Израиля. С ними движется Россия. Очевидным преимуществом МКА является реализуемость концепции создания многоспутниковых орбитальных группировок, обеспечивающих глобальное непрерывное покрытие Земли. Примерами таких систем являются системы связи Глобалстар, Орбком, СБИРС и Дискаверер. Последними успешными разработками в области микроспутников являются МКА Колибри, Компас, MTV, MC-1TK, TES, Рубин и др. [2].

В сборнике докладов II Международной научно-практической конференции "Чрезвычайные ситуации: предупреждение ликвидация" И (г. Минск) [3] изложены основы концепции развития информационных микроспутников. Предприятия Республики Беларусь имеют большой опыт сотрудничества с организациями Российской Федерации в области исследования космического пространства. Применение МКА дистанционного зондирования Земли нацелено в первую очередь на решение следующих задач: обнаружение очагов пожаров, ведение съемок зон стихийных бедствий (наводнений, ураганов), ведение экологического мониторинга и контроль чрезвычайных ситуаций техногенного характера (наблюдение за атмосферными аэрозольными потоками). Для практической реализации возможны следующие пути оптимизации затрат: тесное сотрудничество белорусских и российских ученых, долевое финансирование из бюджетов Беларуси, России, Украины, Польши и Германии. Рассматриваются способы удешевления будущего проекта путем вывода МКА на орбиту в составе кластера (одновременно с основным КА). Российская федерация имеет программу использования стратегических ракет, снятых с боевого дежурства, для вывода в космос гражданских спутников [3].

Элементная база МКА — это твердотельные микроэлектромеханические системы [4]. По этой технологии могут быть выполнены маневровые микродвигатели МКА. Конструкции содержат одновременно датчики положения, решающую вычислительную часть, определяющую необходимость и точность корректировки положения микроспутника в космическом пространстве, а также микроисполнительные устройства — реактивные 🔶 ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ И МИКРОСИСТЕМЫ 💠

микродвигатели. Особое внимание в разработках уделяется использованию компьютеров с принципиально новой архитектурой — молекулярных, квантовых, оптических, нейросетевых.

В работе [5] рассматриваются проблемы создания орбитальных групп из большого числа МКА. Такая группа представлена как единый информационный объект, распределенный в пространстве. Миниатюризация в космической сфере особенно актуальна, так как вывод на орбиту 1 кг полезной нагрузки оценивается в 10 тыс. долл. США. Американская национальная противоракетная оборона предполагает использовать орбитальную группу из 15-20 тыс. спутников массой до 10 кг, называемых наноперехватчиками. Важнейшими характеристиками космических систем наблюдения, связи и навигации является глобальность, оперативность, непрерывность, способность к передаче информации массовому потребителю в реальном масштабе времени и в любой точке пространства [5].

Понятна важность шифрования и обеспечения режима секретности в системах управления космическими объектами. Чаще всего это объясняется необходимостью защитить информацию государственной, стратегической или корпоративной важности. Технология защиты информации постоянно совершенствуется. Этим объясняется внимание и неослабевающий интерес исследователей к теме квантовой криптографии.

Квантовая криптография

Параллельно интенсивно развивается и делает большие успехи квантовая криптография [6-11]. Начало развитию квантовой криптографии положили работы Ч. Беннета (фирма IBM) и Ж. Брассарда (Монреальский университет) [6]. Они предположили, что квантовые состояния могут быть использованы в криптографии для получения фундаментально защищенного канала, т. е. такого канала, данные из которого невозможно перехватить без ведома сторон, принимающих участие в передаче информации. Разработчики предложили схему квантового распределения ключей шифрования, названную ими ВВ84, и в 1989 г. реализовали ее. Эта схема использует квантовый канал, по которому пользователи обмениваются сообщениями, передавая их в виде поляризованных фотонов. Первый квантово-криптографический ключ был передан на несколько метров по воздушному каналу. В настоящее время ученые и разработчики разных стран (Германия, Австрия, Канада, Япония, США) реализовали передачу квантово-криптографического ключа на различные расстояния в разных условиях. Через оптоволокно ученые Австрии и Германии смогли передать квантово-криптографический ключ на 67 км [7]. Позже японские ученые увеличили это расстояние до 150 км [8]. Через воздушное пространство удалось осуществить передачу квантово-криптографического ключа на 23,4 км [9, 10]. Последний эксперимент проводился в горах Южной Германии. Слабый импульсный сигнал посылался ночью с одной горной вершины (2950 м) на другую (2244 м), на которой находился счетчик фотонов.

Один из ведущих специалистов в области квантовых сообщений профессор Ло, оценивая квантовые коммуникации как новую технологию, попытался ответить на вопрос, станут ли данные технологии успешными в практическом отношении в ближайшее время [11]. Профессор указал на несколько ограничений, сдерживающих в настоящее время развитие квантовых коммуникаций. Первое связано с малой скоростью передачи квантовых сообщений, второе — с короткими расстояниями передачи ключей.

Исследователи из Национального института стандартов и технологий США (NIST) предложили решение проблемы увеличения скорости передачи квантовых сообщений [12]. Им удалось передать поток единичных фотонов по воздушному каналу длиной 730 м со скоростью 1 млн битов в секунду. Длина волны используемых фотонов составляла 845 нм.

В работе [13] авторы предложили решение проблемы короткого расстояния передачи квантовокриптографических ключей. Речь идет о возможности передачи фотонов через воздушное пространство на большие расстояния. Такая передача возможна благодаря слабому поглощению (около 1 дБ) атмосферой фотонов некоторых длин волн (800, 1550 нм). Предложено использовать спутники для распространения квантово-криптографических ключей. Спутники рассматриваются как приемники фотонов и как источники сигнала. Для уменьшения потерь при передаче информации авторы предлагают использовать низкоорбитальные спутники и спутники на геостационарной орбите. Рассмотрены пять вариантов организации каналов [13]:

- передача единичных фотонов с Земли на низкоорбитальный спутник; расстояние между источником и приемником сигнала в этом случае от 500 до 1400 км;
- Земля ⇒ геостационарный спутник; расстояние — более 36 000 км;
- связь между низкоорбитальными спутниками; расстояние между спутниками 2000 км;
- геостационарный спутник ⇒ низкоорбитальный спутник; расстояние 35 500 км;
- связь между геостационарными спутниками; расстояние 40 000 км.

Несмотря на обширный материал по указанной тематике многие вопросы остаются еще не ясными. Остается задача по дальнейшему развитию и

совершенствованию концепции и подходов к созданию системы передачи информации в космосе с использованием микрокосмических аппаратов и квантово-криптографических ключей. Это и стало основной проблемной идеей настоящей публикации. Кроме того, требуется более системно описать основные этапы продвижения информации в космической связи с применением квантовых ключей.

Процесс поэтапного продвижения информации для организации космической связи с применением квантовых ключей

Рассмотрим схему поэтапного продвижения информации в квантовой криптографии [14—16]. Укрупненно схема движения информации состоит из четырех основных этапов (рис. 1, см. третью сторону обложки [2]):

- подготовка информации к передаче;
- генерация квантово-криптографического ключа (другое название — первичная квантовая передача);
- передача основного массива информации;
- проверка попыток перехвата информации.
 Рассмотрим эти этапы подробнее.

Этап подготовки информации к передаче (рис. 2). Чтобы передать информацию с помощью квантовокриптографического канала ее представляют в двоичном коде (в виде нулей—единиц). Предварительно возможна кодировка (шифрование) информации классическими методами. Переход к нулям—единицам можно осуществить по-разному. Например, можно использовать различные двоичные коды: код Айкина, код "с избытком три", код Джонсона и т. п.

Этап генерации квантово-криптографического ключа. Это наиболее важный этап. Однако, прежде чем рассмотреть процессы этого этапа, сделаем небольшое отступление и напомним о возможных протоколах генерации квантово-криптографического ключа [6, 10, 16]. Они различаются вариантами использования возможной линейной поляризации единичных фотонов. Дело в том, что источник единич-



Рис. 2. Схема этапа подготовки информации к передаче

ных фотонов генерирует квазичастицы произвольной поляризации. Для получения фотонов со строго определенной поляризацией используют поляризаторы. Их ставят на выходе источника единичных фотонов. Существующие протоколы генерации квантовокриптографического ключа [6, 10, 16] используют четыре варианта поляризации фотонов (см. таблицу).

После представления возможных вариантов поляризации фотонов (фактически — протоколов генерации квантово-криптографического ключа) продолжим рассмотрение схемы второго этапа. Геквантово-криптографического нерация ключа происходит следующим образом [6]. Сначала отправитель с применением генератора случайных чисел формирует и посылает получателю некоторую совершенно произвольную последовательность единичных фотонов. Поляризация фотонов выбрана случайным образом (варианты поляризации см. в таблице). Для генерации ключа используется два типа фотонов: с диагональной и перпендикулярной поляризацией. Отправитель сам для себя решает, какие два типа фотонов он будет использовать: 0 и 45°, 0 и 135°, 45 и 90°, 90 и 135°. Итак, отправитель по квантовому каналу связи отсылает получателю фотоны диагональной или перпендикулярной поляризации. Получатель принимает эти фотоны. Для каждого из фотонов, опять же случайным образом, получатель решает: замерять

Вариант	Схема линейной поляризации	Угол линейной поляризации	Название линейной поляризации
1	7	0°	Перпендику- лярная
2	1	45°	Диагональная
3	$\left[\uparrow\right]$	90°	Перпендику- лярная
4	K	135°	Диагональная

Возможные варианты линейной поляризации фотонов

его поляризацию как перпендикулярную (0°, 90°) или как диагональную (45°, 135°). Затем по открытому каналу связи получатель объявляет, какой тип измерений им был сделан (перпендикулярный или диагональный) для каждого фотона, но не сообщает результат этих измерений. По этому же открытому каналу отправитель информирует получателя, правильный или неправильный вид измерений был выбран для каждого конкретного фотона. Ясно, что в силу случайных, заранее не спрограммированных действий часть результатов между отправителем и получателем совпадет, а часть — не совпадет. Взаимодействующие стороны отбрасывают случаи, когда получатель сделал неправильные замеры. Оставшиеся виды (схемы) поляризации и будут той, известной только отправителю и получателю, секретной информацией, или ключом. Это возможно только в случае, если в квантовом канале связи не происходили попытки перехвата. Если же в канале была попытка перехвата и из него исчезали единичные фотоны, или наоборот, вбрасывались в этот канал новые фотоны от злоумышленника, то получить совпадения между отправителем и получателем будет невозможно. Этот изложенный выше этап работы квантово-криптографической системы называется первичной квантовой передачей, или генерацией квантово-криптографического ключа [6] — ключа, с помощью которого происходит впоследствии передача секретной информации (рис 3).

Этап передачи основного массива информации. Источник сообщения шифрует исходную информацию с использованием только что сформированного ключа и передает сигналы в виде ряда поляризованных фотонов по квантовому каналу связи. Получатель сигнал детектирует, декодирует (расшифровывает) и формирует на выходе исходную информацию (рис. 4).

Этап проверки попыток перехвата информации. Для некоторых подмножеств фотонов в процессе



Рис. 3. Схема этапа генерации квантово-криптографического ключа

передачи осуществляется этап контрольных проверок попыток перехвата секретной информации [2]. Анализ осуществляется отправителем и получателем по открытому каналу. И проводится путем сравнения и отбрасывания случайно выбранных рядов (некоторых последовательностей битов) полученных данных. Согласно принципу неопределенности, злоумышленник не может замерить как перпендикулярную, так и диагональную поляризацию одного и того же фотона. Даже если он для какого-либо фотона выполнит измерение и перешлет получателю этот фотон в соответствии с результатом своих измерений, то в итоге число ошибок намного увеличится. Это станет заметно отправителю и приведет к стопроцентной уверенности отправителя и получателя в состоявшемся перехвате фотонов (рис. 5). Если выявлен перехват, отправитель и получатель немедленно отбрасывают все свои данные и начинают повторное формирование квантово-криптографического ключа, т. е. начинают повторно "первичную квантовую передачу". Если перехвата секретной информации (единичных фотонов) нет, то связь осуществляется прежним ключом (с прежней, ранее выбранной, поляризацией). Более эффективной проверкой является так называемая проверка "на четность" [2]. Она осуществляется опять же по открытому каналу. Например, отправитель сообщает: "Просмотрел 1-й,





Рис. 5. Схема этапа проверки попыток перехвата. Анализ проводят для нескольких подмножеств в процессе передачи

2-й, 4-й, 8-й, 16-й, ... и 998-й из моих 1000 битов. Они содержат четное число единиц". Тогда получатель подсчитывает число "1" на тех же позициях. Если данные получателя и отправителя различаются, проверка на четность случайного подмножества этих данных выявит ошибки. Если ошибок слишком много, то считается, что проводился перехват. В этом случае участники информационного взаимодействия прекращают передачу информации и осуществляют повторную генерацию ключа (см. рис. 4).

Использование орбитальных групп МКА могут открыть новые возможности в реализации квантовой защищенной связи на дальние расстояния. Орбитальные группы позволяют обеспечить многоканальность, одновременную передачу сообщения от одного источника нескольким адресатам или параллельную связь между разными участками информационного взаимодействия. Это возможно благодаря неоднократному дублированию функций каждого МКА в орбитальной группе. Публикации по этой тематике весьма ограничены. Предложим начальную концепцию использования орбитальных групп МКА для передачи квантовых ключей [14—16].

Использование орбитальных групп микрокосмических аппаратов для передачи квантовых ключей

Орбитальные группы состоят из большого числа (сотен и даже тысяч) МКА малой массы и размеров. МКА в орбитальной группе разделены по выполняемым ими функциям [5]. Первый все рассчитывает и раздает приказы, второй принимает и отправляет сообщения, третий измеряет магнитное поле, четвертый следит за поверхностью Земли и т. д. Каждый МКА дублируется в группе несколько раз и, в случае выхода из строя, моментально заменятся таким же. По сути, орбитальная группа МКА, состоящая из нескольких тысяч микроспутников, представляют собой сложнейшую распределенную робототехническую систему [4, 17–19]. Каждый из микроспутников подчиняется командам головного пункта управления, но одновременно при этом способен выполнять автономную, независимую от других микроспутников, работу. Если в такой орбитальной группе присутствуют МКА с приемниками (детекторами) и источниками единичных фотонов, то орбитальная группа может служить получателем, источником или повторителем (ретранслятором) информации с использованием квантово-криптографических ключей.

Представим схему передачи ключей с применением орбитальных групп между наземными станциями и спутниками (рис 6). Схема, представленная на рис. 6, является общей и демонстрирует несколько вариантов передачи квантово-криптографических ключей в космосе. Это наземная станция \Rightarrow наземная станция; наземная станция \Rightarrow спутник;



Рис. 6. Использование орбитальных групп в космической квантовой криптографии (стрелками указаны направления передачи информации): 1 — орбитальная группа микрокосмических аппаратов; 2 — спутник; 3 — наземная станция

спутник \Rightarrow спутник. Разработаем детальнее варианты передачи информации с помощью орбитальных групп МКА (рис. 7, см. третью сторону обложки). В случае необходимости передачи информации на дальние дистанции орбитальные группы МКА можно использовать в качестве ретрансляторов. Скажем, необходимо передать информацию с одной наземной станции на другую (рис. 7, *a*), наладить связь между двумя отдаленными спутниками или космическими станциями (рис. 7, *б*), осуществить рассылку информации от одной наземной станции или космической станции нескольким наземным адресатам (рис. 7, *в* и *г*), соответственно.

В случае, когда наземные отправитель и получатель находятся вне зоны действия одной орбитальной группы МКА, можно использовать цепочки из передающих орбитальных групп (рис. 7, д). При условии, что космические станции или спутники и наземные станции находятся на приемлемом для генерации квантово-криптографического ключа расстоянии, возможно осуществление связи между ними без использования орбитальных групп МКА. Варианты передачи информации с помощью квантовой криптографии в этом случае будут следующими: космическая станция \Rightarrow наземная станция (рис. 7, *e*), космический спутник ⇒ некоторое число наземных станций (рис. 7, \mathcal{W}), наземная станция \Rightarrow некоторое число космических спутников (рис. 7, 3), космическая станция ⇒ наземная станция и космический аппарат (рис. 7, u), космическая станция \Rightarrow некоторое число космических спутников (рис. 7, к). На рисунке штриховая линия со стрелкой символизирует квантовый канал связи и отражает направление передачи информации; сплошная — классический открытый канал, используемый для генерации квантово-криптографического ключа и анализа ошибок (проверки перехвата).

Заключение

Концепция использования орбитальных групп микрокосмических аппаратов находится в начальной сталии своего развития. Она будет постоянно детализироваться, дополняться и совершенствоваться. Одновременно будут разрабатываться технические системы передачи квантово-криптографических ключей в космосе. Результаты практиков-исследователей и ученых-теоретиков лягут в основу технологической реализации схемы. Для практической реализации необходимо решить еще много проблем и задач. Это выбор источника и детектора единичных фотонов. Это разработка передающего и принимающего устройств. Требуется разработать программное обеспечение для управления взаимодействием внутри орбитальной группы, а также для взаимодействия МКА с рабочими спутниками и наземными станциями. Нужны системы точного автоматического "прицеливания" единичных фотонов в противоположные приемные системы их улавливания. Необходимо также решить вопросы рассеяния фотонов, декогеренции, проблемы потери информации из-за этого и еще многое другое.

В заключение следует отметить две последние конференции, посвященные вопросам космонавтики. IV Международная конференция в г. Королеве рассматривала вопросы дистанционного зондирования Земли и космического пространства, радиолокационной, радиотехнической и оптикоэлектронной аппаратуры малых спутников, фундаментальных научных космических исследований, перспективных космических технологий, нетрадиционных методов решения традиционных задач космонавтики, спутниковой связи, интегрированных бортовых информационно-управляющих систем, обеспечения стойкости космических аппаратов к воздействию факторов космического пространства и космического "мусора", увеличения сроков активного существования, ключевых технологий создания малых спутников, планирования, экономики программ и оценки эффективности [19]. Отмечено, что малые спутники являются передовыми космическими системами в настоящее время. На Втором Белорусском космическом конгрессе доклады были разделены по следующим секциям: перспективные материалы для космической техники, спутники и приемопередающая аппаратура, обработка изображений поверхности Земли, геоинформационные системы и их применение, экологический мониторинг и чрезвычайные ситуации, космические технологии и образование [20].

Список литературы

1. **Жирнов М. А.** Микрокосмические информационные аппараты на основе микросистемной техники // Микросистемная техника. 2000. № 2. С. 18–25.

2. Интернет публикации: tarusa.ru, novosti-kosmonavtiki.ru, intersolar.by.ru, thefuture.by.ru, spylog.com, fuchsgruppe.com, ycc.sm.bmtsu.ru, xqp.physik.uni-muenchen.de, submarine.ru, micromachine.narod.ru.

3. Яшин К. Д., Мельниченко Д. А. О концепции развития информационных микроспутников в Республике Беларусь // Сб. тез. докл. II Международной научно-практической конференции "Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация". Минск. 2003. Ч. 1. С. 111–112.

4. Япин К. Д., Шелег И. А., Ригольд С. В. Теория связи и концепция построения распределенных информационных робототехнических систем // Известия Белорусской инженерной академии. 2003. № 1 (15)/3. С. 55–57.

5. Стреж С. В., Трошин Е. В. Создание космических систем на базе микроаппаратов // Микросистемная техника. 2003. № 11. С. 35-43.

6. **Bennet C., Brassard C.** Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing // Int. Conf. Computer, Systems and Signal Processing. India. December 1984. P. 175–179.

7. **Stucki D., Gisin N., Guinard O., Ribordy G., Zbinden H.** Quantum key distribution over 67 km with a plug&play system // New Journal of Physics. 2002. N 4. P. 41.1–48.8.

8. **Kimura T., Nambu Y., Hatanaka T., Tomita A., Kosaka H., Nakamura K.** Single-hoton interference over 150-km transmission using silica-based integrated-optic interferometers for quantum cryptography. 2004. arXiv:quant-ph/0403104.

9. Hughes R. J., Nordholt J. E., Derkacs P., Peterson C. G. Practical free-space quantum key distribution over 10 km in daylight and at night // New Journal of Physics. 2002. N 4. P. 43.1–43.14.

10. Kurtsiefer C., Zarda P., Halder M., Weinfurter H., Gorman P. M., Tapster P. R., Rarity J. G. A step towards global key distribution // Nature. 2002 Vol. 419. N 3. P. 450. 11. Lo H. K. Will quantum cryptography ever become a suc-

11. **Lo H. K.** Will quantum cryptography ever become a successful technology in the marketplace. 1999. arXiv:quant-ph/9912011.

12. Bienfang J. C., Gross A. J., Mink A., Hershman B. J., Nakassis A., Tang X., Lu R., Su D. H., Charles W. Clark, Carl J. Williams. Quantum key distribution with 1.25 Gbps clock synchronization // Optics Express. 2004. Vol. 12. N 9. P. 2011–2016.

13. Aspelmeyer M., Jennewein T., Zeilinger A. Long-Distance Quantum Communication with Entangled Photons using Satellites. 2003. arXiv: quant-ph/0305105.

14. Яшин К. Д., Баркалин В. В., Осипович В. С. Квантовая криптография в космической связи // Известия Белорусской инженерной академии. 2003. № 1 (15)/3. С. 160—163.

15. Яшин К. Д., Баркалин В. В., Осипович В. С. Квантовая криптография: основы разработки и информационное обеспечение // Материалы III Международного конгресса "Развитие информации и системы научно-технической информации в Республики Беларусь". Минск. Национальная академия наук Беларуси. Ноябрь 2003. С. 149—153.

16. Яшин К. Д., Осипович В. С. Космическое обеспечение защиты информационных ресурсов // Матер. IV Международного конгресса "Развитие информатизации и системы научно-технической информации в Беларуси". Минск. Национальная академия наук Беларуси. Ноябрь 2004. С. 162—169.

17. Яшин К. Д., Осипович В. С. Квантовая криптография и построение распределенных робототехнических систем // Матер. Республиканской научно-технической конференции. Минск. Белорусский национальный технический университет. Март 2004. С. 112—114.

18. Яшин К. Д., Осипович В. С., Дядюль С. А. Информационный модуль системы космических средств связи // Матер. Республиканской научно-методической конференции "Информационные технологии в образовании". Минск. Белорусский национальный технический университет. Май 2004. С. 187—189.

19. **Материалы** IV Международной конференции-выставки "Малые спутники: новые технологии, миниатюризация. Области эффективного применения в XXI веке". г. Королев, Московская область. 31 мая — 4 июня 2004.

20. Материалы Второго Белорусского космического конгресса. Минск. Объединенный институт проблем Информатики Национальной академии наук Беларуси. Октябрь 2005. УДК 621:315.592

- С. П. Тимошенков, д-р техн. наук, проф.,
- С. А. Зотов, канд. техн. наук,

В. В. Калугин, канд. техн. наук,

О. М. Бритков, В. Г. Рубчиц, А. А. Воротников, Е. П. Светлов-Прокопьев, канд. физ.-мат. наук, Московский институт электронной техники (технический университет), Москва, Зеленоград

ВЛИЯНИЕ ПОР И НАНОСЛОЕВ НА ИЗГИБНУЮ ЖЕСТКОСТЬ ПОДВЕСА КРЕМНИЕВОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МЭМС

Рассмотрен вопрос удаления пор, образующихся на поверхности раздела сращиваемых пластин кремния, которые используются при производстве чувствительных элементов микроэлектромеханических систем. Описано влияние пор на работу чувствительного элемента МЭМС. Предложена методика расчета процесса залечивания пор, основанная на теории изменения объема и формы поры и движения ее центра тяжести вблизи границы утоненного слоя кремния, обусловленного объемной диффузией вакансий. Проанализировано влияние поверхностных нанослоев на изгибную жесткость подвеса чувствительного элемента микромеханического устройства.

Технологии изготовления многослойных структур и структур кремний на изоляторе (КНИ), полученных с использованием методов сращивания подложек, определяют передовые направления развития нанонауки, нанотехнологий, современной элементной базы микроэлектроники и микросистемной техники. Исходя из этого представляемое направление исследований и разработок является весьма актуальным. В работе [1] приведены результаты разработки физико-химических основ технологии производства многослойных структур и структур КНИ для интегральных схем (ИС) и элементов микроэлектромеханических систем (МЭМС) с использованием новых технологических операций и оригинальных маршрутов. Показано, что использование технологических процессов сращивания подложек (элементов) является перспективным способом получения структур КНИ для различных применений. Сращивание через стеклообразные материалы открывает новые возможности изготовления многослойных структур, а также микроэлектронных изделий и МЭМС на их основе. Кроме того, представлены разработанные технологические процессы формирования элементов и узлов микромеханических датчиков физических величин и результаты моделирования процесса анизотропного травления. Предложена также технология создания трехмерных структур методом анизотропного травления, а также технология создания многоуровневых структур и сложнопрофильных объемных конструкций. Получены различные профили сечения конструкций элементов подвеса колебательной системы (торсионов): прямоугольные, крестообразные, треугольные, ленточные, ромбовидные.

Структуры КНИ позволяют обеспечить технологические и экономические преимущества при получении микромеханических чувствительных элементов (ЧЭ) МЭМС по технологиям прямого соединения перед альтернативными приборами, изготовляемыми на обычных подложках, а также производить изделия, которые невозможно реализовать с использованием других методов. В настоящее время одним из перспективных направлений производства структур КНИ являются технологии, использующие методы сращивания протонированных пластин, которые позволяют получать структуры с изолированным слоем монокристаллического кремния толщиной от 0,1 до десятков микрометров с использованием методов утонения рабочей пластины [1-3].

В процессе изготовления структур КНИ [1-3] применяются различные технологические операции, среди которых химическая обработка пластин, имплантация протонов, высокотемпературные операции и др. В результате проведенных исследований [1] выявлены причины, приводящие к браку структур КНИ, получаемых с использованием процесса сращивания пластин кремния. К этим причинам можно отнести: 1) загрязнение перед операцией имплантации ионов водорода, при соединении и сращивании пластин кремния; 2) шероховатость поверхности; 3) геометрическое несовершенство (прогиб, коробление, локальная неплоскостность). Загрязнения на поверхности полупроводниковых пластин перед проведением сращивания являются основной причиной брака. Ужесточение требований к чистоте и совершенству поверхности пластин необходимо не только для получения структур КНИ, но и для производства ИС, микромеханических ЧЭ МЭМС на их основе.

Важным вопросом в технологии сращивания является проблема залечивания (удаления) пор и полостей, пустых и заполненных газом, образующихся на поверхности раздела сращиваемых пластин кремния, используемых при производстве микромеханических ЧЭ МЭМС [1—3]. В частности, поры влияют на изгибную жесткость подвеса чувствительного элемента любого микромеханического устройства. Решение этой проблемы определяет во многом качество получаемых изделий [4—7]. Здесь сразу же следует отметить тот факт, что очень крупные поры и полости с размерами порядка толщины утоняемого слоя $d_{yT} \approx 10...30$ мкм вскрываются в процессе утонения одной из кремниевых пластин. Возникает задача о движении и залечивании пор и полостей диаметром ≤ 30 мкм. Эта задача может быть рассмотрена на примере модели, предложенной в работах [5, 6]. Несмотря на приближенный характер самой модели, решение задачи дает возможность оценить порядок значений времен движения и залечивания пор и полостей.

Рассмотрим процесс залечивания пор, основанный на теории изменения объема и формы поры и движения ее центра тяжести вблизи границы утоненного слоя кремния, обусловленного объемной диффузией вакансий. Объемные потоки вакансий, направленные от поры или к поре в бесконечном кристалле, приводят к ее симметричному залечиванию или же к росту [5, 6]. Скорость изменения объема поры Ω или ее радиуса *R* в кристалле бесконечных размеров с равновесной концентрацией вакансий на бесконечном расстоянии равна [5, 6]

$$\frac{dR}{dt} = \frac{DP\omega}{RkT}; \ \frac{d\Omega}{dt} = 4\pi R^2 \frac{dR}{dt} = \frac{4\pi DP\omega R}{kT}, \quad (1)$$

и определяется коэффициентом объемной диффузии атомов D и общим давлением на поверхность кристалла $P = P_0 + P_L$, где P_0 — давление газа в поре, $P_L = -2\gamma/R$ — лапласовское давление, $\gamma = 10^3$ эрг/см² — коэффициент поверхностного натяжения. Здесь $\omega = 1/N_0$, N_0 — число атомов в 1 см³; k — постоянная Больцмана; T — температура; t — время. Отметим, что если кристалл подвергнут внешнему давлению, то под P_0 следует понимать разность давления внутри поры и внешнего давления. В случае конечного расстояния от поры до границы L скорость движения центра тяжести поры дается выражением [5, 6]

$$\boldsymbol{v} = -\frac{3}{4} \frac{DP_{\omega}}{RkT} \left(\frac{R}{L}\right)^2 \boldsymbol{e}_{\perp}, \qquad (2)$$

где e_{\perp} — вектор нормали к поверхности поры. Из формулы (2) следует, что пустые поры ($P = -2\gamma/R$) должны двигаться от границы кристалла, а поры, заполненные газом, давление которого превышает лапласовское давление (P > 0), к границе (см. выше).

В рассматриваемом случае малых значений R/L скорость (2) значительно меньше (примерно в $(L/R)^2$ раз) скорости изменения среднего радиуса dR/dt [5, 6]. Поэтому за время залечивания поры с P < 0

она успевает уйти от границы сращивания вглубь неутоненной подложки на расстояние порядка

 $R_0(R_0/L_0)^2$, значительно меньшее, чем ее радиус R_0 . Здесь R_0 — начальный радиус сферической поры.

Радиус поры с ее положительным давлением P > 0 увеличивается и одновременно ее центр тяжести перемещается в сторону границы. За время

$$\tau_L \approx \frac{kT}{DP_{\omega}} L_0^2$$
, $P = P_0 + P_L = 2 \cdot 10^7$ дин/см²,
 $P_0 = 4 \cdot 10^7$ дин/см², (4)

в течение которого происходит увеличение радиуса поры до значения ~ L_0 и передний участок поры достигает границы кристалла (поверхности утоненного слоя); центр тяжести такой поры также сместится на расстояние, сравнимое с L_0 , где L_0 начальное расстояние от центра сферической поры до границы кристалла. Отметим, что давление газов в порах материалов по данным [5] может достигать значений порядка 10^9 дин/см² (то есть около 1000 атм). В наших условиях получения и эксплуатации ЧЭ МЭМС эти значения давлений должны быть значительно меньшими. В качестве примера было выбрано значение давления газов в порах около $P_0 = 4 \cdot 10^7$ дин/см² (см. формулу (4)).

Оценим по формулам (3), (4) порядок значений времен залечивания пор с различными значениями R_0 (L_0). Пустые поры (P < 0) движутся от границы сращивания вглубь неутоненной подложки и их радиус уменьшается, стремясь к нулю. Оценки по фор-муле (3) при $\omega \approx 10^{-23}$ см³, $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг · K⁻¹, T = 1200 K, $D \approx 10^{-8}$ см²/с [5] дают: для радиуса поры $R_0 = 1 \text{ MKM} = 10^{-4} \text{ cm}, \tau_R (1,0 \text{ MKM}) = 414 \text{ c} = 0.115 \text{ y};$ для радиуса поры $R_0 = 10$ мкм $= 10^{-3}$ см, τ_R (10 мкм) $= 4,14 \cdot 10^5$ с = 115 ч и для радиуса по-ры $R_0 = 30$ мкм $= 3 \cdot 10^{-3}$ см, τ_R (30 мкм) = $= 1,1 \cdot 10^7 c = 3090$ ч. Поры с газом (P > 0) движутся от границы сращивания к поверхности утоненного слоя и их радиус увеличивается до значения $R_0 \approx L_0$ $(L_0 -$ расстояние от центра поры до границы кристал-(L_0 — расстояние от центра поры до границы кристал-ла), после чего пора вскрывается. Оценки τ_L по фор-муле (4) при $\omega \approx 10^{-23}$ см³, $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$ эргК⁻¹, T = 1200 K, $D \approx 10^{-8}$ см²/с дают: для $R_0 \approx$ $\approx L_0 = 1,0$ мкм = 10^{-4} см, τ_L (1,0 мкм) = 828 с = 0,23 ч; для τ_L при $R_0 \approx L_0 = = 10$ мкм = 10^{-3} см, τ_L (10 мкм) = 8,28 \cdot 10^4 с = 23 ч и для $R_0 \approx$ $\approx L_0 = 30$ мкм = $3 \cdot 10^{-3}$ см, τ_L (30 мкм) = = 7 45 \cdot 10^5 с = 207 ч Из ланных оценок τ_D и τ_L $= 7,45 \cdot 10^5$ с = 207 ч. Из данных оценок τ_R и τ_L следует, что эти значения резко зависят от R_0 и L_0 . В частности, очень малые поры с размерами $R_0 \le 1$ мкм залечиваются за время ≤ 1 ч, а поры с размерами $R_0 \le 10$ мкм — за время несколько десятков часов. Далее наши оценки показали, что низких температурах термообработки при $(T \le 100 \text{ °C})$ скорости движения *v* пор (микрополостей) резко уменьшаются, а времена залечивания т

увеличиваются на несколько порядков. Очень большие времена залечивания свойственны порам с $R_0 \ge 30$ мкм. Отсюда следует, что при комнатной температуре времена залечивания τ очень велики, а скорости движения v очень малы, так что поры можно считать практически неподвижными. Экспериментальные данные, приведенные в работе [5], подтверждают эти выводы теории. В заключение отметим, что те же самые порядки значений скоростей движения и времен залечивания свойственны и включениям второй фазы (частицы пыли, преципитаты различных металлов, кремния и т. д.) на границе раздела сращиваемых пластин кремния. Таким образом, рассмотренные особенности сращивания пластин кремния и залечивания пор и полостей на границе раздела сращивания, несомненно, способствуют лучшему пониманию технологического процесса получения качественных структур кремний на изоляторе. Проведенные оценки характерных времен различных стадий процесса имеют, в свою очередь, практическую значимость при проведении процесса в целом.

Практический результат из проведенного анализа можно получить, рассматривая типичную конструкцию чувствительного элемента (ЧЭ) микромеханического вибрационного гироскопа LL типа, приведенную на рис. 1.

Для изготовления ЧЭ такого типа используются структуры КНИ с толщиной приборного слоя 5...30 мкм и он может быть изготовлен как в индивидуальном, так и в интегральном исполнении.

Очевидно, что крупные поры и полости с размерами порядка толщины приборного слоя недопустимы для изготовления ЧЭ. В частности, наличие сквозных отверстий в рамках *1* приведет к статическому дисбалансу рамок. Наличие крупных пор и полостей в области гребенок *2*, образующих



Рис. 1. Чувствительный элемент микромеханического вибрационного гироскопа LL типа:

1 — рамка ЧЭ; 2 — гребенка; 3 — подвес рамки ЧЭ; 4 — опора ЧЭ

систему емкостных датчиков, приведет к выпадению отдельных зубьев гребенки и, как следствие, к дисбалансу возбуждающих и измерительных мостов схемы управления гироскопа. Особенно негативные последствия использования структур КНИ с крупными порами и полостями заключаются в возможном нарушении целостности подвесов рамок 3.

Учитывая размеры гребенки (~10 мкм), подвеса (~100 мкм), можно сделать вывод, что поры в структурах КНИ должны быть удалены в результате термообработки в течение практически целесообразного времени. Из расчетов следует, что для изготовления ЧЭ пригодны структуры КНИ с размерами пор не более 3...5 мкм.

Следует отметить, что изгибная жесткость подвеса чувствительного элемента любого микромеханического устройства является определяющим фактором, от которого зависят как динамические, так и статические характеристики данного устройства. В связи с этим проведен анализ влияния нанослоев (поверхностных технологических слоев малых толщин) на изгибную жесткость подвеса микромеханического устройства.

Анализ влияния нанослоев на изгибную жесткость подвеса микромеханического устройства

Проанализируем влияние нанослоев на изгибную жесткость подвеса ЧЭ МЭМС. Сегодня данная проблема стоит весьма остро, это объясняется уменьшением геометрических размеров ЧЭ микроприборов, что приводит к уменьшению размеров упругих подвесов, в силу этого возникает необходимость учета вклада, вносимого поверхностными слоями, в упругие свойства самого подвеса [8, 9].

Для этого рассмотрим кремниевую балку прямоугольного сечения*, покрытую с двух сторон некоторым слоем (например SiO₂), модуль Юнга которого отличается от модуля Юнга кремния (рис. 2). Данная балка представляет собой упругий подвес микромеханического устройства, например, акселерометра, гироскопа или микродвигателя [8, 9].

Свяжем с балкой систему координат Oxyz, оси Ox, Oy и Oz сонаправлены с главными осями сечения балки, точка O помещена в центр тяжести сечения балки (см. рис. 2).

При выводе зависимости, определяющей изгибную жесткость балки, положим в основу гипотезу Бернулли о плоских слоях [10] и допустим, что серединный слой балки является нерастяжимым.

Для определения изгибной жесткости балки в направлении оси *Оу* рассмотрим деформируемый участок $[x; x + \Delta x]$ (рис. 3).

^{*}Вывод, приведенный в данной работе, в общем случае можно обобщить на балку произвольного сечения с произвольным числом слоев.



Рис. 2. Элемент подвеса микромеханического устройства

Запишем выражение для определения напряжения, возникающего в сечении *dξ*:

$$\sigma = E(y)\xi\varphi,$$

где E — модуль упругости первого рода; ξ — расстояние от серединной линии до сечения $d\xi$, φ угол поворота сечения $x + \Delta x$ относительно сечения x (см. рис. 3).

Очевидна зависимость для угла φ :

$$\varphi = \frac{\partial w}{\partial x}\Big|_{x} - \frac{\partial w}{\partial x}\Big|_{x + \Delta x} = \frac{\partial^{2} w}{\partial x^{2}}.$$

Таким образом, напряжение в сечении $d\xi$ определяется зависимостью

$$\sigma = E(y)\xi \frac{\partial^2 w}{\partial x^2},$$
 (5)

где *w* — линейное смещение сечения балки в направлении оси *Oy*.

Умножая выражение (5) на площадь сечения $d\xi$, перейдем к выражению, определяющему силу в сечении $d\xi$, которая возникает вследствие деформа-



ции растяжения (сжатия) данного сечения:

$$dF = E(y)\xi \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} bd\xi$$

Следовательно, момент силы, возникающий в сечении балки, будет определяться зависимостью

$$M = \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} E(y) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} b\xi^2 d\xi, \qquad (6)$$

где $H = h_{\text{Si}} + 2h_{\text{SiO}_2}$; h_{Si} — толщина слоя кремния; h_{SiO_2} — толщина слоя SiO_2 .

Таким образом, изгибная жесткость балки в направлении оси *Оу* будет определяться зависимостью:

$$B = \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} E(y) b\xi^2 d\xi.$$
(7)

Положим, что все слои рассматриваемой нами балки однородны, следовательно, модуль Юнга E(y) может принимать два значения в зависимости

от координаты *y*: при
$$y \in \left[-\frac{h_{Si}}{2}, \frac{h_{Si}}{2}\right]$$
 модуль Юнга

$$E(y) = E_{\text{Si}} = \text{const}$$
, при $y \in \left[-\frac{h_{\text{Si}}}{2} - h_{\text{SiO}_2}, -\frac{h_{\text{Si}}}{2}\right]$ и

при
$$y \in \left[\frac{h_{\text{Si}}}{2}, \frac{h_{\text{Si}}}{2} + h_{\text{SiO}_2}\right]$$
 модуль Юнга

$$E(y) = E_{SiO_2} = const.$$

С учетом сказанного выше перепишем выражение (7) для изгибной жесткости балки:

$$B = E_{\rm Si}b \int_{5}^{\frac{h_{\rm Si}}{2}} \xi^2 d\xi + E_{\rm SiO_2}b \int_{5}^{-\frac{h_{\rm Si}}{2}} \xi^2 d\xi + \frac{-\frac{h_{\rm Si}}{2}}{-\frac{h_{\rm Si}}{2} - h_{\rm SiO_2}} + \frac{\frac{h_{\rm Si}}{2} + h_{\rm SiO_2}}{\int_{5}^{\frac{h_{\rm Si}}{2} + h_{\rm SiO_2}} \xi^2 d\xi.$$
(8)

Окончательно выражение для изгибной жесткости имеет вид:

$$B = E_{\rm Si} \frac{bh_{\rm Si}^3}{12} + E_{\rm SiO_2} b \left(\frac{1}{2}h_{\rm Si}^2 h_{\rm SiO_2} + h_{\rm Si}h_{\rm SiO_2}^2 + \frac{2}{3}h_{\rm SiO_2}^3\right).$$
(9)

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 7, 2006 -

Первое слагаемое в выражении (9) определяет изгибную жесткость кремниевой части балки и совпадает с известной элементарной формулой курса сопротивления материалов, вторая часть выражения (9) определяет влияние, вносимое слоями, на изгибную жесткость балки.

В случае, если слои расположены по всему периметру балки, как показано на рис. 4, то в выражение для изгибной жесткости в направлении оси *Оу* (9) добавится член

$$2 E_{\text{SiO}_{2}} \int_{-\frac{b_{\text{Si}}}{2} - b_{\text{SiO}_{2}} - \frac{H}{2}} \int_{-\frac{b_{\text{Si}}}{2} - b_{\text{SiO}_{2}} - \frac{H}{2}} \xi^{2} d\xi db =$$

= $E_{\text{SiO}_{2}} \frac{H^{3} b_{\text{SiO}_{2}}}{6},$

определяющий изгибную жесткость двух участков слоев, параллельных оси Оу.

Таким образом, изгибная жесткость балки прямоугольного сечения, покрытая слоями по периметру, будет определяться следующей зависимостью:

$$B = E_{\rm Si} \frac{bh_{\rm Si}^3}{12} + E_{\rm SiO_2} \left(b \left(\frac{1}{2} h_{\rm Si}^2 h_{\rm SiO_2} + h_{\rm Si} h_{\rm SiO_2} + \frac{2}{3} h_{\rm SiO_2}^3 \right) + \frac{(h_{\rm Si} + 2h_{\rm SiO_2})^3 b_{\rm SiO_2}}{6}.$$
 (10)

Рассмотрим вклад слоев с различными модулями упругости первого рода на изгибную жесткость подвеса.

Модуль Юнга тонких пленок нитрида кремния (Si_3N_4), используемых в полупроводниковом производстве, составля-





Рис. 5. Зависимость изгибной жесткости балки от толщины слоя для следующих параметров кремниевой балки:

a - b = 0,5 мкм, $h_{Si} = 0,5$ мкм; $\delta - b = 3$ мкм; $h_{Si} = 3$ мкм; e - b = 10 мкм, $h_{Si} = 10$ мкм; e - b = 30 мкм, $h_{Si} = 30$ мкм

ет 380 ГПа. Для пленки нитрида кремния 0,5 мкм, выращенной методом плазмохимического осаждения из газовой фазы, модуль Юнга составляет 210 ГПа. Тонкие пленки оксида кремния, используемые в микроэлектронике, имеют модуль Юнга, равный 75 ГПа. Известно значение модуля Юнга для оксида алюминия в монокристаллическом состоянии — 530 ГПа, и для керамики из оксида алюминия — 344,83...408,99 ГПа.

На рис. 5. приведены графики зависимости изгибной жесткости балки *B* от толщины слоя h_{SiO_2} и b_{SiO_2} (в предположении $h_{SiO_2} = b_{SiO_2}$) для материалов слоев со следующими модулями упругости первого рода: $E_1 = 530$ ГПа, $E_2 = 380$ ГПа, $E_3 = 210$ ГПа, $E_4 = 75$ ГПа, для различных размеров сечения кремниевой части балки *b* и h_{Si} .

Из приведенных результатов видно, что в случае если геометрические размеры сечений кремниевой части балки и слоев различаются в несколько раз, то слои оказывают весьма существенное влияние на изгибную жесткость балки в целом (рис. 5, *a*). Даже в случае если данное отличие более двух порядков, то, как видно из графиков на рис. 5, *c*, поверхностные слои также будут оказывать влияние (до нескольких процентов) на изгибную жесткость балки.

Следует отметить, что изгибная жесткость подвеса любого микромеханического устройства является определяющим фактором, от которого зависят как динамические, так и статические характеристики данного устройства. Из приведенных выше результатов следует, что при проектировании микромеханических приборов необходимо учитывать влияние, оказываемое слоями, на механические характеристики подвеса.

Выводы

1. В рамках метода идеального твердого тела с некими усредненными свойствами рассчитаны скорости движения пор (микрополостей) пустых и заполненных газом и их времен залечивания в рамках различных механизмов движения на границе раздела сращиваемых пластин кремния.

2. Показано, что при высоких температурах термообработки при наличии температурного градиента и внешнего давления, а также в полях термоупругих напряжений поры с размерами до 30 Å (3 нм) обладают значительной подвижностью, а их временам залечивания свойственны умеренные значения.

3. При низких температурах (например, при комнатной температуре) поры практически неподвижны, а времена их залечивания очень велики [см. ф-лу (3)]. Для изготовления целого ряда микромеханических гироскопов и акселерометров могут быть использованы структуры КНИ с размерами пор и полостей не более 3...5 мкм.

4. В результате проведенного расчета установлено, что изгибная жесткость подвеса любого микромеханического устройства является определяющим фактором, от которого зависят как динамические, так и статические характеристики данного устройства. Из приведенных выше результатов следует, что при проектировании микромеханических приборов необходимо учитывать влияние, оказываемое нанослоями на изгибную жесткость подвеса.

Список литературы

1. Тимошенков С. П., Калугин В. В., Светлов-Прокопьев Е. П., Графутин В. И. Физико-химические основы производства микромеханических чувствительных элементов гироскопов и акселерометров // Научная сессия МИФИ-2004. IV Научно-техническая конференция "Научно-инновационное сотрудничество" / Сб. науч. тр. Часть 2. М.: МИФИ, 2004. С. 48, 49.

2. Богданович Б. Ю., Графутин В. И., Калугин В. В., Нестерович А. В., Прокопьев Е. П., Тимошенков С. П., Чаплыгин Ю. А. Технологии и методы исследования структур кремний на изоляторе. М.: Ред.-изд. отдел МИЭТ, 2003. 288 с.

3. **Stengl R., Tan T., Goesele U.** A model for the silicon wafer bonding process // Japan J. Appl. Phys. 1989. V. 28. N 10. P. 1735–1741.

4. Тимошенков С. П. Автореф. докт. дисс. М.: МИЭТ, 2003.

5. Гегузин Я. Е., Кривоглаз М. А. Движение макроскопических включений в твердых телах. М.: Металлургия, 1971. 344 с.

6. Тимошенков С. П., Прокопьев Е. П., Дягилев В. В. О движении и залечивании пор и полостей вблизи границы сращивания стандартных пластин кремния // Известия вузов. Электроника. 1998. № 5. С. 39—44.

7. Тимошенков С. П., Прокопьев Е. П. Некоторые вопросы теории сращивания стандартных пластин кремния // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 1999. № 3. С. 35—44.

8. **Зотов С. А.** Динамика и расчет акселерометра с монокристаллическим маятником. Автореф. дисс. канд. техн. наук. Тула, ТулГУ, 2002.

9. Зотов С. А. Расчет формы деформируемой балки в подвесе микромеханического акселерометра. Известия ТулГУ. Сер. Проблемы специального машиностроения. Вып. 4. Тула, 2001. С. 154—157.

10. Рекач В. Г. Руководство к решению задач по теории упругости. М.: Высшая школа, 1966. 227 с.

УДК: 537.226, 538.956

М. Б. Белоненко, д-р физ.-мат. наук, **А. С. Сасов**, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

Динамика поляризации в сегнетоэлектриках типа порядок беспорядок с релаксационным типом поглощения

Исследуется динамика доменной структуры сегнетоэлектриков типа порядок—беспорядок, описываемых обобщенным изинговским гамильтонианом с релаксационным типом поглощения. Исходя из гамильтониана задачи получено уравнение на псевдоспиновые переменные, описывающее эволюцию поляризации. Такое уравнение численно решено совместно с уравнением для звуковой волны. Проведен анализ результатов и их сравнение с экспериментальными данными.

Введение

Современные направления физики сегнетоэлектрических явлений требуют не только понимания механизма процессов образования и развития доменной структуры, но и их математического описания, с целью предсказания новых свойств и особенностей в уже давно исследуемых экспериментально веществах [1-3]. В данной работе основное внимание было сосредоточено на особенностях динамики поляризации сегнетоэлектриков типа порядок-беспорядок с релаксационным типом поглощения с учетом существенной роли акустической подсистемы кристалла. Подобная модель применима для описания кристалла триглицинсульфата (ТГС) — $(CH_2NH_2COOH)_3 \cdot H_2SO_4$, но может быть также использована и для ряда других сегнетоэлектриков типа порядок-беспорядок, таких как NaNO₂. В частности, в сегнетоэлектриках типа порядок-беспорядок периодические структуры доменного типа, напоминающие солитонные решетки, хорошо наблюдаются в экспериментах по визуализации доменной структуры методом нематических жидких кристаллов и нуждаются, на наш взгляд, в дополнительном теоретическом осмыслении.

Необходимо отметить, что возникающие при этом нелинейные решетки, обязанные своим существованием, как динамике поляризации, так и процессам в акустической системе, будут тесно связаны с доменной структурой кристалла, и могут вносить вклад в его динамические и кинетические свойства. Вследствие этого рассмотрение возможности существования таких структур, исходя из микроскопического псевдоспинового формализма, без дополнительных предположений, является весьма актуальным.

1. Постановка задачи и основные уравнения

Поляризационные свойства сегнетоэлектриков во всех диапазонах температур и приложенных внешних электрических полей с высокой степенью точности можно описать с помощью псевдоспинового формализма. Для кристаллов типа ТГС и нитрита натрия, относящихся к сегнетоэлектрикам с релаксационным типом поглощения, с учетом малости туннельных эффектов основной гамильтониан задачи будет иметь вид [2]:

$$H = -\frac{1}{2\sum_{j}}J_{ij}S_{i}^{z}S_{j}^{z} - E_{0\sum_{j}}S_{j}^{z} + H_{sa} + H_{T}, \qquad (1)$$

где S_j^z имеет смысл оператора электрического дипольного момента *j*-й ячейки; J_{ij} — обменный интеграл, перенормированный с учетом теплового движения атомов; E_0 — приложенное к образцу постоянное электрическое поле. Оператор H_{sa} представляет собой гамильтониан взаимодействия псевдоспиновый со звуком, возбуждаемым в образце благодаря пьезоэффекту. Конкретный вид H_{sa} зависит от направления распространения и вида звуковых колебаний по отношению к кристаллографическим осям x', y', z'. Ограничимся рассмотрением звуковых колебаний одного типа и запишем в предположении, что звук обусловлен линейным пьезоэффектом [4],

$$H_{\rm sa} = -\sum_{j} d \frac{\partial U(y'z,t)}{\partial y'} S_j^z, \qquad (2)$$

где d — соответствующий пьезомодуль; U — значение вектора смещения; $H_{\rm T}$ — гамильтониан взаимодействия псевдоспиновой системы с термостатом, ответственный за поглощение энергии псевдоспиновой системой.

Отметим, что поскольку поглощение энергии носит релаксационный характер, необходимо вывести соответствующие кинетические уравнения для данного случая. Такие кинетические уравнения можно вывести методом неравновесного статистического оператора Зубарева [5] и методом Глаубера [6]. Отметим, что хотя результаты вывода кинетических уравнений этими методами отличаются в разных случаях, для гамильтонианов, соответствующих рассматриваемым кристаллам сегнетоэлектриков, данные уравнения совпадают с уравнениями Блоха для вектора псевдоспина, приведенными в работе [2]. Так в подходе Глаубера, рассматриваемом здесь в силу его простоты, рассмотрим вероятности *P*{..., σ_{qf} , ...} обнаружить псевдоспины в состояниях {..., σ_{qf} , ...} в момент

времени *t*. Предполагается, что зависимость от времени этой функции вероятности задается основным кинетическим уравнением

$$\frac{d}{dt}P\{..., \sigma_{qf}, ...\} = -\sum_{q} w_{q}\{..., \sigma_{qf}, ...\}P\{..., \sigma_{qf}, ...\} + \sum_{q} w_{q}\{..., -\sigma_{qf}, ...\}P\{..., -\sigma_{qf}, ...\},$$
(3)

где $w_q\{..., \sigma_{qf}, ...\}$ — вероятность переворота псевдоспина из-за контакта с тепловым резервуаром, а псевдоспин с индексом *qf* переходит из состояния σ_{qf} в состояние $-\sigma_{qf}$ в течение единичного промежутка времени. Предположим, что теплоемкость термостата достаточно велика так, что он находится всегда в равновесии. Исходя из условия детального баланса в равновесии:

$$\frac{w_q\{...,\sigma_{qf},...\}}{w_q\{...,-\sigma_{qf},...\}} = \frac{P_0\{...,-\sigma_{qf},...\}}{P_0\{...,\sigma_{qf},...\}},$$
(4)

где $P_0\{..., \sigma_{qf}, ...\}$ — функция равновесного распределения, пропорциональная фактору Максвелла — Больцмана $\exp(-\beta H)$], выражение для вероятности спинового перехода $w_{qf}\{..., \sigma_{qf}, ...\}$ может быть записано следующим образом:

$$w_{qf}\{..., \sigma_{qf}, ...\} = \frac{1}{2\alpha} [1 - \sigma_{qf} \tanh \frac{1}{2} \beta E_{qf}].$$
 (5)

Параметр α описывает временной масштаб, на котором в системе происходят все переходы, E_{qf} обозначает оператор поля, действующего на спин qf, и в приближении среднего поля данный оператор заменяется его средним значением. Для средних значений величин, составленных из произведений спинов

$$\prod_{f} \sigma_{qf} = \sum_{\{\sigma\}} \prod_{f} \sigma_{qf} P\{\dots, \sigma_{qf}, \dots, t\}$$
(6)

(сумма пробегает по всем 2^N состояниям системы), используя уравнения (5), легко получить

$$-\alpha \frac{d}{dt} \langle \prod_{f} \sigma_{qf} \rangle = \sum_{f} \langle \prod_{f'} \sigma_{qf'} \left[1 - \sigma_{qf} \tanh \frac{1}{2} \beta E_{qf} \right] \rangle.$$
(7)

Здесь сумма пробегает только по спинам в произведении $\prod_{f'}$. Данное уравнение необходимо дополнить уравнением для звуковой волны, которое в заданных приближениях будет иметь вид

$$u_{tt} - v_0^2 u_{y'y'} - v_0^2 u_{z'z'} + d_1 \langle S^z \rangle_{y'} = 0,$$

где $\langle S^{z} \rangle_{\alpha'} = \frac{\partial \langle S^{z} \rangle}{\partial \alpha'}$; v_{0} — скорость звука; $d_{1} = d/\rho$,

2. Основные результаты моделирования для кристаллов типа триглицинсульфата и их обсуждение

Рассмотрим сначала кристаллы типа триглицинсульфата, отличающиеся тем, что в их микроскопическом гамильтониане обменные интегралы $J_{ij} > 0$ и связывают лишь ближайших соседей. В одномерном случае, соответствующем наличию трансляционной симметрии в направлении перпендикулярном направлению изменения поляризации, кинетическое уравнение для описания ди-

намики поляризации $\langle S^z \rangle$ можно записать следующим образом:

где $\langle S^{z} \rangle$ — неравновесное среднее оператора электрического дипольного момента; J — интеграл обмена; E — внешнее электрическое поле; β — обратная температура; T_{1} — время релаксации. Данное уравнение необходимо решать совместно с уравнением для звуковых колебаний

$$u_{tt} - v_0^2 u_{y'y'} + \frac{d}{\rho} z_{y'} = 0, \qquad (9)$$

где u - эффективная компонента вектора смещений; <math>d - соответствующий пьезомодуль; ρ - плотность образца. Так, типичные решения в виде бегущих волн (т. е. зависящие только от (y' - vt)) имеют вид, представленный на рис. 1.



Белоненко М. Б. и др. 🔶 Динамика поляризации в сегнетоэлектриках типа "порядок—беспорядок" с релаксационным типом



Рис. 2. Визуализация методом НЖК упорядочения в ряды [7]. Структура решеток доменов представлена слева в средней части рисунка

Данное решение будет соответствовать решеткам доменов разной ориентации, плоским в перпендикулярном направлении. Отметим, что подобные доменные структуры наблюдались в эксперименте (рис. 2).

Поскольку обсуждаемые в данной работе сегнетоэлектрики являются квазидвухмерными, необходимо для более адекватного рассмотрения их свойств решать пространственно-двухмерную задачу. В этом случае система уравнений будет иметь вид:

$$\langle \dot{S}^{z} \rangle = -[\langle S^{z} \rangle - \frac{1}{2} \operatorname{th}(\beta (J \langle S^{z} \rangle + A \langle S^{z} \rangle_{y'y'} + A \langle S^{z} \rangle_{z'z'} + du_{y'} + E))]/T_{1};$$
(10)

$$u_{tt} - v_0^2 u_{y'y'} - v_0^2 u_{z'z'} + \frac{d}{\rho} z_{y'} = 0.$$
 (11)

Уравнения (10, 11) решались численно. Для параметров были выбраны следующие значения: $E = 10^5 \text{B} \cdot \text{m}^{-1}$, $\beta = \frac{1}{320} \text{ K}^{-1}$, J = 325 K. В качестве затравочных состояний выбиралось несколько видов поляризации. Типичная эволюция затравочных состояний поляризации приведена на рис. 3.

Отметим, что и в этом случае образуется периодическая структура поляризации, аналогичная солитонным решеткам [8]. Также обратим внимание на сходство полученной расчетной доменной структуры с наблюдаемой экспериментально. Возникновение подобной структуры связано, на наш взгляд, с тем, что релаксационные процессы, как бы "замораживают" распад первоначального состояния, имеющий волновой характер вследствие связи с акустической подсистемой. Таким образом, на основании численных расчетов в рамках микроскопического псевдоспинового формализма



Рис. 3. Типичная эволюция затравочных состояний поляризации

и использования системы связанных уравнений, описывающих поглощение энергии псевдоспиновой системой и распространение акустических волн, установлено существование квазиодномерных солитонных решеток поляризации. Данные решетки обязаны своим появлением нелинейному характеру релаксационного поглощения. При учете квазидвухмерности реальных сегнетоэлектриков типа порядок-беспорядок с релаксационным типом поглощения и учетом пьезоэффекта в образце также возникает разбиение на домены поляризации, образующие квазирегулярную структуру. Установлено, что образующаяся квазирегулярная двухмерная доменная структура поляризации практически не зависит от начальных условий в широких диапазонах параметров задачи. Распад первоначальной структуры проходит через одинаковые стадии, и в итоге устанавливается регулярная структура из "одномерных" солитонных решеток. Отметим, что полученные в результате расчета доменные структуры согласуются с фотографиями реальной доменной структуры триглицинсульфата, полученными методом нематических жидких кристаллов.

3. Основные результаты моделирования для кристаллов типа NaNO₂

Кинетическое уравнение для описания динамики поляризации $\langle S^z \rangle$ можно записать следующим образом:

$$\langle \dot{S}_{ij}^{z} \rangle = \frac{1}{2T_1} \operatorname{th}(\beta (J_z + du_{\xi} + E)) - \frac{\langle S_{ij}^{z} \rangle}{T_1}, \quad (12)$$

где $J_z = J_{ii}(S_{i+1,i}^z + S_{i-1,i}^z + S_{i,i+1}^z + S_{i,i-1}^z) +$ $+ \ J^1_{ij}(S^z_{i+2,j} + S^z_{i-2,j}) + \ J^2_{ij}(S^z_{i,j+2} + S^z_{i,j-2}),$ J, J₁, J₂ — интегралы обменного взаимодействия атома в данном узле с ближайшими соседними и следующими за ними атомами в двух взаимно перпендикулярных направлениях y' и z'; β — обратная температура; Е — внешнее электрическое поле; $\langle S_{ii}^{z} \rangle$ — неравновесное среднее оператора электрического дипольного момента в узле *i*, *j*; *T*₁ время релаксации. Выбор микроскопического гамильтониана Изинга с учетом взаимодействия не только между ближайшими, но и следующими за ними атомами в двух взаимно перпендикулярных направлениях, связан с тем, что в сегнетоэлектриках типа NaNO₂ существует несоразмерная фаза, наиболее естественным образом описываемая таким образом [8]. Данное уравнение необходимо решать совместно с уравнением для звуковых колебаний

$$u_{tt} - v_0^2 u_{y'y'} - v_0^2 u_{z'z'} + \frac{d}{\rho} z_{y'} = 0, \qquad (13)$$

где *и* — эффективная компонента вектора смещений; *d* — соответствующий пьезомодуль; р — плотность образца. Уравнения (12, 13) решались численной схемой "крест". В качестве затравочных состояний выбиралось несколько видов поляризации. Типичная эволюция затравочных состояний поляризации приведена на рис. 4. Эволюция же начального состояния, приведенного на рис. 4 слева, в зависимости от параметров задачи приведена на рис. 5, 6.

Таким образом, динамика доменной структуры кристалла типа NaNO2, как показано на достаточно больших временах, имеет локализованную структуру, это позволяет сделать вывод о том, что данные образования являются долгоживущими состояниями солитонного типа. Устойчивые состояния солитонного типа существуют в достаточно широком диапазоне параметров кристалла и обусловлены, по всей видимости, дипольными взаимодействиями сегнетоэлектрических ячеек из второй координационной сферы. Локализован-



Рис. 4. Иллюстрация эволюции начального состояния и образования долгоживущего локализованного состояния. Показаны основные сталии эволюшии:

 $E = 10^5 \text{ B} \cdot \text{m}^{-1}$ $\beta = \frac{1}{16} \text{ K}^{-1}$ J = 435 K $J_1 = -217 \text{ K}$ $J_2 = -217 \text{ K}$



Рис. 5. Иллюстрация эволюции начального состояния и образования долгоживущего локализованного состояния в случае измененных по сравнению с рис. 4 констант обменных интегралов: J = 435 K, $J_1 = -129$ K, $J_2 = -206$ K. На рис. 5, б время увеличено в 2 раза



Рис. 6. Иллюстрация эволюции начального состояния и образования долгоживущего локализованного состояния, в случае измененных по сравнению с рис. 4, 5 констант обменных интегралов. Значения констант обмена по разным направлениям взаимно заменены по сравнению с рис. 5:

J=435 К, $J_1=-209$ К, $J_2=-126$ К. На рис. 6, б время увеличено в 2 раза

ные устойчивые состояния могут являться центрами образования "кластеров-предшественников", ответственных за наблюдаемые аномалии в поведении комплексной диэлектрической проницаемости в параэлектрической фазе.

Список литературы

1. Лайнс М., Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. М.: Мир, 1981. 736 с.

2. Блинц Р., Жекш Б. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики. М.: Мир, 1975. 398 с.

3. Смоленский Г. А., Крайник Н. Н. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики. М.: Наука, 1968. 183 с.

4. Белоненко М. Б., Шакирзянов М. М. Нелинейная динамика и аномальное затухание электроакустических волн в сегнетоэлектриках типа порядок—беспорядок // ЖЭТФ. 1991. Т. 99. № 3. С. 860—873.

5. Белоненко М. Б., Донская И. С., Кессель А. Р. Кинетические уравнения для Изинговского магнетика в параллельном переменном поле // ТМФ. 1991. Т. 88. № 1. С. 222—236.

6. Levitskii R. R., Zachek I. R., Verkholyak T. M., Moina A. P. Dielectric, piezoelectric, and elastic properties of the Rochelle salt $NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$: A theory // Physical Review. 2003. B 67.

7. Поздняков А. П. Влияние некоторых дефектов структуры на процессы поляризации и переполяризации одноосных модельных сегнетоэлектриков, принадлежащих к различным кристаллофизическим классификационным типам: Дисс. канд. физ.-мат. наук. Волгоград: Изд. ВолГАСУ. 2003.

8. Нагаев Э. Л. Магнетики со сложными обменными взаимодействиями. М.: Наука, 1998. 232 с.

Материаловедческие и технологические основы МНСТ

УДК 678.747:621.317

М. И. Самойлович, д-р физ.-мат. наук, **А. Ф. Белянин**, д-р техн. наук, Центральный научно-исследовательский технологический институт "Техномаш" E-mail: samoylovich@technomash.ru

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК АЛМАЗОПОДОБНЫХ МАТЕРИАЛОВ. Часть 1.

Формирование пленок алмазоподобных материалов, получаемых плазменными методами, происходит в условиях потери морфологической устойчивости гранных форм роста. Нарушение когерентности для таких твердотельных систем может осуществляться различными релаксационными механизмами, что обусловлено возможностью снижать суммарную энергию за счет выбора внутренней подструктуры, взаимного расположения когерентных фаз и оптимизации их морфологических форм. Методы распыления, особенно магнетронного, незаменимы при необходимости формирования наноструктурированных пленок на больших площадях подложек из аморфных и поликристаллических материалов.

Введение

Как известно [1], в качестве планарных аналогов кристаллического состояния можно было бы рассматривать твердокристаллические, в частности, тонкие пленки, характеризующиеся двумерной функцией плотности δ. Формально такие решения не существуют [1] (кроме случая $\delta = \text{const}$), поскольку в результате тепловых флуктуаций функция термодинамического потенциала должна "размываться" и при неограниченном возрастании площади (размеров) такой системы флуктуационные деформации стремятся к бесконечной величине (в отличие от трехмерного случая, когда они остаются конечными и для неограниченных систем). В реальных структурах, когда флуктуации не слишком велики, а толщины пленок незначительны, подобные системы могут иметь довольно большие размеры. Последнему способствуют такие механизмы как формирование блочности, а в общем случае — появление морфологической иерархии в виде доменности, пластинчатости, волокнистости и других типов потери монокристальности, поскольку во всех случаях имеет место "перекачка" упругой объемной энергии в межфазную (пограничную или поверх-

- НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 7, 2006 –

ностную) энергию. Стоит также обратить внимание на возможность существования рассмотренных в работе [1] твердотельных объемных структур, чья функция плотности имеет вид $\delta(x, y)$, что создает, в определенном смысле, предпосылки для появления стержневых подструктур и волокнистого роста. Оказалось [1], что такого рода системы могут существовать при условии, что оси Z всех планарных подструктур (плоскостей Х Ү) будут параллельны друг другу. Еще на одно замечание в работе [1] стоит сослаться, а именно, что для планарных систем возможные элементы симметрии исчерпываются осями и проходящими через них плоскостями симметрии. Очевидно в таких системах (сохраняющих элементы симметрии, присущие кристаллам) должны преобладать ориентации, при которых оси симметрии, как и проходящие через них плоскости симметрии, должны располагаться перпендикулярно или близко к данному направлению (в зависимости от условий формирования) поверхности пленки. В указанном смысле пленки являются аналогами трехмерных жидких кристаллов, однако монокристальность для рассматриваемых систем, по-видимому, можно рассматривать только для сверхтонких эпитаксиальных (автоэпитаксия как рост на затравку является выделенным случаем) и для тонких пленок толщиной в несколько атомных слоев. Во всех остальных случаях, как ниже будет рассмотрено, имеет место образование (с той или иной степенью текстурированности) поликристаллических (поликластерных) систем либо их формирование в условиях потери морфологической устойчивости плоских поверхностей (гранных форм роста [2]).

Целью данной работы являлось изучение особенностей строения тонких пленок, полученных в условиях ионно-плазменных методов. Как ниже будет показано, фактически, такие процессы можно охарактеризовать, как происходящие в условиях потери морфологической устойчивости гранных форм роста. Как известно [3], нарушение когерентности для твердотельных систем может осуществляться различными релаксационными механизмами, что обусловлено способностью для таких систем снижать свою энергию путем выбора внутренней структуры, взаимного расположения когерентных фаз и оптимизации их формы (например, при наличии многофазных метастабильных структур). Само по себе нарушение когерентности приводит к "перекачке" объемной энергии в поверхностную (межфазную). Процессы наноструктурирования представляют значительно более широкие возможности для сохранения когерентности межфазных границ.

Хотя пластинчатая форма обеспечивает максимальную локализацию упругих полей, за исключением участков у краев пластины, поверхностная энергия "не позволяет" всей системе раскатываться в прослойку, но с уменьшением объема роль поверхностной энергии увеличивается, а следовательно, форма приближается к равновесной. Образование структур, имеющих полидоменное строение, будет предпочтительно, если снижение энергии макроскопических полей внутри такой системы преобладает над увеличением энергии за счет других слагаемых. Если имеет место распад на изоморфные компоненты (для многофазных систем), тогда пластинчатая форма не обязательна и форма областей определяется минимумом поверхностной энергии и, следовательно, приближается к цилиндрической (стержневая структура) или близкой к сферической (равноосной). В рамках такого подхода, как естественного процесса наноструктурирования, можно придать структурное обоснование термину — потеря морфологической устойчивости гранных форм роста [2], используемого для объяснения наблюдаемого для многих кристаллов, синтезируемых в области их термодинамической стабильности (например, синтетический алмаз - волокнистое строение при визуальной монокристальности пирамид роста, кварц - прокольный рост [4]), волокнистого роста или кристаллизации с потерей сплошности. В тех случаях, когда формирование определяется отдельными областями (например, вершинами вициналей в случае роста кристаллов в условиях больших или очень малых пересыщений), анизотропия скоростей роста по различным направлениям велика, поэтому первоначально плоская или почти плоская поверхность роста вырождается (распадается) и на ней появляются участки с ориентациями, все дальше отстоящими от исходной для грани соответствующей пирамиды роста. Многочисленные экспериментальные данные показывают, что такого рода процессы, характеризующие аномальные условия роста кристаллов, в случае тонких пленок (и значительной части эпитаксиальных) являются стандартными условиями их формирования.

Приведенные ниже данные также показывают, что частичная или полная потеря синхронности формирования столбчатых (волокнистых) подструктур приводит к потери сплошности (а значит и когерентности). При этом характерной особенностью ионно-плазменных процессов является своеобразный "недостаток" материала для заполнения межстолбчатых пустот, и образование столбчатых подструктур может иметь место при указанных условиях на самых ранних стадиях формирования твердотельных систем.

Таблица 1

Ориентирование текстуры (отне	юсительно подложки) при получении пле	енок методами распыления и вакуумного испарения
-------------------------------	---------------------------------------	---

Материал	Тип решетки кристалли- ческой фазы	Метод получения	Тип текстуры
Алмазная фаза углеродных	Куб.	Распыление ионным пучком	(111)
AIN	Гекс.	ВЧ и ПТ*-магнетронное распыление; распыление ионным пучком	(0001)
c–BN	Куб.	Вакуумное испарение; ионно-пучковая технология	(111)
w—BN	Гекс. (вюрцит)	Вакуумное испарение; ионно-пучковая технология	$\langle 0001 \rangle, \langle 10\overline{1}1 \rangle$
h–BN	Гекс.	Вакуумное испарение; ионно-пучковая технология	(0001)
BeO	Гекс.	Вакуумное испарение	(0001)
CaF ₂	Куб.	ВЧ-магнетронное распыление	(111), (100)
CaF_2^2	Куб.	Вакуумное испарение	$\langle 111 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 100 \rangle$
HfN	Куб.	Вакуумное испарение	$\langle 111 \rangle$
InN	Куб.	ВЧ-реактивное распыление; СВЧ-разряд	(110) (393 K), (100) (>393 K)
$In_2O_3 + 5$ Bec. % SnO_2	Куб.	ВЧ и ПТ-магнетронное распыление	$\langle 100 \rangle, \langle 111 \rangle$
Si ² Si ²	Куб.	Вакуумное испарение; ВЧ и ПТ-магнетронное распыление	(111), (110), (100)
TiN	Куб.	Реактивное диодное распыление	$\langle 111 \rangle$
TiN	Куб.	Вакуумное испарение	$\langle 111 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 100 \rangle$
ZnO	Гекс.	ВЧ и ПТ-магнетронное распыление;	(0001)
		распыление ионным пучком	
ZnS	Куб.	ВЧ и ПТ-магнетронное распыление	(111)
ZrN	Куб.	Вакуумное испарение	(111)
*ПТ —постоянный ток.	I		I

Строение пленок алмазоподобных материалов, сформированных плазменными методами

Преимущественное направление формирования пленок, получаемых методами распыления и вакуумного испарения, определяется не только атомарным строением материала пленки, а в значительной степени ориентацией элементов симметрии материала пленок относительно поверхности подложек (табл. 1) [5].

Методы ионно-плазменного распыления (магнетронное, диодное и другие, а также распыление ионным пучком) характеризуются направленностью потока пленкообразующих кластеров и неравновесными условиями, что в зависимости от условий проведения процесса приводит к различной степени кристалличности пленок (здесь и далее Ј - содержание в объеме пленки материала с элементами симметрии, характерными для кристаллической фазы), а при определенных параметрах процесса их формирования — к образованию аксиальных текстур пленок, проявляющихся у веществ с алмазоподобной кристаллической решеткой в виде волокнистого строения. Под алмазоподобными материалами понимаем системы, представленные материалами структурного типа алмаза (в кристаллическом состоянии).

Пленка, в определенном смысле, может рассматриваться как композит, армированный тонкими игольчатыми волокнами с шероховатой боковой поверхностью, промежутки между которыми полностью заполнены рентгеноаморфной фазой. Можно предполагать, что рентгеноаморфная фаза, заполняющая промежуток между волокнами, представляет собой, по крайней мере частично, максимально детерминированную некристаллическую алмазоподобную структуру [5]. При получении пленок алмазоподобных материалов (AlN, ZnO и др.) для указанных условий ось текстуры всегда совпадает с направлением оси зерен (волокон), сформированных, в свою очередь, нанокристаллитами. Здесь и далее под термином кристаллиты (нанокристаллиты) подразумеваются области (домены) в твердотельной системе, которые часто характеризуются по данным рентгеновской дифракции как апериодические кристаллы, что означает присутствие в них участков различной точечной симметрии с областями периодичности размерами в несколько единиц или десятков периодов решетки для соответствующих кристаллических фаз (рис. 1, a, δ).

Особенности текстуры (текстурированная пленка — система, представленная кристаллитами с закономерной их ориентацией относительно кристаллографических элементов симметрии) полученных материалов связаны с наличием различных типов неоднородности, в том числе атомарной, или шероховатостей у формируемой поверхности. Указанными свойствами, в частности, обладают поверхности, нормальные к винтовым осям симметрии. Волокнистое строение фаз с кубической решеткой (алмаз, Si и другие), наблюда-



Рис. 1. Особенности строения различных участков нанокристаллитов алмазной фазы (электронная микроскопия высокого разрешения — электронный микроскоп СМ200-ТЕМ)

ется по направлениям (100) (винтовые оси симметрии $4_1, 4_3$, (111) — (6₃) и (110) — (2₁), а в бинарных алмазоподобных соединениях со структурой вюрцита (AlN, ZnO и другие) — по направлению $(0001) - (6_3)$ и реже $(11\overline{2}0) (2_1)$. Следует обратить внимание, что при углах разориентации кристаллитов, не превышающих 3—5°, в монотекстурированных поликластерных пленках (например алмазных, получаемых CVDметодами) наблюдается визуальная монокристальность, "подтверждаемая" (если не учитывать особенности дифракции для тонких пленок) рентгеновскими методами.

Строение пленок AlN, сформированных методом магнетронного распыления

Пленки AlN получали с использованием модернизированных промышленных установок ВЧ-магнетронного распыления, оснащенных специально разработанными цельнометаллическими планарными магнетронами [6—9], распылением мишени из Al (99,99 %) на подложках из аморфных и кристаллических материалов: ситалл, плавленый кварц, поликристаллический корунд (поликор), сапфир (α-Al₂O₃ (0112), {0001}) и другие. Условия осаждения пленок AlN были следующие: состав газовой смеси — Ar + 60 об. % N₂, давление газа в вакуумной камере — 0,8...0,9 Па; мощность ВЧ-разряда (13,56 МГц) — 0,2...3 кВт; температура подложки — 473...573 К. При скорости 1...4 мкм/ч для расстояния мишень—подложка, равном 55... 90 мм, на неподвижных подложках получены пленки AlN толщиной до 10 мкм. Для формирования слоев рентгеноаморфного или поликристаллического AlN (AlN_{aM} и AlN_{кр}), устанавливали соответственно отрицательное (-50 В) или положительное (+45 В) электрическое смещение на подложкодержателе ($U_{\rm CM}$). Изменяя $U_{\rm CM}$ в процессе осаждения, получили многослойные структуры, содержащие слои AlN_{аM} и AlN_{кр}.

Все исследованные пленки AlN (коэффициент термического расширения $\alpha_{\rm T} = 3.5 \cdot 10^{-6} {\rm K}^{-1};$ удельное электрическое сопро-тивление $\rho > 10^{14}$ Ом · см) были поликристаллические, текстурированные по (0001). Полученные пленки имели столбчатое (волокнистое) строение, при этом направление оси текстуры (0001) соответствует ориентации волокон, образующих пленку, независимо от материала подложки (рис. 2, а и рис. 3, растровый электронный микроскоп (РЭМ) **TESLA BS-350).** Разориентация зерен относительно оси (0001) текстуры у пленок AlN составляла $\sigma = 0, 5...3^{\circ}$, наклон оси (0001) текстуры от нормали к плоскости подложки $\gamma < 2^\circ$, степень кри-



Рис. 2. Строение пленок AIN, сформированных на подложках из плавленого кварца. На вставке представлены электронограммы на отражение и просвет. Толщина пленок: *a* — 0,4 мкм (РЭМ); *б* — 30 нм (ПЭМ, светлые области — рентгеноаморфная фаза)



Рис. 3. Схема и строение (РЭМ) слоистой структуры: поликластерная пленка алмаза — AIN. На вставках представлены электронограммы на отражение



Рис. 4. Строение пленок AlN, полученных ВЧ-магнетронным распылением при различных условиях (на врезках представлены электронограммы):

a-e поверхности и сколы пленок, сформированных на подложках из плавленого кварца (РЭМ, на рис. 3, *е* справа дан увеличенный фрагмент); ∂ — переход пластинчатого строения (область *I*) в волокнистое (область *2*) и мелкозернистое с равноосными зернами (область *3*) (РЭМ); *е* — отдельное волокно пленки (ПЭМ)

нок AlN составляет 35...63 нм, легированных — 20...50 нм.

При некоторых условиях (положительное U_{см}, малая мощразряда) формируются ность пленки, имеющие мелкозернистое строение с равноосными зернами (рис. 4, а). Изменение условий получения приводит к образованию в объеме пленок составляющей фазы в виде волокон, вплоть до формирования волокнистого строения (рис. 4, δ , e). Угол разориентации смежных волокон в плоскости подложки невелик, поэтому в ряде случаев имеет место объединение соседних волокон, что характеризует еще большее упорядочение структуры пленки и формирование ограниченной текстуры (рис. 4, г). Строение поверхности образования и скола пленки AlN, полученной на подложке из α-Al₂O₃ (0112), показывает наличие перехода от пластинчатого строения в волокнистое и мелкозернистое с равноосными зернами при изменении условий синтеза (рис. 4, д).

С увеличением толщины пленки конусность волокон уменьшается, так что последующее формирование представляет почти параллельный агрегат волокон. Методом дифракционного контраста установлено, что микрокристаллиты AlN несовершенны, поскольку в них наблюдается большое число плоскостных дефектов, возможны дефекты упаковки, двойники (рис. 4, е). Особенности рентгенограмм пленок AlN, полученных на подложках из кристаллических и аморфных материалов, показывают, что ориентированность кристаллитов AlN по направлению винтовой оси (0001) не зависит от материала и ориентации (для монокристалла) подложки, что позволяет получить методом магнетронного распыления текстурированные пленки AlN, имеющие волокнистое строение независимо от материала подложки. Ориентация оси текстуры (0001) относительно подложки зависит от направления потока пленкообразующих кластеров и не зависит от материала и кристаллографического среза подложек. Угол наклона оси текстуры (γ , рис. 4, *в*) зависит только от направления потока пленкообразующих кластеров, а следовательно, от конструкции магнетронного источника и взаимного положения подложки и мишени.

Пленки толщиной 10...30 нм образованы нанокристаллитами конической формы в виде пирамидок, основания которых имеют псевдогексагональную форму. Электронно-микроскопическое изучение пленок AIN толщиной от 3 нм до 3,1 мкм, сформированных на подложках из плавленого кварца, проводилось с использованием реплик и в режиме просвечивания самих пленок, а электронограммы получали от пленок толщиной < 40 нм.

Введение легирующих компонентов в процессе формирования пленок AIN приводит к уменьше-

нию величины Ј. Для получения легированных пленок AlN применялись литые, керамические и составные мишени. Пленки AlN, легированные такими редкоземельными элементами (РЗЭ), как Sm и Er (AlN:Sm и AlN:Er). имели J < 15 об. % и $\sigma = 3...13^{\circ}$. Период решетки с кристаллической фазы неотожженных легированных РЗЭ пленок AlN был на 0,4...4,5 % меньше теоретического значения. Очевидно имело место образование дефектов замещения Sm_{A1} и Er_{A1}. Легирующая примесь присутствует в виде отдельных атомов, как в кристаллической, так и в рентгеноаморфной фазах AlN, а также осаждается в виде включений металла и соответствующего нитрида по границам волокон. Такие включения, по данным ожеэлектронной спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии, до концентрации примеси, равной ≈ 10 ат. % — рентгеноаморфные. При более высокой концентрации примеси формируются

кристаллические нитриды, например, для пленок AlN:Cu -Cu₃N; для AlN:Zn — Zn₃N₂; для $AIN:Mo - Mo_2N$. Отношение концентрации меди в рентгеноаморфной и поликристаллической фазах пленок AlN:Cu (J < 20 об. %), измеренное методами электронно-зондового спектрального микроанализа и инверсионной вольтамперометрии, составляет ≈27,7. Основная доля примеси приходится на аморфные Си и Си₃N. При концентрации Мо до ≈5 вес. % определяющими точечными дефектами кристаллической фазы AlN являются Мо_{А1}; при концентрации Мо 5...20 вес. % основные точечные дефекты — междуузельный Мо. Легирующая примесь в пленках ZnO на J влияет слабо, при этом примесь равномерно распределяется между кристаллической и рентгеноаморфной фазами.

Один из основных факторов, определяющих строение пленок, положение подложек в процессе осаждения пленки относительно источника распыления. Послед-



Рис. 5. Направления потока пленкообразующих кластеров от мишени к подложкам для планарного магнетрона (а):

1 — подложка; 2 — подложкодержатель; 3 — направление потока пленкообразующих кластеров; 4 — Аl-мишень; 5 — магнитная система; 6 — область распыления мишени. Изменение степени кристалличности (б) и параметров, характеризующих пленки (*в*-*e*) в зависимости от положения анализируемого участка пленки относительно распыляемой мишени. Расстояние мишень—подложка 55 мм; материал подложек:

× – ситалл; Δ – плавленый кварц; ■ – α-Al₂O₃ (0112); О – поликор

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 7, 2006

26



Рис. 6. Схема размещения подложки (*a*) и влияние угла наклона подложки из плавленого кварца к поверхности мишени на скорость осаждения и степень кристалличности пленок AIN и Ti (δ), размер областей когерентного рассеяния (*e*), разориентацию зерен относительно оси (0001), текстуры (*c*) и наклон оси текстуры относительно нормали к плоскости подложки (*d*) пленок AIN

нее зависит от конструкции магнетрона, используемого для их формирования. Сравнение параметров, характеризующих пленки AlN (степени кристалличности, периода решетки по оси Z, размера OKP, наклона оси (0001)текстуры от нормали к плоскости подложки, разориентации зерен относительно оси текстуры), полученных с использованием разработанных магнетронов на неподвижных подложках различных материалов, дано на рис. 5, где $L_{\rm M}$ — расстояние от проекции центра мишени на подложкодержателе до анализируемого участка пленки. На схеме процесса (рис. 5, а) в соответствии с ориентированием оси (0001) текстуры кристаллитов показаны направления потоков пленкообразующих кластеров.

Аналогичные зависимости были построены при формировании пленок (на неподвижных относительно магнетрона подложках) с использованием цилиндрической магнетронной распылительной системы с одной областью распыления [10]. Материал подложки и ее кристаллографическое ориентирование влияют на степень кристалличности, размер и углы разориентации кристаллитов пленок, а именно, при формировании пленок на поликристаллическом материале строение пленки над каждым зерном будет отличаться. Располагая подложку под углом α к поверхности мишени, можно в некоторых пределах менять наклон оси (0001) текстуры к плоскости подложки (рис. 6). Ограничения по ориентированию оси текстуры изменением наклона подложки связаны с зависимостью локальной направленности потока пленкообразующих кластеров у поверхности подложки от конструкции подложкодержателя, а также значения и знака подаваемого на него $U_{\rm cm}$. При различных параметрах процесса меняется скорость осаждения пленок V, но при этом вид кривых $V(\alpha)$ не изменяется. Наличие нескольких перегибов на зависимости $V(\alpha)$ AlN связано с тем, что в пленке высокая концентрация кристаллической фазы (рис. 6, δ), в то время как пленки Ti — рентгено-аморфны. Таким образом, тип текстуры сформированных магнетронным распылением пленок не зависит от наклона подложки к поверхности мишени.

Меняя значения и знак U_{см}, можно варьировать степень кристалличности и строение пленок AlN (от разупорядоченной до текстуры с $\sigma < 0,5^{\circ}$). Упорядоченная фаза состоит из кристаллитов, закономерно расположенных относительно подложки, и кристаллитов, не имеющих преимущественного ориентирования. Соотношение между числом тех и других также может меняться в широких пределах. Дифрактограмма не даст полной картины строения кристаллической фазы пленок, поскольку на дифрактограммах сильнотекстурированных по (0001) пленок AlN нет отражений (000*n*). В указанном случае при наличии отражений от части разупорядоченных зерен можно сделать ошибочный вывод о типе текстуры.

Электронно-микроскопическое изучение пленок AlN проводилось с использованием реплик и в режиме просвечивания самих пленок, отделенных от подлож-



Рис. 7. Строение (ПЭМ) поверхности (*a*) и скола (*б*) пленок AlN, сформированных на подложках из плавленого кварца. Толщина пленок: a - 1,6 мкм; $\delta - 0,4$ мкм

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 7, 2006 -



Рис. 8. Строение пленок AIN, сформированных ВЧ-магнетронным распылением: *а* — поперечный скол пленки толщиной 5 мкм (РЭМ); *б* — фрагмент пленки толщиной 30 нм (ПЭМ)

ки. Анализировали пленки AlN, полученные на подложках из плавленого кварца. Были изучены образцы толщиной от 3 нм до 3,1 мкм. Электронограммы получали от пленок толщиной < 40 нм, а в случае пленок толщиной > 1 мкм были использованы электронограммы от механически измельченных пленок. Поверхность пленок AlN — равномерно-зернистая, степень зернистости увеличивается с возрастанием толщины пленки. На рис. 7, *а*, *б* показано строение поверхности и скола пленки



Рис. 9. Строение пленки AIN:

a-e — толщиной 8 мкм, сформированной на подложке α -Al₂O₃ (0112) (РЭМ, на фотографиях (δ , e) представлены фрагменты, выделенные на фотографии (a)); e — толщиной 0,4 мкм, сформированной на подложке из плавленого кварца (платиноугольная реплика, ПЭМ, справа дан увеличенный фрагмент)

AlN различной толщины, отметим, что для пленок толщиной больше 1 мкм форма выхода зерен на поверхность удлиненная (рис. 7, a).

На сколе пленки прослеживается столбчатое строение кристаллитов (рис. 8, a), при этом пленки до толщины 10...20 нм образованы микрокристаллитами конической формы в виде пирамидок, основания которых имеют псевдогексагональную форму (рис. 8, δ).

Так как AlN сильный пьезоэлектрик, происходит взаимодействие заряда пленки с электронным лучом, поэтому не удалось использовать большие увеличения электронного микроскопа (выше 200 тыс. крат). Наклон волокон, наблюдаемый на электронно-микроскопических снимках на краю подложки α-Al₂O₃ $(01\overline{1}2)$, аналогичен наклону волокон AlN на уступах шероховатой поверхности подложки из плавленого кварца. При наклоне волокон (> 30°) на поверхности пленки AIN проявляется псевдоогранка, что видно на рис. 9. При формировании пленок AlN магнетронным распылением на подложках из α-Al₂O₃ (0112) наблюдаются элементы эпитаксиального роста. Получены следующие ориентационные соотношения подложка/пленка: α-Al₂O₃ (0001) $[11\overline{2}0]/AIN (0001) [10\overline{1}0], Si{100}$ [011]/AlN (0001) [1120]. На рентгеновских дифрактограммах помимо отражений от материала подложки наблюдались максимумы, соответствующие отражениям (0002), (0004), (0006), и $(11\overline{2}0)$ AlN. Интенсивность отражений на дифрактограммах, а следовательно, и степень кристалличности для пленок AlN изменялась в зависимости от условий получения (рис. 10). На дифрактограммах пленок, полученных при температуре подложки меньше 450 К, отражения $(11\overline{2}0)$ отсутствуют.



Рис. 10. Зависимости интенсивности отражений (0002) (*a*) и (11 $\overline{2}0$) (б) на рентгеновских дифрактограммах и степени кристалличности (в) пленок AlN, сформированных методом ВЧ-магнетронного реактивного распыления, от температуры подложки α -Al₂O₃ (01 $\overline{1}2$)



направлениях (0001) и ($11\overline{2}0$) (*a*) и угла разориентации зерен относительно осей текстуры (0001) и ($11\overline{2}0$) (*b*) с увеличением температуры подложки. Толщина пленок: • -1-2 мкм; O - 3 мкм; $\blacktriangle - 4-5$ мкм; $\Delta - 6$ мкм

Таким образом, на подложках любого материала можно сформировать пленки AlN, ориентированные по (0001). Рентгеноаморфные пленки AlN также могут быть получены при различных параметрах процесса на любой подложке. При использованных в работе условиях проведения процесса и отрицательном $U_{\rm CM}$ были получены рентгеноаморфные пленки AlN, как на подложках из плавленого кварца, так и из α -Al₂O₃. Используя приведенные выше результаты, можно объяснить температурную зависимость размера ОКР (рис. 11, *a*) и угла разориентации зерен относительно кристаллографических направлений $\langle 0001 \rangle$ и $\langle 11\overline{2}0 \rangle$ (рис. 11, *б*).

Строение пленок ZnO, сформированных методом магнетронного распыления

Пленки ZnO получали методом магнетронного распыления в режимах ВЧ и на постоянном токе (ПТ). Параметры процессов осаждения пленок ZnO представлены в табл. 2. Пленки имели волокнистое строение с размером ОКР, равным 31...42 нм, который (в направлении, перпендикулярном поверхности подложки) определяли по уширению на дифрактограммах отражения (0002). Для пленок ZnO ($\alpha_{\rm T} = 4,6 \cdot 10^{-6}$ K⁻¹; $\rho > 10^8$ Ом \cdot см) разориентация зерен относительно оси (0001) текстуры составляла $\sigma = 2,9...5,4^{\circ}$, наклон оси текстуры относительно нормали к поверхности подложки $\gamma < 1,5^{\circ}$, степень кристалличности Ј ≤ 60 об. %. При отдельных диапазонах давления газовой смеси ($2 \cdot 10^{-2}$...9,31 · 10^{-2} и 0,93...4 Па), помимо зерен, ориентированных по (0001), получали зерна, ориентированные параллельно поверхности подложки плоскостями $(10\overline{1}0)$ и $(10\overline{1}1)$. Перераспределение концентрации зерен, ориентированных по $(10\overline{1}0)$ и $(10\overline{1}1)$, варьировалось с изменением давления.

Пленки ZnO, полученные методом распыления, как на неподвижные подложки, так и с использованием подвижного подложкодержателя, имели столбчатое строение. Поскольку при

Таблица 2

Материал мишени	Состав газа	Давление газа, Па	Мощность разряда, Вт	Электрическое смеще- ние на подложке, В	Температура подложки, К
Zn	Ar + 50 об.% О ₂	0,81,2	200350 (BY)	2040	573673 K
Zn	Ar + (3560) об.% О ₂	0,1330,16	8001200 (ПТ)	_	573673 K

Условия осаждения пленок ZnO методом магнетронного распыления



Рис. 12. Строение (РЭМ) поверхности и скола пленок ZnO (*a*, *б*), сформированных магнетронным распылением на постоянном токе на подложке из ситалла (на фотографии (*a*) справа представлен увеличенный фрагмент); электронограммы пленок ZnO, полученных при различных условиях: при температуре подложки $T_{\rm H} = 673$ K, давлении газовой смеси P = 0,133 Па, концентрации кислорода $C_{\rm O_2} = 50$ об. % (*a*); при $T_{\rm H} = 573$ K, P = 0,133 Па, $C_{\rm O_2} = 35$ об. % (*c*); при $T_{\rm H} = 573$ K, $P = 1,3 \cdot 10^{-2}$ Па, $C_{\rm O_2} = 50$ об. % (*d*)







пыления мишени на степень кристалличности (*a*) и размер областей когерентного рассеяния (б). Положение анализируемого участка пленки относительно магнетрона (см. рис. 13, б);

• — сечение I (y = 5 мм), × — сечение III (y = 45 мм), Δ — сечение V (y = -25 мм)

магнетронном распылении плотности потоков и энергетический спектр пленкообразующих кластеров неоднородны относительно области распыления мишени, необходимо рассмотреть строение пленки ZnO на различных участках неподвижной подложки. Разориентацию зерен оси (0001) текстуры, ориентирование оси текстуры относительно нормали к рабочей поверхности подложки, степень кристалличности и долю объема пленки ZnO, определяющую ее пьезоэлектрическую эффективность, рассчитывали по рентгенограммам качания отражения (0002). Параметры решетки определяли по отражениям (0002) и (1013), при этом направление оси текстуры (0001) соответствовало направлению волокон пленок, полученных при различных условиях (рис. 12). Электронограммы на отражение (рис. 12, в-д) позволили определить ориентацию приповерхностного слоя (~10 нм) пленки, поэтому при изучении влияния положения анализируемого участка пленки относительно мишени на строение пленки ис-



Рис. 15. Влияние положения анализируемого участка пленки относительно области распыления мишени на параметр решетки (а) и наклон оси текстуры (б, в). Положение анализируемого участка пленки относительно магнетрона (см. рис. 13, б):

• — сечение I (y = 5 мм); • — сечение II (y = 25 мм); × — сечение III (y = 45 мм), Δ — сечение V (y = -25 мм), \Box — сечение VI (y = -45 мм)



Рис. 10. Влияние положения анализируемого участка пленки относительно ооласти распыления мишени на разориентацию зерен. Положение анализируемого участка пленки относительно магнетрона (см. рис. 13, б):

• — сечение I (y = 5 мм), • — сечение II (y = 25 мм), × — сечение III (y = 45 мм)

пользовались методики рентгеновской дифрактометрии, дающие информацию о строении всего слоя. Было установлено, что тип текстуры пленок ZnO не зависит от положения анализируемого участка пленки относительно распыляемой мишени (схема эксперимента дана на рис. 13).

Результаты, приведенные на рис. 14—16, получены для пленок ZnO, сформированных на подложках из ситалла (время процесса 2 ч, средняя скорость осаждения 3 мкм/ч). Только на пленке, расположенной на подложке напротив центральной зоны мишени (X = 5 мм, Y = 5 мм), интенсивность отражения (0002) значительно превосходит интенсивности прочих отражений. У пленок, расположенных на других участках подложки, обнаруживается сближение интенсивности различных отражений,

тем большее, чем значительнее наклон оси (0001) текстуры относительно нормали к плоскости подложки. Последнее связано с уменьшением интенсивности отражений (000*n*) вследствие выхода основной массы ориентированных по (0001) зерен пленки ZnO из отражающего положения. Для сильнотекстурированных по $\langle 0001 \rangle$ пленок, начиная с некоторого угла наклона оси текстуры, на дифрактограммах исчезают отражения (000*n*). Данный угол тем меньше, чем меньше разориентация зерен относительно оси текстуры. При разориентации зерен, равной 0,5°, угол наклона оси (0001) текстуры относительно нормали к плоскости подложки, при котором на дифрактограммах пропадают отражения (000*n*), составляет 5°.

Пленки ZnO характеризовались наличием различных фаз, при этом кристаллическая фаза образцов ZnO склонна к двойникованию, проявляющемуся в различной степени для разных условий процесса формирования И положения анализируемого участка пленки относительно мишени. Для ряда пленок на дифрактограммах качания отражения (0002) наблюдались два максимума с расстоянием между вершинами 10...16°, в зависимости от положения в плоскости пленки оси качания. За второй максимум ответственно наличие нежесткого двойника (плоскость двойникования (1120)). Степень кристалличности пленок ZnO рассчитывали с учетом интенсивности указанных максимумов, а количество фазы, определяющей пьезоэлектрическую эффективность полученных пленок, устанавливали по интенсивности основного максимума на дифрактограммах качания. Неоднородность по толщине пленок ZnO, сформированных на подложке 48×60 мм, размещенной в процессе роста напротив центра мишени большей стороной параллельно оси Х, составляла ±7 % в направлении прямолинейного участка области распыления мишени и ±11 % в перпендикулярном направлении.

На рис. 14—16 представлено изменение параметров, характеризующих строение пленок, располагавшихся в процессе образования на сечениях I—VI (см. рис. 13, δ), проведенных параллельно оси *X* в обе стороны от центра мишени на расстояниях 5, 25 и 45 мм. Доля кристаллической фазы для пленок составляла 15...60 об. % от ее максимального содержания в сравниваемом ряду образцов (см. рис. 14, а). Количество фазы, определяющей пьезоэлектрическую эффективность пленки, сформированной на подложке, расположенной в процессе напротив области распыления мишени, уменьшалось за счет возрастания объема рентгеноаморфной фазы (уменьшение степени кристалличности), а также за счет развития двойникования и, следовательно, увеличения объема сдвойникованной части пленки. Размер ОКР в направлении оси (0001) составлял 11...35 нм. Максимальный размер кристаллитов наблюдали у пленок ZnO, сформированных на участке подложки, расположенном в процессе формирования напротив центра мишени (см. рис. 14, б). Указанные участки пленок содержали наибольшее количество фазы, определяющей пьезоэлектрическую эффективность, и имели минимальный период решетки с, приближающийся к параметру кристаллов (см. рис. 15, а).

Зависимости $\gamma(L_{\rm M})$ и $\sigma(L_{\rm M})$ (см. рис. 15, б, в и рис. 16, а, б) построены с учетом только основного максимума на дифрактограммах качания. Наклон оси текстуры увеличивался по мере удаления в плоскости подложкодержателя анализируемого участка пленки от центра мишени. При определении угла наклона оси текстуры и разориентации зерен относительно оси текстуры, качание образцов осуществлялось вокруг осей, расположенных в плоскости пленки параллельно (см. рис. 15, б и рис. 16, а, кривые $\gamma_1(L_M)$ и $\sigma_1(L_M)$) и перпендикулярно (см. рис. 15, в и рис. 16, δ , кривые $\gamma_2(L_M)$ и $\sigma_2(L_M)$) направлению прямолинейных участков области распыления мишени. Угол наклона оси текстуры относительно нормали к поверхности подложки равен нулю (ось текстуры перпендикулярна поверхности подложки) только у пленок, полученных на участке подложки, расположенном против центра мишени (см. рис. 15, *б*, *в*). Для всех других точек пленки ZnO ось текстуры наклонена в сторону центра мишени (см. рис. 15, б, в). Построенные зависимости показали, что ориентирование оси текстуры определяется только взаимным расположением мишени и анализируемого участка пленки и, следовательно, направлением потока пленкообразующих кластеров. Разориентация зерен относительно оси текстуры зависит от условий процесса формирования и материала подложки. Изменение величин, характеризующих строение пленок, при других параметрах процесса их получения не меняло характера представленных на рис. 14-16 зависимостей.

Строение пленок ZnO, сформированных методом распыления ионным пучком

В работе использовали специально разработанный для получения пленок плазменный эмиттер. Применяли мишень из ZnO (диаметр 50 мм), расположенную на расстоянии 70 мм от вытягивающего электрода плазменного эмиттера и установленную под углом 45...60° по отношению к оси пучка ионов (температура подложки составляла 500...520 К). При скоростях осаждения 0,1...0,8 мкм/ч получены пленки толщиной до 5 мкм. При использовании метода распыления ионным пучком Ar пленки ZnO формировали при давлении в вакуумной камере $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па при температуре подложек > 700 К. Указанным методом распыления керамических мишеней из ZnO формируют поликристаллические текстурированные пленки ZnO. Анализ интенсивностей отражений на дифрактограммах показал, что пленки ZnO, сформированные методом распыления ионным пучком, состоят из рентгеноаморфной и кристаллической фаз. Тип текстуры для пленок ZnO зависит от положения подложки относительно распыляемого образца. В табл. 3 приведены данные перераспределения интенсивности трех наиболее ярких отражений по поверхности подложки из плавленого кварца размерами 30 × 40 мм по мере удаления от края подложки, ближнего к линии пересечения плоскостей распыляемой поверхности образца и поверхности подложки, которая располагалась под углом к мишени.

Как видно из табл. 3, для дифрактограммы, снятой с участка пленки ZnO, расположенного у края подложки, был единственный дифракционный максимум $(2\theta = 34, 10^{\circ},$ Cuk_{α} -излучение), которому соответствует межплоскостное расстояние d/n, равное 0,2629 нм, отвечающее отражению (0002) ZnO. При съемке дифрактограмм с участка пленки, отстоящего на 10 мм от края подложки, помимо отражения (0002), появились отражения при углах $2\theta = 31,25^{\circ}$ и $2\theta = 55,37^{\circ}$

Таблица 3

Интенсивность отражений на дифрактограммах, полученных от пленки ZnO, сформированной на подложке из плавленого кварца

Расстояние от края подложки до	Интенсивность отражений I/I ₁			
участка измерения, мм	(1010)	(0002)	(1120)	
2		1,0		
20	0,02 0,4	1,0 0,6	1,0	
35 Данные картотеки ASTM	0,3 0,71	0,3 0,56	1,0 0,4	

(d/n = 0.2862 нм и d/n = 0.1659 нм), соответствующие плоскостям ZnO (1010) и (1120). Участки пленки, отстоящие от края подложки на 20 мм и более, обладают другим типом текстуры, так как на дифрактограммах, полученных с таких участков пленки, наибольшая интенсивность у отражения ($11\overline{2}0$) ZnO, а следовательно, имеет место преимущественное ориентирование кристаллитов пленки плоскостями (1120) параллельно подложке. Было установлено, что преобладающая ориентация зерен не зависит от толщины пленок. В пределах 0,1...0,6 мкм/ч при постоянстве условий проведения процесса тип текстуры пленок не зависит от скорости формирования слоя ZnO. Таким образом, переход одного типа текстуры в другой на различных участках пленки, сформированной на подложке из неориентирующего материала, связан с изменением

направления потока пленкообразующих кластеров.

Был проведен анализ влияния материала монокристаллических подложек и их ориентаций на тип образующейся текстуры. На дифрактограммах, снятых с пленок ZnO, сформированных на подложках, расположенных в области максимальной плотности потока пленкообразующих кластеров, при котором направление потока почти совпадает с нормалью к поверхности подложки, всегда наблюдается один дифракционный максимум. Ha подложке α -Al₂O₃ (01 $\overline{1}2$) указан- $(2\theta = 55.51^{\circ},$ ный максимум d/n = 0.1655 HM) соответствует отражению (1120) ZnO. Для подложек из Gd₃Ga₅O₁₂ {111}, α-SiC {0001} и алмаза {100} дифракционный максимум ($2\theta = 34, 12 - 34, 20^\circ$, d/n = 0,2628...0,2622 HM) соответствует отражению (0002) ZnO. При использовании монокристаллической подложки α-Al₂O₃



Рис. 17. Строение (РЭМ) скола (*a*) и поверхности (*б*) пленок ZnO, сформированных на подложках α -Al₂O₃ (0112)



Рис. 18. Рентгеновские дифрактограммы (Cuk_α-излучение) пленок ZnO толщиной 2,5 мкм, сформированных методом распыления ионным пучком на подложках:

 $a - \alpha$ -Al₂O₃ (11 $\overline{2}0$); δ — плавленый кварц. На вставках представлены рентгеновские дифрактограммы качания отражений (11 $\overline{2}0$) и (0002) (1 — неотожженные пленки; 2 — пленки после отжига на воздухе при 700 К в течение часа)

(0001) наблюдаются элементы эпитаксиального роста в соответствии с ориентационным соотношением α -Al₂O₃ (0001)[0110]/ZnO (0001) [2110]. Одновременно на монокристаллических подложках α-Al₂O₂ для пленок ZnO получены ориентационные соотношения: α-Al₂O₃ $(0001) [10\overline{1}0]/ZnO(0001) [11\overline{2}0],$ α -Al₂O₃ (0112) [0111]/ZnO (1120) $[000\bar{1}]$, a также α -Al₂O₃ (2 $\bar{1}\bar{1}0$) [0110]/ZnO (0001) [1100]. Пленки ZnO, сформированные на подложках из аморфных материалов, установленных в области максимальной плотности потока пленкообразующих частиц, всегда текстурированы по направлению (0001).

Электронной микроскопией на поверхности пленок выявлена бугристость с размером бугорков (зерен) 0,1...1 мкм, при этом элементов огранки у бугорков не обнаружено. На сколе пленки видны волокна, отчетливо проявляющиеся при текстурировании пленок по (0001). Подобный рельеф ростовой поверхности и поверхности скола характерен для столбчатого (волокнистого) формирования, который наблюдается у пленок ZnO, полученных методами ионно-плазменного распыления. Глобулярная форма ростовой поверхности пленок наблюдается у всех образцов, имеющих ось текстуры (0001), перпендикулярную поверхности пленки, независимо от материала подложки. При образовании у пленок ZnO аксиальной монотекстуры по направлению $\langle 11\overline{2}0 \rangle$ волокна наклонены к поверхности подложки (рис. 17, а), но поверхность пленки при этом не имеет глобулярного строения (рис. 17, б).

Глобулярная форма поверхности пленок и волокнистый характер скола полученных слоев указывают на негранный механизм их формирования. Разориентация зерен составляет $\sigma \approx 0,7...5^{\circ}$ для монотекстурированных пленок ZnO, полученных на монокристаллических подложках, и 3...5° для пленок, осажденных на подложки из аморфных материалов (рис. 18, вставки). Наклон оси текстуры относительно нормали к плоскости подложки для всех пленок ≈5°. Дифрактограмма качания, полученная для отражения $(11\overline{2}0)$ с отожженной пленки ZnO на подложке α-Al₂O₃ $(01\overline{1}2)$ (рис. 18, *а* вставка), по форме приближается к кривой качания для объемных монокристаллов ZnO. Полуширина дифракционных линий также уменьшается, что указывает на увеличение размера ОКР.

Список литературы

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. М.: Наука, 1964, 567 с.

2. Чернов А. А. Теория устойчивости гранных форм роста кристаллов // Кристаллография. 1971. Т. 16. Вып. 4. С. 842—863.

3. Ройтбурд А. Л. Особенности развития фазовых превращений в кристаллах // Проблемы современной кристаллографии. М.: Наука, 1975. С. 245—369.

4. Синтез минералов: Коллективная монография. Т. 1. М.: Недра, 1987. 488 с.

5. Материалы, оборудование и технологии наноэлектроники и микрофотоники / Под ред. А. Ф. Белянина, М. И. Самойловича. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2003. 357 с.

6. Белянин А. Ф., Самойлович М. И., Житковский В. Д., Каменева А. Л. Ударостойкие защитные пленочные покрытия на основе AIN в электронной технике // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2005. № 5. С. 35—41.

7. Белянин А. Ф., Самойлович М. И., Житковский В. Д. и др. Формирование методами магнетронного распыления пленок алмазоподобных материалов и их применение в устройствах электронной техники // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2003. № 1, 2. С. 62—78.

8. Belyanin A. F., Samoilovich M. I. Diamond and diamond-like materials films: formation, structure and application in electronics // Nanostructures and photon crystals. Collective monograph after the materials of plenary reports the 10 International conference. Russia. Moscow. CRTI "Technomash". 2004. P. 115–194.

9. Нанотехнологии и фотонные кристаллы / Под ред.: А. Ф. Белянина, М. И. Самойловича. Калуга—Москва: Изд. ОАО ЦНИТИ "Техномаш". 2004. 243 с.

10. Белянин А. Ф., Самойлович М. И. Применение в акустоэлектронике наноструктурированных пленок алмаза и алмазоподобных материалов // Материалы X Международной конференции "Высокие технологии в промышленности России". М.: Изд. ОАО ЦНИТИ "Техномаш", 2004. С. 5—120.

11. Семенов А. П., Белянин А. Ф., Семенова И. А. и др. Тонкие пленки углерода. П. Строение и свойства // Журнал технической физики. 2004. Т. 74. Вып. 5. С. 101–105.

12. Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Житковский В. Д., Багдасарян А. С. Наноструктурные углеродные материалы в тонкопленочной технологии // Инженерная физика. 2004. № 1. С. 33–39.

13. Belyanin A. F., Samoilovich M. I. Nanostructured carbon materials in thin film technology // Nanostructured thin films and nanodispersion strengthened coatings. Series: NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. 2004. V. 155. E—book. P. 77—90.

14. Sadoc J. F., River N. Boerdijk-Coxeter helix and biological helices // Europ. Phys. J. B. 1999. V. 12. P. 309–318.

15. Samoilovich M. I., Talis A. L. Structural realization of a fibre space technick and other algebraic geometry constructions as a foundation for the theory of nanostructural symmetry // Nanostructures and photon crystals. Collective monograph after the materials of plenary reports the 10 International conference. Russia. Moscow. CRTI "Technomash". 2004. P. 5–114.

16. Самойлович М. И., Талис А. Л. Теория симметрии наноструктурных состояний конденсированных сред как структурная реализация конструкций алгебраической геометрии // Материалы X Международной конференции "Высокие технологии в промышленности России". М.: Изд. ОАО ЦНИТИ "Техномаш". 2004. С. 121–255.

17. Шевченко В. Я., Самойлович М. И., Талис А. Л. и др. Геометрические структурные комплексы наночастиц ZrO₂ // Физика и химия стекла. 2005. Т. 31. № 2. С. 92—109.

18. Andersson S., Wadsley A. D. On the description of complex inorganic crystal structures // Nature. 1966. V. 211. P. 581–587.

Книги издательства "Техносфера"

В. Варадан, К. Виной, Л. Джозе. ВЧ МЭМС и их применения

Дан обзор состояния дел в области разработки и изготовления электромеханических систем и их компонентов. Подробно рассмотрены вопросы проектирования и технологические аспекты производства разнообразных микроустройств: переключателей, регулируемых индукторов и конденсаторов, фильтров, фазовращателей, линий передач и антенн, приведены преимущества и недостатки каждой отдельной конструкции и указаны способы их оптимизации. Целая глава книги посвящена такой важной теме, как монтаж микросистем, где обсуждаются методы построения корпусов микросистем и способы их сборки. Детально описаны методы изготовления микроустройств, как традиционных, применяемых в микроэлектронной промышленности, так и современных, разработанных специально для микросистем, использованы материалы, написанные ведущими разработчиками микросистем со всего мира.

Книга предназначена, в первую очередь, для инженеров-разработчиков ВЧ и СВЧ электромеханических микросистем и их компонентов. Она будет полезна специалистам, занимающимся разработкой мобильных систем связи.

Подробная информация о книгах на сайте http://www.technosphera.ru Тел. (495) 234-01-10 УДК 537.228.1 + 539.219.1

А. В. Криворучко,

В. Ю. Тополов, д-р физ.-мат. наук, Ростовский государственный университет

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТКЛИКА АНИЗОТРОПНЫХ 1—3-КОМПОЗИТОВ "СЕГНЕТОПЬЕЗОКЕРАМИКА — ПОЛИМЕР"

Исследованы эффективные гидростатические параметры (пьезокоэффициенты e_h^* , d_h^* , g_h^* , квадрат параметра приема $(Q_h^*)^2$ и коэффициент электромеханической связи k_h^*) 1—3-композитов "сегнетопьезокерамические стержни в форме эллиптического цилиндра полимерная матрица". Проанализированы примеры немонотонного концентрационного поведения d_h^* , g_h^* , $(Q_h^*)^2$ и k_h^* данных композитов с пьезоактивными или пьезопассивными матрицами. Впервые предложена классификация концентрационных зависимостей системы эффективных гидростатических параметров 1—3-композитов на основе сегнетопьезокерамики.

Интерес к композитам "сегнетопьезокерамика (СПК) — полимер" со связностью 1—3 обусловлен возможностями варьирования их эффективных физических свойств, коэффициентов электромеханической связи и параметров приема в широких пределах [1-4] при относительно простой микрогеометрии и взаимодействии компонентов с заметно различающимися свойствами. Ранее подробно исследовались 1-3-композиты с СПК стержнями в форме кругового цилиндра [2, 3, 5, 6], в меньшей степени — со стержнями в форме прямоугольного параллелепипеда [2, 4, 7] или трехгранной призмы [2, 7] и весьма ограниченно — со стержнями в форме эллиптического цилиндра [7]. При этом остается мало исследованным влияние микрогеометрии на переход от трансверсально изотропных структур к анизотропным и на соответствующие изменения пьезоэлектрических и других свойств данных материалов. Кроме того, в литературе отсутствуют работы, в которых рассматривалась бы вся система гидростатических параметров 1—3-композитов, являющихся активными элементами гидрофонов и других гидроакустических устройств. Цель настоящей статьи — анализ влияния микрогеометрии и свойств компонентов на гидростатический пьезоэлектрический отклик 1—3-композитов с СПК стержнями в форме эллиптического цилиндра.

Предполагается, что 1—3-композит имеет ячеистую структуру и характеризуется регулярным распределением цилиндрических СПК стержней в протяженной полимерной матрице. Основания цилиндров лежат в плоскости ($X_1 O X_2$) прямоугольной системы координат $(X_1X_2X_3)$, являются конгруэнтными и описываются уравнением $(x_1/a_1)^2$ + $(x_2/a_2)^2 = 1$, где a_i — длины полуосей эллипса. Центры симметрии эллипсов образуют двоякопериодическую систему узлов и совпадают с вершинами прямоугольников, стороны которых параллельны оси OX₁ или OX₂. Образующие цилиндров параллельны оси OX_3 , а их высоты $h \gg a_i$. Вектор остаточной поляризации СПК стержня $P_r^{(FC)}\uparrow\uparrow$ OX_3 , а полимерной матрицы — $P_r^{(P)}$; при различных условиях поляризации и различных соотношениях между напряженностями коэрцитивных полей компонентов [8, 9] возможны случаи $P_r^{(P)}$ $\uparrow\uparrow$ $OX_3, P_r^{(P)} \uparrow \downarrow OX_3$ или $P_r^{(P)} = 0.$ Эффективные электромеханические свойства 1—3-композита определяются с учетом следующих предположений [1]. Линейные размеры неоднородностей (например, размеры кристаллитов СПК) значительно меньше длины малой оси 2*a*_i эллипса — основания стержня. Длины акустических волн, падающих на образец, значительно больше высоты h. Стержни и

матрица считаются идеально связанными между собой, т. е. на образующих цилиндров отсутствуют воздушные прослойки, микротрещины и т. п. Для определения эффективных электромеханических свойств композита используются следующие полные наборы констант СПК и полимера с верхними индексами (FC) и (P) соответственно: модули упругости $c_{ab}^{(FC), E}$ и $c_{ab}^{(P), E}$, измеренные напряженности электрического при поля $E = \text{const}, \text{ пьезокоэффициенты } e_{ii}^{(FC)}$ и $e_{ii}^{(P)}$, а также диэлектрические проницаемости $\varepsilon_{ff}^{(FC), \xi}$ и $\varepsilon_{ff}^{(P),\,\xi}$, измеренные при механической деформации ξ = const. Усреднение свойств проводится методом эффективного поля [10, 11] с учетом электромеханического взаимодействия между СПК стержнями в трансверсально изотропной среде. Это взаимо-

действие описывается при введении некоторого локального поля, действующего на каждый стержень в композите, и учете граничных условий для электрических и механических полей на границах СПК и полимерного компонентов. Соответствующая матрица эффективных свойств композита имеет вид

$$\|C^*\| = \|C^{(P)}\| + m(\|C^{(FC)}\| - \|C^{(P)}\|)[\|I\| + (1-m)\|S\| \|C^{(P)}\|^{-1}(\|C^{(FC)}\| - \|C^{(P)}\|)]^{-1}, \quad (1)$$

где

$$\|C^{(FC)}\| = \begin{pmatrix} \|C^{(FC), E}\| & \|e^{(FC)}\|^{\mathsf{T}} \\ \|e^{(FC)}\| & -\|e^{(FC), o}\| \end{pmatrix};$$
$$\|C^{(P)}\| = \begin{pmatrix} \|C^{(P), E}\| & \|e^{(P)}\|^{\mathsf{T}} \\ \|e^{(P)}\| & -\|e^{(P), o}\| \end{pmatrix} -$$
(2)

матрицы электромеханических свойств СПК и полимера соответственно; верхний индекс ^т обозначает транспонирование; m — объемная концентрация СПК стержней; ||I|| — единичная матрица; ||S||— матрица коэффициентов Эшелби [12], зависящая от формы стержней и элементов матрицы $||C^{(P)}||$. Матрица $||C^*||$ из (1) имеет ту же структуру, что и матрицы (2), а формирующие (1) матрицы модулей упругости (при E = const) $||c^{*E}||$, пьезокоэффициентов $||e^*||$ и диэлектрических проницаемостей механически зажатого образца $||\varepsilon^{*\xi}||$ являются функциями m и $a = a_1/a_2$.

Основываясь на представлениях об "элементарной" ячейке Банно [11, 13] композита, будем изменять объемную концентрацию *m* в интервале $0 < m < \pi/4$. Верхний предел $\pi/4$ соответствует отношению площади эллипса, вписанного в прямоугольник, к площади этого прямоугольника. Параметр а достаточно проварьировать в интервале 0 < a < 1. При a = 0 наблюдается переход к слоистой структуре типа 2-2 с вертикальными границами раздела, при a = 1 имеет место сечение цилиндра плоскостью (X1 OX2) в форме круга. Соответствующие числовые значения эффективных электромеханических констант практически совпадают (различия менее 1 %) со значениями, рассчитываемыми по формулам [14] (2-2-композит, *a* = 0) или [5, 6, 10] (1-3-композит, *a* = 1). При a = a' > 1 результаты расчета матрицы (1) совпадают с результатами для a = 1/a', если переставить индексы $1 \rightarrow 2, 2 \rightarrow 1, 4 \rightarrow 5, 5 \rightarrow 4$ в элементах матриц $\|c^{*E}\|$, $\|e^{*}\|$ и $\|\varepsilon^{*\xi}\|$. Такая перестановка обусловлена поворотом большой полуоси эллипса — сечения СПК стержня — на 90° в плоскости $(X_1 O X_2)$ и соответствующими изменениями отклика компо-Исследование его пьезоэлектрических зита. свойств показывает, что матрица $||e^*||$, формирую-

Пьезокоэффициенты компонентов	$e_{31}^{(P)} < 0, \ e_{33}^{(P)} > 0, \ e_{h}^{(P)} > 0$ (P(VDF)-TrFE c $P_{r}^{(P)} \uparrow \downarrow OX_{3}$)	$e_{31}^{(P)} = e_{33}^{(P)} = e_h^{(P)} = 0$ (аральдит, полиуретан и др.)	$e_{31}^{(P)} > 0, \ e_{33}^{(P)} < 0, \ e_{h}^{(P)} < 0$ (P(VDF)-TrFE c $P_{r}^{(P)} \uparrow OX_{3}$)
$e_{31}^{(FC)} < 0,$	$\partial e_h^*/\partial m > 0,$	$\partial e_h^*/\partial m > 0,$	$\partial e_h^*/\partial m > 0;$
$e_{33}^{(FC)} > 0,$	$\partial g_h^*/\partial m < 0;$	$\partial g_h^*/\partial m < 0;$	возрастание
$e_h^{(FC)} > 0$	возрастание $(d_h^*)_{\text{max}}$,	возрастание $(d_h^*)_{\max}$,	$(d_h^*)_{\max}, (g_h^*)_{\max},$
(СПК ВаТіО ₃ , ПКР-7М, РZТ-5, ЦТС-19 и др.)	$\left(\mathcal{Q}_{\hbar}^{*} \right)_{\max}^{2}$ и $\left(k_{\hbar}^{*} \right)_{\max}$	$(Q_h^*)^2_{\max}$ и $(k_h^*)_{\max}$	$(Q_h^*)^2_{\max}$ и $(k_h^*)_{\max}$
$e_{31}^{(FC)} < 0,$	То же	$\partial e_h^*/\partial m > 0;$	То же
$e_{33}^{(FC)} > 0,$		возрастание $(d_h^*)_{\max}$,	
$e_h^{(FC)} < 0$		$(g_h^*)_{\max}, (Q_h^*)_{\max}^2$ и $(k_h^*)_{\max}$	
(СПК ПКР-8, ПКР-13 ПКР-62)			
$e_{31}^{(FC)} > 0,$	$\partial e_h^*/\partial m > 0,$	$\partial e_h^*/\partial m > 0,$	$\partial e_h^*/\partial m > 0,$
$e_{33}^{(FC)} > 0,$	$\partial d_h^*/\partial m > 0,$	$\partial d_h^*/\partial m > 0,$	$\partial d_h^*/\partial m > 0,$
$e_h^{(FC)} > 0$	$\partial g_h^*/\partial m < 0,$	$\partial k_h^*/\partial m > 0;$	$\partial k_h^*/\partial m > 0;$
(СПК модифицированного РbTiO ₃)	$\partial k_h^* / \partial m > 0$; убывание $(Q_h^*)_{\max}^2$	знакопеременное поведение $\partial [(Q_h^*)^2] / \partial m;$ убывание $(g_h^*)_{\max}$	убывание $(g_h^*)_{\max}$ и $(Q_h^*)_{\max}^2$

Особенности поведения эффективных гидростатических параметров 1—3-композитов с СПК включениями в форме эллиптического цилиндра при 0 < a < 1

Примечания.

1. Аббревиатурой P(VDF)-TrFE обозначен 75/25 мол. % сополимер фторида винилидена — трифторэтилена. 2. Значения $(x_h^*)_{\text{max}}$ определяются из условия $(x_h^*)_{\text{max}} = \max x_h^*(m, a)$ в интервале $0 \le m \le \pi/4$ при a = const, где $x_h^* = e_h^*; d_h^*; g_h^*;$

 $(Q_h^*)^2; k_h^*$
щая $\|C^*\|$ из (1), содержит ненулевые элементы e_{15}^* , e_{24}^* , e_{31}^* , e_{32}^* , e_{33}^* . Гидростатические параметры определяются следующими выражениями:

 $e_h^* = e_{33} + e_{32}^* + e_{31}^*, \ d_h^* = d_{33}^* + d_{32}^* + d_{31}^*,$ $g_h^* = d_h^* / \varepsilon_{33}^{*\sigma}$ — пьезокоэффициенты;

$$(Q_h^*)^2 = d_h^* g_h^* = (d_h^*)^2 / \varepsilon_{33}^{*\sigma} -$$
(3)

квадрат параметра приема;

$$k_{h}^{*} = d_{h}^{*} / [\varepsilon_{33}^{*\sigma} (s_{11}^{*E} + s_{22}^{*E} + s_{33}^{*E} + 2(s_{12}^{*E} + s_{13}^{*E} + s_{23}^{*E}))]^{1/2} -$$
(4)

коэффициент электромеханической связи, где d_{3j}^* и s_{ab}^{*E} — элементы матриц пьезомодулей $\|d^*\| = \|e^*\| \|s^{*E}\|$ и упругих податливостей $\|s^{*E}\| = \|c^{*E}\|^{-1}$, а диэлектрическая проницаемость механически свободного образца согласно [15] равна $\varepsilon_{33}^{*\sigma} = e_{33}^{*\xi} + e_{31}^* d_{31}^* + e_{32}^* d_{32}^* + e_{33}^* d_{33}^*$.

Результаты анализа зависимостей гидростатических параметров $x_h^*(m, a)$ систематизированы в таблице. Примеры расчетных зависимостей гидростатических параметров представлены на рисунке. Расчеты проведены с использованием экспериментальных значений электромеханических констант [6, 16, 17], соответствующих комнатной температуре. Данные таблицы показывают, что поведение большинства параметров x_h^* зависит от знаков пьезокоэффициентов $e_{3j}^{(FC)}$, $e_h^{(FC)}$, $e_{3j}^{(P)}$ и $e_h^{(P)}$. Вместе с тем, при различных соотношениях между этими пьезокоэффициентами выполняется неравенство $\partial e_h^* / \partial m > 0$. Такое необычное влияние пьезоэлектрических свойств компонентов на концентрационные зависимости x_h^* связано со структурой 1—3-композитов, обеспечивающей монотонные зависимости $e_{3j}^*(m, a)$ в широком интервале *m* при a = const. Особенности поведения $d_h^*(m, a)$ при a = const определяются главным образом знаками $e_{3j}^{(FC)}$ и $e_h^{(FC)}$, а локальные максимумы $(d_h^*)_{\max}$ наблюдаются при m > 0,1, т. е. когда пьезомодули композита $d_{3j}^* \approx d_{3j}^{(FC)}$. Пьезокоэффици-

ент $g_h^*(m, a)$ при a = const проявляет значительную чувствительность к изменению электромеханических свойств компонентов, не свойственную d_{h}^{*} (*m*, *a*). Локальные максимумы $(g_h^*)_{max}$ имеют место в основном при концентрациях 0,01 ≤ *m* < 0,1, соответствующих относительно низкой диэлектрической проницаемости $\epsilon_{33}^{*\sigma}$. Здесь прослеживается общая тенденция поведения пьезокоэффициента $g_h^*(m, a)$, установленная ранее для 1—3- [1, 2, 5, 16] и 2-2-композитов [14]. Следует отметить и корреляцию между $(d_h^*)_{\max}$ и $(k_h^*)_{\max}$, характерную для исследуемых 1-3-композитов [ср. кривые 1-3 и 4-6 на рисунке (а)]. Данная корреляция связана с тем, что увеличение $\varepsilon_{33}^{*\sigma}$ и уменьшение $|s_{ab}^{*E}|$ (при увеличении *m*) практически компенсируют друг друга, т. е. знаменатель формулы (4) слабо изменяется в широком интервале т. Значения локальных максимумов $(\overset{*}{g_h})_{\max}$ и $(\overset{*}{Q_h})^2_{\max}$ различных композитов изменяются в широких интервалах [рисунок (δ , θ)] вследствие непрерывного изменения баланса между d_{31}^* и d_{32}^* или g_{31}^* и g_{32}^* в интервале 0 < a < 1.

Высокие значения $(Q_h^*)^2_{\text{max}}$, установленные для 1-3-композита "СПК ПКР-7М - полиуретан" [кривая 3 на рисунке (в)], объясняются следующифакторами. Во-первых, это отношение ми $e_{33}^{(FC)}/c_{33}^{(FC), E}$, влияние которого на [$Q_h^*(m, 1)$]² обсуждалось в работе [16]. Во-вторых, увеличению $(Q_{h}^{*})_{\max}^{2}$ способствуют меньшие жесткость и диэлектрическая проницаемость матрицы. Существенные различия между концентрационными зависимостями $(Q_h^*)^2$ композитов на основе СПК модифицированного PbTiO₃ [рисунок (г)] и композитов на основе СПК типов РZT, ЦТС и др. [5, 16] обусловлены знаками $e_{3j}^{(FC)}$. Вследствие того, что $e_{3j}^{(FC)} > 0$, в композитах на основе СПК модифицированного PbTiO₃ наблюдается немонотонное пьезомодулей концентрационное поведение $d_{3i}^{*}(m, a)$, где j = 1; 2, а параметр *a* задается из интервала $0,1 \le a \le 1$. Такое поведение аналогично установленному для родственных 0—3-композитов с сильно вытянутыми сфероидальными включениями [11] и для 1—3-композитов, содержащих

стержни конечных размеров в форме прямоугольного параллелепипеда с квадратным основанием [18]. В обоих случаях, рассмотренных в работах [11, 18], $d_{31}^* = d_{32}^*$. В исследуемых нами 1—3-композитах min $d_{31}^*(m, a)$ и min $d_{32}^*(m, a)$ появляются при различных значениях *m* (разность между по-

следними может составлять примерно 0,1) и a = const. Пьезомодули $d_{3j}^{*}(m, a)$ существенно влияют на поведение $d_{h}^{*}(m, a)$ и $[Q_{h}^{*}(m, a)]^{2}$ (см. формулу (3)). Примечательно, что даже при уменьшении $\varepsilon_{33}^{*\sigma}(m, a)$ при замене СПК компонента



Значения локальных максимумов $(x_h^*)_{\max} = \max x_h^*(m, a)$ при a = const и концентрационная зависимость $(\underline{Q}_h^*)_{\max}^2$, рассчитанные для 1—3-композитов с СПК включениями в форме эллиптического цилиндра:

 $a - (a_h^*)_{\text{max}}$ (в 10⁻⁹ Кл/Н) композитов «СПК ПКР-7М – Р(VDF)-TrFE с $P_r^{(P)} \uparrow OX_3^*$, «СПК ПКР-7М – Р(VDF)-TrFE с $P_r^{(P)} \uparrow OX_3^*$, «СПК ПКР-7М – Р(VDF)-TrFE с $P_r^{(P)} \uparrow OX_3^*$, «СПК ПКР-7М – Р(VDF)-TrFE с $P_r^{(P)} \uparrow OX_3^*$, «СПК ПКР-7М – Р(VDF)-TrFE с $P_r^{(P)} \uparrow OX_3^*$, «СПК ПКР-7М – Р(VDF)-TrFE с $P_r^{(P)} \uparrow OX_3^*$ (кривая *I*) вышеуказанных композитов (кривые *4*, *5*, *6* соответственно); $\delta - (g_h^*)_{\text{max}}$ (в 10⁻³ В·м/Н) композитов «СПК (Pb_{0,85}Nd_{0,10})(Ti_{0,99}Mn_{0,01})O₃ – Р(VDF)-TrFE с $P_r^{(P)} \uparrow OX_3^*$ (кривая *I*) и «СПК (Pb_{0,85}Nd_{0,10})(Ti_{0,99}Mn_{0,01})O₃ – полиуретан» (кривая *2*); $s - (Q_h^*)_{\text{max}}^2$ (в 10⁻¹⁵ Па⁻¹) композитов «СПК ПКР-7М – Р(VDF)-TrFE с $P_r^{(P)} \uparrow OX_3^*$ (кривая *I*), «СПК ПКР-7М – Р(VDF)-TrFE с $P_r^{(P)} \uparrow OX_3^*$ (кривая *I*) и «СПК ПКР-7М – полиуретан» (кривая *3*); $s - [Q_h^*(m, a)]^2$ (в 10⁻¹⁵ Па⁻¹) композита «СПК (Pb_{0,85}Nd_{0,10})(Ti_{0,99}Mn_{0,01})O₃ – полиуретан» при a = 0,01 (кривая *I*), 0,10 (кривая *2*), 0,30 (кривая *3*), 0,50 (кривая *4*), 0,99 (кривая *5*)

ПКР-7М на модифицированный РbTiO₃ величина $(Q_h^*)^2_{\text{max}}$, согласно данным рисунка (*г*) и кривой *3* (*в*) уменьшается примерно в 3—5 раз в широком интервале *а*. Для сравнения укажем, что $(Q_h^{(FC)})^2$ СПК модифицированного PbTiO₃ на порядок выше $(Q_h^{(FC)})^2$ СПК ПКР-7М [16, 17]. Приведенные изменения соотношения между $(Q_h^{(FC)})^2$ и $(Q_h^*)^2_{\text{max}}$ объясняются присутствием в 1—3-композите системы СПК стержней в форме эллиптических цилиндров, эффективно влияющих на гидростатические пьезокоэффициенты d_h^* и g_h^* .

Заключение

В настоящей статье проведен анализ системы гидростатических параметров $x_h^*(m, a)$ 1—3-композитов, содержащих СПК стержни в форме эллиптического цилиндра. Впервые установлена важная роль пьезокоэффициентов $e_{3j}^{(FC)}$, $e_h^{(FC)}$, $e_{3i}^{(P)}, e_{h}^{(P)}$ компонентов (см. таблицу) и геометрического фактора а в формировании гидростатических пьезоактивности и пьезочувствительности данных анизотропных материалов. Влияние эллиптичности стержней на параметры $x_h^*(m, a)$ существенно при 0 < a < 0,2, что коррелирует с заметными изменениями анизотропии e_{3i}^* и d_{3i}^* (j = 1; 2) в интервале 0 < a < 0, 2. Представленные в работе результаты могут использоваться при создании гидрофонов, пьезоэлектрических датчиков и преобразователей, работающих в условиях гидростатического давления, а также обеспечивающих различные соотношения между эффективными пьезомодулями d_{3i}^{*} , пьезокоэффициентами g_{3i}^{*} и другими параметрами.

Авторы выражают благодарность д-ру физ.-мат. наук, проф. А. В. Турику, д-ру техн. наук, проф. А. Е. Паничу (РГУ, Ростов-на-Дону) и Dr. С. R. Воwen (University of Bath, Бат, Великобритания) за полезную дискуссию и интерес к тематике исследований.

Список литературы

1. **Sigmund O., Torquato S., Aksay I. A**. On the design of 1– 3 piezocomposites using topology optimization // J. Mater. Res. 1998. V. 13. N 4. P. 1038–1048.

2. Hayward G. Assessing the influence of pillar ratio on the behavior of 1-3 connectivity composite transducers // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., a. Freq. Contr. 1996. V. 43. N 1. P. 98-101.

3. **Topolov V. Yu., Turik A. V**. Nonmonotonic concentration dependence of piezoelectric coefficients of 1–3 composites // J. Appl. Phys. 1999. V. 85. N 1. P. 372–379.

4. Тополов В. Ю., Глушанин С. В. Новые 1—3-композиты и особенности их пьезоэлектрических свойств // Микросистемная техника. 2002. N 6. С. 12—16.

5. Греков А. А., Крамаров С. О., Куприенко А. А. Эффективные свойства трансверсально-изотропного пьезокомпозита с цилиндрическими включениями // Механика композитных материалов. 1989. № 1. С. 62—69.

6. Taunaumang H., Guy I. L., Chan H. L. W. Electromechanical properties of 1–3 piezoelectric ceramic / piezoelectric polymer composites // J. Appl. Phys. 1994. V. 76. N 1. P. 484– 489.

7. Белоконь А. В., Бондарев П. М. Влияние формы керамических стержней на характеристики 1—3-пьезокомпозита при продольных колебаниях // Тр. Междунар. науч.практ. конф. "Фундаментальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения" ("Пьезотехника-99"), 14—18 сент. 1999 г., Ростов-на-Дону, Азов. Т. 1 / Под ред. А. Е. Панича. Ростов-на-Дону, 1999. С. 257—264.

POCTOB-HA-ДOHY, 1999. C. 257–264.
8. Ng K. L., Chan H. L. W., Choy C. L. Piezoelectric and pyroelectric properties of PZT/P(VDF-TrFE) composites with constituent phases poled in parallel or antiparallel directions // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., a. Freq. Contr. 2000. V. 47. N 6. P. 1308–1315.

9. **Kar-Gupta R., Venkatesh T. A.** Electromechanical response of 1–3 piezoelectric composites: Effect of poling characteristics // J. Appl. Phys. 2005. V. 98. N 5. P.054102-14 p.

10. Levin M., Rakovskaja M. I., Kreher W. S. The effective thermoelectroelastic properties of microinhomogeneous materials // Internat J. Solids a. Struct. 1999. V. 36. N 18. P. 2683–2705.

11. Глушанин С. В., Тополов В. Ю., Криворучко А. В. Нетривиальное поведение пьезокоэффициентов 0—3-композитов "керамика модифицированного PbTiO₃ — полимер" // Письма ЖТФ. 2004. Т. 30. N 20. С. 69—75.

12. **Chao L.-P., Huang J. H.** Fracture criteria for piezoelectric materials containing multiple cracks // J. Appl. Phys. 1999. V. 85. N 9. P. 6695–6703.

13. **Banno H.** Recent developments of piezoelectric ceramic products and composites of synthetic rubber and piezoelectric ceramic particles // Ferroelectrics. 1983. V. 50. N 1–4. P. 3–12.

14. Grekov A. A., Kramarov S. O., Kuprienko A. A. Anomalous behavior of the two-phase lamellar piezoelectric texture // Ferroelectrics. 1987. V. 76. N 1–4. P. 43–48.

15. Желудев И. С. Физика кристаллических диэлектриков. М.: Наука, 1968. 464 с.

16. Тополов В. Ю., Турик А. В. Пористые пьезокомпозиты с экстремально высокими параметрами приема // ЖТФ. 2001. Т. 71. N 9. C. 26—32. 17. Topolov V. Yu., Kamlah M. Piezoelectric properties of

17. **Topolov V. Yu., Kamlah M.** Piezoelectric properties of PbTiO₃-based 0-3 and 0-1-3 composites // J. Phys. D: Appl. Phys. 2004. V. 37. N 11. P. 1576–1585.

18. Nelli Silva E. G., Ono Fonseca J. S., Kikuchi N. Optimal design of piezoelectric microstructures // Comput. Mech. 1997. V. 19. N 5. P. 397–410.

УДК 621.382.002

М. В. Бутывская, ОАО "НИИМЭ и Микрон"

ХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКАЯ ПОЛИРОВКА КАК МЕТОД АКТИВАЦИИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН В ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ СТРУКТУР "КРЕМНИЙ-НА-ИЗОЛЯТОРЕ"

Представлены результаты исследования процесса химико-механической полировки (ХМП) в технологии создания структур "кремний-на-изоляторе" (КНИ), полученные с помощью ультразвуковой и атомно-силовой микроскопии. Эти исследования направлены на оптимизацию технологического процесса изготовления структур КНИ, что ведет к снижению стоимости структур.

Технология "кремний-на-изоляторе" (КНИ) выбрана рядом ведущих мировых фирм основным направлением развития кремниевой микроэлектроники.

Использование в современной микроэлектронике структур КНИ вызвано перспективностью данного материала для миниатюризации интегральных схем и возможностью перехода к нанотехнологии. КНИ-подложки обеспечивают полную электрическую изоляцию отдельных приборов на чипе, что ведет к целому набору достоинств:

- увеличению быстродействия;
- снижению потребляемой мощности;
- снижению напряжения питания без потери быстродействия;
- снижению площади микросхемы;
- уменьшению числа операций технологического маршрута.

Все это приводит к снижению стоимости продукции. КНИ-приборы могут функционировать вплоть до температур 350 °С, а также они менее чувствительны к воздействию альфа-частиц и к другим радиационным воздействиям.

В этой работе мы изучали процесс химико-механической полировки, который применяли на следующих этапах формирования КНИ-структуры:

- активация поверхности донорной и несущей пластин перед их соединением;
- неразрушающий контроль качества соединения пластин;
- финишная полировка поверхности приборного слоя после скалывания;
- восстановление оставшейся после скалывания части донорной пластины для повторного использования в процессе создания КНИ-структуры.

При подготовке пластин к соединению были исследованы следующие методы активации поверхности пластин перед их соединением:

• химико-механическая полировка (XMП);

кислородная плазма.

Для оценки качества соединения применен метод сканирующей ультразвуковой микроскопии.

Ультразвуковые системы визуализации высокого разрешения привлекательны благодаря возможности наблюдать микроструктуру в объеме непрозрачных объектов и измерять упругие, вязкие и релаксационные свойства малых областей и включений.

Двухмерное механическое сканирование линзовой системы позволяет получать акустические изображения (полутоновые или в условных цветах) структур на разных глубинах внутри объекта (режим С-сканирования). Характерный С-скан приводится на рис. 1. В данном случае акустическая микроскопия использовалась для неразрушающего контроля на этапе производства микроэлектронных компонентов — определялась степень дефектности в области диффузионного контакта двух кремниевых пластин.

Анализ снимков (рис. 2), полученных на соединенных кремниевых подложках, позволяет сделать вывод о том, что при изготовлении структур КНИ с помощью УЗМ можно проводить контроль, позволяющий выявить соединенные и несоединенные области на границе раздела донорной и несущей пластин. Также из этих снимков видно, что использование ХМП на стадии активации поверхности донорной и несущей пластин перед соединением обеспечивает меньшее число несоединенных областей, чем использование кислородной плазмы.



Рис. 1. Акустическое изображение (С-скан) области соединения двух кремниевых пластин:

a — акустическое изображение области соединения — темные области на изображении соответствуют зонам контакта, белые пятна внутри темной области соответствуют дефектам в зоне соединения; δ — схематическое изображение объекта контроля

Для оценки качества финишной полировки поверхности приборного слоя после скалывания проводились измерения шероховатости на атомно-силовом микроскопе (АСМ).

Шероховатость поверхности оценена следующими параметрами:

а) средним арифметическим отклонением профиля $R_{\rm o}$ — средним расстоянием точек измеренного профиля до его средней линии (расстояние до средней линии суммируется без учета алгебраического знака):

$$R_{\rm a} = \frac{1}{l} \int_{0}^{l} |y| \, dx$$

a)



рирование (l > x),

где *n* — число измерений;

б) средним квадратичным отклонением профиля R_o:

где *l* — расстояние, по которому проводится интег-

$$R_g = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2 dx}$$

n

или приближенно

$$R_g = \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{n}}, i = 1, ..., n.$$

На рис. 3 представлены АСМ-изображения участков исходных кремниевых пластин 4 × 4 мкм и 2 × 2 мкм.



а — пластины проходили активацию поверхности методом ХМП; - пластины проходили активацию поверхности методом кислоб родной плазмы



б)

Рис. 3. Шероховатость поверхности исходных (стандартных) кремниевых пластин



 $R_{\rm a} = 6,3 \div 17,1$ нм

Рис. 4. Шероховатость поверхности прибор-



НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 7, 2006

На рис. 4 приведено АСМ-изображение участка поверхности 6 × 6 мкм КНИ-структуры после скалывания.

На рис. 5 представлены АСМ-изображения участка другой КНИ-структуры до и после ХМП.

Из приведенных данных видно, что после ХМП значение параметров шероховатости поверхности приборного слоя приближается к таковым для исходных (стандартных) пластин или даже становится меньше:

R_a

R_g до ХМП — 7,8...10,3 нм

до ХМП — 6...7,5 нм до ХМП — 7,8...10,3 нм после ХМП — 0,054...0,119 нм после ХМП — 0,067...0,211 нм кремниевых подложек — кремниевых подложек — 0,093...0,17 нм 0,115...0,195 нм

УДК 537.226.33

- ¹Р. А. Лалетин канд. физ.-мат. наук,
- ¹**А. И. Бурханов** д-р физ.-мат. наук,
- ²**А. С. Сигов** д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН,
- 2 К. А. Воротилов д-р техн. наук

¹Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

²Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)

ОСОБЕННОСТИ НИЗКО-И ИНФРАНИЗКОЧАСТОТНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ТОНКИХ ПЛЕНОК BST, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОТЖИГА

Проведено исследование низко- и инфранизкочастотных диэлектрических свойств тонких пленок $Ba_{0,7}Sr_{0,3}TiO_3$, отожженных при температурах 750, 850 и 900 °C, в широкой области температур (от -180 до +100 °C), частот (от 0,1 Гц до 10 кГц) и амплитуд электрического поля (от 15 до 255 кВ/см). Обнаружено, что в образцах имеет место гигантская релаксация, характерная для слоистых гетерогенных структур. Отмечено, что более высокая температура (900 °C) отжига приводит к смещению области релаксации в сторону низких температур (высоких частот).

Введение

В последние десятилетия чрезвычайно возрос интерес к исследованию сегнетоэлектрических тонких пленок. Связано это, прежде всего, с оптимистическими перспективами широкого практического использования данных объектов, обеспечивающих микроминиатюризацию, малую энергоемкость, высокую чувствительность и возможное быстродействие устройств на их основе. К наиболее интенсивно изучаемым объектам такого типа относятся тонкие пленки на основе титаната бария-стронция (BST). Объясняется это прежде

Таким образом, процесс ХМП позволяет равномерно удалить нарушенный слой приборного слоя кремния и снизить уровень шероховатости поверхности до уровня исходных (стандартных) кремниевых пластин.

Введение процесса ХМП в маршрут изготовления структур кремний-на-изоляторе позволяет сделать следующие выводы:

- ХМП наилучшим образом подходит для реализации процесса активации поверхности донорной и несущей пластин перед их соединением;
- ХМП позволяет получить шероховатость поверхности пластин равной исходной, что необходимо для:
- изготовления субмикронных СБИС;
- восстановления отколовшейся части донорной пластины для ее повторного использования в процессе формирования КНИ-структуры.

всего превосходными диэлектрическими свойствами твердого раствора BST, которые легко варьируются при изменении соотношения Ba/Sr.

В большинстве случаев исследование физических свойств тонких пленок BST проводятся на частотах от 100 кГц до 20 ГГц, которые близки к рабочим частотам конструируемых на их основе приборов. Однако диэлектрический отклик таких многокомпонентных неоднородных материалов при более низких частотах может иметь ярко выраженную релаксационную природу. Об этом свидетельствует целый ряд теоретических работ [1, 2]. При этом наиболее информативным для исследования таких релаксационных механизмов является метод низко- и инфранизкочастотной (НЧ и ИНЧ) диэлектрической спектроскопии [3].

Целью настоящей работы являлось расширение диапазона температур, при которых исследуются процессы поляризации и переполяризации, вплоть до температуры кипения азота и диапазона частот (до инфранизких) для получения дополнительной информации о релаксационных процессах в тонких пленках BST, изготовленных с вариацией температуры отжига.

Экспериментальные результаты и обсуждение

В качестве объектов исследования были выбраны два тонкопленочных образца с составом $Ba_{0,7}Sr_{0,3}TiO_3$, изготовленные на подложках Pt/Ti/SiO₂/Si и отожженные при температурах 750, 850 и 900 °C в течение 20 мин. Толщина полученных пленок составляла 0,2 мкм. При электрических измерениях платиновый слой использовался в качестве нижнего (общего) электрода. Верхние электроды (контактные площадки) площадью 0,03 мм² были изготовлены из никеля (Ni). Изучаемые диэлектрические параметры пленок были получены посредством измерения петель поляризации (ПП) и их последующей компьютерной обработки. Исследование отклика образцов проводилось в широкой об-



Рис. 1. Температурные зависимости эффективной диэлектрической проницаемости $\varepsilon'(T)$ на различных частотах ($\nu = 0, 1$ (I), 1 (2), 10 (3), 100 Гц (4) и 1 (5), 10 кГц (6)) электрического поля с амплитудой $E_0 = 247$ кВ/см для образцов тонких пленок BST, отожженных при температурах 750 °С (a) и 900 °С (δ). Нижние части этих же зависимостей в более крупном масштабе приведены на ε и ε



Рис. 2. Частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь tg δ при различных измерительных температурах для образцов тонких пленок BST, отожженных при температурах 750 °C (*a*) и 900 °C (*b*) (*E*₀ = 247 кB/см)

ласти температур (от -180 до +100 °C), частот (от 0,1 Гц до 10 кГц) и амплитуд электрического поля (от 15 до 260 кВ/см).

На рис. 1 (а, б) представлены температурные зависимости эффективной диэлектрической проницаемости $\varepsilon'(T)$, измеренной при различных частотах электрического поля с амплитудой $E_0 = 247 \text{ кB/см}$ для образцов, отожженных при температурах 750 °С (а) и 900 °С (б). Нижние части этих же зависимостей в более крупном масштабе приведены на рис. 1 (в, г). (Образцы, отжигавшиеся при T = 850 и 900 °C, имеют большое сходство в температурном поведении є', поэтому первый из них отдельно не рассматривается.) Видно, что у представленных кривых $\varepsilon'(T)$ наблюдается определенная "пороговая" температура T_{th}, вблизи которой происходит изменение поведения зависимости $\varepsilon'(T)$. Значение T_{th} увеличивается с ростом частоты измерительного поля. Если при самой низкой частоте (0.1 Гп) мы наблюдаем резкое увеличение є' при T_{th} , то при более высоких частотах при подходе к T_{th} происходит сначала уменьшение є' и лишь затем ее увеличение. Такое разделение может указывать на то, что область температур -100...+20 °С является областью фазового перехода [4]. В этом случае на релаксацию, связанную с поведением фазовых (доменных) границ в области сегнетоэлектрического фазового перехода накладывается релаксация, характерная для слоистых гетерогенных структур (гигантская релаксация) [1, 2]. Подтверждением последнего могут служить частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь tgb, приведенные на рис. 2. При этом можно предположить, что релаксационные процессы, наблюдаемые в двух исследуемых пленках, имеют общую природу и различаются только количественными параметрами, связанными с некоторыми структурными особенностями данных пленок.



Рис. 3. Зависимость $\ln(v_r)$ от обратной абсолютной температуры для пленок BST, отожженных при температурах 750, 850 и 900 °С

ратуры. Частоты релаксации определялись по максимумам зависимостей $tg\delta(v)$. Пример зависимости $ln(v_r)$ от 1/Tдля напряженности измерительного поля $E_0 = 247$ кВ/см показан на рис. 3. Было обнаружено, что во всем исследуемом интервале температур частоты релаксации следуют закону Аррениуса:

 $v_r = v_0 \exp[-U_a/(kT)], \qquad (1)$

где $U_{\rm a}$ — энергия активации; v_0 — предэкспоненциальный множитель; k — коэффициент Больцмана; T — абсолютная температура. Значения энергии активации





Для количественного описания процесса релаксации в работе исследовалась зависимость натурального логарифма частоты релаксации v, от обратной темпе (U_a) и предэкспоненциального множителя (v_0) , полученные в результате аппроксимации таких зависимостей уравнением (1), указаны на рис. 3.





Характерной особенностью наблюдаемого процесса релаксации является значительная амплитудная зависимость частоты релаксации. Для примера на рис. 4 приведены частотные зависимости $\varepsilon'(v)$ (рис. 4, а) и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta(v)$ (рис. 4, б) при различных E₀ для пленки BST, отожженной при температуре 900 °С. Данные соответствуют температуре T = 50 °C. Хорошо видно, что увеличение напряженности измерительного поля приводит к росту частоты релаксации (смещению максимума зависимости $tg\delta(v)$ в сторону более высоких частот).

Амплитудные зависимости эффективной диэлектрической проницаемости є' (рис. 5, а) и тангенса угла диэлектрических потерь tgδ (рис. 5, б) на различных частотах электрического поля при температуре T = 50 °C для той же пленки представлены на рис. 5. Характер зависимости $\varepsilon'(E_0)$ позволяет сказать, что процесс гигантской релаксации начинает играть основополагающую роль в диэлектрическом отклике только на частотах ниже 10 Гц и лишь при достижении пороговых полей (E_{th}). Кроме того, значение E_{th} тем выше, чем выше частота измерительного поля.

Работа выполнена при поддержке гранта «Ведущие научные школы» (НШ-1514.2003.2).

Список литературы

1. **Turik A. V., Radchenko G. S.** Maxwell-Wagner relaxation in piezoactive media // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. V. 35. P. 1188–1192.

2. Турик А. В., Чернобабов А. И., Радченко Г. С., Турик С. А. Гигантское пьезоэлектрическое и диэлектрическое усиление в неупорядоченных гетерогенных системах // ФТТ. 2004. Т. 46. С. 2139—2142.

3. Шильников А. В. Низко- и инфранизкочастотная диэлектрическая спектроскопия некоторых сегнетоэлектрических кристаллов и керамик // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1987. Т. 51. С. 1726—1735.

4. Knauss L. A., Pond J. M., Horwitz J. S., Chrisey D. B., Mueller C. H., Treece R. The effect of annealing on the structure and dielectric properties of $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ ferroelectric thin films // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. P. 25–27.

Моделирование и конструирование МНСТ

УДК 621.382.001.63; 621.37

А. И. Галушков, канд. техн. наук,
О. В. Панкратов, канд. техн. наук,
А. И. Погалов, д-р техн. наук,
А. Н. Сауров, д-р техн. наук,
В. С. Суханов, С. В. Угольников, канд. техн. наук, ГУ НПК "Технологический центр" МИЭТ

МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И КАЛИБРОВКИ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УСКОРЕНИЯ

Представлены методы проектирования и калибровки микроэлектронных пьезорезистивных преобразователей ускорения. Преобразователи освоены в опытном производстве и характеризуются оптимальной конструкцией, механическими и метрологическими характеристиками.

С увеличением потребности в дешевых, миниатюрных преобразователях ускорения для применения в различных отраслях промышленности, авиации и на транспорте значительную актуальность приобретает разработка кремниевых микроэлектронных преобразователей ускорения, производство которых основано на использовании групповых технологических процессов и прецизионных методов обработки кремния. Пьезорезистивные преобразователи ускорения (ППУ) могут быть изготовлены с использованием традиционного анизотропного травления кремния для формирования балочной структуры и легко интегрированы со схемой обработки сигнала, формируемой в едином технологическом цикле. Это существенно облегчает миниатюризацию сенсора и реализацию надежных структур.

Типичные схемы конструкций чувствительных элементов (ЧЭ) преобразователей, используемые при проектировании, представлены на рис. 1. Механическая система ЧЭ состоит из основания в виде рамки, внутри которой располагается инерционная масса. Инерционная масса крепится к рамке с помощью балок по консольной или мостовой схеме.

ППУ представляет собой комбинированный датчик двойного преобразования инерционного принципа действия. Ускоренное движение основания вызывает смещение инерционной массы и деформацию балок первичного преобразователя. На балках сформированы твердотельные кремниевые пьезорезисторы, образующие простейший вторичный преобразователь — мостовую электрическую схему, которая преобразует деформацию балок в изменение сопротивления пьезорезисторов и в электрический сигнал [1].

Подвес инерционной массы на одной упругой консольной балке (рис. 1, *a*) обеспечивает повышенную чувствительность ППУ. Недостатком этой схемы является существенная поперечная чувствительность. Подвес инерционной массы на двух консольных балках позволяет увеличить поперечную жесткость и сущест-



Рис. 1. Схемы конструкций чувствительных элементов ППУ

венно уменьшить поперечную чувствительность (рис. 1, δ). Общим недостатком консольной схемы подвеса является нарушение соосности рамки и инерционной массы при больших перемещениях. При мостовой схеме подвеса (рис. 1, e, e, д) инерционная масса перемещается строго вдоль измерительной оси.

Расчетные модели

Аналитическую модель ЧЭ представляют в виде колебательной системы с одной степенью свободы (рис. 2): инерционная масса m, упругий подвес в виде балок жесткостью k и демпфер, имеющий демпфирование b.

Обеспечение необходимого демпфирования является одной из важных проблем проектирования ППУ. Собственные колебания ЧЭ с относительно большим временем затухания препятствуют быстрой обработке измеряемого сигнала. Поэтому основное назначение демпфера — уменьшение времени собственных колебаний, ограничение резонансных колебаний, обусловленных



Рис. 2. Аналитическая модель чувствительного элемента

случайными виброударными нагрузками, и обеспечение защиты от перегрузок. Вязкий демпфер обычно формируют в зазоре между инерционной массой и крышкой корпуса. Использовали воздушный демпфер, позволяющий получить линейное сопротивление.

При измерении меняющихся ускорений возникают частотные погрешности, которые зависят от соотношения между круговой частотой собственных колебаний ЧЭ ω_0 и круговой частотой изменения ускорений ω , действующих на объект. Учитывая это, рассмотрим динамику ЧЭ, его поведение в пространственной и частотной области.

Математическую модель построим, используя второй закон Ньютона. Вынужденные колебания ЧЭ описываются уравнением движения, полученным при суммировании сил инерции, демпфирования, упругости и возбуждения:

 $m(\ddot{x} + \ddot{\chi}) + b\dot{x} + kx = 0,$

где *x* — перемещение инерционной массы относительно основания (показания ППУ); *χ* — перемещение основания.

После преобразования уравнение движения имеет вид

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega_0^2 x = \ddot{\chi}$$
, (1)

где 2n = b/m — приведенное демпфирование; $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ — собственная круговая частота;

k — жесткость упругого элемента.

При $\chi = A \sin \omega t$ решение уравнения (1) имеет вид

$$x = A_0 \mathbf{e}^{-nt} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{A\omega^2 \sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}},$$

где A_0 , A — амплитуда затухающих и вынужденных колебаний; φ_0 , φ — начальная фаза собственных затухающих колебаний и фазовый угол; ω — круговая частота вынужденных колебаний.

Показания преобразователя после затухания собственных колебаний инерционной массы описываются уравнением

$$x = \frac{A\omega^{2}}{\omega_{0}^{2}\sqrt{(1-v^{2})^{2}+(2\xi v)^{2}}} =$$
$$= x_{cT} / \sqrt{(1-v^{2})^{2}+(2\xi v)^{2}} = K_{T} x_{cT}$$

где $v = \omega/\omega_0$ — коэффициент рассогласования частот; $\xi = n/\omega_0$ — относительный коэффициент демпфирования; $K_{\rm A}$ — коэффициент динамичности; $x_{\rm cr}$ — статическое смещение инерционной массы под действием силы инерции.

Фазовый угол ϕ определяется по формуле

$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{2\nu\xi}{1-\nu^2}.$$

Рассмотрим качественное влияние отдельных членов уравнения на работу ППУ. Для измерения ускорения при колебаниях объекта необходимо, чтобы первый и второй члены левой части уравнения (1) были значительно меньше третьего члена. При $\ddot{x} \approx 0$ и $2n\dot{x} \approx$ ≈ 0 уравнение (1) принимает вид

$$\omega_0^2 x = \ddot{\chi} \text{ или } x = -\ddot{\chi}/\omega_0^2 =$$
$$= A\omega^2 \sin(\omega t - \varphi)/\omega_0^2.$$

В этом случае показания ППУ будут пропорциональны ускорению объекта. Равенство соблюдается тем точнее, чем выше ω_0 .

Из изложенного следует, что для измерения ускорений необходим преобразователь с высокой жест-костью.

Графическое решение уравнения (1) представлено на рис. 3 в виде частотных характеристик. Анализ амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) показывает, что только в ограниченном диапазоне частот синусоидальное ускорение преобразуется ЧЭ без динамической погрешности (рис 3, *a*), причем динамическая погрешность существенно зависит от коэффициента демпфирования.

Для расширения рабочего диапазона высоких частот и для снижения уровня выходного сигнала на резонансной частоте применяют вязкое демпфирование с $\xi = 0, 3...0, 7$. При оптимальном демпфировании $\xi = 0.7$ АЧХ равномерна до частоты $f_0/3$ (рис. 3, а). При этом фазочастотная характеристика линейна (рис. 3, б), что обусловливает линейную временную задержку и минимальное искажение выходного сигнала. Для обеспечения заданной динамической погрешности δ_π граничная круговая частота рабочего диапазона находится из условия

$$\delta_{\pi} = K_{\pi} - 1 = \frac{1}{\sqrt{(1 - v^2)^2 + (2\xi v)^2}} - 1$$

Диапазон рабочих частот можно расширить, увеличив собственную частоту ППУ. Это обеспечивают уменьшением инерционной массы m или увеличением жесткости k ее подвески. Однако при этом уменьшится чувствительность, поэтому высокочастотные ППУ менее чувствительны.

При низких частотах (рис. 3), когда $K_{\rm A} \approx 1$, амплитуда колебаний ЧЭ практически равна статическому смещению и определяется только жесткостью пружины. Реакция ЧЭ находится в фазе с возбуждением $\varphi \approx 0$.



При увеличении частоты возрастающее влияние оказывает присущая массе сила инерции. При резонансе (частоты вынужденных и собственных колебаний совпадают) реакция ЧЭ определяется демпфированием, поскольку составляющие, соответствующие массе и жесткости пружины, взаимно уравновешиваются. Податливость системы увеличивается и реакция ЧЭ отстает от возбуждения на фазовый угол $\varphi = \pi/2$.

Важнейшими нормируемыми характеристиками ППУ являются: чувствительность, собственная частота и показатель информативности. Чувствительность отношение изменения сигнала на выходе преобразователя к вызывающему его изменению измеряемого ускорения:

$$S = \Delta U_{\text{Bbix}} / \Delta a.$$

При a = 1g статическая чувствительность ППУ определится как

$$\begin{split} S_0 &= S_1 S_2 = \left(\frac{\varepsilon_R}{1g}\right) \frac{U_{\text{BMX}}}{\varepsilon_R} = \\ &= e_R U_{\text{M}} K_{\text{II}}, \end{split}$$

где S_1 , S_2 — чувствительность первичного (ЧЭ) и вторичного преобразователей (мост Уитстона); ε_R рабочая деформация тензорезисторов; $U_{\rm Bbix}$ — нормированное выходное напряжение; $U_{\rm M}$ — напряжение на мосте; *К*_п — коэффициент преобразования.

Поведение ППУ в частотной области определяется динамической чувствительностью

$$S(v) = S_0 K_{\pi} =$$
$$= S_0 / \sqrt{(1 - v^2)^2 + (2v\xi)^2}$$

и фазовым углом ф

$$tg\phi = \frac{2\nu\xi}{\left(1-\nu^2\right)}.$$

Собственную частоту микроакселерометра (в герцах) определяем из уравнения

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 0.159\sqrt{\frac{k}{m}}$$

где ω_0 — собственная круговая частота; k — жесткость упругого подвеса инерционной массы.

Показатель информативности ППУ рассчитываем из уравнения

$$B = S_0 f_0^2.$$

Конструкции преобразователей ускорения

В ГУ НПК "Технологический центр" МИЭТ разработаны миниатюрные ППУ с подвесом инерционной массы на четырех балках по консольной и мостовой схеме.

Первый вариант разработанной конструкции ППУ представлял кристалл с размерами $8,0 \times 2,5 \times 0,44$ мм, с инерционной массой около 2 мг и консольным подвесом на четырех упругих балках с характерными размерами 600×20 мкм и толщиной 12 мкм.

Второй вариант разработанной конструкции ППУ имел мостовую схему подвеса инерционной массы симметричного типа на четырех упругих балках. Размеры кристалла ППУ составили $5,8 \times 5,2 \times 0,44$ мм. Кремниевая инерционная масса около 2,8 мг подвешена к основанию в виде прямоугольной рамки на четырех кремниевых балках размером 600 \times 160 мкм и толщиной 10—15 мкм [2].



Рис. 4. Кристалл ППУ с консольной схемой подвеса инерционной массы



Рис. 5. Кристалл ППУ с мостовой схемой подвеса инерционной массы

Для формирования полной мостовой схемы на каждой балке ППУ сформированы пьезорезисторы *р*-типа проводимости. Технологические зазоры, образованные между инерционной массой и крышками корпуса, играют роль воздушного демпфера. По периферии опорной платформы расположены контактные площадки, соединенные с пьезорезисторами, которые обеспечивают электрическое контактирование с внешними электрическими приборами. Электрические соединения на рабочем участке выполнены с использованием высоколегированных областей *p*+-типа.

Кристаллы ППУ с консольной и мостовой схемой подвеса инерционной массы представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

Калибровка пьезорезистивных преобразователей ускорения

Свойства ППУ определяются их метрологическими и экс-

плуатационными характеристиками. Метрологические характеристики позволяют установить связь между показаниями ППУ и измеряемой величиной и содержат исходные данные для вычисления погрешности результата измерений. Эксплуатационные характеристики определяют область применения ППУ, диапазоны допустимых значений измеряемой и влияющих величин.

Основные характеристики преобразователей находят в результате калибровки по образцовым средствам. Проводили калибровки следующих основных характеристик: чувствительности, частотной характеристики, резонансной частоты, демпфирующих свойств и добротности, линейности амплитуды. Калибровку проводили методом сличения с использованием образцового пьезорезистивного преобразователя ДН-4-М-1, вибрационной электродинамической установки VP-5, измерителя ВШВ-003.

Чувствительность определяли как отношение электрического выходного сигнала к механическому входному в В/g при синусоидальном возбуждении с эталонной частотой 160 Гц.

Калибровку частотной характеристики проводили в диапазоне частот от 20 до 4000 Гц. Для получения АЧХ использовали метод фиксированных частот. Число фиксированных частот *n* в зависимости от безразмерного коэффициента демпфирования ξ определяем по формуле

$$n = \frac{\ln(f_{\max}/f_{\min})}{\ln(1+2\xi)},$$

где f_{\max}, f_{\min} — граничные частоты диапазона.

Для каждой из фиксированных частот выполняем три пять измерений в целях уменьшения случайных погрешностей.

Резонансной является частота, на которой акселерометр обладает максимальной чувствительностью.

Демпфирующие свойства определяют с помощью метода резонансной кривой (АЧХ). Относительный коэффициент демпфирования оценивают по ширине резонансного пика $\Delta f_{0,7}$ (см. рис. 3) на уровне $\alpha \approx 0,71$ (α — уровень среза АЧХ по отношению к резонансному пику) по формуле

$$\xi \approx \frac{\Delta f_{0,7}}{\Delta f_{\rm p}}$$

где $f_{\rm p}$ — резонансная частота.

Добротность ППУ *Q* вычисляется по формуле

$$Q=\frac{1}{2\xi}.$$

Амплитудную характеристику определяли путем измерения коэффициента преобразования чувствительности в заданном диапазоне измерения гармонического воздействия при постоянной частоте. Число уровней *n* выходной величины обычно принимают из расчета одного уровня на каждые 10 дБ амплитудного диапазона и определяют по формуле

$$n \ge 2g\frac{a_{\max}}{a_{\min}} + 1,$$

где a_{max} , a_{min} — граничные значения диапазона измерения ускорения.

Для снижения влияния случайных погрешностей для каждого уровня выполняют три пять измерений. Нелинейность (гистерезис) амплитудной характеристики определяют по формуле

$$\alpha_{\rm H} = 2 \frac{S_{\rm max} - S_{\rm min}}{S_{\rm max} + S_{\rm min}} \, 100 \, \%, \quad (2)$$

где S_{max} , S_{min} — наибольшее и наименьшее значения средних в группах коэффициентов преобразования.

Исследования характеристик ППУ с консольной схемой подве-

са инерционной массы показали, что он имеет чувствительность 1,9 мВ/g при напряжении питания 9 В, рабочий диапазон частот от 0 до 400 Гц. Резонансная частота акселерометра около 1200 Гц. Исследования характеристик ППУ с мостовой схемой подвеса инерционной массы показали, что он имеет чувствительность 0,54 мВ/g при напряжении питания 9 В. Рабочий диапазон частот от 0 до 900 Гц, резонансная частота — около 2900 Гц.

Коэффициент демпфирования преобразователей составил $\xi = 0, 2...0, 3$, добротность Q = 1, 7...2, 5, показатель информативности $B = (3...4)10^3$ ВГ μ/g , порог чувствительности 10^{-5} g, нелинейность менее 0,2 %.

* * *

Экспериментальные исследования динамических метрологических характеристик ППУ показали высокую сходимость с расчетными моделями.

Разработанная технология и базовые конструктивные узлы ППУ могут быть использованы для создания микросистем широкого назначения в качестве элементной базы нового поколения для научных исследований, экологии, авиации и космических аппаратов, медицины и промышленности.

Список литературы

1. Погалов А. И., Панкратов О. В. Микроэлектронные пьезорезистивные акселерометры // Изв. Вузов. Электроника. 2000. № 2. С. 95—102.

2. Галушков А. И., Погалов А. И. Разработка и исследование конструкции микроэлектронного пьезорезистивного преобразователя ускорения // Материалы конференции "Электроника и информатика — 05". Ч. 1. М.: МИЭТ, 2005. С. 61.

3. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В. Н. Челомей. М. Машиностроение, 1981. Т. 5. Измерения и испытания / Под ред. М. Д. Генкина. 1981. 496 с.

УДК 621.3.049.77.001.2

^{1,2}**Б. Г. Коноплев**, д-р техн. наук, проф., ²**И. Е. Лысенко**, канд. техн. наук, доц., ¹Южный научный центр РАН ²ГОУ ВПО "Таганрогский государственный радиотехнический университет"

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА С ТРЕМЯ ОСЯМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Описан интегральный микромеханический гироскоп с тремя осями чувствительности, изготавливаемый по технологии поверхностной микрообработки. Предложены модели жесткостей упругого подвеса устройства для различных режимов колебаний. Приведены математическая модель гироскопа и результаты его моделирования.

Рынок сенсорных элементов микросистемной техники (МСТ) на протяжении последних лет имеет один из самых высоких показателей темпов роста. Из всего объема элементов МСТ около половины приходится на различные сенсоры для микросистем ориентации и навигации подвижных объектов, в которых весьма критичными являются массогабаритные характеристики элементов [1-3]. Основу элементной базы микросистем ориентации и навигации подвижных объектов, используемых в таких значимых областях, как военная техника, наземный и воздушный транспорт, составляют микромеханические сенсоры. Данный класс сенсоров включает в себя микромеханические гироскопы (ММГ), предназначенные для измерения угловых скоростей объекта.

Известные ММГ [1—6] позволяют измерять угловую скорость объекта по одной или двум осям чувствительности. Для измерения угловой скорости подвижного объекта по трем осям используют комбинации (сборки) из одноосных и двухосных гироскопов, оси чувствительности которых располагаются по трем взаимно ортогональным направлениям, что приводит к увеличению размеров и массы. При этом требуется юстировка или компенсация погрешностей взаимного расположения осей чувствительности, определяемых сборкой.

Разработка интегральных трехосных ММГ позволит улучшить массогабаритные характеристики микросистем ориентации и навигации подвижных объектов, а также уменьшить их себестоимость. При этом конструкции и технологические маршруты изготовления ММГ должны быть адаптированы к существующим интегральным технологиям производства микроэлектронных устройств.

В данной статье представлен интегральный микромеханический гироскоп с тремя осями чувствительности (рис. 1) [7]. Предложенный ММГ содержит неподвижные электроды электростатических приводов 1, инерционные массы 2, неподвижные электроды емкостных преобразователей перемещений 3 и упругий подвес, в состав которого входят якорные области 4, упругие балки 5, 6 и пластины жесткости 7, которые призваны снизить воздействие колебаний инерционных масс 2 на упругие балки 6. Технологический маршрут изготовления интегрального трехосевого ММГ адаптирован под технологию поверхностной микрообработки MUMPs v. 5.0 компании Cronos Integrated Microsystems, Research Triangle Park, NC [8], что позволяет изготавливать его в одном технологическом процессе совместно с другими элементами МСТ, различными по функциональному назначению.

Рассмотрим работу ММГ на примере одной инерционной массы. При подаче на неподвижные (относительно инерционной массы 2) электроды электростатических приводов 1 переменных напряжений, сдвинутых относительно друг друга по фазе на 180°, между ними возникает электростатическое взаимодействие, что приводит к отклонению последней от первоначального положения. Под действием электростатической силы упругая балка 5, представляющая собой фактически консольную балку, будет изгибаться по окружности с центром в точке O_1 , радиусом изгиба R_1 и углом изгиба α (рис. 2). При этом перемещения инерциония масс в некоторой степени будут иницииро-



Рис. 1. Интегральный микромеханический гироскоп



Рис. 2. Модель движения чувствительного элемента гироскопа при действии электростатической силы

вать колебания пластин жесткости 7 за счет *s*-образного изгиба балок 6. Каждая половина упругой балки 6 будет изгибаться по окружностям с центрами в точках O_2 и O_3 , с радиусом изгиба R_2 и углом изгиба β (рис. 2).

Зазор между неподвижным электродом емкостного преобразователя перемещений *3* и инерционной массой *2*, а также площадь их взаимного перекрытия, не изменяются.

На основе выражений для жесткостей упругих балок [9], испытывающих изгиб, а также с учетом их последовательно-параллельного соединения, получено выражение для жесткости упругого подвеса ММГ:

$$k_1 = \frac{2EJ_{z5}5J_{z6}}{L_{b6}^3J_{z5} + 2L_{b5}^3J_{z6}},$$
(1)

где E — модуль Юнга; J_{z5} , J_{z6} — моменты инерции сечений балок 5 и 6 соответственно; L_{b5} , L_{b6} — длины балок 5 и 6 соответственно.

При вращении подложки с некоторой угловой скоростью $\Omega_{x, v}$ вокруг одной из двух взаимно пер-



Рис. 3. Модель движения чувствительного элемента гироскопа при действии $\Omega_{x, y}$

пендикулярных осей, расположенных в плоскости подложки (оси X и Y), инерционная масса 2 под действием силы Кориолиса начинает совершать колебания перпендикулярно плоскости подложки за счет изгиба упругой балки 5 по окружности с центром в точке O_4 , радиусом изгиба R_3 и углом изгиба γ . Перемещение массы 2 также вызывает кручение балок 6 на угол φ (рис. 3). Разность напряжений, генерируемых на емкостных преобразователях перемещений (образованных неподвижными электродами 3 и инерционными массами 2) за счет изменения зазора между ними характеризует угловую скорость $\Omega_{x, y}$.

С помощью выражений для жесткостей упругих балок, испытывающих изгиб и кручение, получено выражение для жесткости упругого подвеса ММГ в рассматриваемом режиме:

$$k_2 = \frac{EJ_{z5}J_{\rho 6}}{2L_{b6}^3 J_{z5}(1+\mu) + L_{b5}^3 J_{\rho 6}} , \qquad (2)$$

где $J_{\rho 6}$ — полярный момент инерции балки *6*; μ — коэффициент Пуассона.

При вращении подложки вокруг оси Z с некоторой угловой скоростью Ω_z инерционная масса 2 под действием силы Кориолиса начинает совершать колебания вдоль плоскости подложки (рис. 4). Колебания инерционной массы через упругие балки 5 передаются пластинам жесткости 7, которые также начинают совершать колебания в плоскости подложки за счет *s*-образного изгиба упругих балок *6*. Каждая половина упругой балки *6* будет изгибаться по окружностям с центрами в точках O_5 и O_6 , с радиусом изгиба R_4 и углом изгиба θ . Разность напряжений в парах, генерируемых на емкостных преобразователях перемещений за счет изменения их площади взаимного перекрытия, характеризует угловую скорость Ω_7 .



Рис. 4. Модель движения чувствительного элемента гироскопа при действии угловой скорости Ω_z

В этом случае жесткость упругого подвеса гироскопа определяется следующим выражением:

$$k_3 = \frac{24EJ_{z6}}{L_{b6}^3}.$$
 (3)



Рис. 5. Зависимости собственных частот колебаний чувствительных элементов гироскопа от длины балок

На рис. 5 представлены результаты моделирования собственных частот колебаний ММГ с использованием предложенных моделей жесткости (—) и численного моделирования в пакете ANSYS (\circ) [10] при $L_{b5} = L_{b6} = L_b$, толщине структуры гироскопа h = 5 мкм, ширине балок w = 5 мкм и площади инерционных масс 200 × 200 мкм.

Из результатов, приведенных на рис. 5, следует, что погрешность моделирования частоты первичных колебаний с использованием полученных моделей (см. рис. 2) по сравнению с численными методами при длине балок 100—200 мкм не превышает 10 %, а при 250—300 мкм — 20 %.

Погрешность моделирования частоты вторичных колебаний (см. рис. 3), вызванных угловой скоростью вокруг осей, расположенных в плоскости подложки, по сравнению с численными методами при длине балок 200—250 мкм не превышает 10 % (рис. 5, δ), а в диапазонах 150—200 мкм и 250—300 мкм — не более 15 %.

Погрешность моделирования частоты вторичных колебаний (см. рис. 4), вызванных угловой скоростью вокруг оси *Z*, по сравнению с численными методами не превышает 5 % (см. рис. 5, *в*).

Пусть инерционные массы 2*a* и 2*б* образуют пару чувствительных элементов, расположенных вдоль оси *X*, а инерционные массы 2*в* и 2*г* — вдоль оси *Y*. Тогда динамическая модель гироскопа может быть представлена дифференциальными уравнениями второго порядка [2] и будет иметь следующий вид:

$$m_{2a}\ddot{x}_{2a} = m_{2a}a_{y} + F_{1} - k_{1}x_{2a} - \eta \dot{x}_{2a};$$

$$F_{1} = \frac{\varepsilon\varepsilon_{0}l_{m}(h - |x_{2ac1}|)}{2(d - x_{2a})^{2}} (U_{1}^{2} - U_{2}^{2});$$

$$m_{2a}\ddot{x}_{2ac1} = m_{2a}a_{z} + F_{xc1} - k_{2}x_{2ac1} - \eta \dot{x}_{2ac1};$$

$$F_{xc1} = 2m_{2a}\Omega_{x}\dot{x}_{2a};$$

$$m_{2a}x_{2ac2} = m_{2a}a_{x} + F_{zc1} - k_{3}x_{2ac2} - \eta \dot{x}_{2ac2};$$

$$F_{zc1} = 2m_{2a}\Omega_{z}\dot{x}_{2a};$$

$$m_{26}\ddot{x}_{26} = m_{26}a_{y} + F_{2} - k_{2}x_{26} - \eta \dot{x}_{26};$$

$$F_{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_{0}l_{m}(h - |x_{26c1}|)}{2(d - x_{26})^{2}} (U_{2}^{2} - U_{1}^{2});$$

$$m_{26}\ddot{x}_{26c1} = m_{26}a_{z} + F_{xc2} - k_{2}x_{26c1} - \eta \dot{x}_{26c1};$$

$$F_{xc2} = 2m_{26}\Omega_{x}\dot{x}_{26};$$

$$m_{26}\ddot{x}_{26c2} = m_{26}a_{x} + F_{zc2} - k_{3}x_{26c2} - \eta \dot{x}_{26c2};$$

$$F_{zc2} = 2m_{26}\Omega_{x}\dot{x}_{26};$$
(5)





$$m_{2B}\ddot{x}_{2B} = m_{2B}a_{x} + F_{3} - k_{1}x_{2B} - \eta\dot{x}_{2B};$$

$$F_{3} = \frac{\varepsilon\varepsilon_{0}l_{m}(h - |x_{2BC1}|)}{2(d - x_{2B})^{2}} (U_{2}^{2} - U_{1}^{2});$$

$$m_{2B}\ddot{x}_{2BC1} = m_{2B}a_{z} + F_{yc3} - k_{2}x_{2Bc1} - \eta\dot{x}_{2Bc1};$$

$$F_{yc3} = 2m_{2B}\Omega_{y}\dot{x}_{2B};$$

$$m_{2B}\ddot{x}_{2BC2} = m_{2B}a_{y} + F_{zc3} - k_{3}x_{2Bc2} - \eta\dot{x}_{2Bc2};$$

$$F_{zc3} = 2m_{2B}\Omega_{z}\dot{x}_{2B};$$

$$m_{2T}\ddot{x}_{2TC1} = m_{2T}a_{z} + F_{yc4} - k_{2}x_{2TC1} - \eta\dot{x}_{2TC1};$$

$$F_{yc4} = 2m_{2T}\Omega_{y}\dot{x}_{2T};$$

$$m_{2T}\ddot{x}_{2TC2} = m_{2T}a_{y} + F_{zc4} - k_{3}x_{2TC2} - \eta\dot{x}_{2TC2};$$

$$F_{zc3} = 2m_{2B}\Omega_{z}\dot{x}_{2B};$$

$$(6)$$

$$m_{2T}\ddot{x}_{2TC2} = m_{2T}a_{y} + F_{zc4} - k_{3}x_{2TC2} - \eta\dot{x}_{2TC2};$$

$$F_{zc4} = 2m_{2T}\Omega_{z}\dot{x}_{2T},$$

$$(7)$$

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 7, 2006

52 -

где $m_{2a}, m_{26}, m_{2B}, m_{2\Gamma}$ — масса первого, второго, третьего и четвертого чувствительных элементов, соответственно; x_{2a} , x_{2b} , x_{2B} , $x_{2\Gamma}$ — перемещение первого, второго, третьего и четвертого чувствительных элементов под действием электростатических сил; a_x , a_y , a_z — ускорения вдоль осей X, Y, Z соответственно; F_1 , F_2 , F_3 , F_4 — силы, создаваемые электростатическими актюаторами; п - коэффициент трения; є — относительная диэлектрическая проницаемость воздушного зазора; ε_0 — электрическая постоянная; l_m , h — длина и толщина инерционной массы соответственно; *d* — расстояние между отклоняющим электродом и инерционной массой; U_1, U_2 — напряжения, подаваемые на неподвижные электроды электростатических приводов относительно массы; Ω_x , Ω_y , Ω_z — угловые скорости вокруг осей X, Y, Z соответственно; F_{xc1} , F_{zc1} , $F_{xc2}, F_{zc2}, F_{yc3}, F_{zc3}, F_{yc4}, F_{zc4}$ — силы Кориолиса, возникающие под действием $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ соответственно; $x_{2ac1}, x_{2ac2}, x_{25c1}, x_{25c2}, x_{2\Gamma c1}, x_{2\Gamma c2}, x_{2\Gamma c1}, x_{2\Gamma c2}$ — перемещения чувствительных элементов под действием сил Кориолиса.

Как показали проведенные исследования, перемещения чувствительных элементов под действием внешних линейных ускорений, направленных по осям X, Y, Z, составили единицы нанометров за счет изгиба балок 5. Балки 6 не испытывают значительных деформаций при действии внешних линейных ускорений. Поэтому при проведении моделирования работы гироскопа внешние линейные ускорения не учитываются. Моделирование проводилось с использованием высокоуровневого языка описания аналого-цифровых устройств VHDL-AMS в программе hAMSter [11].

На рис. 6 приведены результаты моделирования предложенного гироскопа при $L_{b5} = L_{b6} = L_b =$ = 200 мкм, $h_{b5} = h_{b6} = h = 8$ мкм, $w_{b5} = 8$ мкм, $w_{b6} = 2$ мкм, d = 10 мкм, площади инерционных масс 200 × 200 мкм и угловых скоростях $\Omega_{x,y,z} = 50^{\circ}/c$.

При подаче отклоняющего напряжения U = 60 В на неподвижные относительно инерционных масс электроды последние начинают совершать первичные колебания с амплитудой около 4 мкм и частотой порядка 3 кГц (см. рис. 6). При возникновении угловой скорости вокруг осей X и Y инерционные массы 1, 2 (см. рис. 6, *a*, 6, *б*) и 3, 4 (см. рис. 6, *в*, 6, *г*), расположенные вдоль данных осей, начинают совершать вторичные (информативные) колебания перпендикулярно плоскости подложки с амплитудой приблизительно 650 нм. При возникновении угловой скорости вокруг оси Z инерционные массы совершают информативные колебания вдоль плоскости подложки с амплитудой около 170 нм.

Как показали результаты моделирования, амплитуды вторичных колебаний предложенного гироскопа сравнимы с информативными колебаниями аналогичных устройств, что позволяет детектировать угловые скорости объекта по всем трем осям чувствительности.

Предложенные модели жесткостей упругого подвеса для первичных и вторичных режимов колебаний чувствительных элементов гироскопа, динамические модели и результаты моделирования ММГ могут быть использованы при проектировании трехосевого микромеханического гироскопа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проекты №№ 15324, 15328).

Список литературы

1. **Распопов В. Я.** Микромеханические приборы. Тула: Изд-во Тульского гос. ун-та, 2002. 392 с.

2. **Фрайден Дж.** Современные датчики: Справочник. М.: Техносфера, 2005. 592 с.

3. **Performance** of Small, Low-Cost Rate Sensors for Military and Commercial Applications // Draper Laboratory. 11 p. (URL: http://www.draper.com).

4. **Корляков А. В., Лучинин В. В., Мальцев П. П.** Микромеханические структуры на основе композиции "карбид кремний — нитрид алюминия" // Микроэлектроника. 1999. Т. 28. № 3. С. 201–212.

5. ±150°/s Single Chip Yaw Rate Gyro with Signal Conditioning (ADXRS150) // Analog Devices. 12 p. (URL: http://www.analog.com).

6. Погалов А. И., Тимошенков В. П., Тимошенков С. П., Чаплыгин Ю. А. Разработка микрогироскопов на основе многослойных структур кремния и стекла // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 36—41.

7. Коноплев Б. Г., Лысенко И. Е. Интегральный микромеханический гироскоп. Патент РФ № 2251077, 2005.

8. Koester D. A., Cowen A., Mahadevan R., Stonefield M., Hardy B. PolyMUMPs design handbook. Revision 10.0. (URL: http://www.memsrus.com).

9. Jude J. W. Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design, applications // Smart materials and structures. 2001. N 10. P. 1115–1134.

10. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.

11. **The high** performance AMS tool for engineering and research. User Manual hAMSter version 1. (URL: http://www.ham-ster.com).

Ч АНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 621.315.592

Т. А. Горшенина, Г. М. Шмелев, д-р физ.-мат. наук, проф., Волгоградский государственный педагогический университет

НЕРАВНОВЕСНЫЙ КВАЗИДВУМЕРНЫЙ Электронный газ как сегнетоэлектрик

Показано, что в разомкнутом поперек тока j_x образце возможен неравновесный фазовый переход второго рода, заключающийся в спонтанном появлении поперечного электрического поля E_y . Поле E_y как функция температуры ведет себя как спонтанная поляризация в сегнетоэлектриках. Температура Кюри определяется значением приложенного поля E_x .

Низкоразмерные полупроводниковые наноструктуры (квантовые ямы, проволоки, кольца, точки, сверхрешетки и др.) в настоящее время привлекают значительное внимание. Одна из причин состоит в том, что такие системы начинают проявлять нелинейные и неравновесные свойства в сравнительно слабых полях. Другой быстро развивающейся областью современной физики является теория неравновесных фазовых переходов (НФП). Поэтому вполне естественным выгля-ДИТ объединение этих двух направлений и появление работ, посвященных НФП в низкоразмерных структурах.

В данной работе речь идет о квазидвумерных сверхрешетках (2СР) — тонких проводящих пленках, в которых кристаллический потенциал периодически промодулирован в двух направлениях, а в третьем (*OZ*) — движение электронов «заморожено» условием размерного квантования. Эта модуляция может быть реализована, например, с помощью квадратной сетки квантовых точек [1].

Если в такой 2СР вдоль определенного направления протекает ток j_x , то в разомкнутом в поперечном направлении образце возможно спонтанное возникновение электрического поля E_v при превышении тянущим полем E_{x} некоторого критического значения *E*₀ (порядка 0,6 кВ/см) [2]. (Данное явление аналогично экспериментально подтвержденному многозначному эффекту Сасаки в многодолинных полупроводниках [3]). Фактически речь идет о НФП второго рода (НФП2), при этом E_v играет роль параметра порядка, тянущее поле *E_x* — управляющего параметра, спонтанное поле равно $E_{ys} = \pm \sqrt{E_x^2 - E_0^2}$ [2]. Ситуация здесь такая же, как, например, при сегнетоэлектрическом фазовом переходе второго рода, когда спонтанная поляризация Р ~ $\sim \pm \sqrt{T_C + T}$, а управляющим параметром является температура образца Т (T_C — температура Кюри). В работах [4-6] установлено, что при определенных дополнительных условиях (образец в направлении *OY* замкнут на конечное сопротивление; 2CP периодически легирована, и др.), поперечное поле E_y может вести себя так, как и указанная поляризация: $E_y \sim \pm \sqrt{T_C - T}$, (E_x фиксировано, значение T_C определяется тянущим полем E_x). Таким образом, можно говорить о сегнетоэлектричестве (и ферромагнетизме [7]) неравновесного электронного газа.

Здесь мы показываем, что сегнетоэлектричество неравновесного квазидвумерного электронного газа имеет место и без упомянутых дополнительных условий.

Рассматривается квадратная квазидвумерная полупроводниковая сверхрешетка, оси OX и OY направлены под углом 45° по отношению к ее главным осям. В направлении OX приложено электрическое поле E_x , а вдоль OY образец предполагается гальванически разомкнутым.

Для электронов, находящихся на нижнем (первом) уровне размерного квантования, энергетический спектр в приближении сильной связи имеет вид

$$\varepsilon(\boldsymbol{p}) = \varepsilon_1 - \Delta \cos\left(\frac{p_x d}{\hbar}\right) \cos\left(\frac{p_x d}{\hbar}\right),$$
$$-\pi \hbar/d \le p_{x, y} \le \pi \hbar/d, (1) \quad (1)$$

где **р** — квазиимпульс; 2Δ — ширина нижайшей минизоны; $d\sqrt{2}$ период квадратной решетки; $\varepsilon_1 = \pi^2 \hbar^2 / 2m^* a^2$, m^* — эффективная масса в третьем направлении, *a* — толщина пленки.

Плотность тока *j* находим стандартным образом с помощью решения уравнения Больцмана с

интегралом столкновений в τприближении:

$$(e\boldsymbol{E}, \ \frac{\partial f(\boldsymbol{p})}{\partial \boldsymbol{p}}) = \frac{f_0(\boldsymbol{p}) - f(\boldsymbol{p})}{\tau}, \quad (2)$$

где $f_0(\mathbf{p})$ — равновесная функция распределения электронов; $f(\mathbf{p})$ — искомая (возмущенная полем) функция распределения; $\sum_{\mathbf{p}} f_0 = n$ — концентрация носитеpлей; предполагается, что время

релаксации по импульсу т не зависит от энергии носителя. Решение уравнения (2) имеет вид:

$$f(\mathbf{p}) = \frac{1}{\tau} \int_{0}^{\infty} f_0 \times (\mathbf{p} - e\mathbf{E}t) \exp(-t/\tau) dt, \qquad (3)$$

при этом, как нетрудно видеть, $\sum f = n$.

^{*p*} Далее рассматривается невырожденный электронный газ, для которого $f_0(p) \sim \exp(-\varepsilon(p)/kT)$, k — постоянная Больцмана.

В работах [4—7] неявно предполагалось, что электроны рассеиваются на примесях, когда время релаксации τ не зависит от температуры. В данной работе рассматривается рассеяние электронов на акустических фононах, в этом случае [8—9]

$$\tau = \frac{\rho v_s^2 \hbar^3 a}{3m^* \Xi^2 kT},$$
 (4)

где Ξ — константа деформационного потенциала; v_s — скорость звука; ρ — (средняя) плотность материала. Для удобства формулу (4) представляем в виде $\tau = \tau_0 b$, постоянная τ_0 определяется параметрами материала, а $b = u\Delta/kT$, u = a/d.

Используя функцию (3), находим плотность тока:

$$j_{y} = bC_{11}E_{y} \times \frac{1 + b^{2}(E_{y}^{2} - E_{x}^{2})}{(1 + b^{2}(E_{x}^{2} + E_{y}^{2}))^{2} - 4b^{4}E_{x}^{2}E_{y}^{2}},(5)$$

здесь поле **E** выражено в единицах $E_0 = \hbar / ed\tau_0$, а ток — в единицах $j_0 = ned\Delta/\hbar$, $C_{11} = C_{11}(T) =$ $= \langle \cos(p_x d/\hbar) \cos(p_y d/\hbar) \rangle_0$ — среднее по равновесному распределению, для невырожденных носителей заряда $C_{11}(T) =$ $= I_1(\Delta/2kT)/I_0(\Delta/2kT), I_n(z)$ модифицированная функция Бесселя. Выражение для j_x получается из выражения (5) заменами $x \leftrightarrow y$.

Отметим, что результат (5) может быть представлен в виде:

$$j_y = \partial \Phi / \partial E_y$$

где

$$\Phi = C_{11} \ln((1 + b^2 (E_x^2 + E_y^2))^2 - 4b^4 E_x^2 E_y^2)/4b$$
(6)

— синергетический потенциал (производство энтропии [4]). На рис. 1 представлены примеры поведения функции $\Phi(E_v)$.

Подставляя (5) в условие разомкнутости образца в направлении *OY*

$$j_y = \frac{\partial \Phi}{\partial E_y} = 0, \tag{7}$$

находим выражение для поперечного поля:

$$E_{y} \equiv E_{ys} \equiv 0, \qquad 0 \leq |E_{x}| < T/u, \\ \pm \frac{u}{T} \sqrt{E_{x}^{2} - T^{2} u^{-2}}, \ |E_{x}| \geq T/u.$$
 (8)

Здесь проведена замена $kT/\Delta \rightarrow T$. Устойчивость полученных решений (8) определяется неравенством [10]

$$\frac{\partial j_y}{\partial E_y} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial E_y^2} > 0, \qquad (9)$$

которое выполняется при $E_y = E_{ys}$, и стало быть, решения (8) соответствуют минимумам потенциала Ф. Таким образом, здесь мы имеем дело с НФП2, причем управляющими параметрами являются E_x , *T* и *u*. При данных *T*, *u* имеет место НФП2, обнару-



Рис. 1. Синергетический потенциал $\Phi = \Phi(E_y)$ (с точностью до постоянной) при различных значениях параметров: кривая $a - E_x = 1,5, b = 1$; кривая $b - E_x = 1,5, b = 2$; кривая $c - E_x = 1, b = 2$



Рис. 2. Зависимость поля $E_{ys} = E_{ys}(E_x)$ при различных значениях параметров: кривая a - u = 0,2, T = 0,05; кривая b - u = 0,1, T = 0,1



Рис. 3. Зависимость поля $E_y = E_y(T)$ при различных значениях параметров: кривая a - u = 0,15, $E_x = 0,1$; кривая b - u = 0,1, $E_x = 0,2$

женный в работе [11] (рис. 2). При заданных E_x , и и при $|T - T_C| \ll T_C \equiv u|E_x|$, т. е. вблизи точки НФП2, спонтанное поле ведет себя по закону

$$E_{ys} = \pm \sqrt{2|E_x|/u} \sqrt{T_C - T}$$
, (10)

что полностью аналогично температурной зависимости поляризации сегнетоэлектрика вблизи точки Кюри. Этот НФП2 проиллюстрирован на рис. 3.



Рис. 4. Зависимость поля $E_y = E_y(u)$ при различных значениях параметров: кривая $a - E_x = 0,2$, T = 0,1; кривая $b - E_y = 0,5$, T = 0,2

Кроме того, при фиксированных E_x и *T* зависимость $E_{ys}(u)$ имеет также "бифуркационный" вид (рис. 4).

Отметим, что существование $H\Phi\Pi 2$ (рис. 3, 4) обусловлено поведением BAX (рис. 5) соответствующей одномерной CP $[j_x(E_x)$ при $E_y = 0]$. С ростом температуры положение максимума BAX (это и есть точка бифуркации применительно к 2CP) сдвигается в сторону бо́льших полей (для $E_x > 0$); то же самое имеет место с уменьшением параметра u.

Теперь покажем, что и в случае, когда время релаксации τ не зависит от температуры, разомкнутая в направлении ОУ2СР также может вести себя подобно сегнетоэлектрику. Причиной этого является не проводившийся в предшествующих работах учет межподзонных переходов в электрическом поле, вклад которых в зависит от температуры. ток Именно эта зависимость и приводит к "сегнетоэлектрическому" поведению спонтанного поперечного поля. В работе [12] проанализированы результаты теоретических работ на эту тему и представлена соответствующая формула, которая применительно к 1СР имеет вид:

$$j = \frac{2\tau_0 \Delta}{\hbar} \cdot \frac{1 - \exp\left(\frac{\hbar}{\tau_0 T \Delta} \boldsymbol{E}\right)}{1 + \boldsymbol{E}^2},$$

(\box{E} > 0), (11)



Рис. 5. ВАХ одномерной СР для различных значений параметров:

кривая a - T = 0,3, u = 0,2; кривая b - T = 0,1, u = 0,2; кривая c - T = 0,1, u = 0,1

где напряженность поля, температура и плотность тока записаны в тех же единицах, что и в формулах (5) и (8), приложенное поле E направлено вдоль оси СР.

Для реальных значений параметров СР ($\tau_0 \approx 10^{-12}$ с, $\Delta \approx 10^{-14}$ эрг) и при $T \ge 0,5$ показатель экспоненты в формуле (11) оказывается малым, и с точностью до членов ~ E^2 из (11) имеем

$$j = \frac{2}{T} \cdot \frac{\boldsymbol{E} - \frac{\boldsymbol{\gamma}}{T} \boldsymbol{E}^2}{1 + \boldsymbol{E}^2}, \qquad (12)$$

где $\gamma = \hbar/2\tau_0 \Delta$.

Применительно к 2СР формула (12) определяет ток в случае, когда приложенное поле направлено вдоль одной из главных осей 2СР. Аналогичная формула имеет место и в ситуации, когда это поле параллельно другой главной оси.

Пусть оси координат *ОХ* и *ОУ* направлены под углом 45° к главным осям 2СР, тогда с помощью формулы (12) получим

$$j_{y} = \frac{1}{T} \left(\frac{E_{x} + E_{y} - \frac{\gamma}{T} (E_{x} + E_{y})^{2}}{1 + (E_{x} + E_{y})^{2}} - \frac{E_{x} - E_{y} - \frac{\gamma}{T} (E_{x} - E_{y})^{2}}{1 + (E_{x} - E_{y})^{2}} \right),$$
$$(E_{x} \pm E_{y} > 0).$$
(13)



Рис. 6. Спонтанное поперечное поле (14) при различных температурах: кривая a - T = 0.5; b - T = 0.7; c - T = 1.5 ($\gamma = 0.05$)

Подставляя (13) в выражение (7), находим, что спонтанное поперечное поле

$$E_{ys} = \begin{cases} 0, \ E_x^2 T - T + 2\gamma T_x < 0 \\ \frac{\sqrt{T(E_x^2 T - T + 2\gamma E_x)}}{T}, \ (E_x^2 T - 1 + 2\gamma E_x) \\ -T + 2\gamma E_x) \ge 0. \end{cases}$$
 (14)

При выполнении второго неравенства в (14) синергетический потенциал

$$\Phi = \frac{1}{2T} \ln((1 + E_x^2 + E_y^2)^2 - 4E_x^2 E_y^2) + \frac{\gamma}{T^2} (\operatorname{arctg}(E_x + E_y) + \operatorname{arctg}(E_x - E_y)) + \operatorname{const} (15)$$

становится двухъямным. При фиксированной температуре реализуется НФП2, установленный в работе [11] (рис. 6). Если же фиксированное поле $|E_x| < 1$, то выражение (14) можно представить в виде

$$E_{ys} = \pm \sqrt{(1 - E_x^2)/T} \sqrt{T_C - T}$$
, (16)

где *T_C* определяется значением тянущего поля:

$$T_C = \frac{2\gamma E_x}{1 - E_x^2}.$$
 (17)

Таким образом, как следует из (16), в этих условиях имеет место НФП2 "сегнетоэлектрического" типа. Рис. 7 иллюстрирует данный переход.

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 7, 2006



 $a - E_x = 0.93; b - E_x = 0.95; c - E_x = 0.97$ ($\gamma = 0.05$)

Везде выше предполагалось, что электроны находятся на нижнем уровне размерного квантования. Можно показать, что учет вышележащих уровней не приводит к принципиально новым результатам, касающимся представленных здесь НФП.

Рассмотренные здесь бистабильные системы могут быть использованы в различного рода устройствах. Прежде всего имеются в виду переключатели [2], усилители слабых периодических сигналов [13], а также фильтрующие элементы [14]. Численные оценки описанных эффектов сводятся, в основном, к оценке характерного поля E_0 . При $\tau_0 \approx 10^{-12}$ с, $d \approx 10^{-6}$ см значение $E_0 \approx 600$ В/см.

Список литературы

1. **Dorn A., Ihn Th., Ensslin Kl.** et al. Electronic transport through a quantum dot network // arXiv:cond-mat/0411300, 2004.

2. Эпштейн Э. М., Шмелев Г. М., Маглеванный И. И. Неравновесные фазовые переходы в квазидвумерном электронном газе в электрическом поле // ФТТ. 1996. Т. 38. С. 3478.

3. Asche M., Kostial H., Sarbey O. G. Experimental proof of the multivalued Sasaki effect in n-Si. // J. Phys. C: Solid St. Phys. 1980. V. 13. L 645.

4. Shmelev G. M., Maglevanny I. I. Electric-field-induced ferroelectricity of electron gas // J. Phys.: Condens Matter. 1998. V. 10. P. 6995.

5. Шмелев Г. М., Маглеванный И. И., Эпштейн Э. М. Сегнетоэлектрические свойства неравновесного электронного газа // Изв. ВУЗов. Физика. 1998. № 4. С. 72.

6. Maglevanny I. I., Shmelev G. M., Epshtein E. M. The Influence of Periodic Doping on the Nonequilibrium Phase Transitions in Lateral Superlattice // Phys. Stat. sol. (b). 1997. V. 204. P. 737.

7. Epshtein E. M., Shmelev G. M., Maglevanny I. I. Ferromagnetic and Ferroelectric Properties of Nonequilibrium Electron Gas // Phys. Lett. A. 1999. V. 254. P. 107.

8. Тавгер Б. А., Демиховский В. Я. Квантовые размерные эффекты в полупроводниковых и полуметаллических пленках // УФН. 1969. Т. 96. С. 61.

9. Arora V. K., Awad F. G. Quantum size effect in semiconductor transport // Phys. Rev. B. 1981. V. 23. N 4. P. 5570.

10. Бонч-Бруевич В. Л., Звягин И. П., Миронов А. Г. Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках. М.: Наука, 1972. 415 с.

11. Шмелев Г. М., Эпштейн Э. М. Спонтанное возникновение поперечной ЭДС в проводнике с неаддитивным непараболическим законом дисперсии // ФТТ. 1992. Т. 34. С. 2565.

12. Grahn H. T., von Klitzing K., Ploog K., Döhler G. H. Electrical transport in narrow-miniband semiconductor superlattices // Phys. Rev. B. 1991. V. 73. N 14. P. 12094.

13. Шмелев Г. М., Эпштейн Э. М., Чайковский И. А., Матвеев А. С. Неравновесные фазовые переходы и стохастический резонанс в квазидвумерной сверхрешетке. // Изв. АН. Сер. физ. 2003. Т. 67. № 8. С. 1110.

14. Маглеванный И. И., Шмелев Г. М. Влияние электрического поля на стохастическую фильтрацию в квазидвумерных полупроводниковых сверхрешетках // Материалы 3-го Межд. сем. "Компьютерное моделирование электронных процессов в физике, химии и технике", Воронеж, 2004. С. 81.

новые книги

Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам. Сборник статей под ред. д-ра техн. наук, проф. П. П. Мальцева. Москва: Техносфера, 2005. — 592 с, ISBN 5-94836-063-6

Ежемесячному междисциплинарному теоретическому и прикладному научно-техническому журналу "Нано- и микросистемная техника" исполнилось пять лет. Наиболее цитируемые статьи, опубликованные в журнале с ноября 1999 г. по март 2005 г., сгруппированы в соответствии с названием рубрик и позволяют проследить развитие от микро- к наносистемной технике в России. В книге рассмотрены общие вопросы, технологии формирования наноструктур, методы исследования наноструктур, метрологическое обеспечение, основы технологии, моделирование и конструирование компонентов нано- и микросистемной техники, перспективы их применения. Монография представляет интерес для ученых, инженеров и преподавателей высшей школы, аспирантов и студентов, специализирующихся в области микро- и наноэлектроники, микро- и нанотехнологии, микро- и наносистемной техники.

Книга **постоянно** продается в магазине "Дом книги": 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 40, рядом с гостиницей "Спутник". Ближайшая станция метро: "Ленинский проспект".

Заявки на книги присылайте по адресу: 125319, г. Москва, а/я 594 Издательство "Техносфера" e-mail: knigi@technosphera.ru; sales@technosphera.ru факс: (495) 956-33-46 В заявке обязательно указывайте свой почтовый адрес! Продажа в Интернет по одному экземпляру и более: http://www.ozon.ru/context/detail/id/2538416/ (Цена 434 руб, Вес: 970 гр., отгружается в течение 7—10 дней + время доставки)

Справочные страницы

УДК 802.0(075.8)

К. Д. Яшин, канд. техн. наук, доц., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (г. Минск), Е. В. Лацапнёв, Белорусский национальный технический университет (г. Минск)

АНГЛО-РУССКИЙ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК ПО МИКРО-И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ

Даны термины и наиболее широко употребляемые словосочетания и аббревиатуры по микро- и наносистемной технике и технологии их изготовления.

Η

Hall effect sensor — сенсор на эффекте Холла. Твердотельный полупроводниковый микросенсор, действие которого основано на эффекте Холла. Эффект Холла — явление возникновения поперечной разности потенциалов (называемой также Холловским напряжением) при помещении проводника с постоянным током в магнитное поле. Эффект открыт в 1879 г. Э. Холлом. Микроприбор используется для измерения силы магнитного поля и в качестве датчиков скорости и положения.

Hard bake — термообработка при более высокой температуре. Это так называемое задубливание фоторезиста. Имеется в виду, что задубливание фоторезиста после проявления — это как бы вторая стадия термообработки фоторезиста. Первая стадия осуществляется перед экспонированием и называется предэкспозиционная сушка (или просто сушка). Вторая стадия (задубливание) выполняется при более высокой температуре (~130 °C), чем первая сушка (~90 °C). Задубливание удаляет растворитель и влагу из фоторезиста, способствует его стабилизации, увеличивает его адгезию и стойкость в последующих процессах травления и имплантации.

Hardened photoresist — задубленный фоторезист. Так называется фоторезист, прошедший термообработку после проявления. Эта термообработка после проявления фоторезиста улучшает адгезию пленки фоторезиста со сформированным в ней изображением. Высокие адгезионные свойства пленки фоторезиста необходимы для химической устойчивости к действию травителей на последующей за задубливанием операции травления. Режимы задубливания зависят от свойств фоторезиста и других параметров литографического процесса. Приблизительно — это 110—160 °С и время порядка 5—15 минут.

Hardness — твердость. Мера сопротивления твердого тела вдавливанию или царапанию. Таким испытаниям подвергаются пленки материалов, применяемые в технологии МЭМС.

Hardware Description Language (HDL) — язык описания аппаратных средств. Используется проектировщиками интегральных схем для закладывания рабочих функций в полупроводниковое микроизделие. В настоящее время наибольшее распространение получили два языка: Verilog и VHDL. Аббревиатура VHDL (Very High speed integrated circuit Description Language) означает язык аппаратного описания высокоскоростных интегральных схем. VHDL был разработан в 1983 г. по заказу Министерства обороны США. VHDL предназначен для имитации, моделирования, синтеза и документирования при проектировании любых вычислительных устройств. В 1987 г. был определен стандарт языка IEEE 1076—1987. Verilog — зарегистрированная торговая марка Cadence Design Systems, Inc. (США). В 1995 г. был определен стандарт язы- κa — Verilog LRM (Language Reference Manual), IEEE 1364—1995. VHDL обладает большей универсальностью и гибкостью по сравнению с Verilog. Однако из-за своих расширенных возможностей VHDL проигрывает в эффективности и простоте, т. е. на описание одной и той же конструкции в Verilog потребуется на 40-50 % меньше символов, чем в VHDL. Также VHDL проигрывает и в быстродействии языку Verilog, особенно при моделировании на уровне вентилей и транзисторов. В Verilog существуют специфические объекты (UDP, Specify-блоки), не имеющие аналогов в VHDL. Также следует упомянуть стандарт PLI (Program Language Interface), который позволяет включать функции, написанные пользователем (например, на Си), в код симулятора.

HDL-A/MS (Hardware Description Language applied to Analog/Mixed Signal systems) — язык описания аппаратных средств, применяемый для аналоговых/смешанных сигнальных систем. Предоставляет важную возможность для документирования сигналов и многократного использования интеллектуальных свойств системы.

Hertz — герц. Обозначение: Гц, Нz. Единица измерения частоты периодических процессов. Один герц соответствует одному периоду колебаний в секунду. Назван в честь немецкого ученого-физика XIX века Генриха Герца. Неteroepitaxy — гетероэпитаксия. Вариант эпитаксии, при которой один тип материала эпитаксиально осаждается на другой тип материала, например Si или Al_2O_3 . Особенно широкое распространение получила гетероэпитаксия в производстве полупроводниковых многослойных гетероструктур на подложках GaAs и InP. Гетероэпитаксиальные структуры нашли применение при изготовлении лазерных и CBЧ микроустройств. Различают: жидкостную, газофазную и молекулярно-лучевую гетероэпитаксию.

Hexamethyl Disilazane (HMDS) — гексаметилдисилазан. Используется в технологии нанесения покрытий. Гексаметилдисилазан затравливает поверхность подложки для улучшения адгезии фоторезиста к поверхности подложки.

High Aspect Ratio Micromachining (HARM) — микрообработка с высоким характеристическим отношением. См. *Aspect ratio*. Метод микрообработки для изготовления микроструктур с высоким характеристическим отношением > 10. Глубокое реактивное ионное травление, LIGA-технология, лазерная микрообработка и др. относятся к HARM.

High-Efficiency Particle Air (НЕРА) — высокоэффективная система фильтрации воздуха. Воздушный фильтр, который удаляет до 99,97 % частиц с размерами, превышающими 0,3 мкм в диаметре.

High energy ion implantation — высокоэнергетическая ионная имплантация. Ионная имплантация, выполняемая при энергии, превышающей 750 кэВ. Используется для формирования скрытых слоев и для получения ретроградных карманов. Ретроградный карман (retrograde well) — это подход к формированию карманов в КМОП-структурах. Ретроградный карман состоит из легированной области с вертикальным распределением примеси таким образом, что наименьшая концентрация на поверхности подложки, а самая высокая — на дне кармана. Есть другое, более распространенное использование высокоэнергетической ионной имплантации. Для того чтобы избежать проблем. связанных с большими временами разгонки примесей при создании глубоких карманов КМОП-структур, можно воспользоваться ионной имплантацией примеси в *p*-карманы при очень высокой энергии ионов (400-600 кэВ). При этом необходимый заряд под *n*-канальным транзистором образуется без длительной термической обработки. Глубокая имплантация ионов бора, проводимая после локального окисления, обеспечивает создание высокой поверхностной концентрации примеси под изолирующим оксидом, которая впоследствии служит для ограничения распространения в горизонтальном направлении инверсной области. Использование такого метода позволяет существенно повысить плотность упаковки элементов в микроизделии и понизить их чувствительность к возникновению эффекта защелкивания.

High pressure oxidation — окисление под высоким давлением. Окисление, выполняемое под давлением, превышающем атмосферное давление. Окисление под высоким давлением увеличивает скорость окисления при фиксированной температуре. Пример: окисление Si при повышенном давлении и низкой температуре во влажном кислороде. При давлении 1 МПа и температуре 750 °С пленка оксида толщиной 30 нм может быть выращена в течение 30 мин. Для изменения толщины можно варьировать временем окисления, температурой и давлением. Такой метод применяется при выращивании тонких подзатворных оксидов. Одновременно с выращиванием тонкой оксидной пленки происходит формирование толстого оксида в слое легированного поликремния. Это результат концентрационно-ускоренного окисления. Установлено, что свойства оксида в основном зависят от температуры окисления, а не от давления. Преимущество окисления кремния при высоком давлении: метод позволяет выращивать слои термического оксида при относительно низких температурах в течение времени, сравнимым со временем, необходимым для обычного высокотемпературного процесса при атмосферном давлении. В связи с этим можно свести к минимуму процесс перераспределения предварительно введенной в подложку примеси. Применение метода: формирование быстродействующих биполярных структур с изопланарной изоляцией элементов и высокой плотностью компоновки этих элементов; формирование по МОП-технологии динамических запоминающих устройств с произвольной выборкой, где процесс успешно применяется для выращивания толстых изолирующих окисных слоев.

Hillock — холмик, бугорок. Имеется в виду дефект металлизации в виде выступа. Выступ формируется в металлической пленке вследствие электромиграции. Электромиграция представляет собой массоперенос проводящего металла. См. Electromigration. Он происходит путем передачи импульса от электронов, движущихся под влиянием электрического поля, приложенного к проводнику. После разрушения проводника из-за электромиграции в нем обнаруживается либо пора, либо разрыв, либо бугорок, либо другое скопление материала. Кроме электромиграции, частицы, попадающие на пластину в камере осаждения, также могут быть причинами таких дефектов. Образование бугорков (небольших возвышений на поверхности) зависит от состава пленки. Предыдущая термообработка тоже может ухудшить зеркальность поверхности металлической пленки, затруднить ведение литографии и других последующих операций. Кроме того, есть еще одно понятие такого дефекта. В эпитаксиальной технологии широко известен следующий факт: при выращивании эпитаксиальных слоев кремния на подложках с ориентацией (111) на поверхности эпитаксиального слоя образуется мелкая сыпь. Это бугорки.

Hole — дырка, отверстие. Имеется в виду дырка как носитель заряда. Примеры: захваченная дырка, избыточные дырки и др. Кроме того, имеется в виду дырка как отверстие. Примеры: отверстие на плате для вывода компонента, контактное окно, установочные отверстия, отверстие в пассивирующем слое, юстировочное отверстие и др.

Нотоеріtaxy — гомоэпитаксия. Вариант эпитаксии, при которой один тип материала эпитаксально осаждается на подложку такого же типа материала. Другими словами, если материал эпитаксиального слоя и подложки идентичен (например, GaAs выращивают на GaAs-подложке, или Si выращивают на Si-подложке), то такой процесс называют автоэпитаксиальным или гомоэпитаксиальным. Если же материалы эпитаксиального слоя и подложки различаются (например, GaAlAs выращивается на GaAsподложке или InGaAsP на InP-подложке), процесс называют гетероэпитаксиальным. Отсюда названия: гомоэпитаксиальные (автоэпитаксиальные) и гетероэпитаксиальные структуры.

Homogeneous — гомогенный. Гомогенная система — это система, химический состав и физические свойства которой во всех частях одинаковы или меняются непрерывно, без скачков. Между отдельными частями системы нет поверхностей раздела. Пример: автоэпитаксиальные структуры кремния. См. *Нотоерitaxy*.

Honing — хонингование (притирка). Отделочная микромеханическая обработка, в основном — внутренних цилиндрических поверхностей микродеталей мелкозернистым абразивным микроинструментом в виде брусков. Последние смонтированы на хонинговальной головке (хоне). Абразивные бруски прижимаются к обрабатываемой поверхности, а сама хонинговальная микроголовка, закрепленная в шпинделе хонинговального устройства, совершает вращательное и возвратно-поступательное движения.

Hot embossing — горячее тиснение. Метод для изготовления микроустройств из полимеров, при котором оригинал шаблона вдавливается под высоким давлением и температурой внутрь полимерной подложки, перенося детали топологии в полимер.

Hydraulic actuator — гидравлический актюатор. Микроактюатор, который использует механическую энергию потока жидкости в качестве движущей силы. Эти устройства обладают большим выходным усилием, высокой плотностью энергии и достаточно большими для микроустройств размерами. Проблемы данных микроактюаторов связаны с нарушением герметичности и самоблокировками подобных микроустройств. Тем не менее, широкие типичные применения: поршневые микросистемы, микротурбины, металлические микросильфоны. Используются в производстве автоматизированных микроустройств, в инвазивной микрохирургии и т. д.

Нуdrazine — гидразин N_2H_4 — бесцветная жидкость. Очень токсичный анизотропный травитель для кремния. Обладает селективностью к алюминию. Последний, как известно, широко еще применяется для создания металлизации при формировании МЭМС-устройств и КМОП-схем относительно небольшой степени интеграции. Гидразин используется также как реактивное топливо, например, для микрореактивных двигателей. Но это не самое сильное из современных видов топлива.

Hydrofluoric acid (HF) — фтористоводородная кислота (HF). Другое название — плавиковая кислота. Получают из плавикового шпата. НF широко используется в технологии микрообработки для травления SiO₂. Пример: травление "жертвенного" слоя двуокиси кремния: SiO₂ + HF \rightarrow SiF₄ + H₂O. Плавиковая кислота в смеси с азотной кислотой HNO₃ травит кремний.

Hydrogen — водород. Бесцветный газ, без вкуса и запаха, горюч и взрывоопасен. Первый элемент периодической системы элементов. Водород легчайшее вещество из всех известных веществ (в 14,4 раза легче воздуха). Атомный вес 1,00797 а. е. м. Плотность 0,0899 г/л при 0 °С и давлении в одну атмосферу. Водород кипит (сжижается) и плавится (затвердевает) соответственно при -252,6 °С и -259,1 °C. Затвердевший водород имеет гексагональную структуру кристаллической решетки. Из всех газов водород обладает наибольшей теплопроводностью. Водород мало растворим в воде, но хорошо — во многих металлах (Ni, Pt, Pd и др.). Водород — единственный элемент, изотопы которого имеют собственные названия: H¹ — протий (H), H² – дейтерий (D) и H³ – тритий (T). Водород используется: для получения пара в печах посредством реакции с кислородом; как газ предварительной очистки; как транспортирующий газ в ходе процесса эпитаксии; как составляющий компонент газов при отжиге. Примеры эпитаксии кремния в атмосфере H_2 : разложение моносилана SiH₄, дихлорсилана SiH₂Cl₂ + H_2 , тетрахлорида кремния SiCl₄ + H₂ и др. Водород как носитель лигатуры: $B_2H_6 + H_2$, $AsH_3 + H_2$, $PH_3 + H_2$, $GeH_4 + H_2$ и др. Экспериментально установлено улучшение параметров микроизделий после их пассивации фосфоросиликатным стеклом (ФСС) с последующим низкотемпературным отжигом пластин в Н₂. Последний способствует усилению свойств ФСС по стабилизации границы раздела Si-SiO₂.

Hydrogen storage alloy — сплав хранения водорода. Сплав, способный растворять большое количество водорода между кристаллическими решетками. Примеры: сплавы La-Ni₅, Ti-Fe, Ti-Mn, Li-Fe, Mg-Ni и т. д. Сплавы, способные абсорбировать водород из газовой фазы, выплавляют из редкоземельных и переходных металлов, используя специальную вакуумную технологию. Эти сплавы при комнатной температуре и под определенным водородным давлением способны абсорбировать чрезвычайно большое количество водорода, формируя твердый гидрид металла. Химическая реакция образования гидрида сопровождается выделением теплоты во внешнюю среду. Обратный процесс десорбции водорода можно получить при понижении давления водорода ниже определенного значения. Процесс десорбции газа будет сопровождаться поглощением теплоты из внешней среды. Эти металлы, абсорбирующие водород, называются "сплавы хранения водорода". Подобно тому, как губка впитывает воду, эти сплавы могут поглощать водород с огромной эффективностью. Сплавы хранения водорода, основанные на редкоземельных металлах, таких как Ti, Zr, Fe и т. д., активно изучаются в настоящее время, однако только сплавы из редкоземельных металлов так называемой группы АВ₂ достигли стадии массового производства и коммерциализации. В качестве материала с обратимым сохранением газа используются сплавы группы АВ₅, поскольку они могут действовать при умеренных температурах (от -20 до +60 °C), в то время как сплавы группы AB_2 требуют дополнительного нагрева (до 150 °C). Эти сплавы могут использоваться для тепловых микроактюаторов, а также в качестве материалов, накапливающих энергию.

Hysteresis cycle — гистерезисный цикл. Имеется в виду так называемая петля гистерезиса. Гистерезис — от греч. "отставание". Это есть запаздывание изменения какой-либо физической величины, характеризующей состояние вещества, от изменения другой физической величины, определяющей внешние условия. Различают: магнитный гистерезис, упругий гистерезис и др. В основе работ над оптическими компьютерами, создаваемыми на основе микрооптоэлектромеханических систем, лежит принцип бистабильности. Поясним ее на примере гистерезиса. Если увеличить интенсивность падающего на вещество светового луча до некоторого значения I₁, то произойдет резкое возрастание интенсивности прошедшего луча. А на обратном ходе при уменьшении интенсивности падающего луча до некоторого значения $I_2 < I_1$ интенсивность прошедшего луча некоторое время остается постоянной, а потом резко падает. Определенно два значения интенсивности прошедшего луча соответствуют интенсивности падающего луча и зависят от предыдущего состояния поглощающего вещества. Важно обратить внимание, что предыдущее состояние вещества однозначно определяет, какое из двух состояний волна будет иметь на выходе. Эти два состояния являются аналогом "1" и "0" в полупроводниковых системах.



АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области физики, математики, информатики, механики, химии и биологии и поддержанных Российском фондом фундаментальных исследований (РФФИ) по итогам конкурса 1999 г. Эти отчеты представляют определенный интерес для специалистов в области микро- и наносистемной техники. Общий список работ опубликован в "Информационном бюллетене РФФИ", № 7, 1999 г. (http://www.rfbr.ru).

Концентрационные эффекты и валентное состояние водорода в гидридах интерметаллических соединений

Номер проекта: 99-03-32626 Год представления отчета: 2002

С использованием техники высоких газовых давлений изучены равновесия в области давлений до 2000 атм в системах CeNi5-хCox-H2 и Ce0.8La0.2Ni5-хCox-H2, построены p-C-T диаграммы и рассчитаны термодинамические параметры фазовых превращений. Стабилизированы и рентгенографически охарактеризованы гидридные фазы с различной концентрацией водорода. Обнаружены новые в химии гидридов явления, проявляющиеся в качественном различии формы изотерм абсорбции и соответствующей десорбции (CeNi3.5Co1.5) и колебательной динамики достижения равновесия в процессе гидридообразования (CeNi2.5Co2.5). Впервые методом калориметрического титрования исследована динамика достижения равновесия в бинарной системе Pd-H2. Предложен механизм абсорбции водорода в *a*- и *b*-областях диаграммы состояния и определена критическая концентрация водорода, отвечающая качественному изменению характера связи водорода с матрицей и обусловленная, вероятно, переходом Hd+ (в фазе *a*-раствора)[®]Hd- (в фазе *b*-моногидрида).

Методом микрокалориметрии Кальве проведено систематическое исследование взаимодействия с водородом соединений LaNi5-хMx, где M = Al, Sn, Cu, Co построены Q-C-T, определены термодинамические параметры реакций, исследована кинетика взаимодействия в этих системах и предложен механизм реакций при различных концентрациях водорода.

Показано, что в Сu- и Со-замещенных системах в зависимости от концентрации водорода и условий термической обработки в атмосфере водорода возможно существование двух различных, обратимо переходящих друг в друга форм соединения с отвечающими им разными типами p-C-T диаграмм.

Методами рентгенофазового анализа изучена зависимость структурных параметров от концентрации водорода для стабилизированных оксидом углерода гидридных фаз на основе соединений LaNi5-xAl(Sn)х. Установлено, что при повышенном содержании р-элементов (x = 0,2) образование *а* твердого раствора водорода протекает без обычного для данного структурного типа расширения элементарной ячейки.

Проведены ЯМР исследования гидридов интерметаллического соединения CeNi3Hn с концентрацией водорода n = 1,0 и 3,0. На основе определенных величин сдвига Найта и скорости спин-решеточной релаксации сделан вывод о присутствии двух типов атомов водорода с выраженным ковалентным характером связи с металлической матрицей.

Государственное учебно-научное учреждение Химический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова

Исследование роли фуллерена в образовании карбидов и композитов при металлотермическом восстановлении хлоридов

Номер проекта: 99-03-32541 Год представления отчета: 2001

Восстановлением тетрахлорида титана (TiCl₄) с четыреххлористым углеродом (CCl₄) и перхлорэтиленом (C₂Cl₄) в атмосфере аргона, гелия или азота в импульсном реакторе (типа Кролла) синтезированы карбиды и карбонитриды титана различной стехиометрии, исследовано влияние условий синтеза на стехиометрию. Согласно данным рентгеноспектрального микроанализа, карбиды состоят в основном из двух фаз. Фаза I с атомным соотношением углерод:титан от 1,2 до 1,6, что формально приближается к стехиометрическому составу простейших фуллеритов — металлокарбонам (Ti₈C₁₂), представлена белыми блестящими зернами, при электронной бомбардировке слабо люминесцирующими в области с максимумами

1,9—2,2 и 3,0—3,5 эВ. Фаза II, содержащая до 90 % и более углерода, интенсивно люминесцирует с максимумами приблизительно в тех же областях.

Рентгеноструктурный анализ продуктов восстановления смесей $TiCl_4 c CCl_4 u C_2Cl_4 в$ атмосфере азота показал наличие двух кристаллических фаз с параметрами решетки 0,432 нм и 0,424—0,426 нм. Синтезом карбида внутри металлической матрицы при перемешивании получены композиционные материалы (КМ) на основе алюминий-магниевого и магний-алюминиевого сплавов, проведено картирование КМ, исследован состав упрочняющей фазы. Магнийтермическим восстановлением хлорида скандия в присутствии сажистого углерода синтезирован карбид скандия. Синтезированы карбиды на алюминиевой и никелевой связках.

Исследованы возгоны, образующиеся на различных участках поверхности импульсного реактора. Методами масс-спектроскопии показано, что наряду с сажистым углеродом возгоны содержат смесь сложных перхлоруглеродных кластеров, основной из которых — перхлорбензол (C_6Cl_6). Масса кластеров достигает 700—800 а. е. м. При восстановлении перхлорэтилена наряду с шестичленными углеродными циклами образуются пятичленные типа гексахлорпентадиена (C_5Cl_6), не обнаруженные в продуктах восстановления CCl₄.

Под воздействием аргонового лазера экстракты возгонов в толуоле флюоресцируют. Спектр флюоресценции представляет собой широкую бесструктурную полосу с максимумом в области 694—670 нм для темных растворов и 625—595 нм для желтых. Спектры поглощения растворов имеют два пика поглощения при 350—370 нм и несколько слабых полос поглощения в видимой области до 450 нм.

Методами бумажной хроматографии в смеси идентифицировалось более десятка компонентов. Для сравнения изучены продукты термического разложения CCl_4 и C_2Cl_4 в проточном реакторе в отсутствии магния и над лодочкой с магнием. Массспектрограммы характеризуются меньшим числом пиков; кроме перхлорбензола на них в основном представлены продукты его хлорирования. Квантово-механическим расчетом обнаружена метастабильная трехмерная молекула C_8Cl_6 , стехиометрия которой соответствует одному из веществ, определенных на масс-спектрограмме.

Предложена гипотеза об участии фуллеренов в процессе синтеза тугоплавких соединений титана, которая обосновывается наличием в реакторе зон локального гипернагрева, синтезом в нем 5- и 6членных углеродных циклов и особенностью распределения углерода в конечном продукте.

Санкт-Петербургский государственный горный институт

Электронный нос проводит точный химический анализ

Тонкая кремниевая пластина позволит быстро и точно анализировать газовые смеси и обнаруживать бактерии в воздухе. Это сложное электронное устройство, известное как "электронный нос" (рис. 1), разработано учеными из Университета Беркли, Калифорния, США. Для того чтобы это уникальное устройство получило воплощение в "железе", ученые вынуждены были обратиться за его исполнением к компании Nanomix Inc., расположенной в Эмервилле.

"Представьте себе портативную лабораторию, которая позволит вам количественно и качественно анализировать газы, предоставляя нужную информацию за минуты. Как только вы внесли чип "электронный нос" в газовую среду, вы тут же получаете результат — почти полный его химический анализ. В лаборатории вы получите те же результаты только через несколько часов", — объясняет президент компании Дэвид Макдональд (David Macdonald).

Другое применение электронного носа — идентификация возбудителей заболеваний, передающихся воздушно-капельным способом. Как утверждает президент компании, чип способен и на это.

"Наша технология "электронного носа", или, как еще мы его называем, — Е-Nose, позволяет анализировать практически все, что содержится в воздухе", — комментирует Брэдли Джонсон (Bradley Johnson), ученый из Беркли.

Несмотря на то, что устройство называется "электронный нос", принцип действия его похож на функционирование биологических рецепторов запахов. Любая молекулярная комбинация, находящаяся в воздухе и попадающая в одну из 2200 ячеек "носа", кодируется и обрабатывается компьютером. Примерно так же работают рецепторы на-



Рис. 1. Производственная чип-пластина "электронного носа" состоит из 2200 ячеек-анализаторов Sensation

шего носа: каждый запах — это определенная конфигурация молекул, которая отсылается в мозг и там анализируется.

"Самое интересное — то, что у этой технологии есть много вариантов для развития", — говорит Макдональд.

Ученые из Беркли заложили основу алгоритмизации и принцип действия "электронного носа", но реализовать его "в железе" смогла компания Nanomix, которая довольно долгое время работает в области разработки и продвижения на рынок продуктов, использующих нанотехнологии. Компанией создана специальная платформа для E-Nose, названная Sensation, которая представляет собой чип с площадью 2 мм². Она содержит ряд наносенсоров для распознавания молекул и может быть интегрирована с устройствами более высокого уровня (например, с компьютером или отдельным микропроцессором).

Наносенсоры представляют собой углеродные нанотрубки. Подобный принцип детекции молекул с помощью нанотрубок предлагал Ральф Меркле и Эрик Дрекслер еще в 1998 г. Теперь же предсказанные и рассчитанные ими устройствасенсоры выходят на рынок. Отдельные примеси, которыми можно снабдить нанотрубки, позволяют определять различные типы молекул, а также микроорганизмы.

Основное предназначение Sensation — слежение за уровнем CO₂ в медицине. Это позволит сразу же определить, правильно ли сделана интубация. При этом модуль можно поместить непосредственно в трахею больного. "То, что раньше можно было сделать и проверить только в больнице, с помощью Sensation может сделать водитель скорой непосредственно на вызове", — поясняет Макдональд. Для работы Sensation требуется только одна обычная пальчиковая батарейка.

Компания Nanomix на сегодняшний день находится в частных руках и состоит из 35 человек. "Мы полагаем, что готовое медицинское устройство индикации уровня углекислоты будет стоить до 20 \$, а это совсем недорого", — закончил директор Nanomix Дэвид Макдональд.

Источник: CNEWS: Электронный нос проводит точный химический анализ (http://www.cnews.ru/)

Нанотрубки как основа Flash-памяти

Углеродные однослойные нанотрубки, хорошо зарекомендовавшие себя в микро- и наноэлектронике, микросистемотехнике и биологии, имеют, оказывается, еще ряд полезных свойств, которые можно использовать в вышеперечисленных областях.



Рис. 2. Структура (а) и микрофотография (б) Flash-памяти на основе нанотрубок

Недавно группе исследователей удалось создать на основе нанотрубки Flash-память (рис. 2). Пока еще устройство далеко от полноценного коммерческого продукта, но ученые надеются, что их исследования откроют новые типы архитектуры молекулярной памяти на основе нанотрубок и позволят выпускать полноценные массовые электронные устройства на их основе.

"В то время, как подавляющая часть наноэлектроники на основе нанотрубок работает при достаточно низких температурах, наше устройство может работать при комнатной, — говорит Джиян Дай (Jiyan Dai), ученый из Политехнического университета Гонконга (Hong Kong Polytechnic University). — Это свидетельствует о том, что нанотрубочная электроника становится "теплой", что позволит ей скорее выйти на потребительский рынок".

Трудно сказать, где не используется Flash-память. В основном, это накопитель данных в цифровых аудиоплеерах, видеокамерах, мобильных телефонах, фотоаппаратах и USB-устройствах переноса информации. Основное достоинство Flash-памяти то, что она энергонезависима, т. е. продолжает хранить данные без дополнительного питания.

Обычная Flash-память состоит из матрицы транзисторов-ячеек, каждая из которых состоит из трех слоев: "управляющий ключ" и "плавающий ключ", разделенные тонкой пленкой оксида-изолятора.

Как только на ячейку подается напряжение, электроны формируют отрицательный заряд на "плавающем ключе", который, при определенном числе зарядов становится закрытым, и ячейка принимает значение логического "0". Как только напряжение понижается, затвор ключа открывается, и ячейка принимает значение "1". Так каждая ячейка может хранить один бит информации.

Дай и его коллега Лу (Х. В. Lu) смогли создать ячейку, в которой роль "плавающего ключа", хранящего заряд, играет пленка, содержащая композит из нанотрубок. Об этом они сообщили в текущем выпуске Applied Physics Letters.

Композит, содержащий углеродные нанотрубки, состоит из гафния, алюминия и кислорода (так называемый HfAlO-композит). Он служит как в качестве "управляющий ключа", так и в качестве оксидной пленки, разделяющей части ячейки между собой. Новая Flash-ячейка — это своеобразный бутерброд, состоящий из нанотрубок, композита и кремниевой подложки. Его толщина — всего несколько нанометров. Естественно, память, изготовленная на основе нанобутерброда, будет гораздо более миниатюрной, чем современные аналоги.

Дай и Лу провели ряд исследований, которые позволили получить информацию об электронных характеристиках нового устройства. В первую очередь, это емкость ячейки — то, как долго она может хранить без утечек электрический заряд. Ученые провели ряд замеров — от нескольких секунд до нескольких часов. Как выяснилось, устройство плохо держит краткосрочно полученные заряды и гораздо лучше — полученные при длительном заряде ячеек. При слабой зарядке "окно памяти" (порог напряжения, при котором информация хранится) становится более узким, что нежелательно для памяти этого типа. Однако при более длительной зарядке "окно памяти" держится на уровне 0,5 В.

"Мы уверены, что у нас получится создать память с более широким окном памяти, что сделает новый тип Flash-памяти коммерчески возможным продуктом", — говорит Дай.

Источник: PhysOrg: Carbon Nanotubes with a Memory (http://www.physorg.com/news63291916.html)

"Педальный" тандем из двух молекул

Исследователям из Токийского университета (Япония) удалось синтезировать новый тип наноактюатора, который приводится в движение светом. Это открытие может помочь ученым создать сложные НЭМС, которые, возможно, будут работать на световой энергии.

"Решение проблемы передачи и превращения разных видов энергии одного в другой в наноразмерном диапазоне — один из открытых вопросов наномеханики. Если нам удастся достаточно узнать о молекулах-двигателях, то на их основе можно будет создать более сложные наносистемы: нанороботы, механокомпьютеры и более сложные наномашины", — говорит ученый Казуши Кинбара из Токийского университета.

Оказывается, ученым из Японии удалось создать не просто новый тип актюатора, а полноценную молекулярную машину, копирующую работу двигателя внутреннего сгорания автомобиля. Работа двух молекул использует принцип работы кривошипно-шатунного механизма совместно с поршнем, только на атомарном уровне (рис. 3).

Основа двигателя — молекула ферроцена $(Fe(C_5H_5)_2)$, два кластера порфирина цинка и цепочки азобензена. Эти цепочки связывают ферроцены с порфириновыми кластерами, в итоге молекула походит более на механизм с педалями, чем на "чистый" кривошип. Под воздействием ультрафиолетового излучения азобензен изменяет форму на цис-изомер, это эффект так называемой фотоизомерии, когда фотоны вызывают обратимое изменение структуры молекулы. Это приводит к тому, что две "педали" изменяют свое положение в пространстве. При освещении молекулы обычным светом, а не ультрафиолетом, "педали" возвращаются на прежнее положение.

На "педалях" ученые установили специальные присоединительные места для адгезии с другой мо-



Рис. 3. Вот так работает наномотор

лекулой, которая выступает в качестве ротора. Как только педали начинают двигаться, молекула-ротор тоже приходит в движение.

Большим достижением Кинбара считает тот факт, что движение в наномоторе передается не через ковалентную химическую связь. Дальнейшие планы ученых — создать более сложную молекулярную машину, состоящую из большого числа наномоторов.

Источник: Nanotechweb.org: Molecular machine twists other molecules (http://www.nanotechweb.org/articles/news/5/3/15/1)

Молекулярный автомобиль обзавелся мотором

Ученые из университета Райса сконструировали первую автономную мобильную наносистему молекулярную машину, передвигающуюся с помощью световой энергии. Ученые прикрепили к ранее созданному молекулярному наноавтомобилю мотор-лопасти из молекулы р-карборана.

Ранее эта же команда ученых создала наименьшую в мире движущуюся наномашину (см. № 2, 2006 г. нашего журнала), которая ездит как настоящие легковые машины. До сих пор ученым не удавалось сделать что-то сложнее простого актюатора или сенсора.

На самом деле "рама машины" — большая молекула-наносистема, состоящая из трехсот атомов. Она похожа на настоящий автомобиль только наличием четырех "колес" и способом передвижения.

В качестве колес наносистеме служили фуллерены (молекулы C₆₀), связанные химическими связями с "каркасом" машины. Ширина рамы наноавтомобиля — 4 нм, чуть больше, чем толщина ДНК. Он имеет раму и оси, к которым и присоединены химическими связями фуллерены.

Другие научные группы уже строили объекты нанометрового масштаба, напоминающие внешне автомобили, однако это первый пример, когда полученная молекулярная конструкция сначала действительно катилась (даже не скользила, а именно ехала!) по поверхности так же, как катятся на колесах автомобили.

Первоначально ученые придумали оригинальный метод приведения в движение наномашины: они нагрели ее до 200 °С, что вызвало вращение фуллеренов на химических связях, соединяющих их с "рамой машины". От вращения четырех молекул наносистема пришла в движение и смогла катиться по плоской золотой поверхности.Однако на "ездовом полигоне" (рис. 4) от нагрева ездили все машины, что делает невозможным управление отдельными автомобилями. А это будет необходимо при организации молекулярных конвейеров



Рис. 4. Полигон с машинками под микроскопом

и транспортных линий, осуществляющих перемещение промежуточных продуктов в нанофабриках будущего. Теперь же ученые решили поставить на каждую машину индивидуальный "мотор", питающийся световой энергией.

Но для этого потребовалось заменить фуллерены-колеса базовой рамы на молекулы карборанов, содержащие углерод, водород и бор. Такая альтернативная конструкция позволила ученым "навесить мотор".

Мотор-актюатор машины (рис. 5) представляет собой крестообразную лопасть, установленную в центре рамы, которая, вращаясь, отталкивает ее от субстрата (все той же золотой подложки). Похоже это на принцип действия древних колесных паро-



Рис. 5. Наномашина с мотором



Рис. 6. Сравнение наномашины с обычным авто

ходов, однако несмотря на архаичность принципа действия он все же остается довольно эффективным в наноразмерном диапазоне.

"Лопастный нанодвигатель", правда, нереверсивный, может вращаться только в одну сторону, поэтому машинка будет ехать только вперед. Однако управляемое передвижение молекулярной машины — это большой прогресс в области наносистемотехники!

Наномашины настолько малы (как упоминалось выше, их размер составляет 3—4 нм), что 20 000 устройств можно поместить на торце человеческого волоса.

Руководил исследовательской группой уже известный нам профессор из Райса Джеймс Тур (James M. Tour). Детальное описание наномашины и исследование ее характеристик появилось впервые в выпуске Organic Letters от 13 апреля.

Молекулярная конструкция ротора была разработана Бен Ферингой (Ben L. Feringa), ученым из нидерландского университета. Этот ученый долгое время работал с командой профессора Тура, поэтому исследователям удалось создать столь сложное устройство. Сравнение наномашины с обычным авто приведено на рис. 6.

Не отстает в развитии нанотехнологий и российская наука. Недавно был проведен конкурс на лучший проект по использованию высокопроизводительной кластерной системы, проводившийся компаниями Sun Microsystems и "Т-Платформы".

Так вот, первое место и самый мощный призовой 10-узловой кластер T-Fire20 от компании "Т-Платформы" и корпорации Sun Microsystems достались Химическому факультету МГУ за проект "Прототипы наномобилей на основе высокопроизводительных расчетов методами молекулярного моделирования". Нашим ученым удалось смоделировать на кластерных системах тот самый наноавтомобиль профессора Тура. Только вот синтезировать его "вживую" им пока не удается. Для его синтеза необходимо финансирование, которое пока не открыто. Сейчас же химфак МГУ намерен моделировать различные комбинации из молекул — "осей" и "колес", чтобы получать более скоростные или грузоподъемные модели наномобилей.

Источники: Rice Media: Rice scientists attach motor to single-molecule car (http:// www. media.rice.edu/ media/ NewsBot.asp?MODE = VIEW&ID = 8448&SnID = 397273424), Rice scientists build world's first single-molecule car (http: // media.rice.edu/media/NewsBot.asp?MODE = VIEW &ID = 7850)

Анализ крови за две минуты — реальность, а не фантастика

Представьте себе устройство размером с мобильный телефон, которое может всего лишь по одной капле крови выдать ее полноценный анализ. Удивительно, правда? И это устройство уже существует благодаря разработкам ученых из Калифорнийского университета (США) в рамках программы Национального исследовательского института биомедицинских космических приложений (National Space Biomedical Research Institute — NSBRI).

Устройство разрабатывалось в первую очередь для космонавтов. При длительных полетах в космос необходимо проводить систематические анализы крови. И чем быстрее это будет сделано, тем лучше. Анализатор дает информацию об образце в среднем за две минуты.

Сегодня же для того, чтобы сделать анализ крови нужна лаборатория, оснащенная специальным оборудованием и достаточно большое количество самой крови. Такой анализ провести в космосе крайне затруднительно, поэтому прибор-анализатор будет очень востребован при пилотируемых миссиях на Марс или Луну.

"Мы просто миниатюризировали счетную машину-анализатор, которая используется в обычных лабораториях, и получили устройство, не превышающее размерами мобильный телефон", — говорит Таи, профессор из Калифорнийского университета. Счетчик-анализатор крови обычно разделяет и идентифицирует ее отдельные компоненты: эритроциты (красные кровяные тельца), белые кровяные тельца, липиды, белки и кислород.

Таи и его коллеги работали сначала с миниатюрными жидкостными вентилями, насосами и микрожидкостными каналами, а затем специалисты из NSBRI решили использовать эти достижения для разработки миниатюрного и быстродействующего анализатора (рис. 7).

Исследователи давно занимаются производством нанометровых трубок (необычных углеродных нанотрубок) для того, чтобы создать работоспособные биологические лаборатории-на-чипе.

В результате у Таи и его коллег получилась настоящая лаборатория-на-чипе, способная по капле крови проводить анализ. Вначале капля крови поступает в смесительный резервуар, в котором она смешивается с антикоагуляторами, препятствующие ее свертыванию, а затем в специальный контейнер, где кровь "разжижается", что позволяет затем посчитать отдельные клетки. После разбавления крови образец поступает в сепаратор, где клетки распределяются по размерам и направляются по отдельным конвейерам далее. "Сепарация осуществляется благодаря гидродинамическим свойствам крови как жидкости", — говорит Таи.

Таи и его коллеги уверены, что анализатор можно переоборудовать для идентификации разных молекул, вирусов и бактерий, что позволит получить более полную информацию о крови, чем та, которую можно получить с помощью традиционного анализа.

"Этот чип очень гибкий, его можно использовать в различных применениях анализа. Можно даже проводить онкологические тесты раннего обнаружения рака, если добавить к счетчикам белковые маркеры раковых клеток, — продолжает Таи. — Сейчас мы этим и занимаемся — улучшаем струк-



Рис. 7. Экспресс-анализатор

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 7, 2006

туру чипа и пробуем его для диагностики различных заболеваний".

Источник: EurekAlert: Building a hand-held lab-on-a-chip to simplify blood test (http://www.eurekalert.org/ pub_releases/2006-04/nsbr-bah041106.php)

Нанотрубки VS графен: битва за будушее наноэлектроники

Похоже, что у углеродных нанотрубок появился серьезный конкурент в области наноэлектроники. Предполагаемый конкурент тоже состоит из углерода, более того — это развернутая в двумерный лист нанотрубка или же наноматериал графен. Впервые графен был синтезирован профессором Эндрю Геймом и его коллегами из Университета Манчестера (США) совместно с командой доктора Новоселова из Черноголовки (Россия). Данный наноматериал представляет собой "развернутую" нанотрубку. Это пленка из атомов углерода, представляющая собой одну молекулу. Журналисты окрестили новый наноматериал "двумерным", так как он толщиной в один атом углерода.

Профессору Гейму впервые удалось отделить атомарный слой от кристалла графита. При этом отделенные атомы сохранили связь друг с другом, образовав "заплатку" из ткани толщиной в один атом. Исследователи назвали новый материал двумерным фуллереном. Графен стабилен, очень гибок, прочен и проводит электричество.

Благодаря уникальным свойствам углерода в пространственной решетке графена последний характеризуется высокой мобильностью электронов, что делает графен очень перспективной основой наноэлектронных устройств.

Свойства графена довольно неплохо изучены. Так, ученые из Georgia Institute of Technology (США) совместно с исследователями из Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) (Франция) создали графеновые транзисторы и простейшую логику на их основе. Исследователи полагают, что благодаря их достижениям появится новый класс графеновой наноэлектроники с базовой толщиной транзисторов до 10 нм.

"Вообще мы предполагаем создать наноэлектронные устройства, которые не имеют ничего общего с современной микроэлектронной базой, — говорит Вальт Де Хир (Walt de Heer), профессор из Georgia Tech's School of Physics. — Наша основная цель — создание наноэлектронных устройств, работающих на эффекте дифракции электронов, а не на обычном эффекте диффузии, использующемся повсеместно. Если нам удастся это сделать, то в нашем распоряжении будут быстродействующие устройства с низким энергопотреблением", — говорит Вальт. Работа ученых поддерживается не только Национальным Научным Обществом США (U. S. National Science Foundation), но и корпорацией Intel, что не удивительно в свете последних достижений в области наноэлектроники. Вальт и его коллеги провели доклад о своих достижениях 13 марта на встрече Американского физического общества (American Physical Society).

Поскольку углеродные нанотрубки проводят электричество практически без сопротивления, то, естественно, они до сих пор являются кандидатами № 1 для транзисторной базы. Более того, кроме одиночных транзисторов на их основе уже создан полностью функционирующий логический контур. Однако ряд трудностей мешает перейти уже сейчас на массовое применение нанотрубок в микро- и наноэлектронике.

Вот основные причины, не пускающие нанотрубки в "большую электронику":

- невозможность синтезировать нанотрубки четко определенных размеров, характеризующиеся определенными свойствами. Другими словами, при синтезе каждый раз получаются нанотрубки с другими свойствами, разбег которых не позволяет использовать их серийно;
- производственно-технологические трудности интеграции нанотрубок в серийные микроэлектронные устройства;
- нагрев и значительные потери энергии в местах соединения "металл—нанотрубка" из-за высокого сопротивления соединения.

Де Хир, посвятивший не один год изучению свойств однослойных углеродных нанотрубок, уверен в том, что они — только первая ступень в развитии наноэлектроники, а конечная обязательно приведет к графеновой базе.

Одним из серьезных преимуществ графена перед нанотрубками является простота производства интегральных схем на графеновой основе. Для этого не потребуется сложного оборудования, и устройства на новой основе можно будет изготавливать в больших количествах с помощью уже хорошо известной нанолитографии.

"Нанотрубка — это тот же графен, только развернутый в плоский лист. Свойства, химический состав и морфология однослойной углеродной нанотрубки повторяет морфологию графена на плоскости", — комментирует Де Хир. Так полагает не только Де Хир, но и другие ученые, занимающиеся нанотрубками, графеном и другими наноматериалами вплотную.

"Так, интегральная микросхема, составленная целиком только из одного графена, не будет иметь мест соединений с проводниками, а значит, будет меньше тепловых потерь и лишнего энергопотребления.



Рис. 8. Графеновый транзистор

"Для производства графена необходима вафля карбида кремния. При нагреве ее в вакууме атомы кремния покидают вафлю, оставляя один большой слой графена. Далее на графеновую вафлю наносится слой обычного фоторезиста, который используется при производстве микроэлектроники. И с помощью оптической или электронно-лучевой литографии ученые вытравили шаблоны на графеновой вафле, создав матрицу транзисторов (рис. 8). Завершается процесс травлением вафли — так удаляются лишние слои графена.

"Мы использовали нанолитографию точно так, как если бы мы делали не графеновую, а обычную кремниевую микросхему, — говорит Де Хир. — Технология осталась та же, только изменился материал. Это, я считаю, огромное преимущество графена по сравнению с теми трудностями, которые мы испытывали, изготавливая микроэлектронику на основе нанотрубок".

Используя традиционную электронно-лучевую литографию, ученым удалось создать структуры размерами около 80 нм, а затем, используя новый нанолитограф из Института Джорджии, им удалось спуститься вниз по размерной шкале до 10 нм.

Графеновые чипы показали высокую мобильность заряда — до 25000 см²/В · с. Также ученым удалось наблюдать когеренцию электронов при комнатной температуре, что свидетельствует о проявлении эффектов квантовой интерференции. Также исследователи планируют получить эффект баллистического транспорта в графеновых наноструктурах, но для этого им придется создать структуры, меньшие по размерам. Как мы уже говорили выше, на графеновой вафле Де Хиру удалось создать полностью графеновые полевые транзисторы. Кроме транзисторов, ученым удалось на базе графена сделать рабочее устройство квантовой интерференции — кольцевую структуру, которая будет полезна при управлении электронными волнами.

Де Хир работает с графеном с 2001 г. и получил грант от Intel в 2003 г. Как он сам считает, работа на "графеновом поле" только начинается. Он и его коллеги успешно создают и исследуют новые структуры, но до массового применения графена еще далеко. "Мы заложили только основу графеновой электроники, а для получения конкретных результатов потребуются годы исследовательской работы многих ученых. Мы только в самом начале пути, но я не сомневаюсь, что этот путь приведет к успеху новых решений в наноэлектронике будущего".

Источник: EurekAler: Nanotubes VS Graphen chips (http:// www.eurekalert.org)

NaturalNano заставит замолчать мобильные телефоны

Компания NaturalNano успешно разработала новый состав на основе галлуазитовых нанотрубок, который при нанесении, например, на стены помещения, позволит блокировать сигналы сотовых сетей. Таким образом, в местах общего пользования (театрах, библиотеках и др.) вы сможете больше не услышать назойливые звонки.

Как сообщает компания NaturalNano, суть предложенной методики сводится к следующему. Основу "краски" составляют нанотрубки, полученные из глинистого минерала галлуазита (назван в честь бельгийского геолога Ж. Б. Омалиуса д'Аллуа) и заполненные мельчайшими наночастицами меди (рис. 9). Процесс нанесения такого состава на поверхность теоретически должен не сильно отличаться от обычной покраски.

Состав NaturalNano будет востребован, прежде всего, в различных общественных местах, где звонки мобильников и громкие разговоры нежелательны или даже запрещены. Это могут быть кинотеатры, учебные заведения, больницы и пр. Примечательно, что вместе с нанокраской предлагается использовать специальное фильтрующее устройство фирмы AMBIT. Такое устройство сможет блокировать одни сигналы и пропускать другие (например, звонки в службы экстренной помощи). Более того, при необходимости фильтр позволит передавать внутрь помещения весь беспроводной трафик, например, во время антракта в театре.

Некоторые эксперты уже высказываются с критикой в адрес высокотехнологичной краски. Так,



Рис. 9. Галлуазитовые нанотрубки

Джо Фаррен, представитель ассоциации Wireless Association, утверждает, что любые схемы выборочной блокировки сигналов незаконны. Однако Роберт Кроули, сотрудник AMBIT, отмечает, что незаконны только активные устройства (глушилки), тогда как краска является пассивной. А систему передачи сигналов AMBIT в защищенные помещения можно сравнить с ретранслятором. Ассоциация мобильной связи США уже выступила с протестом против применения подобной краски в театрах и кинозалах.

Компанией успешно получен патент на изобретение (USA patent No. 6,885,845), что открывает двери к производству нанокраски.

Необходимо отметить, что с 1999 г. российской фирмой "Тико" выпускается краска "Тиколак", защищающая от воздействия электромагнитного излучения в широком диапазоне частот (от нескольких герц до десятков гигагерц). На низких частотах излучение в основном отражается, а на высоких и сверхвысоких частотах — поглощается, переходя в тепло. Изменением химического состава краски, который держится в секрете, можно управлять соотношением "поглощение—отражение". "Тиколак" нетоксичен, что подтверждено гигиеническим сертификатом Минздрава РФ и в 20 раз дешевле, чем зарубежные аналоги.

Источник: NaturalNano — NaturalNano Licenses Key Patent for Selective Wireless Access in RF Shielded Environments (http://www.naturalnano.com/pr/2006/0 2/ 02132006_AMBIT.html)

Сморшивающиеся липидные капсулы для доставки лекарств

Исследователи Иллинойского университета под руководством профессора Сахраои Чаийеба, изучающие механизмы "сморщивания" мембран, разработали новый способ доставки лекарств по требованию. Они создали чувствительные к изменениям температуры капсулы, способные высвобождать препараты именно тогда, когда это необходимо, и с требуемой скоростью.

Для создания капсул размером от 10 до 100 мкм исследователи помещали препарат внутрь двухслойной липидной мембраны, определенные липидные молекулы которой сшивались с помощью процесса полимеризации. При охлаждении до 10 °С такие капсулы сморщиваются и схлопываются, как лопнувший воздушный шар, что приводит к высвобождению препарата. Скорость выхода препарата из капсулы может быть отрегулирована числом возникающих морщин, которое зависит от степени полимеризации мембраны.

Проблема заключается в том, как охладить капсулы, не повредив при этом окружающие ткани. Ее решение может заключаться в использовании недавно изобретенных наночастиц, которые могут быть охлаждены с помощью размагничивания.

В настоящее время исследователи заняты разработкой способа покрытия липидных капсул наночастицами, которые охлаждали бы их при воздействии магнитного поля, вызывая тем самым высвобождение препарата.

Источник: Интернет-журнал "Коммерческая биотехнология" — http://www.cbio.ru/)

Составил Ю. Свидиненко

Информация



Göteborg, Sweden 17th-20th September 2006

WELCOME TO EUROSENSORS XX GÖTEBORG, SWEDEN

Since its establishment in 1987, the Eurosensors series of conferences are the only European forum to cover the entire field of Sensors, Actuators and Microsystems. The Eurosensors conference provides an excellent opportunity to bring together European scientists and engineers from academy, national research institutes and companies to present and discuss the latest results in the general field of solid-state sensors, actuators, microsystems and nanosystems.



The conference goals are to stimulate interaction and knowledge exchange between the delegates in a friendly atmosphere.

The 20th anniversary of EUROSENSORS will be celebrated in Göteborg, the second largest city of Sweden, situated on the beautiful south west coast. With its relaxed and friendly atmosphere, Göteborg proudly lives up to its reputation of having the charm of a small town with all the opportunities of a big city. EUROSENSORS XX will be held at the Chalmers Conference Centre, on the premises of the Chalmers University of Technology, located near the city centre.

Professor Peter Enoksson Head of the Solid State Electronics Laboratory Department of Microtechnology and Nanoscience (MC2) Chalmers University of Technology

Contact details

Congrex Sweden AB Box 5078 402 22 Göteborg Phone number: +46 31 708 60 00 Fax number: +46 31 708 60 25

Please contact for questions regarding: Registration / Hotel: eurosensors2006@gbg.congrex.se Abstract / Paper submissions: eurosensorsabstract@gbg.congrex.se Scientific Programme: eurosensors@mc2.chalmers.se

CONTENTS

Balakhonova M. L. Problems of the Realizability of Innovative Projects in Sphere of Research and Developmental Development...

In this article the role and value of innovative projects in the field of creation and perfection of scientific and technical potential of the state are shown, the basic problems of realizability of innovative projects in the sphere of research and development are formulated and offers aimed at their implementation are worked out. The analysis of the structure and volumes of internal expenses for researches and development on various sources of financing is made and the complex of actions directed at creation of conditions for normal development of the innovative environment and increase of a level of realizability of innovative projects in the sphere of research and development is worked out.

Yashin K. D., Osipovich V. S., Zolotoi S. A., Latsapnev E. V. Microcosmic Apparatuses and Quantum Keys.....

The review of the modem scientific and technical publications of microcosmic apparatuses and quantum cryptography is presented in this work. The initial concept and scheme of moving information in space quantum cryptography, which are characterized by orbital groups of microcosmic apparatuses using as the retransmitters of quantum-cryptographic keys between earth stations, space stations and operating satellites are given.

Also the main stages of information transmition during the space communication with application of quantum keys are described.

Timoshenkov S. P., Zotov S. A., Kalugin V. V., Britkov O. M., Rubchits V. G., Vorotnikov A. A., Svetlov-Prokop'ev E. P. Influence of Pores and Nanolayers on Stiffness of Bracket of Silicon Sensitive Element Mems....

The question of movement of pores formed on an interface bounded of silicon wafers of sensitive elements (SE) of microelectromechanical systems (MEMS) used by manufacture SE MEMS is considered. Influence of pores on work of sensitive elements MEMS is described. The design procedure of process of closing of pores, based on the theory of change of volume and the form of a pore and movement of her centre of gravity near to border of thin a silicon layer caused by volumetric diffusion of vacancies is offered. Influence superficial nanolayers on stiffness of bracket of silicon sensitive element MEMS is analysed.

Belonenko M. B., Sasov A. S. Polarization Dynamics in Ferroelectrics

of order-disorder type ferroelectrics described by general Using Hamil-tonian with relax absorption. Using Hamiltonian we got the equation in pseudospin variables that describes polarization evolution. This equation was solved with the sonic wave equation. We analyzed results and compared them with experimental data.

Samoylovich M. I., Belyanin A. F. Formation of Nanostructured Films of Diamond-Like Materials .

Formation of diamond-like material films being obtained by plasma-methods occurs under condition of morphological instability of boundary growth forms. Coherence-breaking for such solid-state systems can be carried out by different relaxation mechanisms that is conditioned on ability to decrease total energy by internal sub-structure selection, coherent phases relative position and optimization of morphological forms. Sputtering methods, especially magnetron sputtering, are irreplaceable for the formation of nanostructured films on large substrate area of amorphous and polycrystalline materials

Krivoruchko A. V., Topolov V. Yu. Prediction of the Hydrostatic Pie-zoelectric Response of Anisotropic 1–3 Poled Ferroelectric Ceram-

Butyvskaya M. V. Chemical-Mechanical Polishing as a Method of Ac-40

Results of research of process of chemical-mechanical polishing (CMP) are presented to technologies of creation of structures "silicon on insulator⁶ (SOI), to the received by means of ultrasonic and atomic-power microscopy. These researches are directed on optimization of technological process of manufacturing of structures SOI, that, hence, conducts to depreciation of structures.

Laletin R. A., Burkhanov A. I., Sigov A. S., Vorotilov K. A. Particularities of Low- and Infralow Frequency Dielectric Response of BST Thin Films Prepared at Different Annealing Temperatures ...

A study of low- and infralow frequency properties of $Ba_{0.7}Sr_{0.3}TiO_3$ thin films annealed at the temperatures of 750, 850 and 900 °C was car-ried out in a wide measurement range of the temperatures (-180 °C to +100 °C), frequencies (0.1 Hz to 10 kHz) and amplitudes of the electric field (15 kV/cm to 255 kV/cm). It was revealed that in the samples the eigentic relavation, tunied for lower hatercognic structures, took place gigantic relaxation, typical for layer heterogenic structures, took place. It was established that the more high annealing temperature (900 °C) results in a shift of relaxation region down to the lower mesurement temperatures (or up to the more high mesurement frequencies).

Galyshkov A. I., Pankratov O. V., Pogalov A. I., Saurov A. N., Suchanov V. S., Ugolnikov S. V. The Methods of Design and Cali-bration Microelectronic Piezoresistive Transducers of Acceleration . 45 The methods of design and calibration of microelectronic piezore-

sistive transducers of acceleration have been presented. Transducer been made in experimental manufacture. Its have optimum construction, good mechanical and metrology specifications.

is produced using surface micromachining. Stiffness model of the elastic suspension and gyroscope model are developed.

Gorshenina T. A., Shmelev G. M. Non-Equilibrium Quasi-Two-Di-

It is shown that the sample being open-circuited in transverse (with respect to current j_x) direction the second-order nonequilibrium phase transition consisting in the spontaneous appearance of a transverse electric field (E_y) is possible. The field E_y , as a function of temperature proves to show the features of spontaneous polarization in ferro-electrics. "The Curie temperature" is defined by the value of the applied field E_{γ} .

For foreign subscribers:

Journal of "NANO and MICROSYSTEMS TECHNIQUES" (Nano- i mikrosistemnaa tehnika, ISSN 1813-8586) Joint-stock company MK-Periodica. E-mail: info@periodicals.ru Tel.: +7(495) 684-5008. Fax: +7(495) 681-3798 The journal bought since november 1999.

Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev

ISSN 1813-8586.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(495) 269-5510. E-mail: nmst@zknet.ru; http://www.microsystems.ru

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4/1. Телефон редакции журнала (495) 269-5510. E-mail: nmst@zknet.ru Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства

в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т. Н. Погорелова. Технический редактор И. С. Павлова. Корректор Е. В. Комиссарова

Сдано в набор 4.05.2006. Подписано в печать 14.06.2006. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 8,82. Уч.-изд. л. 10,0. Заказ 925. Цена договорная

Отпечатано в Подольской типографии — филиал ОАО "ЧПК", 142110, г. Подольск, ул. Кирова, 15