

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 4 (93) ✧ 2008

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий
и информационных технологий Российской Академии наук

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России

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.

Мокеров В. Г.

Никитов С. А.

Сигов А. С.

Чаплыгин Ю. А.

Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И.

Андреевский Р. А.

Антонов Б. И.

Арсентьева И. С.

Астахов М. В.

Быков В. А.

Волчихин В. 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.

Колобов Ю. Р.

Кузин А. Ю.

Мокров Е. А.

Нарайкин О. С.

Норенков И. П.

Панич А. Е.

Панфилов Ю. В.

Петросянц К. О.

Петрунин В. Ф.

Путилов А. В.

Пятышев Е. Н.

Сауров А. Н.

Серебряников С. В.

Сухопаров А. И.

Телец В. А.

Тимошенков С. П.

Тодуа П. А.

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Безменова М. Ю.

Григорин-Рябова Е. В.

Чугунова А. В.

Учредитель:

Издательство

"Новые технологии"

Издается с 1999 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Зеленограду — 50 лет	2
Гольцова М. М., Юдинцев В. А. МЭМС: большие рынки малых устройств . . .	9

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Ковалевский А. А., Лабунов В. А., Строгова А. С., Шевченко А. А. Исследование закономерностей транспорта водорода в порошковый кремний	13
Мустафаев Ар. Г., Мустафаев Аб. Г. Проблемы масштабирования затворного диэлектрика для МОП-технологии	17
Мясникова Т. П., Гершанов В. Ю., Захарченко И. Н., Гармашов С. И. Оптические спектры пленок BiPS_4 на стекле и Si при фазовых переходах	22
Непочатенко В. А. Ориентационное согласование фаз при формировании тонкой фазовой границы в несобственных сегнетоэластиках	24

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Астахов М. В., Дутов И. В., Родин А. О. Взаимодействие аморфного ферромагнитного микропровода с электромагнитным излучением	28
Лихошерст В. В., Распопов В. Я. Контур жесткой обратной связи в микромеханических приборах и расчет его параметров	30
Никулин А. В. Анализ влияния геометрических размеров упругих элементов на собственные параметры микромеханических гироскопов LL-типа	34
Карташев В. А., Карташев В. В. Исследование процесса электрохимической заточки иглы туннельного микроскопа	40

НАНОТЕХНОЛОГИИ И МОЛЕКУЛЯРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Пронин В. П., Пономарев А. Н., Хинич И. И., Чистотин И. А. Спектроскопия упругого отражения электронов как метод анализа элементного состава наноразмерных систем	45
---	----

ИНФОРМАЦИЯ

Микросистемы	49
Раткин Л. С. Нанотехнологический приоритет российской науки	78
От совместных проектов — к совместным конкурсам	79
Contents	80

Аннотации статей журнала и требования к оформлению статей доступны на сайте журнала:
<http://www.microsystems.ru>. E-mail: it@novtex.ru

ПОДПИСКА:

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

Зеленограду — 50 лет

ИЗ ИСТОРИИ¹

3 марта 1958 года был принят основополагающий для Зеленограда документ — постановление Совета Министров СССР № 248 "О строительстве нового города в пригородной зоне Москвы, в районе станции Крюково Октябрьской железной дороги".

Создание города-спутника преследовало цель обеспечить рассредоточение населения Москвы и улучшение его жилищных условий. В постановлении были заложены

и основные критерии будущего строительства, определившие впоследствии его интерьер, особенности и название, а именно: "применение приемов свободной планировки", "использование естественного рельефа местности и существующей растительности".

В июле 1962 года вышло постановление ЦК КПСС и СМ СССР об организации в Зеленограде научно-исследовательского экспериментального и производственного

центра микроэлектроники (Научного центра), определившее всю дальнейшую судьбу Зеленограда. Инициатором и идеологом создания Научного центра выступил Александр Иванович Шокин — крупный ученый, инженер и организатор промышленности и науки. А. Шокин сформулировал основные принципы организации Научного центра:

— научный центр должен иметь комплексный характер с организацией в его составе всех необходимых НИИ и опытных заводов, обеспечивающих полный цикл исследования, разработки и производства интегральных схем, материалов и технологий электроники;

— научный центр должен иметь статус головной организации в стране по микроэлектронике;

— предприятия электронной промышленности должны стать градообразующей системой развития Зеленограда.

Эти принципы были успешно реализованы в течение чрезвычайно короткого периода времени. Уже в 1965 г. на предприятиях электроники работало несколько тысяч человек, было введено в строй 60 тыс. кв. м производственных площадей. В 1966 году в составе Центра микроэлектроники действовали шесть НИИ, пять опытных заводов. К началу 1971 года научно-промышленный комплекс имел уже около 300 тыс. кв. м производственных площадей, а общая численность работающих на его предприятиях составляла 12,8 тыс. чел.

Возрастающие потребности в интегральных схемах для аппаратуры, особенно в оборонной отрасли, в скором времени превысили возможности опытных заводов Зеленограда. Перед руководством отрасли встала задача созда-



¹ Материал взят из альманаха "Инновационный Зеленоград".

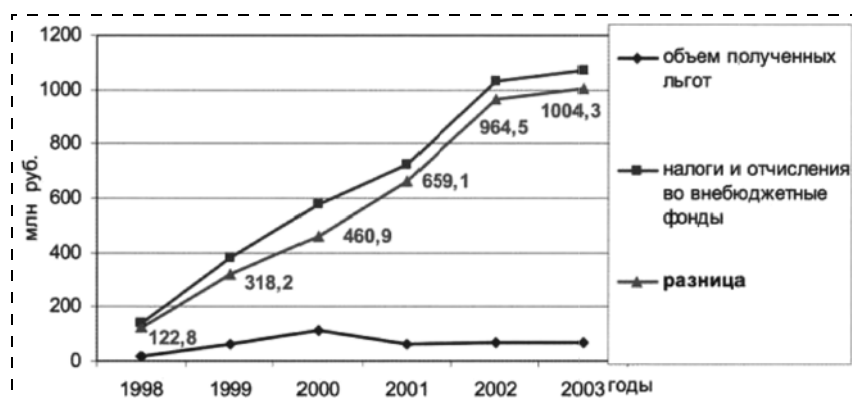
ния новых научных и серийных заводов в различных городах СССР. Такие предприятия были построены на Украине, в Грузии, Азербайджане, Белоруссии, Молдавии, Прибалтике и в большинстве своем включены в состав Научного центра, в 1978 году ставшего головным научно-производственным объединением отрасли. В рамках этого объединения обеспечивался замкнутый технологический цикл, начиная от прикладных исследований и заканчивая серийным производством изделий для конечных потребителей.

НПО "Научный центр" непрерывно наращивало свои научно-технические и производственные возможности. Ежегодный прирост выпускаемой продукции составлял около 25 %, что являлось одним из самых высоких показателей в промышленности страны.

Динамичное развитие научно-технического потенциала Научного центра обеспечивалось за счет централизованного государственного планирования, управления, финансового и ресурсного обеспечения всех направлений научной и производственной деятельности.

В 1965 году в Зеленограде был организован Московский институт электронной техники. Создание этого образовательного центра позволило обеспечить предприятия электронной промышленности, в первую очередь в Зеленограде, наиболее важным видом ресурсов — высококвалифицированными специалистами, представляющими собой интеллектуальный потенциал наукоемкой отрасли народного хозяйства. Изначально эффективность подготовки специалистов в МИЭТ определялась тесными взаимосвязями с предприятиями Научного центра. Такие взаимосвязи включали преподавательскую деятельность ведущих ученых и разработчиков предприятий Зеленограда в МИЭТе, практику студентов и аспирантов института в НИИ и на заводах Научного центра.

Помимо МИЭТа кадровое обеспечение зеленоградских предприятий электронной промышленности осуществлялось за счет МФТИ, МГУ, МИФИ и др. Это позволило использовать результаты и достижения других научных школ в области микроэлектрони-



ки, увеличить приток новых перспективных мыслей и научных идей, сформировать масштабный интеллектуальный потенциал в Зеленограде, а также благоприятно повлиять на формирование и развитие социально-культурной атмосферы города.

ЦЕНТР ЭЛЕКТРОНИКИ

В середине 80-х годов в Зеленограде полностью сложился комплексный центр отечественной электроники, обеспечивающий современной элементной базой и аппаратурой на ее основе возрастающие потребности страны и народного хозяйства в целом.

Об уровне выпускаемых в начале 80-х годов изделий микроэлектроники объективно можно судить по публикациям в ведущих американских научно-технических изданиях, неоднократно отмечавших, что в области перспективной электронной техники разрыв между западными странами и Советским Союзом сократился с десяти лет (в 70-е годы) до 1,5—2 лет. Советские системы вооружений, созданные с применением микроэлектронных изделий Зеленограда, стали одними из лучших в мире и обеспечили высокий уровень обороноспособности страны.

Предприятия электронной промышленности Зеленограда, являясь градообразующими, оказали огромное влияние на все социально-экономические и демографические тенденции в городе. Одновременно с развитием научно-промышленного комплекса росла потребность в трудовых ресурсах как в промышленности, так и в других сферах городской социально-производственной инфраструктуры. Население Зеленогра-

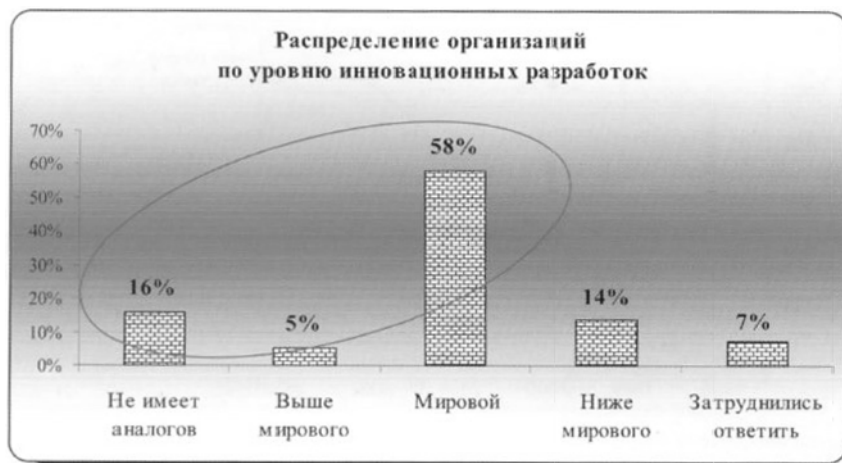
да быстро увеличивалось за счет естественного прироста и за счет привлечения специалистов из других регионов. К 1986 году в городе проживало уже 156 тыс. человек, на заводах и в НИИ Зеленограда работало более половины трудоспособного населения, что является явным признаком градообразующего характера научно-промышленного комплекса.

ОТ ЭПОХИ ПЕРЕМЕН — К СТАБИЛЬНОСТИ

Социально-экономические преобразования 90-х годов не могли не сказаться на состоянии научно-производственного комплекса электроники Зеленограда. Системообразующие связи между предприятиями были утрачены, централизованное финансирование прекратилось, предприятия лишились гарантированных госзаказов. В результате этого объем производства зеленоградских предприятий упал по сравнению с докризисным 1991 годом до 46 %, численность работающих сократилась в 3 раза.

В декабре 1997 г. Правительством Москвы и Мосгордумой было принято решение о создании в Зеленограде территориально-промышленной зоны с особым статусом — особой экономической зоны регионального уровня. В этот период поддержка предприятий электронной промышленности Зеленограда из бюджета города Москвы осуществлялась преимущественно путем предоставления им налоговых льгот, в результате чего ее получали практически все предприятия.

ТЕОС "ОЭЗ "Зеленоград" была одной из немногих особых зон в Москве, работавших успешно. По показателям деятельности ТЕОС "ОЭЗ "Зеленоград" обеспечен рост



налогов в бюджеты и отчислений во внебюджетные фонды, при этом их общая сумма за все время ее функционирования почти в 10 раз превысила сумму полученных за это время льгот (3923,7 млн руб. и 393,9 млн руб. соответственно).

Льготное налогообложение позволило не только приостановить спад производства, но и добиться стабилизации и роста экономических показателей. За время существования особой зоны (с 1998 по 2003 г.) объем производства в действующих ценах вырос в 15 раз, налогооблагаемая прибыль — в 26 раз, численность работающих — в 1,3 раза.

Другим важным результатом этой поддержки явилось то, что подавляющее большинство научных организаций и промышленных предприятий сохранило направленность своей деятельности.

После ликвидации особой зоны в 2003 году крупные промышленные предприятия Зеленограда получают поддержку целевым (адресным) методом — путем участия в реализации проектов в рамках Комплексной программы промышленной деятельности в Москве.

Результаты деятельности предприятий электроники в этот период показали высокую эффективность форм поддержки, используемых при реализации Комплексной программы. Так, рост объема производства продукции и научных услуг был достаточно высок, и за 3 года произошло его удвоение — с 7,9 до 15,7 млрд руб. (в действующих ценах), темпы роста заработной платы работающих составляли 20–40 % и опережали темпы инфляции. Темп роста налогов и отчислений составлял 10–20 %, их прирост за

2004–2006 гг. составил 692 млн руб., при этом объем налогов, зачисляемых в городской бюджет, вырос в 2,2 раза.

В то же время такие темпы роста нельзя воспринимать как бум в электронной промышленности Зеленограда. Скорее, сейчас наступил период стабилизации в деятельности предприятий. Этот вывод базируется на том, что, несмотря на ощутимые успехи предприятий, кардинальных, качественных скачков в их развитии не произошло. В электронике Зеленограда еще ощущаются отрицательные последствия реформ 90-х годов. И неслучайно отечественная электронная компонентная база в аппаратуре для систем вооружения составляет всего 35 %, а изделия микроэлектроники и того меньше — всего 10 %.

В настоящее время осуществляется комплекс мер, направленных на вывод отечественной электронной промышленности на мировой уровень.

Безусловно, большое значение в выполнении этой задачи имеет государственно-частное партнерство, реализуемое в Москве и округе. Правовой базой для этого является Комплексная программа промышленной деятельности в Москве. В рамках этой программы в 2004–2006 годах было реализовано 9 проектов зеленоградских предприятий, направленных на модернизацию, расширение и создание новых производств. Финансирование этих проектов осуществлялось на долевой основе, из бюджета города Москвы на эти цели было выделено около 500 млн руб. Предприятия округа достаточно активно участвуют в других региональных программах

(в Московской программе НИОКР), а также в федеральных программах развития промышленности и инновационной сферы.

МАЛЫЙ ИННОВАЦИОННЫЙ БИЗНЕС

В развитии инноваций в Зеленограде важную роль играет малое высокотехнологичное предпринимательство. Его роль в последние годы существенно возрастает как по размеру налоговых поступлений в бюджеты разных уровней, так и по объемам и качеству выпускаемой продукции.

Малый бизнес Зеленограда играет существенную роль в его экономическом развитии. В округе насчитывается порядка 2800 малых предприятий и 2200 индивидуальных предпринимателей. Таким образом, в городе около пяти тысяч субъектов малого предпринимательства — по численности это 75 % от количества всех предприятий Зеленограда. Всего в малом бизнесе занято порядка 30 000 человек.

Продуктивному развитию малого инновационного бизнеса и предпринимательства в Зеленограде способствует ряд административных, экономических и исторических факторов и предпосылок, среди которых:

- наличие производственных помещений, которые предоставляются и могут предоставляться в аренду, на крупных промышленных предприятиях Зеленограда с имеющейся производственной инфраструктурой: вода, сжатый воздух, вентиляция, транспортные магистрали, удобный подъезд и т. п.;
- имеющийся опыт по поддержанию малого бизнеса у соответствующих отделов префектуры, структур поддержки малого бизнеса, зеленоградского Технопарка, инновационно-промышленного комплекса МИЭТа;
- наличие достаточного числа научно-технических малых предприятий, приемлющих концепцию научно-технологического парка, а также отдельных лиц — держателей инноваций или потенциальных создателей инноваций.

Научно-технический уровень большинства зеленоградских инновационных компаний очень

высок. Они имеют собственные ноу-хау, патенты и авторские свидетельства на изобретения. Такие предприятия, как "Нанотехнология-МДТ", "Элвис", "Центр компьютерной голографии", находятся в ряду лучших не только в России, но и в мире.

Разработки малых инновационных предприятий ЗелАО демонстрируются на престижных международных и национальных выставках.

Например, на научно-промышленной ярмарке в Ганновере, СеВІТ, ежегодном салоне изобретений "Эврика" в Брюсселе.

В последние годы качественный рост малого инновационного бизнеса в ЗелАО становится все более заметным. Увеличивается количество зеленоградских малых предприятий, готовых к выходу на внешние рынки как по уровню производимой продукции, так и по оборотам средств.

На малых предприятиях встает вопрос сертификации продукции на соответствие международным стандартам качества, усиливается заинтересованность в поиске деловых партнеров за рубежом.

Среди малых предприятий округа значительная часть научно-технических и производственных компаний является экспортоориентированной. Многие занимаются производством и поставками собственной продукции, ведут разработку новых приборов и технологических решений, ряд фирм ведет внешнеэкономическую деятельность в соответствии с партнерскими соглашениями и договорами о партнерстве.

Подавляющее большинство организаций ведет активное взаимодействие с партнерами и заказчиками в странах СНГ: Беларуси, Молдове, Азербайджане, Узбекистане, Казахстане, странах Балтийского региона. Многие (62 %) осваивают рынки Западной и Восточной Европы, причем чаще всего зеленоградские предприятия контактируют или ведут совместные проекты с предприятиями Германии, Франции, Италии. Порядка 20 малых предприятий вовлечены в экспортно-импортные отношения со странами Северной Америки (преимущественно США, Канада), налажены

прямые деловые контакты со странами Азии.

С каждым днем рынок предъявляет все более высокие требования к конкурентоспособности, качеству производимой малыми предприятиями продукции и оказываемых ими услуг. Задача сегодняшнего дня — реализация системы мер по сертификации малых предприятий на соответствие требованиям ИСО, внедрение в их работу современных маркетинговых технологий и аутсорсинга, создание условий для объединения малых предприятий в кластеры, вовлечение их в технико-внедренческую зону.

Развитие малого предпринимательства в инновационной сфере, продвижение малого бизнеса на рынок инноваций, совершенствование механизмов поддержки экспорта наукоемкой продукции — одна из приоритетных задач, поставленных в столичной и окружной Комплексных целевых программах поддержки и развития предпринимательства на 2007—2009 годы, в соответствии с которыми ведется поддержка малого предпринимательства в Москве. Открытие двух венчурных фондов, Фонда содействия кредитованию малого бизнеса, предоставление бюджетом города субсидий по инновационным проектам, создание Агентства поддержки инновационного предпринимательства, технопарков, бизнес-инкубаторов — все это шаги, направленные на поддержку столичного высокотехнологичного предпринимательства.

Целый ряд программ по финансированию инновационных проектов и НИОКР на протяжении 13 лет реализует Фонд содействия

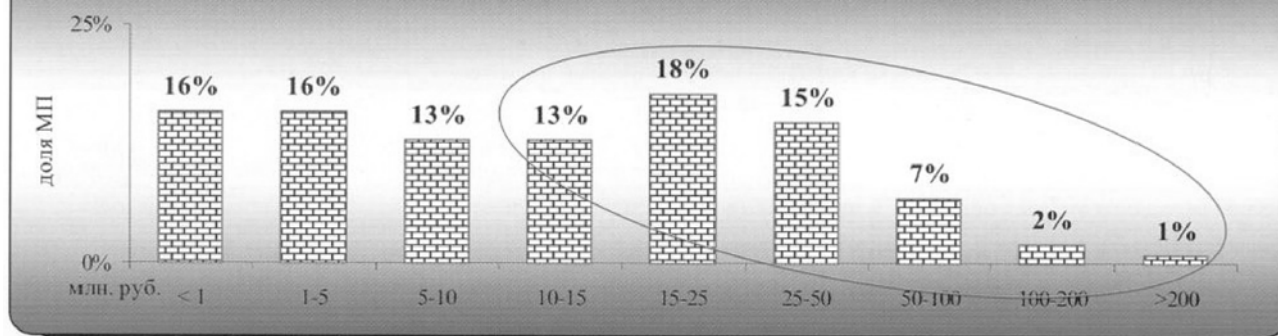
развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд Бортника). С Фондом с 2003 года активно взаимодействует Зеленоградский ИТЦ, ключевой элемент в инновационной структуре МИЭТ. ИТЦ ежегодно привлекает к участию в программе "СТАРТ" начинающие малые компании.

В округе в целях поддержки и роста инновационного предпринимательства реализуются проекты по созданию бизнес-инкубатора для начинающих научно-технических фирм, создается специализированная территория малого предпринимательства "Зеленоград", успешно работает система организаций окружной инфраструктуры поддержки бизнеса: ОАО "Технопарк-Зеленоград", Центр развития предпринимательства ЗелАО г. Москвы, ТАРП-Зеленоград, Муниципальный фонд поддержки малого предпринимательства, Зеленоградский филиал МТПП, научно-образовательный и инновационный комплекс МИЭТа. В то же время существующие элементы инфраструктуры округа не обеспечивают в полной мере поддержки инновационной деятельности предприятий и организаций. Существующие разрывы в инновационном цикле и переходе от фундаментальных исследований через НИОКР к коммерческим технологиям требуют создания целостной инфраструктуры инновационной деятельности.

Поэтому в конце 2007 года в Зеленограде принята Концепция создания инфраструктуры поддержки инновационной деятельности, цель которой — создание благоприятной среды для зарождения, создания и реализации ин-



Распределение выручки от реализации продукции (работ, услуг)



новаций путем создания новых и развития существующих элементов инфраструктуры (центров коллективного пользования, центров трансфера технологий, центров сертификации и пр.), а также создание единой системы управления данной инфраструктурой. Программа рассчитана на срок до 2012 года. Предлагаемые ею преобразования, а также комплекс финансовых, экономических и организационных мер, позволят при поддержке Правительства Москвы создать целостную, эффективно функционирующую инфраструктуру поддержки инновационной деятельности в округе, существенно увеличить число инновационно-активных предприятий, обеспечить инновационное развитие промышленного производства.

ИННОВАЦИИ В ЦИФРАХ

Инновационную деятельность в округе осуществляет порядка 300 малых предприятий. На малых предприятиях промышленности и научно-технической сферы занято более трети персонала от общего числа работающих в малом бизнесе.

Инновационную деятельность большинство малых предприятий ЗелАО (58 %) ведет в области информационных технологий и электроники. При этом остальная часть, а это немногим меньше половины (42 %), занята по другим направлениям: производственным и экологическим технологиям, разработкам в области новых материалов и химических продуктов, технологий энергосбережения и живых систем, деятельности по модернизации систем, техники и механизмов.

Инновации присутствуют не только в таких традиционных от-

раслях, как промышленность и научно-техническая сфера. В сфере торговли тоже есть место инновационным решениям, так, например, в деятельности сети магазинов "Утконос" применяется инновационная технология продаж.

Сравнительный анализ финансово-экономических показателей деятельности 100 инновационных компаний Зеленограда в 2004—2006 гг. показывает положительную динамику развития сферы инноваций в округе. По итогам 2006 г. средняя выручка инновационных предприятий в фактических ценах составила 24,4 млн руб., что на 54 % больше, чем в 2004 г. При этом размер имущества (активов) в среднем увеличился на 43 %. Превышение темпов роста выручки над темпами роста активов свидетельствует об эффективном использовании вложенных ресурсов.

Две трети инновационных малых предприятий (68 %) в 2006 году получили выручку от реализации продукции (работ, услуг) в размере более 5 млн руб. В других отраслях такими доходами может похвастаться от 15 до 56 % фирм.

По размеру средней выручки инновационные предприятия уступают предприятиям оптовой торговли и промышленности округа, но по количеству предприятий, получающих за год в виде выручки более 15 млн руб., они занимают лидирующее положение — 43 % предприятий (от 4 до 35 % по другим отраслям).

По размеру налога на прибыль, который уплачивают малые инновационные предприятия, их обгоняют только предприятия промышленности. Параллельно с ростом величины выручки предприятий увеличиваются и их выплаты

в бюджет: величина уплачиваемого налога на прибыль увеличилась на 24 % в фактических ценах.

Но предприятия в эти годы вкладывают значительные средства в собственное развитие. Так, за 2 года средняя величина активов инновационных малых предприятий увеличилась на 43 %, в том числе средняя величина основных средств — на 76 %.

Практически все предприятия ведут деятельность с положительной рентабельностью.

Результаты 2005—2006 гг. показали, что инновационные предприятия в большинстве являются финансово устойчивыми и, что характерно, менее других отраслей зависимы от стороннего капитала. Конечно, скорость оборачиваемости их капитала, в том числе оборотного, не так высока, что связано с длительностью процесса инновационных разработок. Ведь особенности инновационного бизнеса заключаются в больших затратах на разработку и продвижение, а также в длительном периоде развития. Но при этом, как было отмечено выше, и рентабельность этой деятельности значительно отличается от других сфер бизнеса.

По итогам опроса руководителей инновационных организаций округа, подавляющее большинство — 79 % малых инновационных предприятий — готовы не только выйти на мировой рынок, но и занять на нем лидирующие позиции (у 5 % уровень разработок превышает мировой, а 16 % разрабатывают уникальную продукцию). Остальные инновационные предприятия (21 %) разрабатывают неконкурентоспособную на мировом рынке продукцию либо затрудня-

ются с оценкой уровня разработок.

За 2007 год крупными предприятиями электронной промышленности Зеленограда произведено продукции и услуг на 9,4 млрд руб. в фактических ценах предприятий (135,6 % к 2006 г.). Объем реализованной продукции в фактических ценах составил 10 млрд руб. (129,2 % к 2006 г.), по предприятиям электронной промышленности — 9 млрд руб. (131,6 % к 2006 г.). Более 20 процентов от общего объема произведенной составляет оборонная продукция. В течение 2007 года зеленоградскими предприятиями получена суммарная прибыль в размере около 1 млрд рублей.

Численность населения, занятого на крупных предприятиях промышленности, составляет 8,7 тыс. человек, науки — 3 тыс. человек, средняя заработная плата на предприятиях промышленной сферы — 20,6 тыс. руб., в науке — 21,9 тыс. руб.

ВПЕРЕДИ — БОЛЬШАЯ РАБОТА

Сложившаяся в отечественной электронной промышленности ситуация объективно оценена руководством страны, и появилось понимание, что электроника — это локомотив, который может потянуть за собой всю экономику России. Свидетельством этому служит то, что в 2006—2007 гг. в Зеленограде проведен ряд важных мероприятий федерального масштаба, руководители государства посетили зеленоградские предприятия электроники.

В мае 2006 года МИЭТ вошел в число победителей конкурса в рамках приоритетного национального проекта "Образование" по отбору образовательных учреждений высшего профессионального образования, внедряющих инновационные образовательные программы. МИЭТ получил грант на два года в размере 816 млн руб.

19 сентября 2006 г. в Зеленограде прошла расширенная выездная коллегия Минпромэнерго РФ, в которой приняли участие министр промышленности и энергетики В. ХРИСТЕНКО и президент Российского союза промышленников и предпринимателей

А. ШОХИН. На коллегии были рассмотрены стратегия инновационного развития электронной промышленности, вопросы государственно-частного партнерства в области электроники.

17 октября 2006 г. Президент РФ В. ПУТИН провел в Зеленограде заседание Совета по науке, технологиям и образованию, на котором были обсуждены вопросы партнерства науки, образования и бизнеса в реализации курса государства на техническое перевооружение экономики.

12 декабря 2007 года ОАО "НИИМЭ и Микрон" (предприятие IT-концерна "Ситроникс") в очередной раз подтвердило свое негласное звание центра микроэлектроники страны. Такую высокую оценку получили город и завод из уст первого вице-премьера РФ С. ИВАНОВА во время торжественного открытия фабрики по производству микросхем с топологическим уровнем 0,18 микрон, что соответствует мировому уровню, и в ближайшее время намерено реализовать проект по организации производства изделий микроэлектроники с топологическими размерами 0,065 микрона, что позволит ему выйти на передовые позиции в мире.

Что касается создания новых производств, то в этом направлении в последние годы произошли существенные подвижки.

Компания "Ситроникс" совместно с немецкими партнерами запустила фабрику по производству смарт-карт (sim-карты для сотовых телефонов, банковские и транспортные карты и др.).

Завод "Микрон" открыл цех по производству чип-модулей. Ранее российские компании, выпускающие смарт-карты, использовали лишь зарубежные чип-модули.

ОАО "Ангстрем" проводит работы по созданию производств изделий микроэлектроники уровня 0,18 мкм.

ЗАО "НПК КБ "Взлет" совместно с Российским кардиологическим научно-производственным комплексом и клиникой нервных болезней Московской медицинской академии им. И. М. Сеченова создан комплекс медицинского оборудования: "Вакуумный аппаратный комплекс "Космея-М" для операций на работающем сердце,

аутогемотрансфузер "Агат", "Переносной вакуумный массажер". Комплекс "Космея" удостоен ряда наград, в том числе Гран-при в Нюрнберге и Хорватии.

ЗАО "Нанотехнология МДТ" разработало и осуществляет поставку серии сканирующих зондовых микроскопов и зондовых нанолaborаторий.

Компанией "Смарт-карты" (с сентября 2007 г. ООО "Ситроникс Смарт Технологии") открыта линия по производству смарт-карт.

ОАО "Квант" открыло первую в России производственную линию по сборке персональных компьютеров фирмы Fujitsu Siemens Computers.

ФГУП "НИИ физических проблем им. Ф. В. Лукина" осуществило запуск линейного и малого кольцевого ускорителя источника синхротронного излучения — синхротрона.

2 августа 2007 г. постановлением Правительства Российской Федерации утверждена Федеральная целевая программа "Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008—2010 годы".

Эта программа также предусматривает участие зеленоградских предприятий. Достаточно сказать, что из 8 направлений программы 2 направления возглавляют зеленоградские организации — ответственным исполнителем по направлению "Наноэлектроника" является НИИ физических проблем, а по направлению "Наноиндустрия" — Московский государственный институт электронной техники.

При этом программой предусмотрено выделение средств на техническое перевооружение этих организаций в объеме 950 и 410 млн руб. соответственно.

В настоящее время Государственный научный центр "НИИ физических проблем" и компания "Нанотехнология-МДТ" выходят на завершающую стадию проекта создания Центра высоких технологий "Зеленоград" на базе источника синхротронного излучения, который обеспечит предприятиям как Зеленограда, так и России в целом возможность осуществлять исследования, разработку и производство изделий наноэлектроники.

В целом участие зеленоградских предприятий в нацпроекте по развитию нанотехнологий будет достаточно широким: здесь и фундаментальные исследования в области нанотехнологий, и разработка и производство оборудования, включая нанофабы, и прикладные исследования в области нанoeлектроники и многое другое.

Это вселяет оптимизм в части создания реальных предпосылок для ускоренного развития электроники и зеленоградской микроэлектроники в частности. И этот оптимизм уже находит реальное подтверждение.

21 сентября 2006 года Правительство РФ приняло за основу проект стратегии развития электронной промышленности до 2025 года, а 28 декабря одобрило Федеральную целевую программу "Национально-технологическая база на 2007—2011 годы". Объем финансирования этой программы составит порядка 100 млрд руб., в т. ч. из бюджета будет выделено 40 млрд руб. Одной из основных задач, которые будут реализованы в рамках этой программы, является полное преодоление в течение 2—3 лет технического отставания в уровне производства электронной компонентной базы. Другой задачей является резкое увеличение доли российских производителей на внутреннем рынке. В первую очередь это касается специальной и военной техники — в течение 5 лет предполагается увеличить эту долю до 50 %. Долю использования отечественной электронно-компонентной базы в аппаратуре гражданского назначения предполагается довести до 15 %.

Таким образом, создаются реальные предпосылки для ускоренного развития электроники и микроэлектроники в частности. Это-

му в немалой степени будет способствовать также созданная в 2006 г. особая экономическая зона технико-внедренческого типа "Зеленоград".

В результате конкурса город Москва получил право на создание в Зеленоградском административном округе особой экономической зоны технико-внедренческого типа. 21 декабря 2005 г. Правительство Российской Федерации приняло постановление № 779 о создании технико-внедренческой особой экономической зоны "Зеленоград".

В развитие этого постановления Правительство Российской Федерации и Правительство Москвы 18 января 2006 г. подписали соответствующее соглашение.

18 января 2006 года в Москве подписано соглашение о создании на территории г. Москвы (в Зеленограде) особой экономической зоны технико-внедренческого типа. Соглашение подписали министр экономического развития и торговли Российской Федерации Г. ГРЕФ и мэр Москвы Ю. ЛУЖКОВ.

Целью создания технико-внедренческой особой экономической зоны "Зеленоград" является развитие инновационной деятельности в области высоких технологий посредством коммерциализации научных разработок и создания наукоемких производств новых видов конкурентоспособной продукции.

В качестве основных направлений деятельности резидентов в ТВЗ "Зеленоград" было заявлено 20 научно-технических направлений в области микроэлектроники и электроники, телекоммуникаций и связи, информационных технологий.

В обеспечение технико-внедренческой деятельности дальнейшее развитие получит инновационная инфраструктура. Инфраструктурные проекты по развитию сети дизайн-центров, центров коллективного пользования современным оборудованием и новейшими технологиями, центров целевого инкубирования инновационных компаний, научно-образовательных центров в совокупности обеспечат резидентам ТВЗ условия для осуществления прорывных разработок и производства на их основе конкурентоспособной научно-технической продукции.

Экспертная оценка показывает, что к окончанию деятельности ТВЗ "Зеленоград" (в 2025 г.) деятельность организаций-резидентов будет характеризоваться следующими значениями показателей:

- выручка резидентов достигнет 30 млрд руб., численность работающих — 15 тыс. чел.;

- общий экономический эффект от создания ТВЗ "Зеленоград" составит около 30 млрд руб.

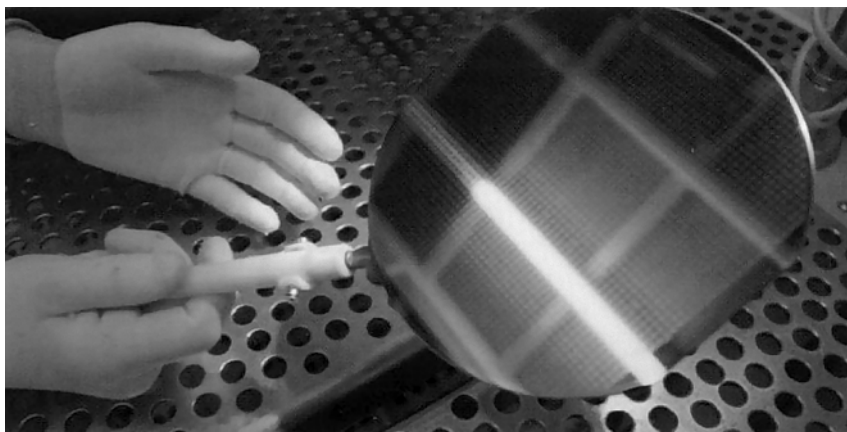
Наряду с этим планируется решить ряд социальных проблем:

- будет максимально использован интеллектуальный, научно-технический и технологический потенциал, созданный в Зеленограде за все годы его развития;

- будет обеспечено производственными площадями дальнейшее развитие научно-технической и производственной деятельности;

- будут решены проблемы занятости жителей Зеленограда и транспортная.

Создание в округе технико-внедренческой зоны не только внесет существенный вклад в инновационное развитие его экономики, но и решит ряд проблем, существующих на региональном уровне. Наиболее перспективный путь развития территорий, на которых нет таких природных полезных ископаемых, как нефть или газ, — это развитие инновационной деятельности. Москва, и Зеленоград как ее часть, является такой территорией, и развитие здесь наукоемких технологий — наиболее эффективный путь дальнейшего повышения уровня жизни населения, перехода экономики города на качественно новую ступень развития.



М. М. Гольцова, В. А. Юдинцев

МЭМС: БОЛЬШИЕ РЫНКИ МАЛЫХ УСТРОЙСТВ

Рассмотрены состояние и перспективы развития МЭМС, причины, препятствующие реализации МЭМС-технологии и развитию рынка МЭМС-устройств, и пути их преодоления.

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) — небольшие устройства, объединенные с полупроводниковыми приборами и сочетающие характеристики электронных схем и механических компонентов, — появились на рынке в 80-е годы прошлого столетия, хотя принцип их построения был предложен еще в 50-е годы. Но только сейчас они, наконец, нашли широкий спрос. Об этом свидетельствует тот факт, что в 2005 году общий объем средств, вложенных в развитие МЭМС и микросистем, превысил 1 млрд долл. Сегодня интерес к МЭМС-технологии обусловлен не только их техническими возможностями, но и коммерческими перспективами. Многочисленные рынки сбыта МЭМС сулят значительные прибыли. Важный стимул для развития этой технологии — возможность объединения с бурно развивающейся нанотехнологией. Но, несмотря на рост продаж МЭМС, по темпам развития эта технология существенно уступает полупроводниковой, которая стремительно завоевывала рынки электронных систем на протяжении всей своей истории. Что же препятствует реализации потенциалов этой перспективной технологии и развитию рынка МЭМС-устройств? Какие усилия прилагаются для решения существующих проблем? Каково современное состояние и перспективы развития МЭМС?

Проблемы коммерциализации

К основным причинам, сдерживающим промышленный выпуск МЭМС-устройств, относятся следующие.

1. Отсутствие всего необходимого для производства МЭМС технологического оборудования. Так, нет нужных установок глубокого травления кремниевых пластин, установок двухстороннего совмещения и соединения нескольких пластин. Разработка такого оборудования — процесс длительный и дорогостоящий. Как правило, этим занимаются малые фирмы с ограниченными финансовыми возможностями и небольшим коллективом квалифицированных специалистов.

2. Недостаточное понимание механических свойств МЭМС и зависимости материалов, используемых при их производстве, от технологического процесса.

3. Относительно низкая точность контроля толщины МЭМС-структур (как правило, она должна быть выше $\pm 10\%$, принятых в полупроводниковой промышленности); непонимание взаимодействия

Таблица 1

Освоение массового производства первых МЭМС-приборов

Изделие	Год освоения, выпуска		Инкубационный период, лет
	первого образца	серийных приборов	
Датчик давления	1961	1984	23
Датчик ускорения:			
пьезорезистивный	1970	1995	25
емкостной	1977	1995	18
Головки струйных принтеров	1977	1996	19
Дисплеи (DLP)	1979	2001	22

механической и электрической стабильности структур; отсутствие технологии вертикального монтажа пластин, критичной для многих МЭМС-приборов.

4. Отсутствие специализированных недорогих устройств тестирования промышленных МЭМС, особенно оборудования, имитирующего механические усилия, например давление.

В результате сроки освоения массового производства первых приборов (совокупный объем выпуска — 1 млн шт.) оказались длительными (табл. 1). Правда, эти сроки аналогичны "инкубационным" периодам других технологий, таких как воспроизведение видеоизображения, сотовая связь и спутниковое телевидение. К тому же сейчас срок между окончанием НИОКР и освоением промышленного производства первых образцов МЭМС составляет три—шесть лет, а для новых приборов, изготавливаемых по современной технологии, — два—три года.

Что предпринимается для поддержки коммерциализации МЭМС-технологии? Какие уроки удалось извлечь за столь длительный период ее развития?

По данным отчета о состоянии промышленности, выпускающей МЭМС-устройства и системы, на 2006 год, опубликованном в журнале *Small Times*, для ее успешного развития производители должны усилить меры по продвижению этой технологии на рынок. Чтобы сформировать ресурсы, требуемые для выпуска МЭМС, необходимо понять, что нужно потребителю. Дело в том, что на начальном этапе развития компании-разработчики МЭМС-устройств и систем в основном открывали высококвалифицированные специалисты в области полупроводниковой техники под девизом "сделай что-нибудь новое, и это завоеует рынок". В результате сейчас практически все поставщики выпускают МЭМС по собственной технологии, считая, что единственно верное решение — идти "своим путем" (*"My Way"*). Производителям МЭМС следует проводить политику полупроводниковых фирм — оперативный, качественный и недорогой "ответ" на нужды потребителя. Для быстрой коммерциализации МЭМС-технологии компаниям-разработчикам целесообразно отказаться от собственного производства в пользу так называемых "чистых" заводов (*foundries*), подобных фирмам TSMC или Chartered Semiconductor, или в пользу контрактных производителей.

Но есть и положительные моменты. За прошедший длительный этап развития инфраструктура

промышленности МЭМС-устройств существенно улучшилась. Появились производители специализированного промышленного оборудования — EV Group, Jenopik, STS и Suss MicroTec. В результате изготовители смогли отказаться от применения модифицированного технологического оборудования, предназначенного для производства полупроводниковых приборов. Кроме того, появились компании, специализирующиеся в области средств проектирования МЭМС (Conventor, IntelliSense и MEMSCAP). Большая часть поставляемых на рынок МЭМС изготовлены на пластинах диаметром 150 мм, хотя пока еще многие выпускают устройства на пластинах 100 мм. Вместе с тем ряд компаний (Dai Nippon Printing, Sony, STMicroelectronics) освоили крупномасштабное производство на 200-миллиметровых пластинах.

Пока в МЭМС-индустрии, несмотря на активную деятельность в последние пять лет Международной ассоциации производителей полупроводникового оборудования и материалов (*Semiconductor Equipment and Materials International* — SEMI), существует дефицит стандартов. Только в середине 2005 года был выпущен первый стандарт по МЭМС-технологии — "Руководство по конструированию, производству и сборке стандартных средств ввода-вывода для жидкостных микросистем". К сожалению, сейчас это лишь один из трех стандартов, относящихся к МЭМС-технологии. Для справки: в полупроводниковой промышленности действуют более 700 стандартов. Чтобы ускорить коммерциализацию МЭМС-технологии, необходимо разработать большое число стандартов на методы обработки, сборки и тестирования МЭМС-устройств. И этому должны способствовать такие объединения промышленников, как действующие в полупроводниковой индустрии организации SEMI и некоммерческий консорциум SEMATECH. В этой связи перспективна деятельность организованного Европейской комиссией в 1992 году Общества поддержки лидерства в области многофункциональных микросистем (*Network of Excellence in Multifunctional Microsystems* — NEXUS).

Важную роль в развитии МЭМС-технологии играют слияние и поглощение компаний. Правда, в результате мирового экономического спада 2001—2003 гг. особенно пострадали компании, приобретенные крупными фирмами, специализирующимися в области оптических телекоммуникационных систем. Тем не менее позиции "выживших" фирм сегодня укрепились, и многие из них становятся рентабельными. Сейчас с появлением большого числа

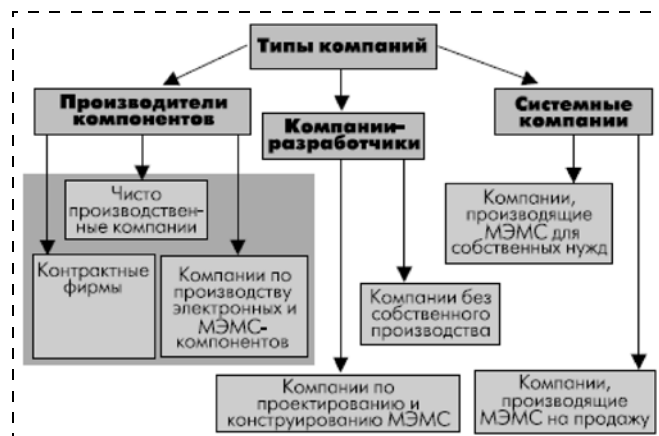


Рис. 2. Типы МЭМС-компаний

новых компаний производство МЭМС и микросистем постепенно наращивается. Положительные результаты дает и слияние фирм. Каково же сегодня состояние рынка МЭМС-устройств и микросистем?

Состояние МЭМС-промышленности

Согласно оценкам фирмы *Databeans*, занимающейся маркетинговыми исследованиями, рынок МЭМС в 2006 году составит ~6,3 млрд долл. В последующие 5 лет он увеличится более чем в 2 раза и достигнет ~15 млрд долл. при среднегодовых темпах прироста 20 % (табл. 2). Прогноз аналитической и консультативной компании *Yole Development* более сдержан: продажи МЭМС за период 2006—2010 гг. увеличатся с 5,1 до 9,7 млрд долл. при среднегодовых темпах прироста 15 % (рис. 1, см. третью сторону обложки). Это обусловлено ростом производства МЭМС и снижением его издержек.

По оценке *Yole Development*, сегодня на мировом рынке МЭМС присутствуют компании следующих типов (рис. 2):

- производители электронных систем, располагающие производственными участками по выпуску МЭМС. Это наиболее обширный круг игроков на рынке. Сейчас в мире насчитывается 200 таких компаний (в том числе и лидеры в области электронной техники — *Bosch, Delphi, Hewlett Packard*). Этот тип фирм, в свою очередь, можно разделить на производителей МЭМС для собственных нужд (к ним относятся такие крупные компании, как *Fujikura* и *Endevco*) и для продажи на рынке;
- компании-разработчики, которые можно разделить на компании без собственного производства МЭМС (*fabless*) и компании, занимающиеся про-

Таблица 2

Динамика мирового рынка МЭМС-устройств (данные компании *Databeans*)

Показатель	Динамика рынка								Среднегодовые темпы прироста, %
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Объем продаж:									
стоимостное выражение, млрд долл.	5,42	5,19	6,3	7,61	9,16	10,98	13,31	15,65	20
количественное выражение, млрд шт.	5,14	5,23	6,2	7,93	9,76	10,96	14,0	16,74	22
Средняя цена, долл.	1,06	0,99	1,02	0,96	0,94	1,0	0,95	0,93	—2

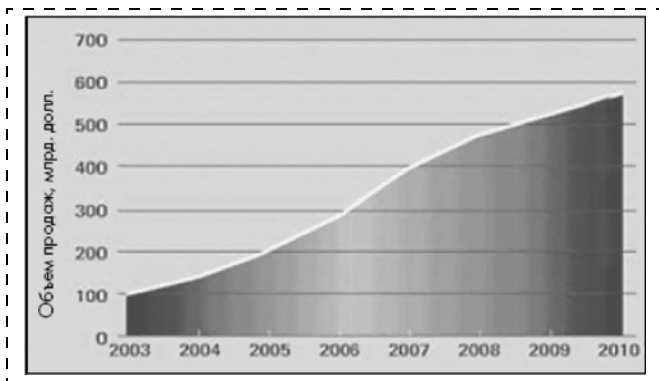


Рис. 3. Мировой объем продаж контрактных и чисто производственных фирм

ектированием и конструированием МЭМС и микросистем (*Lionix*). В последнее время наблюдается рост активности новых компаний *fabless*-типа, о чем свидетельствует деятельность компании *Akustica*, *Discera*, *Knowles*, *Lightconnect*;

- производители электронных компонентов, которые, в свою очередь, делятся на поставщиков МЭМС на рынок (к ним относятся такие ведущие полупроводниковые фирмы, как *Analog Devices*, *STMicroelectronics*, *Freescall*, *Infineon/Sensor*, *VTI Technologies*); "чисто" производственные компании (*foundries*), занимающиеся только выпуском МЭМС (*DALSA Semiconductors*, *AMP*, *IMT*, *Neostones*) и контрактные производители.

Согласно данным *Yole Development*, в 2005 году на долю компаний типа *foundries* и контрактных производителей приходилось ~ 3 % рынка МЭМС. Однако к 2010 году объем их продаж увеличится по сравнению с 2005 г. в 3 раза и превысит 500 млн долл. (рис. 3). Об этом свидетельствует и рост активности таких компаний. Продажи некоторых из них, по оценкам *Yole*, в 2006 году должны были превысить 20 млн долл. Эта категория фирм неоднородна (рис. 4, см. третью сторону обложки). В нее входят компании следующих типов:

- небольшие независимые компании-производители небольшой номенклатуры изделий (*APM*, *IMT*, *MEMStech*, *Micralyne*, *Microfab Bremen*, *Silex*, *Touch Microsystems*, *Tronuc's Microsystems*);
- небольшие независимые компании с диверсифицированным производством МЭМС (в основном собственной разработки). Это такие компании, как *Colibrys* и *MEMSCap*;
- средние фирмы по выпуску специализированных микросхем типа ASIC, освоившие и производство МЭМС (*China Resources Semiconductor*, *DALSA Semiconductor*, *Semefab*, *Xfab*);
- крупные электронные компании с небольшими производственными участками по выпуску МЭМС (*Honeywell*, *Matsushita*, *Electric Works*, *Olympus*, *Omron*);
- крупные полупроводниковые компании, предлагающие услуги по производству МЭМС (*Dai Nippon Printing*, *Sony*, *STMicroelectronics*).

Области применения МЭМС разнообразны. И они постоянно расширяются. Сейчас наиболь-

ший объем продаж приходится на долю головок струйных принтеров (25 % мирового рынка МЭМС). Вероятно, в ближайшем будущем с ними по объему продаж сравняются или превзойдут их устройства цифровой обработки света (*Digital Light Processing — DLP*). Уже сейчас на долю DLP приходится 50 % мирового рынка проекционных телевизоров. Устройства цифровой обработки света лидируют на рынке телевизоров высокой четкости с размером экрана 1 м и более. Компания *Texas Instruments* начала поставки трехмерных DLP для проекционной цифровой киноаппаратуры. И в то же время компания продемонстрировала небольшую микросхему DLP, которая позволит проецировать на большой экран изображения малогабаритных карманных устройств, скажем, дисплея мобильного телефона.

Продажи головок струйных принтеров, акселерометров для мешков безопасности и датчиков кровяного давления достигли насыщения, и темпы их прироста снижаются. Это "открывает дорогу" новым МЭМС-изделиям и новым областям их применения (радиочастотным переключателям для беспроводных систем связи, датчикам давления шин и гироскопам для различных автомобильных, аэрокосмических и промышленных систем). Одна из наиболее быстро развивающихся областей применения МЭМС-приборов — радиочастотные устройства. Разработкой и исследованиями в области ВЧ-МЭМС в мире заняты более 120 промышленных и научных организаций. По данным фирмы WTC, за период 2004—2009 гг. рынок ВЧ-МЭМС вырастет с 126 млн до 1,1 млрд долл. (или ~6 млрд шт. в количественном выражении). Сегодня приборы этого типа выпускают более 60 фирм, причем из них около 15 начали поставки промышленных изделий или образцов в 2005 году.

МЭМС наконец стали достаточно малогабаритными, дешевыми и прочными, чтобы завоевать мир бытовой электроники. Датчики перемещений, МЭМС-микросхемы микрофонов, гироскопов и акселерометров находят спрос у изготовителей сотовых телефонов, цифровых фотокамер, игровых приставок, портативных компьютеров. Уже в 2007 году доля МЭМС для бытовой аппаратуры составит 9 % от мирового рынка МЭМС (доля устройств для средств связи — 10 %, периферийных устройств компьютеров — 24 %). В последующие годы, согласно прогнозам экспертов, доля МЭМС, предназначенных для бытовой аппаратуры, возрастет до 22 %.

Только продажи МЭМС-микрофонов для сотовых телефонов, согласно прогнозам компании *Yole*, возрастут с 60 млн единиц в 2005 году до более 350 млн в 2008 году, общий объем их продаж составит 432 млн штук. А по данным компании *In-Stat*, более 85 % кремниевых MEMS-микрофонов, выпущенных в 2005 году, предназначались для сотовых телефонов. Остальные МЭМС-микрофоны нашли применение в цифровых камерах, MP3-плеерах и карманных компьютерах. Компания *Yole* оценивает продажи МЭМС-микрофонов в 2010 году в 800 млн долл. против 100 млн долл. в 2005 г. (рис. 5, см. третью сторону обложки). Правда, этот прогноз был подготовлен компанией в ходе анализа рынка за 2005 год. То-

гда практически единственными микрофонами на базе МЭМС, представленными на рынке, были изделия компаний *Knowless Electronics LLC* (США) и *Sonion MEMS A/S* (Дания). Так называемые кремниевые микрофоны этих компаний были выполнены соответственно на двух и трех микросхемах. К 2007 году *Knowless* продала более 82 млн МЭМС-микрофонов. При этом предполагается, что 8 % из них были предназначены для старших моделей мобильных телефонов. Ожидается, что в 2007 году на долю мобильных телефонов придется уже 20 % от объема продаж этих изделий.

Ситуация на рынке МЭМС-микрофонов может существенно улучшиться благодаря выпуску компанией *Akustica* однокристалльной микросхемы МЭМС-микрофона модели АКУ2000. Микросхема объединяет акустический преобразователь, аналоговый усилитель и сигма-дельта АЦП. С выхода АЦП снимается цифровой одноразрядный модулированный сигнал, нечувствительный к радиочастотам и электромагнитным помехам. Выполнена микросхема по стандартной КМОП-технологии. Для высвобождения встроенной диафрагмы микрофона требуется всего один дополнительный процесс, который проводится после того, как сформированы КМОП-устройства микросхемы. Возможность массового производства микросхемы с высоким выходом годных была подтверждена практическими результатами. Ее воспроизвели девять заводов с помощью одиннадцати различных методов — от дешевого 0,6-мкм процесса с алюминиевыми межсоединениями до 0,18-мкм процесса с медной металлизацией.

Гармонические искажения кремниевого микрофона АКУ2000 при уровне звукового давления 115 дБ не превышают 10 %. Тактовая частота — 1...4 МГц, отношение сигнал/шум — 55 дБ. Напряжение питания составляет 2,8...3,6 В, потребляемый ток в режиме пониженного потребления энергии — 75 мкА. Микросхема поставляется в монтируемом на поверхность корпусе с размерами 4 × 4 × 1,8 мм.

По мнению аналитиков, микросхема МЭМС-микрофона компании *Akustica* благодаря низкой стоимости (начальная цена 4 долл. за микрофон при закупке партии в 1 тыс. шт.), высоким характеристикам и простоте монтажа в систему найдет применение в различных цифровых бытовых системах — от ПК и карманных компьютеров до головных телефонов стандарта *Bluetooth* и сотовых телефонов. Правда, несмотря на свой потенциал, МЭМС-микрофоны (в том числе и изделия *Akustica*) не сразу найдут применение в сотовых телефонах. Такие крупные производители, как *Nokia*, *Motorola* и *Philips*, не спешат переходить на новую технологию. Сейчас они платят 95 центов за обычный микрофон с электретной мембраной и используют центральный процессор со встроенным речевым кодеком. Производителям МЭМС-устройств придется доказать, что их приборы позволят улучшить блок обработки речи, а на это уйдет несколько лет. Поэтому большинство аналитиков считает, что МЭМС-микрофоны найдут широкое применение в мобильных телефонах лишь к 2010 году. А пока благодаря развитию телефонии на базе IP (VoIP) наиболее перспективный рынок

для высококачественных МЭМС-микрофонов — ноутбуки и ПК. В моделях 2007 года каждый крупный поставщик ноутбуков предусмотрел, по крайней мере, одну VoIP-платформу. Так, компания *Fujitsu* намерена установить микрофон АКУ2000 в ноутбук модели LifeBook Q2010. Рост спроса на МЭМС-микрофоны для ПК стимулирует и выпуск компанией *Microsoft OC Windows Vista*, предусматривающей возможность применения в каждом компьютере до четырех микрофонов.

Интерес представляет и МЭМС-микрофон компании *Infineon Technologies*, выдерживающий температуру до 260 °С. К тому же, по утверждению разработчиков, микрофон по вибростойкости и ударопрочности превосходит традиционные устройства. Микрофон состоит из двух микросхем: МЭМС и специализированной микросхемы типа ASIC. Последняя преобразует изменения емкости гибкой кремниевой мембраны МЭМС, вызванные акустическими колебаниями, в электрические сигналы. Микросхемы смонтированы в плоский корпус с размерами 4,72 × 3,76 × 1,5 мм. Отношение сигнал/шум микрофона составляет 59 дБ, чувствительность — 10 мВ/Па. Потребляемый ток равен 70 мкА при напряжении питания 1,5...3,3 В. Благодаря своим характеристикам прибор компании *Infineon* перспективен для замены традиционных электретных микрофонов. А высокая термостойкость позволяет без труда непосредственно паять его на стандартную печатную плату. Таким образом, появляется возможность полной сборки бытовой техники на автоматизированных линиях крупносерийного производства.

Но не микрофонами едиными славен рынок МЭМС для бытовой аппаратуры. Производители мобильных телефонов обещают стать крупнейшими потребителями разнообразных МЭМС-устройств. МЭМС гироскопы, ВЧ-ключи и генераторы будут активно вытеснять на этом рынке кварцевые генераторы.

По мере совершенствования средств изменения масштаба изображения и разрешения цифровых фотокамер (до 3 и 5 мегапикселей) стабилизация изображения становится важнейшей задачей. Существующие средства стабилизации изображения достаточно громоздки, потребляют большую мощность и стоят дорого. Поэтому они не могут применяться в малогабаритных телефонах с фотокамерами. Удачное решение этой проблемы предложила образованная в 2003 году компания *InvenSense*. В середине 2006 года она выпустила устройство стабилизации изображения, выполненное на основе двухосевого МЭМС-гироскопа, которое позволяет существенно улучшить качество изображения, поскольку исключает эффект его размытия вследствие дрожания рук.

Новый гироскоп модели IDG-300 объединяет МЭМС-схему гироскопа с электронной КМОП-микросхемой регистрации угла поворота. МЭМС-гироскоп размещен на кристалле размерами 3,5 × 3,5 × 1 мм (размеры ближайшего конкурента — гироскопа на основе пьезокерамики компании *Murata* — больше). Монтируется устройство стабилизации в плоский безвыводной корпус QFN-типа размерами 6 × 6 × 1,45 мм. Гироскоп предназначен для фотокамер сотовых телефонов и фотоаппаратов. Гироскопы

компания *InvenSense* поставляются изготовителям комплектного оборудования Японии, Тайваня и США.

По оценкам специалистов компании, 35 % поставляемых сегодня на рынок фотоаппаратов оснащены средствами стабилизации изображения на базе МЭМС. К тому же, 40 % современных сотовых телефонов имеют цифровые фотокамеры. В результате спрос на средства стабилизации изображения существенно возрос. Кроме того, МЭМС-гироскопы могут улучшить точность GPS-систем, обеспечить создание более "разумных" интерфейсов "человек—машина", реагирующих на движения рук и жесты пользователя. Кристалл с МЭМС-гироскопом может монтироваться в корпус с трехосевым акселерометром, формируя малогабаритное дешевое пятиосевое устройство регистрации перемещения. А по утверждению специалистов компании *InvenSense*, к 2008 году промышленность освоит выпуск шестиосевых инерционных измерительных устройств. По площади и стоимости они будут сопоставимы с двухосевыми моделями, но смогут обеспечить более совершенный интерфейс "человек—машина".

Помимо рынка сотовых телефонов весьма перспективен для МЭМС-компонентов и рынок игровых платформ последнего поколения. Так, долго-

жданная платформа Wii фирмы *Nintendo* оснащена беспроводным устройством контроля перемещений, которое позволит преобразовать пассивную игру в интерактивную. Игроки смогут размахивать виртуальными теннисными ракетками, владеть невидимыми шпагами и брэнчать на воздушных гитарах. И все это благодаря акселерометрам компаний *STMicroelectronics* и *Analog Devices*, которые регистрируют движение и наклон руки игрока и реагируют на изменения их направления, скорости и ускорения. Компания *Nintendo* к концу 2006 года планировала продать только в США и Канаде 4 млн игровых платформ Wii.

Разработчики и изготовители МЭМС опровергли предубеждение о непригодности МЭМС для изделий широкого применения. Потенциальный рынок МЭМС-устройств для бытовой аппаратуры ограничен только воображением. Изделия на базе МЭМС становятся предметами повседневной жизни. Их все больше применяют в средствах обеспечения жизнедеятельности человека — от систем безопасности и биоконтроля до аппаратуры автоматизации дома, промышленного контроля, мониторинга окружающей среды и, конечно, бытовой техники и развлекательных систем.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

УДК 577.23:620.95

А. А. Ковалевский, канд. техн. наук,
В. А. Лабунов, д-р техн. наук,
А. С. Строгова, А. А. Шевченко, канд. техн. наук,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, г. Минск

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТРАНСПОРТА ВОДОРОДА В ПОРОШКОВЫЙ КРЕМНИЙ

Исследованы закономерности транспорта водорода в порошковый кремний. Установлено, что с увеличением насыщенной массы, соответственно, увеличивается и водородосорбционная емкость порошков. Химическая обработка нано- и микроструктурированных порошков кремния в смеси кислот или концентрированных щелочей способствует повышению их водородосорбционной емкости. Показано, что максимальная водородосорбционная емкость порошков кремния достигается при их плотности $0,8...1,0 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ при температуре гидрирования $373...673 \text{ К}$ и давлении водорода в проточной системе $0,1...1,0 \text{ МПа}$. Она может достигать 4 масс. %.

Введение

Работы по водородной энергетике во многих, особенно промышленно развитых странах, относятся к приоритетным направлениям развития науки и техники и находят все большую финансовую поддержку со стороны как государственных структур, так и частного капитала. Более того, мировые потребности в энергии растут с пугающей скоростью. Потребление первичной энергии ежегодно увеличивается на 1,8 %. Этот прогноз продержится до 2030 года [1].

В долгосрочной перспективе возобновляемые источники энергии станут важнейшим источником получения водорода [1—4]. Короче говоря, водород и электроэнергетика совместно предоставляют один из наиболее перспективных путей для получения возобновляемой энергии.

Хранение водорода — вполне стандартная задача для современной промышленности, в этой отрасли оно осуществляется безопасно и обеспечено необходимым сервисом. Кроме того, больше объема водорода можно безопасно аккумулировать в баллонах и подземных хранилищах. Однако применительно к транспортным средствам необходим существенный прорыв в технологии бортового хранения водорода для того, чтобы достичь пробега между заправками,

сравнимого с бензиновыми или дизельными автомобилями. Принципиально новые разработки и идеи в этом направлении уже ведутся [5–18], а новые транспортные системы проходят демонстрационную стадию.

Традиционно используемые емкости для хранения водорода в газовой и жидкой фазах могут быть существенно облегчены, упрочнены и удешевлены. Новейшие методы, основанные на адсорбции водорода в гидридах металлов, и в химических гидридах, а также на углероде, требуют дальнейших исследований и сравнительного анализа. Гидриды интерметаллических соединений используются, прежде всего, как системы, аккумулирующие водород. Образование гидридов таких металлов, как магний, цирконий, титан преимущественно происходит в результате химических реакций этих металлов с водородом при повышенном давлении [7–10]. Более эффективным методом является гидрирование так называемых механических сплавов, т. е. материалов, полученных путем механической активации смеси металлов [11]. Обратимое гидрирование интерметаллических соединений и различного рода сплавов на основе металлов, таких как редкоземельные металлы, магний, титан, цирконий, ванадий и 3-d переходных металлов, является одним из широко исследуемых способов решения проблемы аккумулирования водорода [1–18]. По значению водородной емкости сплавы на основе магния удовлетворяют современным требованиям, предъявляемым к металлгидридным системам, — более 5 масс. % водорода в гидридных фазах. Основными препятствиями использования магния в качестве рабочего материала в металлгидридных аккумуляторах водорода являются: высокая температура выделения и поглощения H_2 , склонность к спеканию, высокая чувствительность к примесям в водороде и к влаге, неудовлетворительная кинетика сорбции и десорбции водорода, а также истощение их запасов и высокая стоимость. В связи с этим следует искать им полную или частичную замену.

Учитывая тот факт, что кремний по запасам в земной коре занимает второе место, а в производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем накопилось и постоянно возобновляется большое количество отходов кремния, утилизация которых представляет большую проблему, мы пытаемся использовать его для синтеза и накопления водорода. Более того, исследований в этой области на должном уровне до настоящего времени не проводилось.

В данной работе предпринята попытка исследовать закономерности транспорта водорода в нано- и микроструктурные порошки кремния.

Методика эксперимента

Наноструктурные порошки кремния с размером частиц (кристаллитов) от 20 до 70 нм получали в результате разложения моносилана (SiH_4) в ВЧ-плазме в объеме камеры при давлении 20...40 Па в модернизированной плазменной установке "Плазма-600". Микроструктурные порошки кремния с размером частиц от 70 до 6000 нм получали в результате по-

мола отходов монокристаллического кремния в вихревой струйной акустической мельнице ВИМ-8. Размеры частиц и их количественное распределение по размерам определялось с помощью фотографий со сканирующего электронного микроскопа S-806 (Hitachi, Япония). Также средние размеры наночастиц определялись посредством дифракции рентгеновских лучей на кристаллическом ядре частицы. Насыщение порошка кремния водородом осуществлялось в графитовых (МПГ-8) карбидизированных кюветах с объемом отдельной ячейки 1 см в установке эпитаксиального наращивания УНЭС-2П-КА при температуре 297...723 К. Использовался водород с точкой росы 198...208 К. Количественное содержание водорода оценивалось по разнице массы кюветы до и после насыщения. Взвешивание проводилось на аналитических весах SETRAL-200S с точностью 10^{-6} .

Воспроизводимость опытов оценивалась по критерию Кохрена в результате статистической обработки данных с достоверной вероятностью 0,97.

Результаты и обсуждение

Многочисленные экспериментальные результаты показали, что поглощение водорода микро- и наноструктурными порошками кремния зависит от толщины слоя и насыпной массы порошка. На рис. 1 (кривая 1) представлены данные по поглощению водорода микро- и наноструктурными порошками кремния. Объем насыпного порошка составлял 0,785...1,570 см³.

Из этих данных следует, что микро- и наноструктурные порошки кремния с увеличением насыпной массы повышают свою водородосорбционную емкость. Увеличение насыпной массы, как и объема, порошка приводит к повышению его поглощательной способности к водороду.

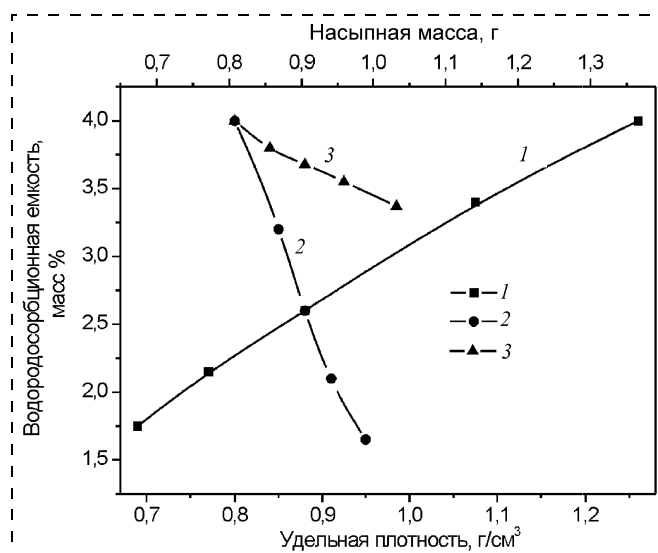


Рис. 1. Закономерность изменения водородосорбционной емкости микро- и нанопорошков кремния в зависимости от насыпной массы (кривая 1) и от удельной плотности порошка кремния (кривые 2, 3). Кривые 1, 2 — порошок кремния, полученный в результате измельчения отходов полупроводникового монокристаллического кремния; кривая 3 — порошок кремния, полученный в результате плазмохимического разложения моносилана

Однако увеличение плотности микро- и наноструктурных порошков в заданном объеме, напротив, несколько снижает поглощательную способность порошков кремния (рис. 1, кривые 2, 3). Объясняется это снижением проницаемости водорода в объеме порошка при заданных условиях гидрирования.

В любом случае следует стремиться к тому, чтобы плотность порошков находилась в пределах $0,8...1,0 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. В этом случае размер частиц измельченного порошка находится в пределах $500...6000 \text{ нм}$. Процесс гидрирования таких порошков целесообразнее всего проводить при температуре $423...473 \text{ К}$ и давлении водорода порядка $0,1 \text{ МПа}$.

Максимальная водородосорбционная емкость таких порошков может достигать $4,0 \text{ масс. \%}$ (рис. 2). При такой предварительной обработке микро- и наноструктурных порошков скорость гидрирования их оказалась выше скорости гидрирования порошков без предварительной химической обработки. Этот факт свидетельствует о том, что порошки измельченного до размера частиц $500...6000 \text{ нм}$ кремния, прошедшие химические "шлифование" или "полирование" в смеси кислот или щелочей, являются хорошими поглотителями водорода.

Активация микро- и наноструктурных порошков кремния при температуре гидрирования 623 К в течение 30 мин при давлении водорода в проточном реакторе $0,25 \text{ МПа}$ приводит к поглощению водорода в количестве, необходимом для образования гидроксида кремния состава SiH_2 . Однако согласно дифрактограммам (рис. 3) в результате такой обработки происходит аморфизация образца. В области, где должны находиться дифракционные максимумы кремния, наблюдается гало (рис. 3, спектр 1). Совокупность этих данных позволяет предположить, что активация при средних температурах приводит к образованию рентгеноаморфного гидроксида кремния. Увеличение времени термической активации

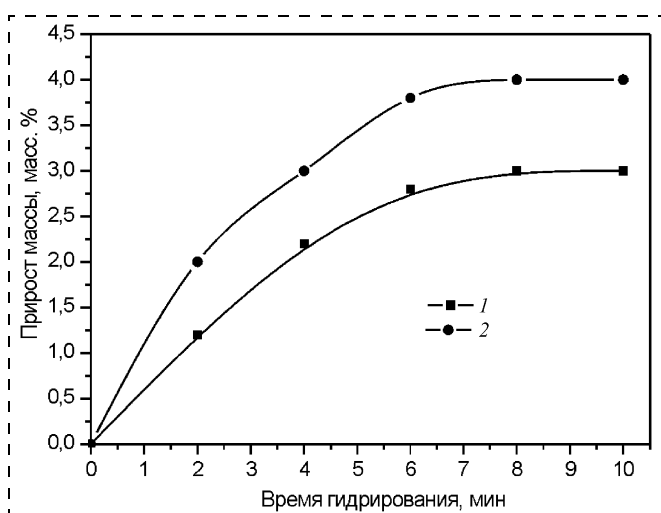


Рис. 2. Поглощение водорода порошками из отходов измельченного полупроводникового монокристаллического кремния: без химической обработки (кривая 1) и с химической обработкой (кривая 2) порошка измельченного кремния в 50 %-ном растворе гидроксида калия (КОН) в течение 30 мин

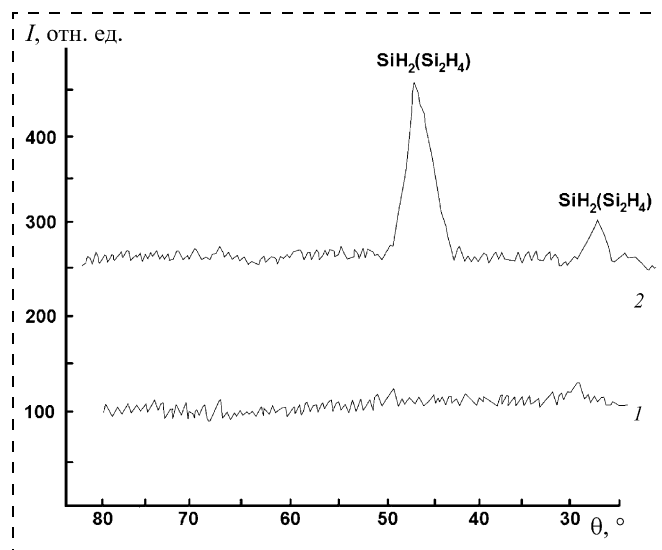


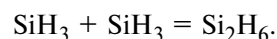
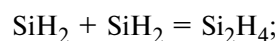
Рис. 3. Дифрактограммы гидрированных микро- и наноструктурных порошков кремния:

1 — дифрактограмма рентгеноаморфного гидроксида кремния, температура гидрирования 623 К , длительность гидрирования 30 мин ; 2 — дифрактограмма гидроксида $\text{SiH}_2(\text{Si}_2\text{H}_4)$. Длительность гидрирования 30 мин , температура 673 К

до $45...60 \text{ мин}$ не приводит к изменению фазового состава.

Аналогичные результаты получены при температуре 673 К и времени активации $5...15 \text{ мин}$. Дальнейшее гидрирование в течение $20...30 \text{ мин}$ приводит к образованию гидроксида Si_2H_4 (рис. 3, спектр 2).

Вероятнее всего, в данном случае гидрид образуется по реакции:



Отметим два интересных явления, обнаруженных при гидрировании микро- и наноструктурных порошков кремния в условиях низкого давления водорода. При поглощении водорода при температуре $373...773 \text{ К}$ его давление не опускается ниже $0,1 \text{ МПа}$, а при исходных значениях давления ниже этого значения образования гидридов не происходит. Таким образом, область с давлением водорода более $0,1 \text{ МПа}$ должна соответствовать устойчивому существованию гидроксида SiH_2 .

Оптимальной температурой гидрирования следует принять температуру 623 К , при которой достигается, по всей видимости, максимальная подвижность атомов кремния при формировании гидроксида.

Вторая особенность реакции в данных условиях — образование высокотемпературной формы $\text{Si}_2\text{H}_4(\text{SiH}_2)$, стабильной при комнатной температуре. При температуре выше 723 К для гидроксида такого состава наблюдается обратный фазовый переход. Однако это явление находит свое объяснение. Образующийся при низкой температуре $\leq 573 \text{ К}$ гидрид находится в равновесном состоянии при условиях гидрирования в проточном реакторе. С прекращением термического воздействия он переходит в метастабильное состояние, уход из которого в новое устойчивое состояние требует

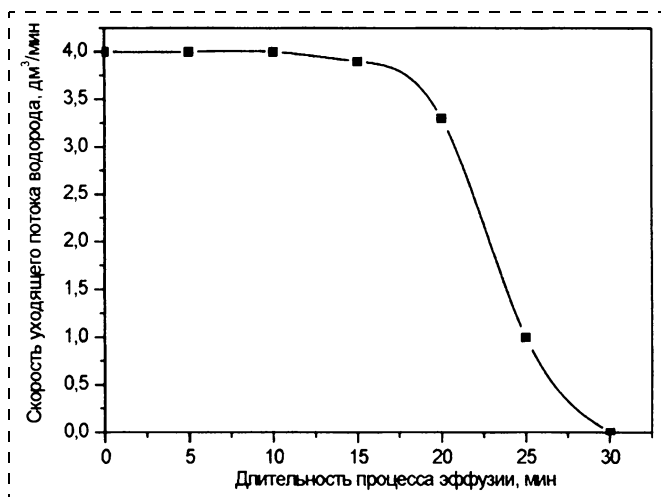


Рис. 4. Закономерность выделения водорода из порошка кремния массой 28 г и плотностью $0,8 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$

преодоления определенного потенциального барьера, например, в результате дальнейшего нагревания.

Возможно, при этом будет какой-то температурный гистерезис, т. е. потребуются температура выше 573 К. При этом содержание водорода в образцах ни в коем случае не превышает 4 масс. %.

Таким образом, представлен принципиально новый метод наводороживания микро- и наноструктурных порошков кремния через гидриды кремния в условиях относительно невысоких давления водорода и температуры гидрирования. Более того, данный метод предполагает ограничение температуры гидрирования до 723 К, выше которой начинается обратный процесс дегидрирования (рис. 4). Следовательно, манипулируя температурой, мы можем как внедрять водород в микро- и наноструктурные порошки кремния, так и извлекать его из их объема. Водород, поступающий в объем микро- и наноструктурного порошка кремния в области температур 373...723 К за счет диффузионного процесса, может реагировать не только с атомами кремния с образованием гидридов типа SiH_2 , но и с полимеризацией гидридов в более сложные составы типа Si_2H_4 , Si_2H_6 . Отсюда можно сделать вывод, что исходный микро- и наноструктурный порошок кремния полностью гидрируется по границам зерен до своих равновесных состояний. Естественно, что при этом в наводороживании микро- и нанопорошков кремния принимают участие и активные центры, возникающие при внедрении водорода. Это частицы H , Si^{2+} , SiH_2 , SiH_3 и т. п. Температура начала и окончания гидрирования микро- и нанопорошков кремния находится в определенной зависимости от длительности процесса и дисперсности микропорошка. Процесс имеет две выраженные стадии, разнесенные по температурам: температура гидрирования до 723 К и температура дегидрирования выше 723 К. Температура перехода между стадиями определяется особенностями дисперсности микро- и наноструктурных порошков кремния и структуры гидридов на поверхности частиц.

Выводы

Увеличение объема и насыпной массы нано- и микроструктурных порошков приводит к увеличению водородосорбционной емкости порошков.

Химическая обработка нано- и микроструктурных порошков кремния в смеси кислот или концентрированных щелочей также способствует повышению их водородосорбционной емкости. Максимальная водородосорбционная емкость порошков кремния достигается при их плотности $0,8...1,0 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, при температуре гидрирования 373...673 К и давлении водорода в проточной системе $0,1...1,0 \text{ МПа}$. В этом случае она может достигать 4 масс. %. Порошки измельченного кремния с размером частиц 500...6000 нм, прошедшие химическое "шлифование" ("полирование") в смеси кислот или щелочей, являются хорошими поглотителями водорода.

Список литературы

1. Пономарев-Степной Н. Н., Пахомов В. Водородная экономика и будущее человечества // В мире науки. 2006. № 7. С. 3—7.
2. Апресян Л. А., Власов Д. В., Власова Т. В. и др. Реактор с активированным водородом для синтеза углеродных нанотрубок // Журнал технической физики. 2006. Т. 76. № 9. С. 140—142.
3. Виноградов Д. В. Современное состояние водородной энергетики // Вопросы атомной науки и техники. Серия Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. 2006. С. 153—155.
4. Пономарев-Степной Н. Н. Атомно-водородная энергетика // Атомная энергия. 2004. Т. 96. Вып. 6. С. 412—425.
5. Miller E. L., Rocheleau R. E., Deng X. M. Design consideration for a hybrid amorphous silicon/photoelectrochemical multijunction cell for hydrogen production // International journal of Hydrogen Energy. 2003. N 28. P. 615—623.
6. Rocheleau R. E., Miller E. L. Photoelectrochemical production of hydrogen: engineering loss analysis. // Int. J. Hydrogen Energy. 1997. V. 22. N 8. P. 771—782.
7. Тарасов Б. П., Фокин В. П., Борисов Д. Н. и др. Аккумуляция водорода сплавами магния и редкоземельных металлов с никелем // International scientific journal for Alternative Energy and Ecology. 2004. V. 15. N 1. P. 47—52.
8. Гойдин В. В., Молчанов В. В., Буянов Р. А. Синтез гидридов интерметаллических соединений при механохимической активации и повышенном давлении водорода // Неорганические материалы. 2004. Т. 40. № 11. С. 1328—1332.
9. Klanchar M., Hughes T. G. System for Generating Hydrogen: — U. S. Patent N 5.634.341 (3.07.1997) and N 5.867.978 (9.02.1999).
10. Bogdanović B., Brand R. A., Marjanović A., Schwickardi M., Tölle J. Metal-doped sodium aluminum hydrides as potential new hydrogen storage materials // Journal of Alloys and Compounds. 2000. V. 302. N 1—2. P. 36—58.
11. Zaluska A., Zaluska L., Strom-Olsen O. L. Nanocrystalline magnesium for hydrogen storage // Journal of Alloys and Compounds. 1999. N 288. P. 217—225.
12. Мальшенко С. П. Водород как аккумулятор энергии в электроэнергетике // Российский химический журнал. 1997. Т. XLI. № 6. С. 112.
13. Копситанчук И. Г., Иванов Е. Ю., Болдырев В. В. Взаимодействие с водородом сплавов и интерметаллидов, полученных механохимическими методами // Успехи химии. 1998. Т. 67. № 1. С. 75.
14. Антонова М. М. Соединения магния — аккумуляторы водорода // Киев. ИПМ. 1993.
15. Schwarz R. B. Hydrogen storage in magnesium-based alloys // MRS Bulletin. 1999. V. 24. N 11. P. 40.
16. Verbetsky V. N., Klymkin S. N. Interaction of magnesium alloys with hydrogen. Pergamon: Hydrogen Energy Progress. VII. 1998. Vol. 2. P. 1319.
17. Григорьев Т. Ф., Баранова А. П., Ляхов Н. З. Механохимический синтез интерметаллических соединений // Успехи химии. 2001. Т. 70. № 1. С. 52.
18. Тарасов Б. П., Шилкин С. П. О возможности выделения и аккумуляции водорода высокой чистоты с помощью гидрообразующих интерметаллических соединений // Журнал прикладной химии. 1995. Т. 68. № 1. С. 537.

Ар. Г. Мустафаев¹, канд. техн. наук,
Аб. Г. Мустафаев, канд. техн. наук,

¹ ГОУ ВПО "Дагестанский государственный
технический университет",

² ГОУ ВПО "Кабардино-Балкарский
государственный университет"

ПРОБЛЕМЫ МАСШТАБИРОВАНИЯ ЗАТВОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА ДЛЯ МОП-ТЕХНОЛОГИИ

Рассмотрены проблемы масштабирования МОП-транзисторов, связанные с уменьшением толщины затворного оксида и выбором материала затвора, в предположении того, что МОП-технология останется доминирующей при производстве СБИС и кремний будет основным материалом подложки. Показано, что экспоненциальная зависимость тока утечки от толщины диэлектрика не позволяет использовать ультратонкие слои оксида кремния, в связи с чем необходим подбор альтернативного материала затворного диэлектрика.

Введение

Более 30 лет МОП-технология развивается и совершенствуется в соответствии с законом Мура. Характеристики приборов, такие как быстродействие и потребляемая мощность, поэтапно улучшались, и одной из причин этого было масштабирование размеров транзистора. Интеграция полупроводниковых приборов увеличивалась, проходя через этапы ИС, БИС, СБИС, и в настоящий момент в промышленных масштабах разрабатываются и производятся ультрабольшие ИС (УБИС). Возможность увеличения производительности прибора с одновременным снижением потребляемой мощности сделало МОП-технологии доминирующей для изготовления УБИС [1].

Одним из фундаментальных ограничений на масштабирование МОП-структуры была фотолитография, и степень интеграции характеризуется минимальным технологическим размером. После достижения предела разрешения фотолитографии, для производства приборов с технологическим размером 0,1 мкм была привлечена УФ-литография. При исчерпании возможности оптической литографии использовалась рентгеновская и электронно-лучевая литография. В настоящий момент и в ближайшем будущем маловероятно, что масштабирование полупроводниковых приборов будет ограничено возможностями литографии [2]. Препятствием будет лишь высокая стоимость промышленного высокотехнологичного оборудования для литографии. Более вероятно, что масштабирование будет ограничено при достижении областями прибора размеров (длина, ширина или толщина), сопоставимых с несколькими атомными слоями кремния.

Важной проблемой МОП-технологии является масштабирование затворного диэлектрика. Толщи-

Прогноз технологического размера и толщины
затворного диэлектрика

Год	Минимальный технологический размер, мкм	Толщина затворного диэлектрика, нм
1997	0,25	4...5
1999	0,18	3...4
2001	0,15	2...3
2003	0,13	2...3
2006	0,10	1,5...2
2009	0,07	<1,5
2012	0,05	<1

на затворного оксида является инструментом для контроля короткоканальных эффектов при уменьшении размеров затвора. Она должна линейно уменьшаться с уменьшением длины канала для обеспечения надежного управления каналом. В таблице показаны прогнозные значения толщины затворного диэлектрика (SiO_2) [1].

Если затворным диэлектриком останется SiO_2 , то его толщина к 2012 году должна быть менее 1 нм (около трех атомных слоев кремния), тогда как при использовании материала с высокой диэлектрической постоянной толщина затворного диэлектрика может быть увеличена.

В данной работе рассмотрены перспективы масштабирования затворного диэлектрика как фактора, ограничивающего масштабирование МОП-транзистора.

Короткоканальные эффекты определяются отношением ширины обедненного слоя канала к длине канала. Ширина обедненного слоя канала обратно пропорциональна квадратному корню от концентрации легирующей примеси в канале [3]. При масштабировании оксида для обеспечения одинакового порогового напряжения n МОП- и p МОП-транзисторов концентрацию примеси в канале необходимо увеличивать.

На рис. 1 (см. четвертую сторону обложки) показана ширина обедненного слоя канала для двух транзисторов с разной толщиной оксида [4]. Транзистор с тонким оксидом имеет меньшую ширину обедненного слоя канала и поэтому имеет лучшие короткоканальные характеристики. По этой причине при уменьшении длины канала МОП-транзистора необходимо снижать толщину затворного диэлектрика.

Ввиду необходимости контроля короткоканальных эффектов ограничение толщины SiO_2 также устанавливает предел масштабированию затвора и канала МОП-транзистора. На рис. 2 показано соотношение длины канала (затвора) и эффективной толщины оксида, которая определяется как

$$T_{ox}^{Eff,phys} = \frac{\varepsilon_{ox}}{\varepsilon_{hi-k}} T_{hi-k}$$

где $T_{ox}^{Eff,phys}$ — эффективная толщина оксида; T_{hi-k} — физическая толщина диэлектрического слоя; ε_{ox} и ε_{hi-k} — диэлектрические проницаемости SiO_2 и альтернативного диэлектрика. Предел длины затво-

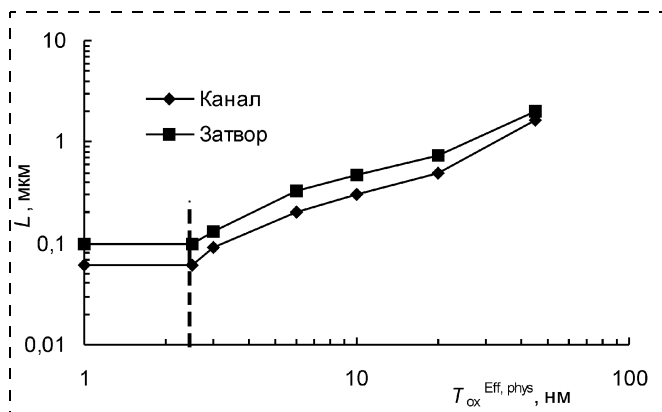


Рис. 2. Зависимость длины затвора и электрической длины канала от эффективной толщины оксида

ра и канала при использовании SiO_2 в качестве диэлектрика равен 0,1 и 0,06 мкм соответственно [4]. Предельная толщина SiO_2 будет достигнута, когда туннельный ток $I_{\text{затвор-канал}}$ станет равным $I_{\text{исток-сток}}$ в выключенном состоянии.

Диэлектрики имеют хорошую проводимость при высоких температурах и электрических полях. В ультратонких слоях SiO_2 , а также при очень больших электрических полях проводимость определяют эффекты туннелирования. Проводимость других изолирующих слоев (Si_3N_4 , Al_2O_3) обычно намного превышает проводимость SiO_2 [3]. Туннелирование носителей заряда через барьер, вследствие квантовых эффектов, увеличивается экспоненциально при уменьшении толщины диэлектрика. Туннельный ток зависит от эффективной массы носителей заряда в диэлектрике m^* , высоты барьера ϕ_B и толщины оксида t_{ox} . Характерными свойствами туннельного механизма являются слабая температурная зависимость тока и сильная зависимость от значения приложенного напряжения. Вероятность туннелирования при прямоугольном барьере равна [5]

$$T = \exp \left(-2 \sqrt{\frac{2m^* q \phi_B}{\hbar^2}} t_{ox} \right),$$

где q — заряд электрона; $\hbar$ — постоянная Планка.

Вследствие разницы высоты барьера для электронов и дырок, а также меньшей туннелирующей способности дырок в оксиде, чем электронов, ток туннелирующих дырок примерно на порядок ниже туннельного тока электронов при любом смещении. Поэтому туннельные утечки являются большей проблемой для n МОП-транзисторов.

Приборы с толщиной затворного оксида менее 1,5 нм непригодны для работы в высокопроизводительных приложениях [6–8]. Так как оксид становится тоньше, то ток утечки через него увеличивается. Для SiO_2 при напряжении на затворе 1 В ток утечки увеличивается с 10^{-12} А/см² при 3,5 нм до 10 А/см² при 1,5 нм [6], т. е. при уменьшении толщины пленки в 2 раза ток утечки увеличивается на 12 порядков. Подобное экспоненциальное увеличение тока утечки является едва ли не главной причиной, ограни-

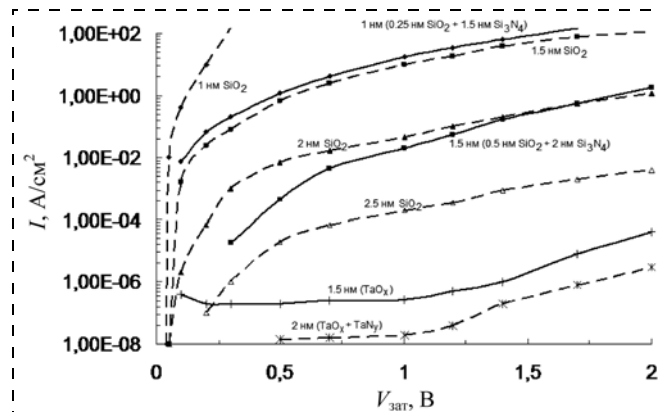


Рис. 3. Зависимость плотности туннельного тока затвора для различных эффективных толщин оксида от напряжения на затворе

чивающей применение SiO_2 в качестве затворного диэлектрика.

На рис. 3 приведены зависимости туннельных токов для различных эффективных толщин оксида от напряжения для n МОП-транзистора во включенном состоянии. Вследствие экспоненциального роста туннельных токов с уменьшением толщины оксида вероятность пробоя увеличивается.

При уменьшении толщины оксида необходимо уменьшить токи утечки и сохранить, а желательно увеличить, его надежность. Введение азота (<1 ат. %) в оксид кремния используется для устранения некоторых проблем, например предотвращения диффузии бора из затвора в оксид или лучшего контроля горячих электронов [7]. Показано, что отжиг в атмосфере NH_3 снижает дефектность оксида кремния [9]. Еще более эффективен отжиг в атмосфере NO или N_2O , но при использовании N_2O наблюдается увеличение толщины пленки.

Так, у нитрида кремния диэлектрическая проницаемость в 2 раза выше, чем у оксида SiO_2 , он является привлекательным материалом для затворного диэлектрика [10]. Оксинитридные затворные диэлектрики имеют диэлектрическую проницаемость, сравнимую с проницаемостью оксида кремния. В целях повышения диэлектрической проницаемости необходимы обогащенные азотом или чистые слои нитрида кремния [11]. Однако Si_3N_4 при непосредственном контакте с кремнием имеет большую плотность поверхностных состояний, что ухудшает электронфизические характеристики. По этой причине необходим тонкий обогащенный кислородом граничный слой между Si и Si_3N_4 . Предел толщины для обоих материалов одинаков и определяется туннельными токами утечки из затвора в канал.

В то же время вследствие квантово-механических эффектов и обеднения поликремниевых затворов заряд в канале и в инверсном слое располагается на некотором расстоянии от границы Si-SiO_2 , являясь функцией от напряжения на затворе. На рис. 4 показано, что эффективная электрическая емкость затворной композиции определяется емкостью обедненного поликремния, физической емкостью диэлектрика и вклада квантовых эффектов в кремнии, которые сдвигают пик распределения носителей за-

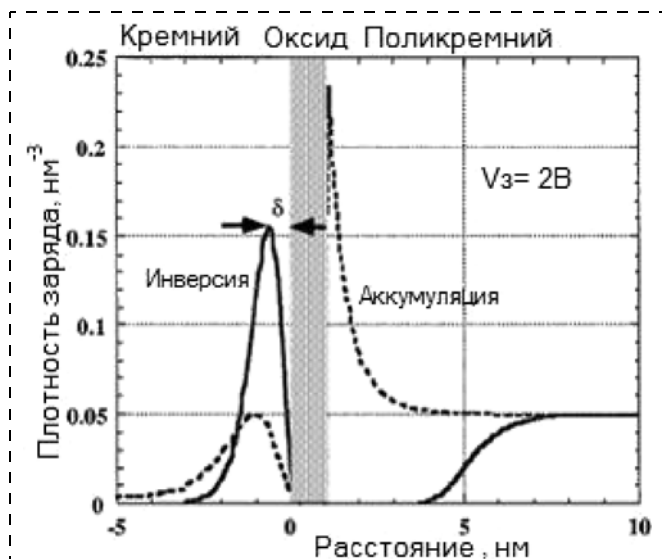


Рис. 4. Распределение плотности заряда в МОП-транзисторе с учетом квантовых эффектов [12]

ряда от границы раздела. При обратном смещении часть приложенного напряжения обедняет сильно-легированный поликремний около границы раздела с диэлектриком затвора. Увеличение легирования поликремния вблизи границы раздела снижает эффект обеднения, улучшая управление каналом. Поэтому для лучшего управления каналом оправдано использование металлических затворов, так как они обладают иммунитетом к эффекту обеднения.

Число носителей падает до минимума на границе барьера, а пик распределения смещается глубже в кремний (рис. 4). Вклад в эффективную диэлектрическую емкость зависит от отношения ϵ_{Si}/δ , где ϵ_{Si} — диэлектрическая проницаемость кремния, а δ — эффективное расстояние носителей заряда от границы раздела (см. рис. 4). Максимум распределения расположен в 1 нм от границы Si—SiO₂, что увеличивает эффективную толщину SiO₂ ($T_{ox}^{Eff,phys}$) на 0,3 нм [13].

Значительная часть материалов с высокой диэлектрической проницаемостью нестабильна при контакте с кремнием, поэтому необходим буферный слой SiO₂ на границе раздела кремний—диэлектрик. Эффективную емкость в этом случае можно найти из выражения

$$\frac{1}{C_{Eff}} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{hi-k}},$$

и она определяется емкостью буферного оксида. Эффективная электрическая толщина диэлектрика равна

$$T_{ox}^{Eff,el} = T_{ox}^{Eff,phys} + T_{qm} + T_{pd},$$

где T_{qm} — квантовая поправка для заряда в канале (0,3 нм); T_{pd} — поправка для обедненного поликремния (0,5 нм) [14].

В приборах с толщиной оксида SiO₂ менее 1,5 нм туннельные токи слишком велики для обеспечения

приемлемого энергопотребления ИС (см. рис. 3). Поэтому необходим материал с более высокой диэлектрической проницаемостью. Альтернативные диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью являются ключом для дальнейшего масштабирования МОП-транзисторов с размером затвора менее 0,1 мкм. Эти материалы позволяют использовать толстые диэлектрические слои, что приводит к меньшим потерям вследствие туннелирования, и дают возможность дальнейшего масштабирования эффективной толщины оксида.

МОП-приборы обладают некоторой емкостью затвора, пропорциональной диэлектрической проницаемости и обратно пропорциональной толщине материала затвора. Для уменьшения токов утечки при равной емкости затвора необходима более толстая пленка с высокой диэлектрической проницаемостью. Туннельный ток утечки затвора экспоненциально зависит от толщины диэлектрика, тогда как емкость зависит линейно, т. е., незначительно увеличив емкость затвора, можно намного уменьшить ток утечки. Проблема в том, что такой диэлектрик также должен иметь большую ширину запрещенной зоны и высокий энергетический барьер для туннелирования. Для большинства диэлектриков ширина запрещенной зоны обратно пропорциональна диэлектрической проницаемости (рис. 5). Возникает проблема оптимизации: необходимо определить, какой параметр оказывает большее влияние на ток утечки — диэлектрическая проницаемость или ширина запрещенной зоны.

На рис. 5 показана диэлектрическая проницаемость двойных оксидов (относительно SiO₂) и соответствующая им ширина запрещенной зоны [15]. В общем случае желательна большая ширина запрещенной зоны, так как высота потенциального барьера увеличивается вместе с ней. Ввиду обратной квадратичной зависимости от высоты барьера и линейной зависимости от толщины оксида преимущество в выборе отдается материалам с высокой ди-

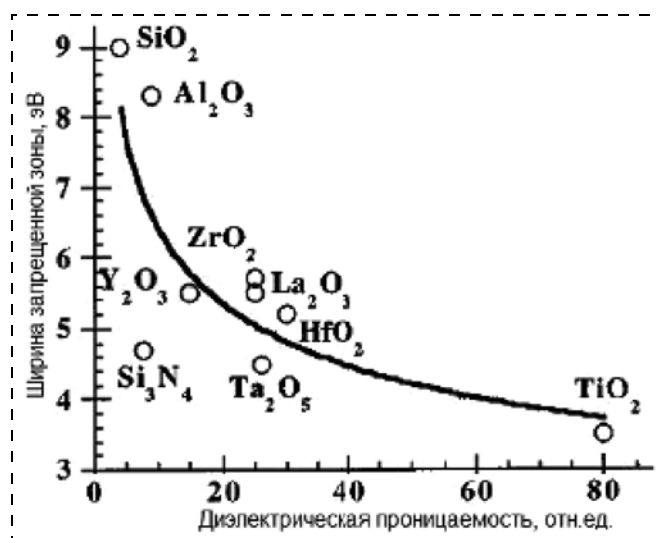


Рис. 5. Диэлектрическая проницаемость и ширина запрещенной зоны двойных оксидов

электрической проницаемостью в целях уменьшения туннельного тока.

Для предотвращения эмиссии через барьер Шоттки необходима высота барьера более 1 эВ для обоих типов носителей. Оксид кремния имеет энергетический барьер 3,1 эВ для электронов и 4,7 эВ для дырок. Асимметрия зонной структуры при контакте с кремнием предсказана для некоторых материалов с высокой диэлектрической проницаемостью (Ta_2O_5 , $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ и др.) [16]. В общем случае асимметрия зонной структуры представляет потенциальные проблемы для узкозонных материалов. Ta_2O_5 имеет ширину запрещенной зоны 4,4 эВ и барьер для электронов в 0,36 эВ, а для дырок 2,9 эВ [16]. В этом случае эмиссия Шоттки в зону проводимости приведет к значительным утечкам через диэлектрик. При наличии в диэлектрике затвора ловушечных уровней, снижающих эффективный барьер туннелирования, может вырасти ток утечки.

Другой проблемой для нового материала диэлектрика является трудность создания такой же низкодефектной границы раздела, как Si— SiO_2 . Так, любое улучшение управления каналом, вызванное снижением емкости затворной композиции, может быть потеряно при деградации подвижности вследствие увеличения плотности поверхностных состояний. В работе [17] приведена эмпирически определенная зависимость между подвижностью и поверхностными состояниями на границе раздела для термического оксида:

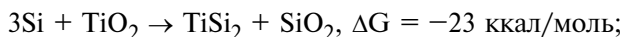
$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{1}{1 + k\bar{D}_{it}},$$

где $\bar{D}_{it}$ — плотность поверхностных состояний. Например, плотность поверхностных состояний для TiO_2 на границе с кремнием равна $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ в центре зоны, резко увеличиваясь к краям зоны; этого достаточно для снижения подвижности на два порядка [15]. Поэтому низкое значение плотности поверхностных состояний в центре зоны не гарантирует улучшения подвижности в режимах работы транзистора.

Возможно снижение туннельных токов утечки при использовании слоистых диэлектриков [18]. Так, вероятность туннелирования для слоистых структур пропорциональна $\sqrt{\varphi_B^{ox}} t_{ox} + \sqrt{\varphi_B^{hi-k}} t_{hi-k}$ [5], соответственно, составной диэлектрик с 0,5 нм SiO_2 и 2 нм Si_3N_4 будет иметь эффективную толщину, соответствующую 3,1 нм SiO_2 . Таким образом, выгода от использования нитрида составляет 0,6 нм в предположении равенства эффективных масс носителей в обоих диэлектриках. Преимущество диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью и буфером SiO_2 падает с уменьшением толщины структуры, так как буферный слой должен составлять не менее монослоя оксида.

На рис. 6 (см. четвертую сторону обложки) показаны альтернативные материалы для затворного диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемо-

стью [19–31]. Оксиды титана и тантала были исследованы в качестве затворного диэлектрика [20–24]. Термодинамически ни один оксид не стабилен при контакте с кремнием. Оксид титана стремится к формированию силицида титана, а Ta_2O_5 образует металлическую фазу:



На границе раздела Ta_2O_5 — кремний образуются комплексы тройных оксидов типа $\text{Si-Ta}_x\text{-O}_y$, которые после отжига преобразуются в SiO_2 [23, 24]. Так как эти оксиды не устойчивы при контакте с кремнием, необходим буферный слой SiO_2 .

Оксиды гафния и циркония термодинамически стабильны в контакте с кремнием [25–27]. Гафний и цирконий, являясь переходными металлами, имеют тетраэдрическую структуру, у них достаточно электронов для замещения кремния и их оксиды имеют структуру, подобную SiO_2 . Использование SiO_2 и ZrO_2 (HfO_2) позволяет приблизить совершенство границы раздела к уровню SiO_2 —Si.

Силикаты гафния и циркония $(\text{Zr}, \text{Hf})\text{Si}_x\text{O}_y$ были опробованы в качестве диэлектриков затвора [28]. Кристаллическая структура ZrSiO_4 является композицией тетраэдра SiO_4 и атома Zr внутри ее. Силикат гафния имеет аналогичную структуру.

Оксиды лантана и иттрия являются диэлектриками со средней диэлектрической проницаемостью. Оксид алюминия также имеет среднее значение диэлектрической проницаемости и ширину запрещенной зоны, сравнимую с SiO_2 [29, 30].

Все альтернативные материалы нуждаются в буферном слое SiO_2 для получения границы раздела с низкой плотностью поверхностных состояний. Также необходимо использовать металлический электрод затвора для предотвращения реакции между затворным диэлектриком и поликремнием, которая ведет к образованию SiO_2 .

Важным классом материалов являются смешанные оксиды металлов (перовскиты) с формулой ABC_3 , где C — это кислород. Некоторые перовскиты отлично сочетаются с кремниевой подложкой [31]. При этом стабильные оксиды, такие как SrO и BaO, могут быть буфером между кремнием и перовскитом с высокой диэлектрической проницаемостью [31]. Комплексы перовскитов типа $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{La}_n(\text{Sc}, \text{Al})_n\text{O}_{3n+1}$ предоставляют широкие возможности для комбинации с нижележащим буферным слоем.

Большинство альтернативных диэлектриков нестабильно при прямом контакте с поликремнием, поэтому он является не самым оптимальным материалом затвора. Преимущество поликремния в том, что он может быть легирован примесью *n*- или *p*-типа, меняя работу выхода под характеристики *n*МОП- или *p*МОП-транзисторов, а также хорошо выдерживает высокотемпературные обработки. Для уменьшения сопротивления затвора на поверхности легированного поликремния используются тугоплавкие металлы и их силициды, что позволяет сохранить хорошо изученную границу раздела поликремний — SiO_2 . Работа выхода наиболее подходящих металли-

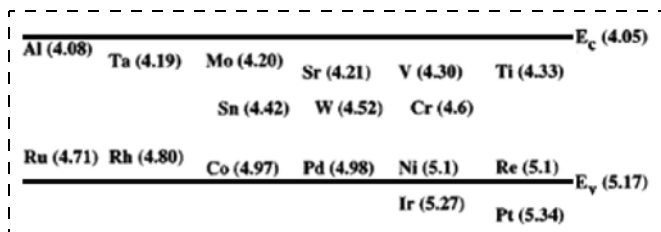


Рис. 7. Работа выхода металлических затворов относительно запрещенной зоны кремния

ческих затворов сдвигает пороговое напряжение вверх на 0,5 В по сравнению с высоколегированным поликремниевым затвором.

Если альтернативный диэлектрик не может находиться в стабильном контакте с поликремниевым затвором, то необходим новый материал затвора — металл. Немногие металлы могут выдерживать высокотемпературные процессы МОП-технологии, и формирование затворной композиции будет необходимо перенести к завершению процесса [2]. Таким образом, для использования материала с высокой диэлектрической проницаемостью надо не только его найти и исследовать, но, возможно, и перестроить последовательность операций формирования МОП-прибора.

Существуют несколько кандидатов с работами выхода около E_c : Al, Ta, Mo, Zr, Hf, V, Ti, и несколько с работой выхода, близкой к E_v : Co, Pd, Ni, Re, Ir, Pt (рис. 7). Также существует ряд проводящих оксидов металлов: In_2O_3 , SnO_2 , OsO_2 , RuO_2 , IrO_2 , ZnO_2 , MoO_2 , ReO_2 , и проводящие нитриды типа TiN. Трудность не в недостатке выбора материала, а в том, какой материал приведет к меньшим затратам при встраивании в технологический процесс. Проблема использования металлического затвора с альтернативным диэлектриком в том, что он не совместим с МОП-технологией. По этой причине необходимо использовать два различных металла для затвора с работами выхода около E_c и E_v (для n МОП- и p МОП-транзисторов). Формирование двух различных металлических затворов в МОП-технологии значительно усложняет процесс изготовления. Металлический затвор с работой выхода, равной работе выхода собственного кремния, как, например, вольфрамовый, пригоден для МОП-технологии. На рис. 8 (см. четвертую сторону обложки) показаны обедненные слои n МОП-транзисторов с равными пороговыми напряжениями, но разными материалами затвора [4]. Видно, что транзистор с вольфрамовым затвором имеет большую область обеднения и, следовательно, ухудшение короткоканальных эффектов.

Заключение

В данной работе рассмотрены возможности масштабирования затворного диэлектрика. Диэлектрики затвора с высокой диэлектрической проницаемостью позволяют физически толстым диэлектрическим слоям иметь толщину, эквивалентную тонкой пленке SiO_2 . Данное решение требует проведения

дополнительных исследований относительно термодинамической стабильности и зонной структуры альтернативного материала. В то же время желательно, чтобы хорошо изученная граница раздела Si— SiO_2 присутствовала в структуре МОП-приборов, это определяет нижнюю границу толщины диэлектрика (не менее 0,3 нм), даже если туннельные токи при этом незначительны. Большинство альтернативных материалов не обладают достаточной термодинамической стабильностью — например, при низких температурах может измениться фаза, а соответственно, и свойства материала.

Необходимость уменьшения сопротивления поликремния приводит к увеличению уровня его легирования, что также позволяет снизить влияние эффектов обеднения поликремния. Но такой подход ограничен растворимостью примеси и диффузией примеси из поликремния через затворный диэлектрик в кремний. Последнее особенно важно для p^+ -затворов, так как бор быстро проникает через слой SiO_2 . Решением является поиск нового материала затвора — металла, позволяющего без значительных издержек встраивание в технологический процесс.

Список литературы

1. National Technology Roadmap for Semiconductors. <http://www.sematech.org/public/roadmap/>
2. Buchanan M. Scaling the gate dielectric: Materials, integration and reliability // IBM Journal of R&D. #3. 1999. Vol. 43.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2 т., кн. 1. М.: Мир, 1984. 456 с.
4. Thompson S., Packan P., Bhor M. MOS scaling: Transistor challenges for the 21st century // Intel Tech. J. 1998. Vol. Q3. P. 1—19.
5. Ng K. K. Complete Guide to Semiconductor Devices. New York: McGraw-Hill, 1995.
6. Momose H. S., Qno M., Yoshitomi T. etc. 1.5 nm Direct-Tunneling Gate Oxide Si-MOSFETs // IEEE Trans. Electron Devices. 1996. 43. 1233.
7. Momose H. S., Nakamura S.-I., Ohguro T., etc. A Study of Hot-Carrier Degradation in n-and p-MOSFETs with Ultra-Thin Gate Oxides in the Direct Tunneling Regime // IEEE International Electron Devices Meeting, Washington: DC. 1997.
8. Lo S.-H., Buchanan D. A., Taur Y., etc. Quantum-Mechanical Modeling of Electron Tunneling Current from the Inversion Layer of Ultra-Thin Oxide nMOSFETs // IEEE Electron Device Lett. 1997. 18. 209.
9. Cartier E., Buchanan D. A., Dunn G. J. Atomic Hydrogen-Induced Interface Degradation of Reoxidized-Nitrided Silicon Dioxide on Silicon // Appl. Phys. Lett. 1994. 901. 64.
10. Ma T. P. Making silicon nitride film a viable gate dielectric // IEEE Trans. Electron Devices. 1998. Vol. 45. P. 680.
11. Guo X., Ma T. P. Tunneling leakage current in oxynitride: dependence on oxygen/nitrogen content // IEEE. Electron Devices Lett. 1998. Vol. 19. P. 207.
12. Blanks D. K. et al. NEMO: General release of a new comprehensive quantum device simulator // Proc. IEEE 24th Int. Symp. Compound Semiconductors. 1997. P. 639—642.
13. Hareland S. A., Krishnamurthy S., Jallepalli S. et al. IEDM Technical Digest. 1995. P. 933.
14. Plummer J. D., Griffin P. B. Material and Process Limits in Silicon VLSI Technology // Proc. of the IEEE. 2001. Vol. 89. N 3. P. 240—258.
15. Campbell S. A., Gilmer D. C., Wang X. C. et al. MOSFET transistors fabricated with high permittivity TiO_2 dielectrics // IEEE Trans. Electron Devices. 1997. Vol. 44. P. 104.
16. Robertson J., Chen C. W. Schottky barrier heights of tantalum oxide, barium strontium titanate, lead titanate and stron-

tium bismuth tantalite // Appl. Phys. Lett. 1999. Vol. 74. P. 1168.

17. **Sun S. C., Plummer J. D.** Electron mobility in inversion and accumulation layers on thermally oxidized silicon surfaces // IEEE Trans. Electron Devices. 1980. Vol. 27. P. 1497.

18. **Мустафаев Г. А., Мустафаев А. Г., Саркаров Т. Э.** Свойства тонких диэлектрических пленок // Зарубежная электронная техника. 2001. № 3. С. 74—105.

19. **Hubbard K. J., Schlom D. G.** Thermodynamic stability of binary oxides in contact with silicon // Mater. Res. 1996. Vol. 11. N 6. P. 2757.

20. **Guo X., Wang X., Luo Z.** et al. High quality ultra thin (1,5 nm) $\text{TiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ gate dielectric for deep sub-micron CMOS technology // Proc. Int. Electron Devices Meeting. IEDM, 1999. P. 137.

21. **Luan H. F., Lee S. J., Lee C. H.** et al. High quality Ta_2O_5 gate dielectrics // Proc. Int. Electron Devices Meeting, 1999. 141 p.

22. **Park D., Lu Q., King T. J.** et al. $\text{SiON}/\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{TiN}$ gate stack transistor with 1,8 nm equivalent SiO_2 thickness // Proc. Int. Electron Devices Meeting. 1998. P. 381.

23. **Alers G. B., Werder D. J., Chabal Y.** et al. Intermixing at the tantalum oxide/silicon interface in gate dielectric structures // Appl. Phys. Lett. 1998. Vol. 73. № 11. P. 1517.

24. **Ono H., Koyanagi K.** Formation of silicon-oxide layers at the interface between tantalum oxide and silicon substrate // Appl. Phys. Lett. 1999. Vol. 75. N 22. P. 3521.

25. **Lee B. H., Jeon Y., Zawadzki K.** et al. Effects of interfacial layer growth on the electrical characteristics of thin titanium oxide films on silicon // Appl. Phys. Lett. 1999. Vol. 74. N 21. P. 3143.

26. **Lee B. H., Kang L., Qi W. J.** et al. Ultrathin hafnium oxide with low leakage and excellent reliability for alternative gate dielectric application // Proc. Int. Electron Devices Meeting. 1999. P. 133.

27. **Ma Y., Ono Y., Stecker L.** et al. Zirconium oxide based gate dielectrics with equivalent oxide thickness of less than 1,0 nm and performance of submicron MOSFET using a nitride gate replacement process // Proc. Int. Electron Devices Meeting. 1999. P. 149.

28. **Wilk G. D., Wallace R. M., Anthony J. M.** Hafnium and zirconium silicates for advanced gate dielectrics // Appl. Phys. 2000. Vol. 87. N 1. P. 484.

29. **Gusev E. P., Copel M., Cartier E.** et al. High-resolution depth profiling in ultrathin Al_2O_3 films on Si // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 76. P. 176.

30. **Manchanda L.** et al. Gate quality doped high- ϵ_c films for CMOS beyond 100 nm: 3—10 nm Al_2O_3 with low leakage and low interface states // Proc. Int. Electron Devices Meeting. 1998. P. 605.

31. **McKee R. A., Walker F. J., Chisholm M. F.** Crystalline oxides on silicon: The first five monolayers // Phys. Rev. Lett. 1998. Vol. 81. N 14. P. 3014.

УДК 535.343.2, 539.23

Т. П. Мясникова, канд. физ.-мат. наук, доц.,
В. Ю. Гершанов, канд. физ.-мат. наук, доц.,
И. Н. Захарченко, канд. физ.-мат. наук,
С. И. Гармашов, канд. физ.-мат. наук, доц.,
Южный федеральный университет,
г. Ростов-на-Дону,
e-mail: vgersh@sparc-mail.ru

ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ПЛЕНОК BiPS_4 НА СТЕКЛЕ И Si ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ

Исследованы оптические спектры тонких пленок BiPS_4 /стекло и BiPS_4/Si . Обнаружены особенности в области 50, 80 и 120 °С, а именно — минимумы параметра правила Урбаха σ и скачок энергетического положения длинноволнового края полосы. В ближней ИК области спектра пленки BiPS_4 наблюдалась полоса поглощения с максимумом 1,05 эВ, вероятно, обусловленная поляроном большого радиуса с энергией связи 0,25 эВ. Выше 100 °С эта полоса пропадает, что связано с разрушением поляронов большого радиуса.

Одним из тифосфатов переходных металлов, используемых в качестве фотоэлектродов в фотоэлектродхимических ячейках, является BiPS_4 [1], свойства которого мало изучены. Исследование оптических спектров сегнетоэлектриков, таких как BaTiO_3 , LiNbO_3 [2, 3] и сульфата аммония [4], показало себя как чувствительный метод для обнаружения фазовых переходов (ФП). В настоящей работе исследованы спектры оптического поглощения пленки BiPS_4 на стекле толщиной 104 нм и пленки BiPS_4

на кристаллическом кремнии толщиной 175 нм для определения температур ФП.

Пленки BiPS_4 выращивались методом сублимации из монокристаллического источника в квазизамкнутом объеме с горячей стенкой. В качестве подложек использованы стекло и кремний с ориентацией (100). Температура источника изменялась в пределах 500—620 °С. Температура подложек на стекле составляла 350—400 °С, на кремнии несколько выше. Скорость роста от 2 до 6 нм в минуту. Толщины пленок определялись на атомно-силовом микроскопе. Толщина полученных пленок находится в пределах 0,1—1,2 мкм. Рентгеноструктурный анализ для достаточно толстых пленок показал хорошее совпадение постоянных решетки пленки с па-

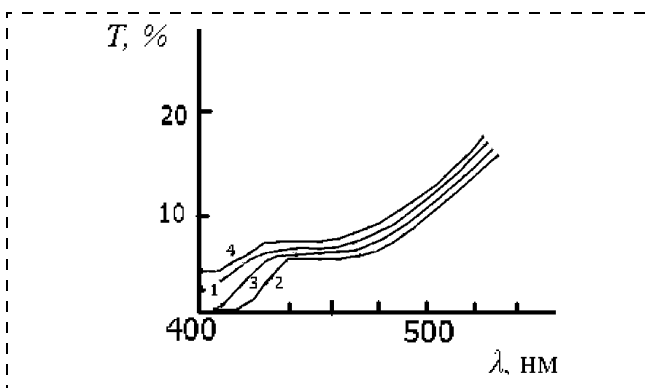


Рис. 1. Температурная зависимость спектров пропускания пленок BiPS_4 на стекле толщиной 104 нм:

1 — при 15 °С; 2 — 30 °С; 3 — 40 °С; 4 — при 70 °С

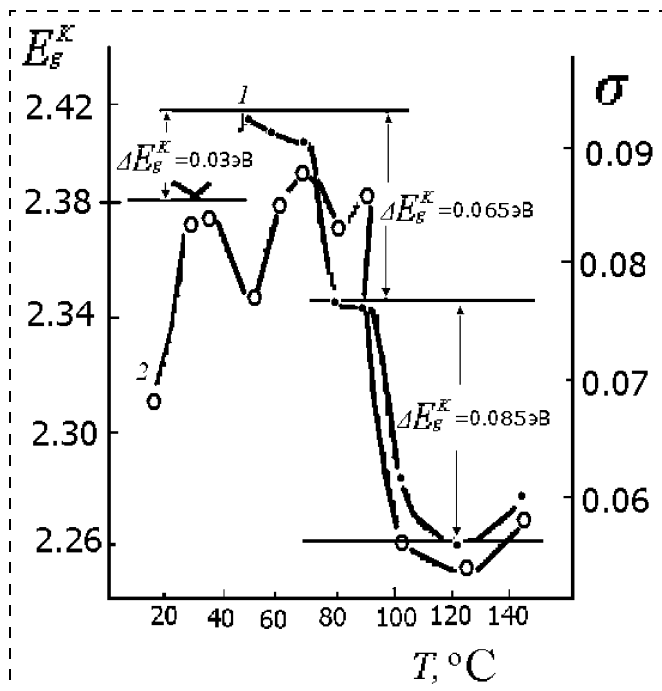


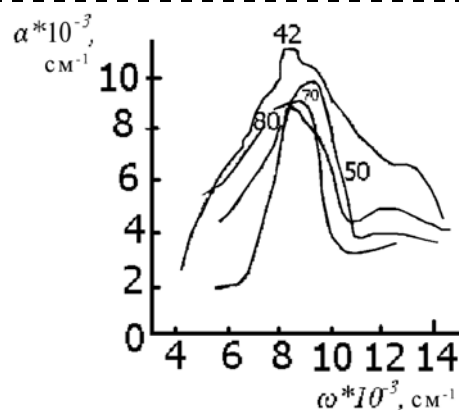
Рис. 2. Температурная зависимость энергетического положения длинноволновой части полосы поглощения 450 нм E_g^K при $\ln K = 11,5$ (кривая 1) и параметра правила Урбаха σ (кривая 2) для пленки BiPS_4 на стекле

раметрами кристалла BiPS_4 . Тонкие пленки рентгеноаморфны.

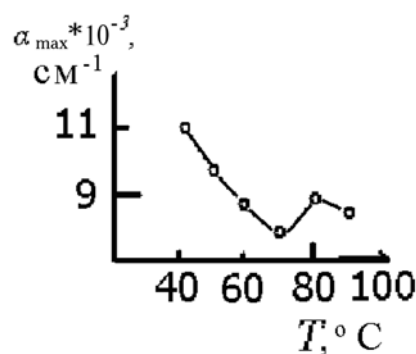
В видимой области спектра пленки BiPS_4 на стекле толщиной 104 нм наблюдались две полосы поглощения с длиной волны максимума поглощения 400 и 450 нм при 17 °С. На рис. 1 видно, что при 30 °С эти полосы смещаются в длинноволновую область спектра (410 и 460 нм), а при 40 °С — в коротковолновую область (400 и 450 нм), т. е. обнаруживают сильную температурную зависимость, что позволяет отнести их к вибронному экситону с переносом заряда [5]. Для длинноволнового края второй полосы поглощения (450 нм) выполняется правило Урбаха. На рис. 2 видно, что параметр правила Урбаха σ , характеризующий наклон прямолинейной зависимости $\ln K(h\nu)$, имеет минимумы при 50, 80 и 120 °С. Энергетическое положение края поглощения при постоянном коэффициенте поглощения $\ln K = 11,5$ в области 50 °С увеличивается на 0,03 эВ, в области 80 °С уменьшается на 0,065 эВ, а в области 100–120 °С уменьшается на 0,085 эВ. Так как минимумы параметра σ соответствуют наиболее разупорядоченному состоянию вещества, то можно предположить, что фазовые переходы происходят при 50, 80 и 120 °С. Константа электрон-фононного взаимодействия g ниже 80 °С составляет 6,9, а выше 80 °С $g = 10,67$. Константа электрон-фононного взаимодействия рассчитана по формуле

$$g = 2/3 \sigma_0^{-1},$$

где значение σ_0 определялось из графика зависимости σ от $1/12(kT)^2$ как координата точки пересече-



а)



б)

Рис. 3. Спектры поглощения в ближней ИК области пленки BiPS_4/Si при температурах 42, 50, 70, 80 °С (а) и температурная зависимость коэффициента поглощения в максимуме $\alpha_{\max}$ BiPS_4/Si (б)

ния прямой, проходящей через точки в каждой фазе, с осью ординат при $1/12(kT)^2 = 0$ (k — постоянная Больцмана). Энергия эффективного фонона при температуре ниже 80 °С равна 259 cm^{-1} , а выше 80 °С — 285 cm^{-1} .

Все параметры правила Урбаха вносят вклад в изменение энергетического положения края поглощения. А именно, в области 50 °С вклад в изменение энергетического положения края поглощения за счет аномалии параметра правила Урбаха E_0 равен –0,048 эВ, вклад от аномалии K_0 составляет 0,04 эВ, вклад от аномалии параметра σ –0,003 эВ. В области 80 °С вклад в изменение энергетического положения края полосы поглощения от аномалии E_0 равен –0,15 эВ, вклад от аномалии K_0 составляет 0,11 эВ, вклад от аномалии σ –0,008 эВ.

В ближней ИК области спектра пленки BiPS_4 на кремнии толщиной 175 нм наблюдалась полоса поглощения с центром 1,05 эВ (8500 cm^{-1}) и полушириной 1,07 эВ (рис. 3, а), которую можно отнести к полярону большого радиуса с энергией связи 0,25 эВ, найденной по формуле $h\nu_{\max}/4,2$ [6]. При повышении температуры коэффициент поглощения в максимуме $\alpha_{\max}$ этой полосы уменьшается (рис. 3, б), и полуширина уменьшается до 0,51 эВ при 70 °С,

а выше 100 °С полоса поглощения пропадает, что связано с разрушением полярона большого радиуса [6].

Таким образом, особенности в оптических спектрах пленок BiPS₄ позволяют предположить существование ФП при 50, 80 и 120 °С, а также поляронный механизм проводимости.

Список литературы

1. Buoncristiani A. M., Byvik C. E. Semiconductor Photo-electrochemistry // NASA Technical Paper 2088. 1983. P. 1—96.
2. Мясникова Т. П., Евсеева Р. Я., Гах С. Г. Оптические спектры титаната бария с примесями // Тр. 9-го меж-

дунар. симпозиума "Порядок, беспорядок и свойства оксидов". Сочи. 2006. Ч. 2. С. 41.

3. Мясникова Т. П., Мясникова А. Э. Оптические спектры ниобата лития // ФТТ. 2003. 45. № 12. С. 2230.

4. Мясникова Т. П., Мясникова А. Э. Оптические спектры сульфата аммония в параэлектрической фазе // ФТТ. 2007. 49. № 10. С. 1817.

5. Vikhnin V. S., Eglitis R. I., Kapphan S. E., Borstel G., Kotomin E. A. Polaronic-type excitons in ferroelectric oxides: microscopic calculations and experimental manifestation // Phys. Rev. B. 2002. 65. P. 104304 (1—11).

6. Мясников Э. Н., Мясникова А. Э., Матропас З. П. О множественном рождении фононов при фотодиссоциации поляронов Ландау—Пекара // ЖЭТФ. 2006. 129. № 3. С. 548.

УДК 536.424.1

В. А. Непочатенко, канд. физ. мат. наук,
Белоцерковский государственный аграрный
университет, Украина,
E-mail: aaa@btsau.kiev.ua

ОРИЕНТАЦИОННОЕ СОГЛАСОВАНИЕ ФАЗ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ТОНКОЙ ФАЗОВОЙ ГРАНИЦЫ В НЕСОБСТВЕННЫХ СЕГНЕТОЭЛАСТИКАХ

Проведен анализ ориентационного соответствия двух фаз при фазовом переходе первого рода 3mF2/m для случая, когда формируется тонкая фазовая граница. Показано, что для этого фазового перехода невозможно полное ориентационное согласование фаз, что является причиной формирования полидоменного состояния монокристалла. Рассмотрено влияние степени разориентации фаз при фазовом переходе на вид доменной структуры в несобственных сегнетоэластиках Pb₃(PO₄)₂ и Pb₃(VO₄)₂.

Введение

В отличие от сегнетоэлектриков, для чистых сегнетоэластиков остается дискуссионным вопрос о причинах формирования полидоменной структуры в монокристаллах. В зависимости от вида фазового перехода (второго или первого рода) в сегнетоэластических кристаллах хорошего качества образуется монодоменное или полидоменное состояние. В связи с этим представляет интерес рассмотрение ориентационного соответствия двух фаз при фазовом переходе первого рода. Наиболее простым видом когерентной границы раздела фаз является тонкая фазовая граница (ТФГ). В работе [1] предложена модель тонкой фазовой границы, разделяющей две моноклинные фазы, а в работах [2, 3] сделан анализ условий ее образования для фаз с разной симметрией. Термин "тонкая фазовая граница" соответствует границе раздела с непосредственным контактом двух фаз, при котором каждый узел на границе раздела является общим для двух смежных кристаллических

решеток. Показано, что плоская ТФГ формируется при определенных соотношениях между значениями параметров решеток в районе фазового перехода первого рода, причем, как правило, необходим поворот кристаллографических осей одной фазы относительно другой на небольшой угол. Ориентация оси и знак угла поворота зависят от уравнения ТФГ. Этим поворотам соответствуют матрицы преобразования системы координат (СК) или векторы Гиббса $\mathbf{G}_f$. Близкие (субориентационные) состояния формируются ТФГ разной ориентации, их можно совместить с помощью не утраченных при фазовом переходе элементов симметрии параэластической фазы.

Известно [4, 5], что в сегнетоэластической фазе наблюдаются повороты в разные стороны кристаллографических осей смежных доменов относительно параэластической фазы, пропорциональные значению спонтанной деформации. Ориентация оси, значение и знак угла спонтанного поворота зависят от температуры и типа домена. В работе [6] показано, что субориентационные состояния в Pb₃(PO₄)₂ принадлежат к двум типам структурных доменов, которым соответствуют равные по модулю векторы Гиббса $\mathbf{G}_1$ и $\mathbf{G}_2$, угол между которыми при комнатной температуре равен ~170°. Вектор $\mathbf{G}_f$ для любого ориентационного состояния при определенной температуре сегнетоэластической фазы можно определить из уравнений соответствующей доменной стенки, полученных в СК параэластической и сегнетоэластической фаз [7].

Следовательно, для формирования ТФГ необходим относительный поворот СК двух фаз, соответствующий вектору $\mathbf{G}_f$, однако при этой же температуре существует спонтанный поворот СК сегнетоэластической фазы относительно параэластической, которому соответствует вектор $\mathbf{G}_f$. Степень ориентационного соответствия двух фаз при фазовом переходе можно оценить из модуля разности векторов Гиббса $|\Delta \mathbf{G}_f| = |\mathbf{G}_i - \mathbf{G}_f|$.

Целью настоящей работы было выяснить, возможно ли полное ориентационное соответствие фаз при фазовом переходе первого рода 3mF2/m для случая, когда реализуется ТФГ.

Обозначим кристаллографические параметры параэластической (псевдомонотриклиной) фазы $a_1, b_1, c_1, \beta_1, \varphi_1 = \beta_1 - 90^\circ$; сегнетоэластической моноклинной фазы — $a_2, b_2, c_2, \beta_2, \varphi_2 = \beta_2 - 90^\circ$; X_1, Y_1, Z_1 и X_2, Y_2, Z_2 — соответствующие ортогональные оси координат (ось X параллельна оси c , ось Y — оси b), OS_{11} и OS_{12} — субориентационные состояния.

Определение относительной ориентации двух фаз при формировании тонкой фазовой границы

В работе [2] получено, что две моноклинные фазы с кристаллографическими параметрами $a_1, b_1, c_1, \varphi_1 = \beta_1 - 90^\circ$ и $a_2, b_2, c_2, \varphi_2 = \beta_2 - 90^\circ$ при выполнении условий

$$A_{11}A_{33} - A_{13}^2 = 0, A_{22}/A_{11} < 0 \quad (1)$$

могут быть разделены двумя ТФГ, уравнение которых в СК параэластической и сегнетоэластической фаз имеют вид:

$$X_1 + B_1 Y_1 + K_1 Z_1 = 0; \quad (2)$$

$$X_1 - B_1 Y_1 + K_1 Z_1 = 0; \quad (3)$$

$$X_2 + B_2 Y_2 + K_2 Z_2 = 0; \quad (4)$$

$$X_2 - B_2 Y_2 + K_2 Z_2 = 0, \quad (5)$$

где $B_1 = \sqrt{-A_{22}/A_{11}}$, $K_1 = A_{13}/A_{11}$, $B_2 = \sqrt{-B_{22}/B_{11}}$, $K_2 = B_{13}/B_{11}$, $A_{11} = 1 - (c_2/c_1)^2$, $A_{22} = 1 - (b_2/b_1)^2$, $A_{13} = -\frac{c_2}{c_1 \cos \varphi_1} \left(\frac{c_2}{c_1} \sin \varphi_1 - \frac{a_2}{a_1} \sin \varphi_2 \right)$; $A_{33} = 1 - \frac{1}{\cos^2 \varphi_1} \times$

$$\times \left(\left(\frac{a_2}{a_1} \right)^2 \cos^2 \varphi_2 + \left(\frac{c_2}{c_1} \sin \varphi_1 - \frac{a_2}{a_1} \sin \varphi_2 \right)^2 \right);$$

$$B_{22} = 1 - (b_1/b_2)^2; B_{11} = 1 - (c_1/c_2)^2;$$

$$B_{13} = -\frac{c_1}{c_2 \cos \varphi_2} \left(\frac{c_1}{c_2} \sin \varphi_2 - \frac{a_1}{a_2} \sin \varphi_1 \right).$$

Из уравнений ТФГ, полученных в двух системах координат, можно определить вектор Гиббса, соответствующий повороту одной СК относительно другой:

$$\mathbf{G}_{fi} = g_1 \mathbf{e}_1 + g_2 \mathbf{e}_2 + g_3 \mathbf{e}_3, \quad (6)$$

где $g_1 = s_1 \operatorname{tg}(\delta_1/2)$; $g_2 = s_2 \operatorname{tg}(\delta_1/2)$; $g_3 = s_3 \operatorname{tg}(\delta_1/2)$; s_i — направляющие косинусы положительной оси вращения; δ_1 — угол поворота.

Ориентацию оси находим из векторного произведения, а угол поворота — из скалярного произведения нормалей к плоскостям ТФГ. Из выражений (2) и (4) получаем необходимые компоненты для определения $\mathbf{G}_{f1}$, соответствующего OS_{11} :

$$s_1 = \frac{q_1}{|g|}; s_2 = \frac{q_2}{|g|}; s_3 = \frac{q_3}{|g|}, \delta_1 = \arccos(S_1), \quad (7)$$

$$\text{где } q_1 = B_1 K_2 - B_2 K_1; q_2 = K_1 - K_2; q_3 = B_2 - B_1; |g| = \sqrt{q_1^2 + q_2^2 + q_3^2}; S_1 = \frac{1 + B_1 B_2 + K_1 K_2}{\sqrt{(1 + B_1^2 + K_1^2)(1 + B_2^2 + K_2^2)}}.$$

Аналогично из уравнений (3) и (5) можно получить координаты вектора $\mathbf{G}_{f2}$, который соответствует второму субориентационному состоянию OS_{12} .

Определение спонтанного поворота системы координат сегнетоэластической фазы относительно параэластической фазы

При фазовом переходе $\bar{3}mF2/m$ возможны два типа доменных стенок W и W' , которые разделяют (без учета малых углов) три ориентационные состояния OS_1, OS_2, OS_3 [4, 8]. При формировании W доменной стенки создается дополнительный поворот СК, обусловленный изменением формы кристалла при этом типе двойникования [4, 9]. Поэтому спонтанный поворот СК сегнетоэластической фазы относительно параэластической будем определять из уравнений W' доменной стенки, полученных в двух системах координат. Ориентационное состояние OS_1 может быть отделено от OS_2 и OS_3 двумя W' доменными стенками, которым соответствуют следующие уравнения в СК параэластической фазы [8]:

$$X_1 + B_3 Y_1 + K_3 Z_1 = 0; \quad (8)$$

$$X_1 - B_3 Y_1 + K_3 Z_1 = 0, \quad (9)$$

где $B_3 = \sqrt{3}$; $K_3 = -2e_{13}^s/e_{11}^s$; $e_{11}^s = \frac{\sqrt{3}b_2 - c_2}{2\sqrt{3}b_2}$ и

$e_{13}^s = \frac{c_2 - 3a_2 \sin(\varphi_2)}{6a_2 \cos(\varphi_2)}$ — компоненты спонтанной деформации.

В работе [7] получены уравнения этих доменных стенок в СК сегнетоэластической фазы:

$$X_2 + B_4 Y_2 + K_4 Z_2 = 0; \quad (10)$$

$$X_2 - B_4 Y_2 + K_4 Z_2 = 0, \quad (11)$$

$$\text{где } B_4 = \frac{B_3 e_{11}^s (1 - e_{13}^s - e_{11}^s)}{(1 + e_{11}^s)(e_{11}^s + 2e_{13}^s)}; K_4 = -\frac{2e_{13}^s (1 - e_{11}^s/2)}{e_{11}^s + 2e_{13}^s}.$$

Из уравнений (8), (10) получаем вектор Гиббса $\mathbf{G}_1$, который определяет спонтанный поворот СК ориентационного состояния OS_{11} относительно параэластической фазы:

$$\mathbf{G}_1 = h_1 \mathbf{e}_1 + h_2 \mathbf{e}_2 + h_3 \mathbf{e}_3, \quad (12)$$

где $h_1 = r_1 \operatorname{tg}(\delta_2/2)$; $h_2 = r_2 \operatorname{tg}(\delta_2/2)$; $h_3 = r_3 \operatorname{tg}(\delta_2/2)$;

$$r_1 = \frac{d_1}{|d|}; r_2 = \frac{d_2}{|d|}; r_3 = \frac{d_3}{|d|}, \delta_2 = \arccos(S_2); \quad (13)$$

$$d_1 = B_3 K_4 - B_4 K_3; \quad d_2 = K_3 - K_4; \quad d_3 = B_4 - B_3;$$

$$|d| = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2}, \quad S_2 = \frac{1 + B_3 B_4 + K_3 K_4}{\sqrt{(1 + B_3^2 + K_3^2)(1 + B_4^2 + K_4^2)}}.$$

Координаты вектора G_2 , соответствующего второму субориентационному состоянию, находим аналогично, необходимо только изменить знак коэффициентов B_3 и B_4 .

Ориентационное согласование двух фаз при фазовом переходе

Идеальное согласование двух фаз при формировании ТФГ будет выполняться, если векторы G_{fi} и G_i , соответствующие одинаковому субориентационному состоянию, будут равными, т. е.

$$G_{fi} = G_i. \quad (14)$$

Из уравнения (14), учитывая условие формирования плоских ТФГ (1), получаем систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= r_1, \\ s_2 &= r_2, \\ S_1 &= S_2, \\ A_{11}A_{33} - A_{13}^2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

В целях упрощения решения (15) будем считать, что значение K_3 в уравнениях (8), (9) известно. При численных расчетах будем использовать значение, соответствующее ориентации W' в $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$, а затем проведем анализ по влиянию вариации значения этого коэффициента на полученное решение. Решая совместно первое и четвертое уравнения системы (15) и учитывая, что $b_1 = c_1/\sqrt{3}$, $a_1 \sin(\varphi_1) = c_1/3$, получаем уравнение третьего порядка:

$$X^3 + AX^2 + BX + C = 0, \quad (16)$$

где $X = (c_1/c_2)^2$; $A = -\frac{p_1^2 p_3 + 4p_1 D p_2 + 4c_2^2}{p_2 p_1^2}$; $B = \frac{4(p_1 D p_3 + p_2 D^2 + c_2^2)}{p_2 p_1^2}$; $C = -\frac{4D^2 p_3}{p_2 p_1^2}$; $p_1 = 1 + 2D$;

$$p_2 = K_3^2 h_1^2 + 12b_2^2; \quad p_3 = 12b_2^2; \quad h_1 = \sqrt{3}b_2 - c_2;$$

$$h_2 = 3\sqrt{3}b_2 + c_2; \quad h_3 = \sqrt{3}b_2 + c_2; \quad h_4 = 3\sqrt{3}b_2 - c_2;$$

$$D = \frac{2\sqrt{3}h_1 h_2 - 24Fh_3 b_2 + \sqrt{3}FK_3^2 h_1^2}{24b_2(Fh_3 - h_2) - \sqrt{3}K_3^2(F+2)h_1^2}; \quad F = \frac{h_1}{h_4}.$$

Корни уравнения (16) соответствуют трем функциональным зависимостям кристаллографического параметра c_1 от параметров b_2 и c_2 (обозначим эти корни c_{11} , c_{12} , c_{13})

$$c_{11} = f(b_2, c_2) = c_2 \sqrt{y_1 - A/3}; \quad (17)$$

$$c_{12} = \omega(b_2, c_2) = c_2 \sqrt{y_2 - A/3}; \quad (18)$$

$$c_{13} = \psi(b_2, c_2) = c_2 \sqrt{y_3 - A/3}, \quad (19)$$

$$\text{где } y_1 = 2\sqrt{-p/3} \cos(\alpha/3);$$

$$y_{2,3} = -2\sqrt{-p/3} \cos\left(\frac{\alpha \pm \pi}{3}\right); \quad \alpha = \arccos\left(-\frac{q}{2\sqrt{-(p/3)^3}}\right);$$

$$p = -A^2/3 + B; \quad q = 2(A/3)^3 - AB/3 + C.$$

Первый корень (c_{11}) для последующего анализа интереса не представляет, поскольку он является ре-

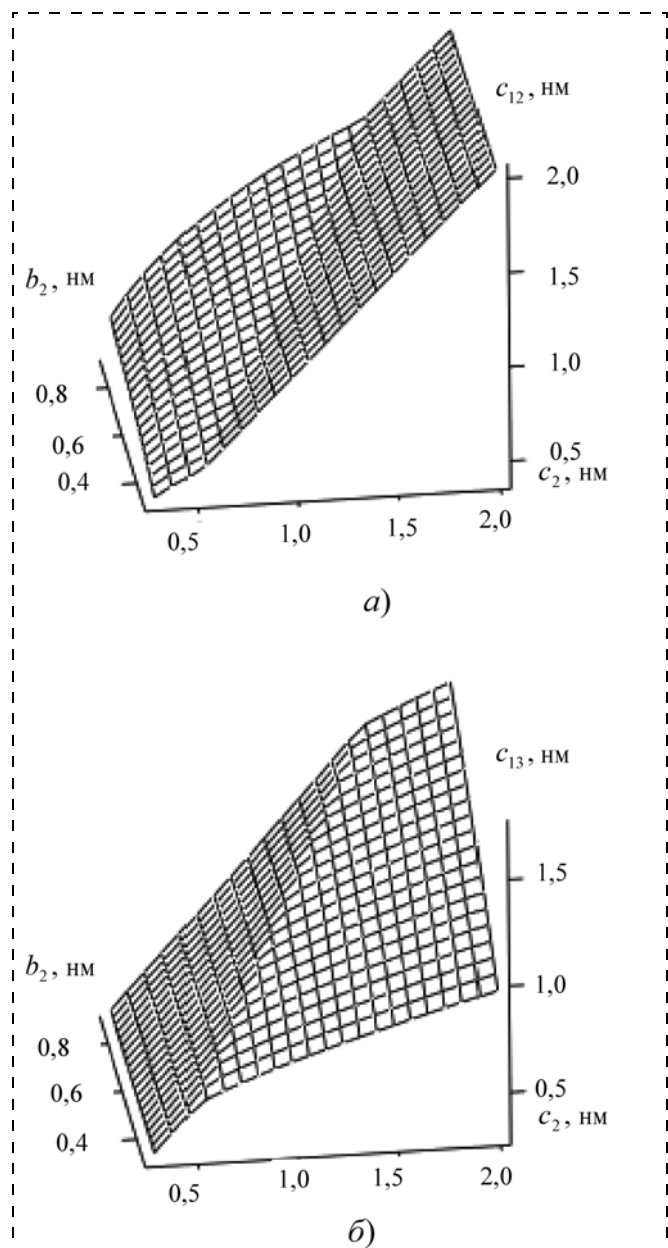


Рис. 1. Зависимость c_{12} (а) и c_{13} (б) от значений кристаллографических параметров b_2 , c_2 сегнетоэластической фазы

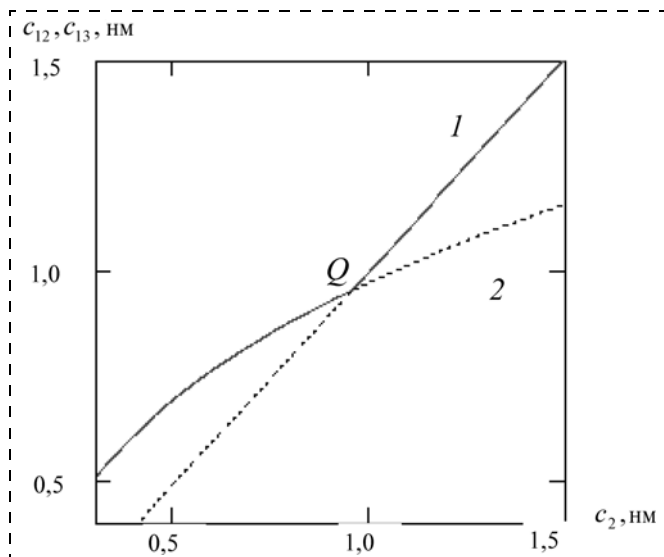


Рис. 2. Зависимость c_{12} (1) и c_{13} (2) от значения кристаллографического параметра c_2 сегнетоэластической фазы при $b_2 = 0,55$ нм

шением (16) только при нулевых значениях b_2 , c_2 , c_1 . Зависимости значений двух других корней (18), (19) от параметров b_2 и c_2 представлены на рис. 1. Сделаем сечение полученных поверхностей при $b_2 = 5,5 \text{ \AA} = 0,55 \text{ нм}$ (рис. 2). Можно показать, что c_{12} и c_{13} являются решением системы (15) только в районе точки Q (рис. 2), рассматривая ее как предельное значение (в точке Q уравнения ТФГ (2)–(5) являются неопределенными, так как при этих параметрах $c_{12} = c_{13} = c_2 = c_1 = b_2\sqrt{3}$, $b_1 = b_2$, $a_1 = a_2$, $\beta_1 = \beta_2$, $A_{ij} = B_{ij} = 0$). Следовательно, точка Q соответствует параметрам гипотетического фазового перехода второго рода для этого сечения, а линия излома поверхностей на рис. 1 — линии возможных фазовых переходов второго рода. При варьировании величины K_3 изменяются наклоны кривых 1 и 2 (рис. 2), координаты Q не изменяются.

Таким образом, система (15) решения не имеет, но разность векторов $\Delta G = G_{f1} - G_1$ стремится к нулю по мере приближения параметров b_2 , c_2 и c_1 к линии возможного фазового перехода второго рода. Следовательно, в сегнетоэластиках при фазовом переходе первого рода может быть разориентация фаз разной степени. Степень разориентации двух фаз будем определять из модуля разности векторов Гиббса:

$$|\Delta G_{11}| = |G_1 - G_{f1}| = \sqrt{(g_1 - h_1)^2 + (g_2 - h_2)^2 + (g_3 - h_3)^2}. \quad (20)$$

Определим степень разориентации фаз в ортофосфате и ортованадате свинца. Подставляя в выражение (20) кристаллографические параметры реше-

ток в районе фазового перехода для $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$ [10] и $\text{Pb}_3(\text{VO}_4)_2$ [11], получаем следующие значения: $|\Delta G_{11}|$ равен соответственно $7,3 \cdot 10^{-4}$ и $3,6 \cdot 10^{-3}$. Как видим, степень разориентации фаз в ортованадате свинца значительно больше, чем в ортофосфате свинца. Следует отметить, что $|\Delta G_{12}|$ на порядок больше в этих монокристаллах, поэтому векторы Гиббса G_i и G_{fi} соответствуют одному и тому же ориентационному состоянию OS_{1i} .

Увеличение степени разориентации фаз в районе фазового перехода должно приводить к уменьшению оптимального размера образующихся доменов для уменьшения возникающих механических напряжений. Данный ориентационный фактор, по-видимому, и определяет формирование мелкой доменной сетки в $\text{Pb}_3(\text{VO}_4)_2$ [12].

Таким образом, из проведенного анализа можно сделать вывод, что при фазовом переходе первого рода $\bar{3}mF2/m$ для случая, когда формируется тонкая фазовая граница, невозможно полное ориентационное соответствие двух фаз, что должно приводить к ограничению размера плоской границы раздела и к полидоменному состоянию монокристалла. Степень разориентации фаз зависит от разности значений параметров решеток реального фазового перехода и соответствующих значений гипотетического фазового перехода второго рода. При значительной разориентации двух фаз должны быть существенно уменьшены линейные размеры площади фазовой границы, формирующей определенное ориентационное состояние, что приведет к образованию мелкой доменной структуры, а при больших значениях — к разрушению монокристалла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дудник Е. Ф., Непочатенко В. А. // Кристаллография. 1980. Т. 25. С. 984.
2. Непочатенко В. А., Непочатенко И. А. // Укр. Физ. Журн. 2005. Т. 50. № 1. С. 64.
3. Непочатенко В. А. // Укр. Физ. Журн. 2005. Т. 50. № 5. С. 483.
4. Chabin M., Gilletta F. // J. Appl. Cryst. 1977. V. 10. P. 247.
5. Wamer L. S., Baggio R. F., Dussel H. L. // Ferroelectrics. 1981. V. 31. P. 121.
6. Непочатенко В. А. // Кристаллография. 2005. Т. 50. № 6. С. 1009.
7. Непочатенко В. А., Кудзин А. Ю. // ФТТ. 2006. Т. 48. № 6. С. 1071.
8. Sapriel J. // Phys. Rev. B. 1975. V. 12. N 11. P. 5128.
9. Непочатенко В. А., Дудник Е. Ф. // ФТТ. 2003. Т. 45. № 10. С. 1870.
10. Guimaraes D. M. C. // Phase Transitions. 1979. V. 1. P. 143.
11. Gamier P., Calvarin G., Berar J. F., Weigel D. // Mat. Res. Bull. 1984. V. 19. P. 407.
12. Дудник Е. Ф., Колесов И. С., Орлов О. Л. // ФТТ. Т. 22. С. 1861.

УДК 537.635:537.622.4

М. В. Астахов, д-р хим. наук, проф.,
И. В. Дутов, А. О. Родин, канд. физ.-мат. наук,
Государственный технологический университет
"Московский институт стали и сплавов"

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АМОРФНОГО ФЕРРОМАГНИТНОГО МИКРОПРОВОДА С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Ферромагнитный резонанс в аморфном ферромагнитном микропроводе возбуждается электрической составляющей высокочастотного электромагнитного поля. Значение электрической составляющей электромагнитного поля не влияет на форму и положение пика, а влияет только на интенсивность сигнала. Аморфный ферромагнитный микропровод состава $\text{Co}_{18}\text{Fe}_{72}(\text{SiB})_{10}$ является перспективным поглотителем СВЧ излучения на частотах ниже 10 ГГц. На частоте 10 ГГц не проявляется эффект взаимодействия микропроводов между собой.

Введение

Исследование взаимодействия сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного излучения (ЭМИ) с материалами в целях создания тонких широкополосных покрытий, эффективно поглощающих электромагнитные волны в широком диапазоне частот, ведутся уже на протяжении полувека. Как показывает анализ результатов, опубликованных в периодической литературе и патентах, за последние десятилетия, несмотря на достигнутые в настоящее время успехи в этой области, проблема получения радиопоглощающих материалов (РПМ) является весьма актуальной. Это связано, с одной стороны, с развитием радиоэлектронной техники, а с другой стороны — с постоянно изменяющейся совокупностью требований, предъявляемых к радиофизическим, физико-химическим и механическим свойствам РПМ в зависимости от условий их применения.

Одним из наиболее перспективных наполнителей для РПМ является аморфный ферромагнитный микропровод (АФМП). Недавно было показано, что коэффициент отражения РПМ на основе АФМП на фоне металлической пластины составляет ниже 10 дБ в диапазоне частот 5–37 ГГц [1].

Активно дискутируемый вопрос — это механизм поглощения СВЧ излучения, реализуемый в АФМП. Рассматривались механизмы электрических и магнитных потерь, а также эффект взаимодействия микропроводов между собой. Недавно было показано, что АФМП имеет максимум взаимодействия с СВЧ излучением при расположении образца под углом 45° к магнитному и электрическому полю [2]. В работе [3] были определены значения магнитной проницаемости для микропровода состава $\text{Fe}_{76,6}\text{Ni}_{1,23}\text{Si}_{8,65}\text{B}_{13,5}$ с диаметром жилы 9 мкм и стеклянной оболочки 21 мкм. Данная статья посвящена исследованию АФМП состава $\text{Co}_{18}\text{Fe}_{72}(\text{SiB})_{10}$ методом ферромагнитного резонанса.

Экспериментальная часть

Исследования проводили на установке для измерения диэлектрических и магнитных параметров образцов стержневой формы с поперечным сечением менее $1,1 \times 1,1$ мм длиной 18 мм на частоте 10 ГГц. Установка предназначена для измерения диэлектрической и магнитной проницаемости, а также тангенсов углов диэлектрических и магнитных потерь. Кроме того, установка позволяет создавать постоянное магнитное поле с помощью электромагнита для проведения исследований ферромагнитного резонанса (ФМР).

Микропровод помещался в цилиндрический резонатор в максимум магнитного поля, параллельно электрической составляющей СВЧ поля и перпендикулярно магнитной. Для обеспечения точности расположения образца внутри резонатора использовали диэлектрический стержень с диаметром, практически равным диаметру отверстия в резонаторе. Такая геометрия позволяла перемещать образец, находящийся на стержне, в области резонатора с различным значением электрического поля (в том числе в нулевое поле) путем вращения диэлектрического стержня вокруг оси. Минимум электрической составляющей в резонаторе представлял собой окружность, а угол поворота стержня измерялся относительно касательной к этой окружности. Заметим, что все исследования проводились вблизи максимума магнитного поля, так что электрическое поле было либо равно нулю, либо очень малым.

Несмотря на малость значений напряженности электрического поля во всей области вблизи мак-

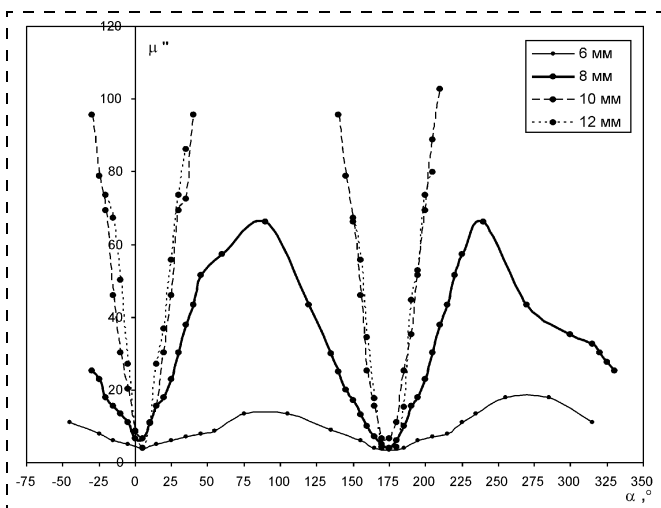


Рис. 1. Зависимость эффективной магнитной проницаемости μ'' от угла поворота образца для образцов различной длины

симула магнитного поля значения добротности резонатора и, соответственно, определяемые значения эффективной магнитной проницаемости μ'' (обратно пропорциональные разности добротности пустого резонатора и резонатора с образцом) существенно зависят от положения образца (рис. 1). На рисунке видно, что существует два минимума в точках 5° и 175° , наличие которых можно объяснить попаданием образца в минимум электрического СВЧ поля. Кроме того, на рисунке видно, что значения минимума совпадают для всех длин образцов.

Приложение внешнего постоянного магнитного поля к образцам, находящимся точно в максимуме магнитного поля, не изменяет добротности системы. Однако при повороте стержня с образ-

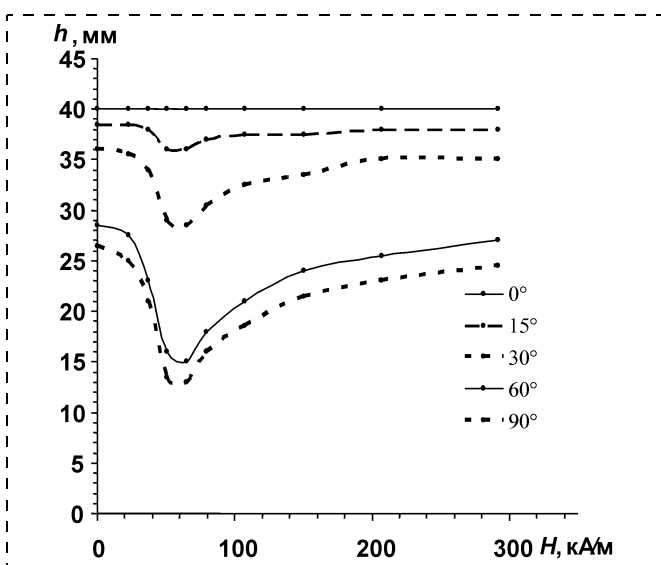


Рис. 2. Полевая зависимость сигнала, прошедшего через резонатор с образцом АФМП; h — высота резонансного пика, характеризующая добротность

цом, которое приводит к увеличению градиента электрического поля, добротность системы существенно меняется в зависимости от приложенного поля (рис. 2).

Как видно на рис. 2, кривая имеет резко выраженный минимум, совпадающий по значению поля (860 Э) для всех углов, и характеризуется существенной несимметричностью.

В работе [2] было показано, что такой вид кривой ФМР определяется наличием двух резонансных эффектов. Положение первого пика определяется свойствами материала (прецессией вектора намагниченности) и не зависит от длины микропровода. Второй пик связан с собственной частотой образца как электромагнитного резонатора (диполя), а значит, его частота задается длиной микропровода. При малых длинах второй пик смещается в область больших полей, и его влияние на линию истинного ФМР мало, а при больших длинах первый пик практически полностью маскируется вторым. При этом значение резонансного магнитного поля перемещается в область более высоких магнитных полей (рис. 3). Отметим, что появление четко выраженного пика происходит при длине микропровода менее $\lambda/4$.

Этот эффект практически полностью повторяется, если в качестве образца использовать два параллельных микропровода. На рис. 4 представлена полевая зависимость проходящего сигнала для двух АФМП различной длины. Видно, что вид кривых практически не меняется по сравнению с одинарным микропроводом, и можно отметить лишь, что кривые идут ниже. На основании этого можно констатировать, что эффекта взаимодействия между микропроводами не наблюдается не-

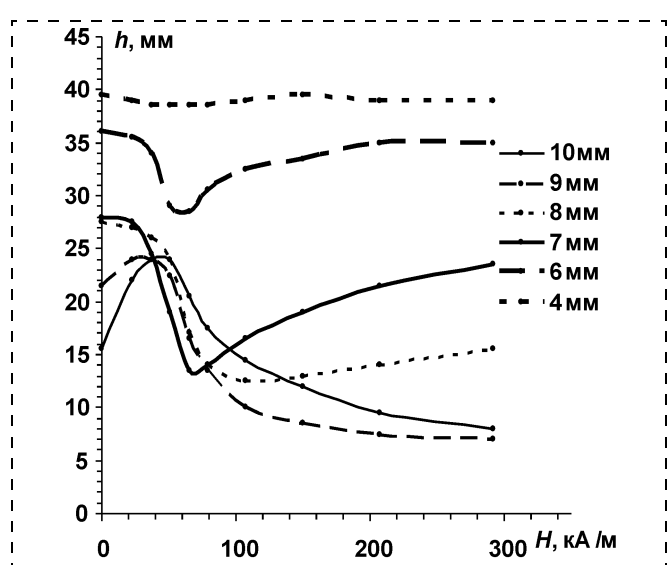


Рис. 3. Полевая зависимость сигнала, прошедшего через резонатор с образцом из АФМП различной длины, с ориентировкой 30° относительно минимума электрического поля

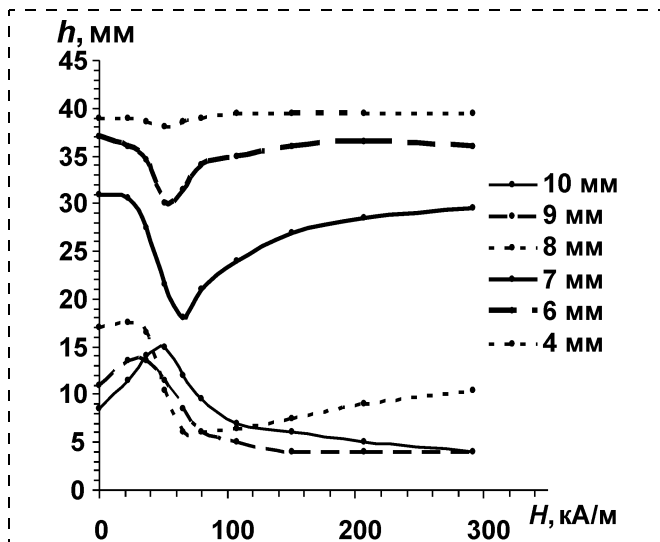


Рис. 4. Полевая зависимость сигнала, прошедшего через резонатор с образцом из двух АФМП различной длины, с ориентировкой 30° относительно минимума электрического поля

смотря на то, что при изготовлении образца два микропровода располагали вплотную друг к другу.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- ферромагнитный резонанс в аморфном ферромагнитном микропроводе возбуждается СВЧ

магнитным полем индукционных токов, связанных с электрическим полем излучения;

- значение электрической составляющей электромагнитного поля не влияет на форму и положение пика, а влияет только на интенсивность сигнала;
- для длинных микропроводов $L > \lambda/4$ пик ферромагнитного резонанса маскируется резонансным пиком микропровода как электромагнитного резонатора;
- АФМП состава $\text{Co}_{18}\text{Fe}_{72}(\text{SiB})_{10}$ является перспективным поглотителем СВЧ излучения на частотах ниже 10 ГГц;
- на частоте 10 ГГц не проявляется эффект взаимодействия микропроводов между собой.

Список литературы

1. Астахов М. В., Курапов Д. И., Родин А. О., Тулин В. А. Ферромагнитный резонанс в аморфном микропроводе // IV Междунар. конф. "Электротехника, электромеханика и электротехнологии". М., Клязьма, 2000. С. 145—146.
2. Tulin V. A., Astahov M. V., Rodin A. O. Amorphous ferromagnetic microwire in the microwave cavity Ferromagnetic resonance and absorption // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2003. P. 258—259.
3. Астахов М. В., Родин А. О., Дутов И. В. Измерение магнитной проницаемости аморфного ферромагнитного микропровода на частоте 10 ГГц // XII Междунар. конф. по спиновой электронике и гироекторной электродинамике. Москва, 2003. С. 321—327.

УДК 581.383

В. В. Лихошерст,
В. Я. Распопов, д-р техн. наук, проф.,
ГОУ ВПО "Тульский государственный
университет"

КОНТУР ЖЕСТКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРАХ И РАСЧЕТ ЕГО ПАРАМЕТРОВ

Рассмотрен вопрос создания контура жесткой обратной связи в микромеханических приборах с помощью одного емкостного преобразователя. Определена структура контура, необходимая для реализации обратной связи. Получены выражения для расчета параметров электрической цепи и определения требуемого коэффициента передачи цепи обратной связи, позволяющего обеспечить заданные характеристики микромеханического прибора.

Введение

В настоящий момент большинство разработанных конструкций микромеханических приборов компенсационного типа, таких как микроги-

роскопы [1, 2, 3] и микроакселерометры, имеют в своем составе как минимум два преобразователя, размещенных вдоль одной из осей, в направлении которой движется инерционная масса (ИМ). С помощью одного осуществляется съем сигнала о текущем положении ИМ прибора, другой играет роль датчика силы (момента — в зависимости от типа датчика), с его помощью происходит управление положением ИМ. Такое исполнение существенно упрощает схему управления и позволяет осуществлять непрерывное управление движением ИМ. Однако наряду с этим имеется и ряд недостатков:

- геометрические размеры конструкции увеличиваются за счет необходимости размещения двух преобразователей. Это приводит к увеличению массы ИМ, соответственно, жесткости упругого подвеса и, как следствие, к снижению эффективности работы обратной связи (ОС) [4];
- с технологической точки зрения требуется изготовление большего числа гребенчатых структур, что при конечной точности изготовления микроструктуры приводит к большему разбросу параметров от структуры к структуре и влечет за собой увеличение числа отбраковываемых изде-

лий (относится к технологиям поверхностной обработки);

- для микрогирископов, имеющих в своем составе две пары преобразователей (одна для режима движения, вторая для режима чувствительности [3]), ввиду того что вся структура является проводящей, возможно появление дополнительных ошибок в показаниях;
- ввиду того что электростатическая сила зависит от напряжения, прикладываемого к элементам структуры, и расстояния между ними, при подаче на датчик сема напряжения, постоянного по амплитуде и переменного во времени, возникает сила, направленная в сторону движения ИМ, что приводит к дополнительной нагрузке на упругий подвес и датчик силы и сказывается на точности измерения.

Цель данной статьи — показать возможность создания структуры ОС, позволяющей уменьшить указанные недостатки, и получить зависимости для определения параметров контура ОС.

Структура контура ОС

На основании сказанного выше напрашивается вывод, что для уменьшения степени влияния выявленных недостатков необходимо осуществлять ОС с помощью одного емкостного преобразователя, который представляет собой и датчик перемещения, и датчик силы, совмещенный в едином элементе конструкции микроструктуры. Для обеспечения работы такого преобразователя необходимо разделить по времени периоды работы преобразователя как датчика перемещения (период измерения) и как датчика силы (период управления). То есть помимо опорных напряжений, прикладываемых к преобразователю, необходимо сформировать еще один сигнал, на основании которого в электронной части прибора будет осуществляться разделение периодов измерения и управления. Для сохранения работоспособности прибора при этом следует в измерительную цепь прибора включить запоминающий усилитель.

Таким образом, измерение и управление положением ИМ в предлагаемом способе создания контура ОС будет осуществляться на высокой частоте (кГц), что позволяет:

- упростить технологический процесс изготовления прибора (изготавливается один преобразователь, а не два);
- использовать данный способ для создания жесткой ОС для осцилляторов с малым демпфированием без использования гибкой ОС, так как фазовое запаздывание в цепи ОС мало;
- использовать микроструктуры с малыми начальными емкостями ввиду малой длительности периода измерения.

Предположительная структура контура обратной связи по перемещению приведена на рис. 1

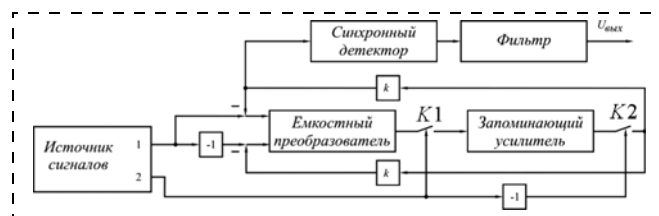


Рис. 1. Структура контура ОС

(промежуточные усилительные и преобразующие звенья не включены).

На рис. 1 приняты следующие обозначения: звенья с коэффициентом -1 — инвертирующие усилители с коэффициентом усиления 1; звенья с коэффициентом k — усилители, реализующие коэффициенты усиления цепи ОС. Источник сигналов генерирует следующие сигналы: 1 — опорный сигнал, прикладываемый к преобразователю; 2 — сигнал, с помощью которого ключами $K1$ и $K2$ осуществляется разделение периодов измерения и управления. Вид сигналов представлен на рис. 2.

Схема работает следующим образом. В начальный момент времени ключ $K1$ замкнут, ключ $K2$ разомкнут (сигнал 2). На плечи преобразователя от источника сигналов подаются противофазные напряжения одинаковой по модулю амплитуды (сигнал 1). Запоминающий усилитель осуществляет запоминание разностного сигнала, полученного с преобразователя. По прошествии времени, равного длительности импульса сигнала 2, происходит размыкание $K1$ и замыкание $K2$. По напряжению на выходе запоминающего усилителя в цепи ОС с коэффициентами k формируются напряжения, которые вычитаются из напряжений, приложенных к преобразователю. Так как сигналы на плечах преобразователя противофазны, то в одном плече происходит увеличение (суммирование) напряжения, а в другом — уменьшение (вычитание). Рис. 3 иллюстрирует прикладываемые к плечам преобразователя напряжения и напряжения на обкладках преобразователя.

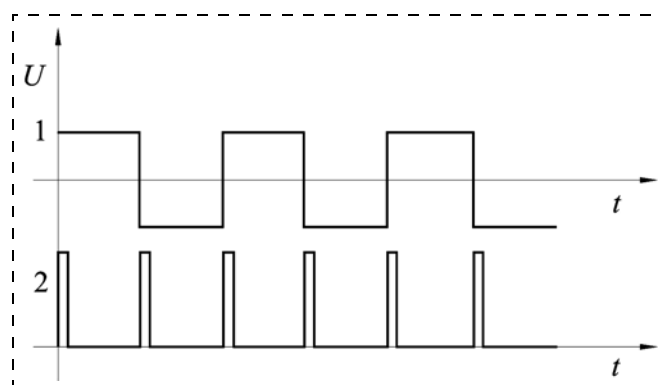


Рис. 2. Вид генерируемых сигналов

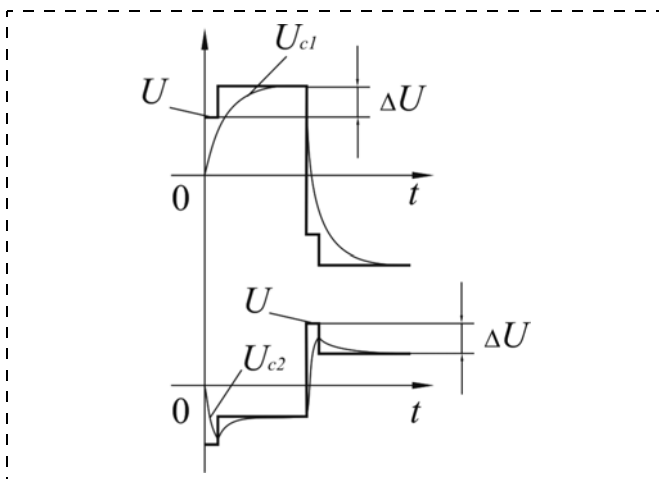


Рис. 3. Изменение напряжения на преобразователе

На рис. 3 видно, что амплитуда U напряжения, прикладываемого в измерительном периоде, одинакова для обоих плеч преобразователя, а амплитуды в период управления отличаются на величину $2\Delta U$ (напряжение в цепи ОС $\Delta U = k_{oc}\delta$, где k_{oc} — коэффициент передачи цепи ОС, δ — перемещение ИМ), что приводит к значительному увеличению электростатической силы (пропорционально квадрату приложенного напряжения) на одном плече преобразователя и уменьшению на другом. Это способствует высокой эффективности управления.

Напряжения на обкладках U_{c1} и U_{c2} не совпадают с приложенными к ним напряжениями вследствие временного запаздывания, связанного с зарядкой конденсаторов, и это приводит к тому, что сила, развиваемая преобразователем, будет недостаточна для компенсации перемещения ИМ. На основании сказанного становится очевидной необходимость получения зависимостей, определяющих взаимосвязь полученных в процессе предварительного проектирования [5, 6] (на основании анализа статических характеристик) параметров преобразователя и статического коэффициента передачи, обеспечивающего линейность силовой характеристики и значение коэффициента передачи, имеющих место в динамике.

Определение параметров емкостного преобразователя

Первоочередной задачей является определение постоянной времени емкостного преобразователя. Уравнение, описывающее заряд емкости за время измерительного периода, имеет вид

$$k_z U_0 = U_0(1 - e^{-\lambda_0 \tau_0}), \quad (1)$$

где k_z — коэффициент запаса; U_0 — амплитуда питающего напряжения; $\lambda_0 = \frac{1}{RC_0}$ (R — добавочное

сопротивление преобразователя, C_0 — начальная емкость преобразователя при перемещении, равном нулю); τ_0 — длительность импульса измерения.

В результате моделирования процессов, протекающих в электрической и механической частях прибора, на нелинейной модели [6], воспроизводящей импульсный характер изменения напряжений и силовых характеристик, получено, что значение k_z должно быть равно 0,75–0,8. Это позволяет расширить область перемещений ИМ, в которой сохраняется эффективность управления.

Из выражения (1) получим:

$$\lambda_0 = \frac{\ln(1 - k_z)}{\tau_0}.$$

Величину τ_0 можно выразить через параметры электронных элементов:

$$\tau_0 = \frac{T}{2k_\tau} = \frac{1}{4k_\tau \pi f},$$

где T — период частоты генератора опорного сигнала; f — частота генератора опорного сигнала, Гц; k_τ — отношение длительности импульса измерения к периоду частоты генератора опорного сигнала (на основании данных моделирования — не менее 5).

Окончательно получим:

$$\lambda_0 = -4\ln(1 - k_z)k_\tau \pi f,$$

откуда следует:

$$RC_0 = -\frac{1}{4\ln(1 - k_z)k_\tau \pi f}. \quad (2)$$

Таким образом, на основании полученных в результате предварительного проектирования значений емкости и требуемого коэффициента запаса, а также определяемых параметрами электроники частоты генератора опорного сигнала и отношения измерительного импульса к периоду частоты генератора опорного сигнала определяется добавочное сопротивление, необходимое для обеспечения требуемых параметров преобразователя. Выражение (1) может быть разрешено и относительно частоты генератора.

Определение требуемого коэффициента передачи электронной схемы управления

На основании вычислительных экспериментов, поставленных на нелинейной математической модели, описывающей как механическую, так и электрическую части прибора [6], получено, что как в статике, так и в динамике (в установившемся состоянии) эффективное значение силы, необходимое для компенсации силы действующей перегрузки, остается постоянным, следовательно, и напряжения компенсации, взятые за период частоты генератора опорного сигнала (площади напряжений),

должны быть равны как в статике, так и в динамике. Основываясь на данном положении, получим выражение для определения коэффициента передачи в динамике исходя из статического коэффициента передачи, полученного в результате вычислений на основании предлагаемой методики расчета параметров [2].

В статике площадь управляющего воздействия, взятого за половину периода генератора опорного сигнала, будет определяться выражением

$$S^{stat} = 2\Delta U \frac{T}{2} = \Delta UT,$$

где S^{stat} — площадь управляющего воздействия; ΔU — амплитуда управляющего воздействия; T — период генератора опорного сигнала.

Выражение для определения амплитуды управляющего воздействия имеет вид

$$\Delta U = U_0 k_{oc}^{stat} \bar{\delta},$$

где U_0 — амплитуда напряжения генератора опорного сигнала; k_{oc}^{stat} — относительный статический коэффициент передачи, обеспечивающий линейность силовой характеристики преобразователя; $\bar{\delta} = \frac{\delta}{\delta_m}$ — текущее относительное перемещение (δ_m — максимально возможное перемещение ИМ).

Так как равенство площадей управляющих напряжений имеет место при установившемся состоянии, то текущее относительное перемещение $\bar{\delta} = 1$, и выражение для определения площади управляющего импульса в статическом режиме при действии максимальной перегрузки примет вид

$$S^{stat} = U_0 k_{oc}^{stat} T.$$

В динамике при действии измерительного импульса (при условии действия перегрузки) электростатическая сила всегда будет направлена на схлопывание обкладок, поэтому при действии управляющего импульса сила, развиваемая преобразователем, должна быть такой, чтобы компенсировать как силу действующей перегрузки, так и схлопывающую силу, действующую в измерительном периоде. Учитывая, что в динамике напряжение на емкостном преобразователе нарастает не мгновенно, получим напряжение, имеющееся на каждом из емкостных преобразователей в конце действия периода измерения:

$$\Delta U_1^{IZ} = U_0(1 - e^{-\lambda_1 \tau_0});$$

$$\Delta U_2^{IZ} = U_0(1 - e^{-\lambda_2 \tau_0});$$

где τ_0 — длительность измерительного импульса; λ_1, λ_2 — частоты емкостных преобразователей:

$$\lambda_1 = \lambda_0 - \Delta\lambda;$$

$$\lambda_2 = \lambda_0 + \Delta\lambda.$$

Измеренное напряжение за время действия измерительного периода, пропорциональное перемещению, будет равно разнице напряжений на преобразователях:

$$\Delta U^{IZ} = U_0 e^{-\lambda_0 \tau_0} \text{sh}(\Delta\lambda \tau_0).$$

Управляющее напряжение на обкладках преобразователей будет иметь вид

$$\Delta U^* = \bar{k}_{oc}^{din} \Delta U^{IZ},$$

где $\bar{k}_{oc}^{din} = \frac{k_{oc}^{din}}{k_{oc}^{stat}}$ — относительный коэффициент передачи (k_{oc}^{din} — коэффициент передачи в динамике).

Площадь управляющего импульса в динамике

$$S_{upr}^{din} = 2\Delta U^* \left(\frac{T}{2} - \tau_0 \right).$$

Площадь измерительного импульса в динамике:

$$S_{iz}^{din} = \Delta U^{IZ} \tau_0.$$

Полная площадь в динамике:

$$S_{\Sigma}^{din} = S_{upr}^{din} - S_{iz}^{din}.$$

Приравняем полученные площади напряжений $S^{stat} = S^{din}$ и получим выражение

$$U_0 k_{oc}^{stat} T = 2U_0 e^{-\lambda_0 \tau_0} \text{sh}(\Delta\lambda \tau_0) \left[2\bar{k}_{oc}^{din} \left(\frac{T}{2} - \tau_0 \right) - \tau_0 \right].$$

Выразим из полученного выражения отношение динамического коэффициента передачи к статическому:

$$\bar{k}_{oc}^{din} = \frac{k_N}{1 - \frac{2\tau_0}{T}} \left[\frac{k_{oc}^{stat}}{2e^{-\lambda_0 \tau_0} \text{sh}(\Delta\lambda \tau_0)} + \frac{\tau_0}{T} \right], \quad (3)$$

где $k_N = (1,3 \div 1,4)$ — поправочный коэффициент, полученный на основании данных моделирования и зависящий от первоначальной амплитуды заряда емкостного преобразователя за время действия измерительного периода.

Требуемый коэффициент передачи в динамике

$$k_{oc}^{din} = \bar{k}_{oc}^{din} k_{oc}^{stat}.$$

Следует отметить, что $\bar{k}_{oc}^{din}$ имеет размерность В/В, т. е. это коэффициент передачи электронной схемы создания обратной связи по перемещению.

Заключение

Предложена структура контура жесткой обратной связи, реализуемая на высокой частоте с помощью одного емкостного преобразователя, не имеющая недостатков схем с двумя преобразователями.

Найдены аналитические выражения (2) и (3), позволяющие уточнить данные, получаемые в процессе предварительного расчета параметров, и связать рассчитанные данные механической части микромеханического прибора с реальными параметрами генераторов опорного и измерительного сигналов добавочным сопротивлением, увеличивающим постоянную времени емкостного преобразователя. Полученное выражение (3) позволяет рассчитывать требуемый коэффициент передачи предложенной схемы контура обратной связи по перемещению. На основании полученных данных на следующих этапах проектирования микромеханического прибора должны проводиться расчет параметров и выбор электронных элементов, кото-

рые будут использоваться в цепях съема сигнала и обратной связи по перемещению.

Список литературы

1. **Patent 6327907 US**, G01P 15/14. Microgyroscope having asymmetric comb sensors / Kyu-Yeon Park; Samsung Electro-Mechanics Co., Ltd. 11.12.2001. 15 p.
2. **Patent 6044707 US**, G01P 15/14. ANGULAR RATE SENSOR / Kyu-Yeon Park; Aisin Seiki Kabushiki Kaisha; 04.04.2000; 10 p.
3. Тимошенков С. П., Зотов С. А., Морозова Е. С., Балычев В. Н., Прокопьев Е. П. Передаточные функции чувствительного элемента микромеханического вибрационного гироскопа LL-типа // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 9. С. 32—34.
4. Мельникова Е. Н., Мельников В. Е. Некоторые особенности компенсационных акселерометров с маятниковым чувствительным элементом на упругом подвесе // Авиакосмическое приборостроение. 2007. № 6. С. 21—25.
5. Лихошерст В. В. Расчет параметров и характеристик микромеханических акселерометров // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. 2006. № 6. С. 66—71.
6. Лихошерст В. В. Проектирование и моделирование работы микромеханических акселерометров // Матер. VIII конф. молодых ученых. Навигация и управление движением. С.-Пб., 2007. С. 76—83.

УДК 531.383

А. В. Никулин, ГОУ ВПО Тульский государственный университет

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СОБСТВЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ LL-ТИПА

Выполнен анализ влияния геометрических размеров упругих элементов различного конструктивного исполнения на частоты колебаний, расстройку и масштабный коэффициент МГ LL-типа. Сформулированы выводы о целесообразности практического использования рассмотренных упругих элементов.

Микромеханические гироскопы, или микрогироскопы (МГ), являются электромеханическими системами, в которых энергия вынужденных (первичных) колебаний (режим движения — РД) инерционной массы на упругом подвесе (резонатор) при появлении переносной угловой скорости преобразуется в энергию вторичных колебаний (режим чувствительности — РЧ), которые содержат информацию об измеряемой угловой скорости. По виду движения инерционных масс в РД и РЧ различают гироскопы LL-типа (*linear-linear*), или LL-гироскопы; гироскопы RR-типа (*rotare-rotare*), или

RR-гироскопы, и гироскопы LR-типа, или LR-гироскопы. В LL-гироскопах инерционные массы в РД и РЧ совершают поступательные перемещения, в RR-гироскопах — вращательные перемещения, в LR (RL)-гироскопах — различные комбинации поступательных и вращательных перемещений инерционных масс [1]. Наибольшее распространение получили МГ LL-типа, поскольку изготовление их чувствительных элементов (ЧЭ) и сборка требуют меньшего числа технологических этапов, что сказывается на их стоимости, при этом по своим характеристикам они не уступают МГ RR- и LR-типа.

Проектирование микромеханических гироскопов требует от разработчика решения целого ряда задач, одной из которых является разработка конструкции чувствительного элемента. При этом

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Обозначение	Параметр	Значение
Ω_z	Диапазон измерения, град/с	300
$\Delta\omega$	Полоса пропускания, Гц	40
Δx	Амплитуда колебаний РД, мкм	1
ω_x	Частота колебаний в РД, Гц	3000
Δ	Расстройка частот РД и РЧ, %	3
c	Толщина структуры, мкм	5
w	Ширина УЭ РД и РЧ, мкм	2
ρ	Плотность, кг/м ³	2330
E	Модуль упругости, ГПа	165
δ	Допуск на изготовления, мкм	—

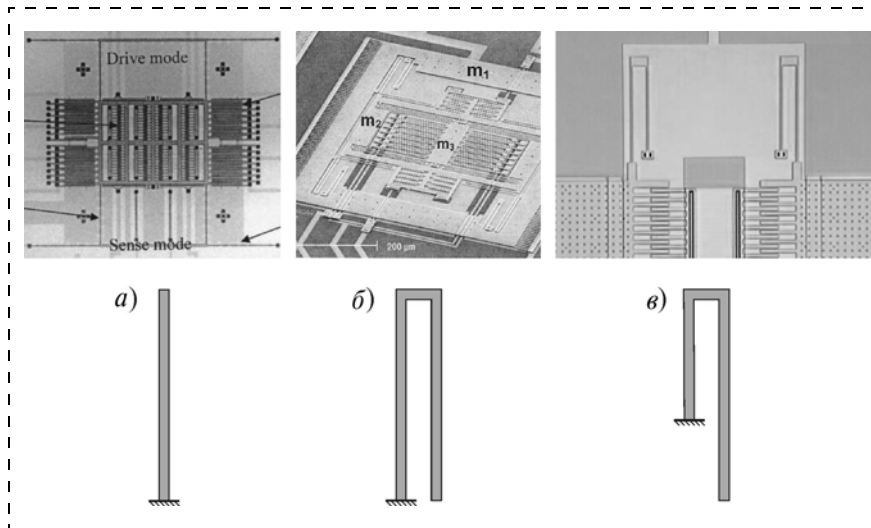


Рис. 1. Типовые конструкции УЭ подвеса МГ LL-типа

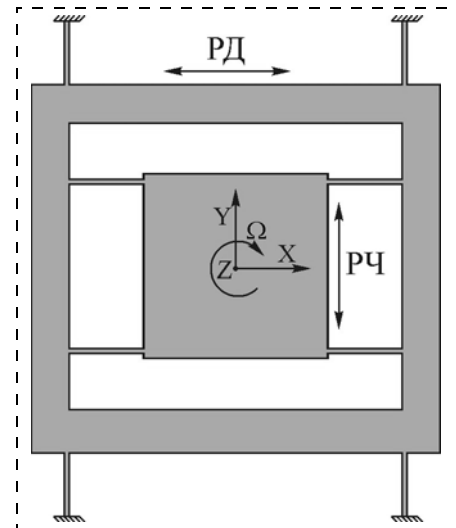
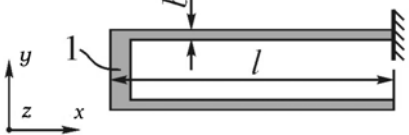
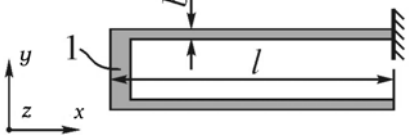
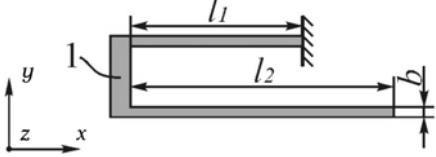


Рис. 2. Кинематическая схема МГ LL-типа

Таблица 2

Параметры упругих элементов

№	Конструкция	Формула для вычисления жесткости	Ограничения
1		$k_z = \frac{Ebc^3}{l^3}$, где b — ширина УЭ	—
2		$k_y = \frac{1}{2} Ec \left(\frac{b}{l}\right)^3$, где c — толщина УЭ	Элемент 1 не деформируется
3		$k_y = \frac{Ecb^3}{(l_1^3 + l_2^3)}$, где c — толщина УЭ	Элемент 1 не деформируется

немаловажным является выбор функциональных узлов (кинематическая схема, упругие элементы подвеса, преобразователи силы и перемещения), обеспечивающих требуемые характеристики в соответствии с техническим заданием. Конструкция упругих элементов (УЭ) подвеса является одним из наиболее критичных элементов конструкции ЧЭ МГ, поскольку собственные частоты, расстройка и, как следствие, постоянство масштабного коэффициента будут определяться точностью обеспечения их геометрических размеров при производстве. В связи с этим важным является оценка влияния геометрических размеров на указанные параметры для различных конструктивных исполнений УЭ.

На рис. 1 приведены фотографии чувствительных элементов МГ LL-типа, а ниже кинематические схемы используемых в них упругих элементов подвеса. Представленные УЭ являются типовыми для МГ LL-типа, что подтверждается большим числом конструкций, представленных в патентных описаниях и ряде публикаций [1].

В работе [2] рассмотрено влияние геометрических параметров УЭ МГ RR-типа на собственные частоты, расстройку и масштабный коэффициент. Используя предложенный в работе [2] подход, выполним анализ влияния геометрических параметров УЭ (рис. 1), используя кинематическую схему, представленную на рис. 2. Колебания в режиме движения (РД) совершаются в направлении оси X , а в режиме чувствительности (РЧ) — оси Y .

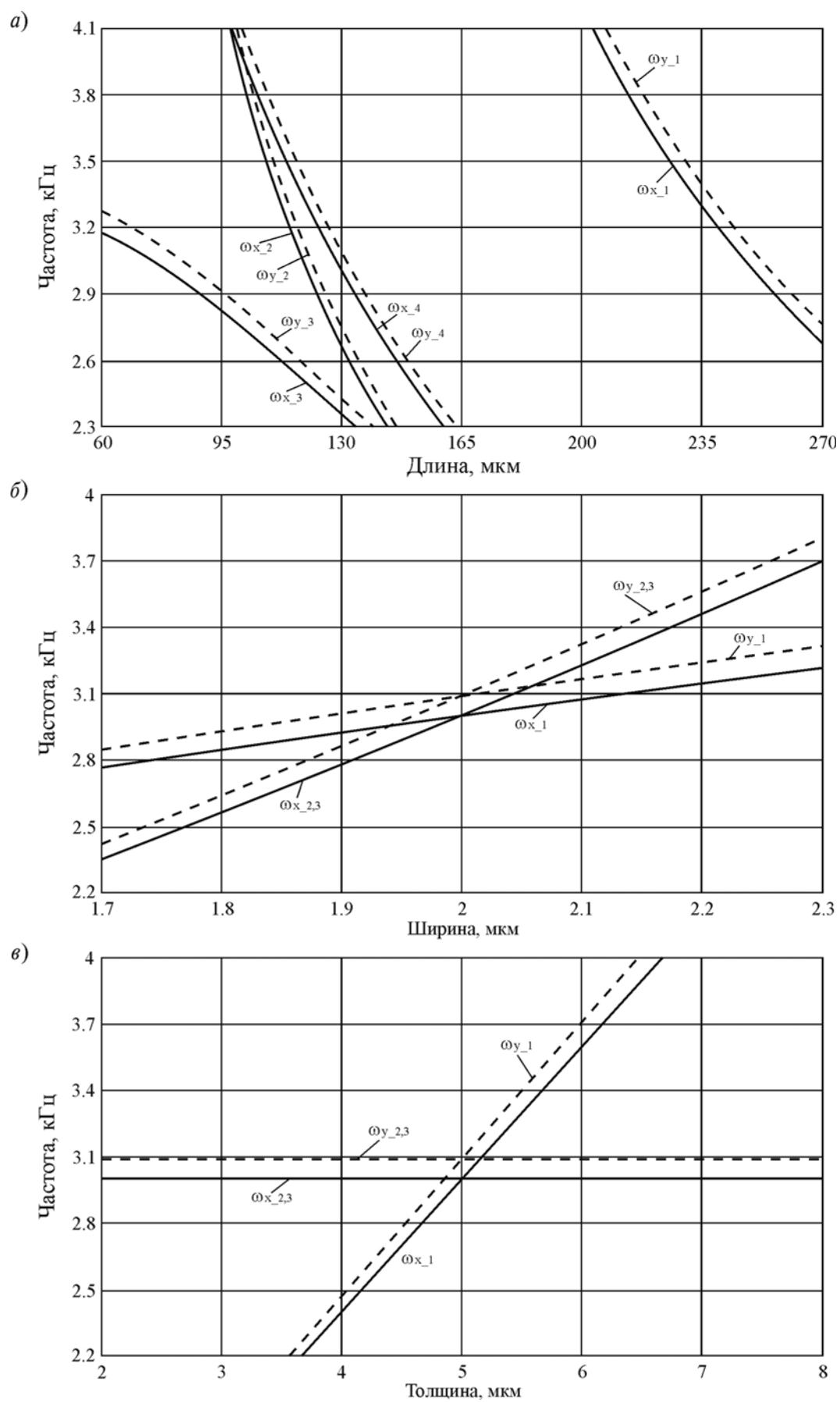


Рис. 3. Зависимость собственных частот колебаний от изменения:
 а — длины УЭ РД и РЧ; б — ширины УЭ РД и РЧ; в — толщины структуры

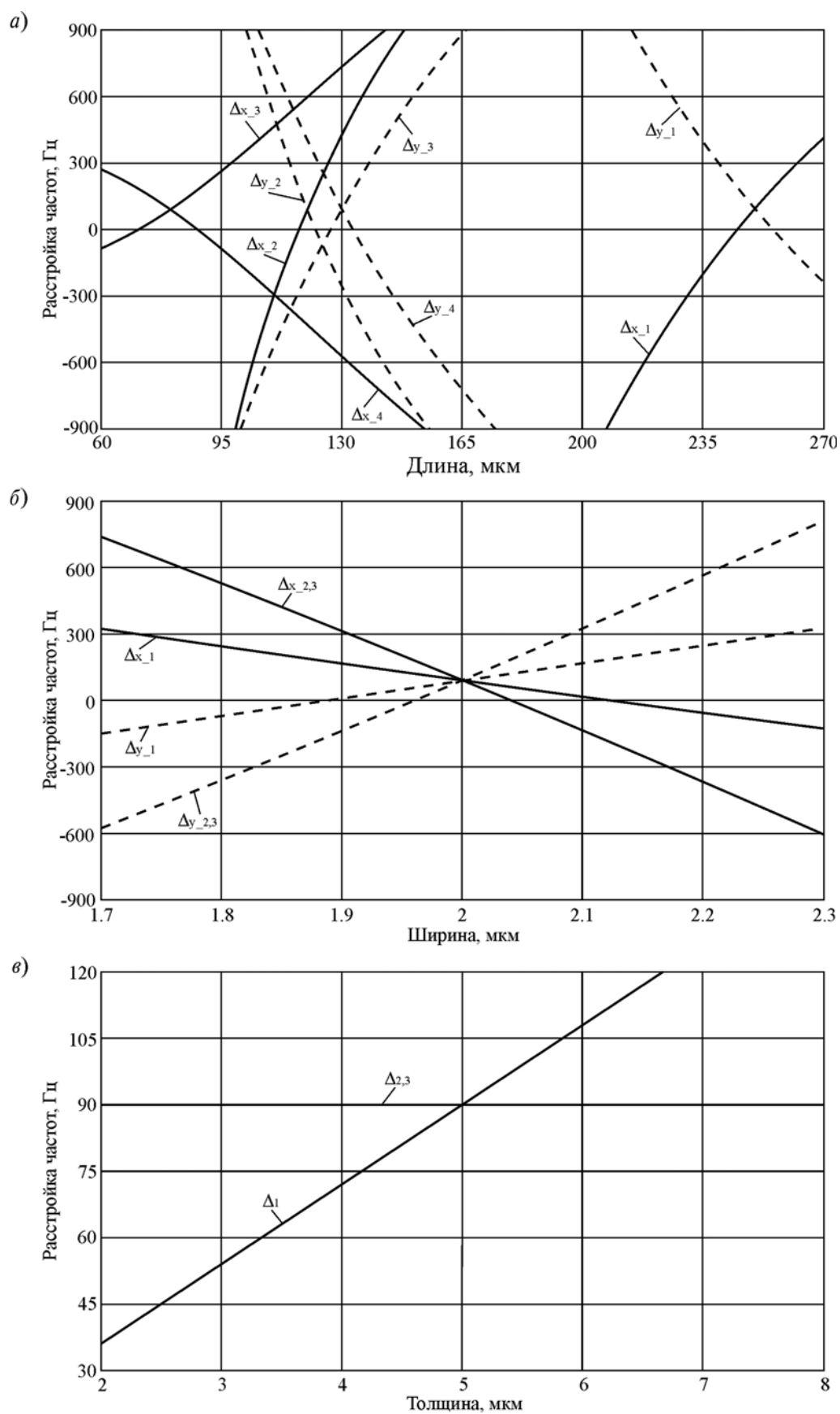


Рис. 4. Зависимость расстройки частот от изменения:

а — длины УЭ РД и РЧ; *б* — ширины УЭ РД и РЧ; *в* — толщины структуры

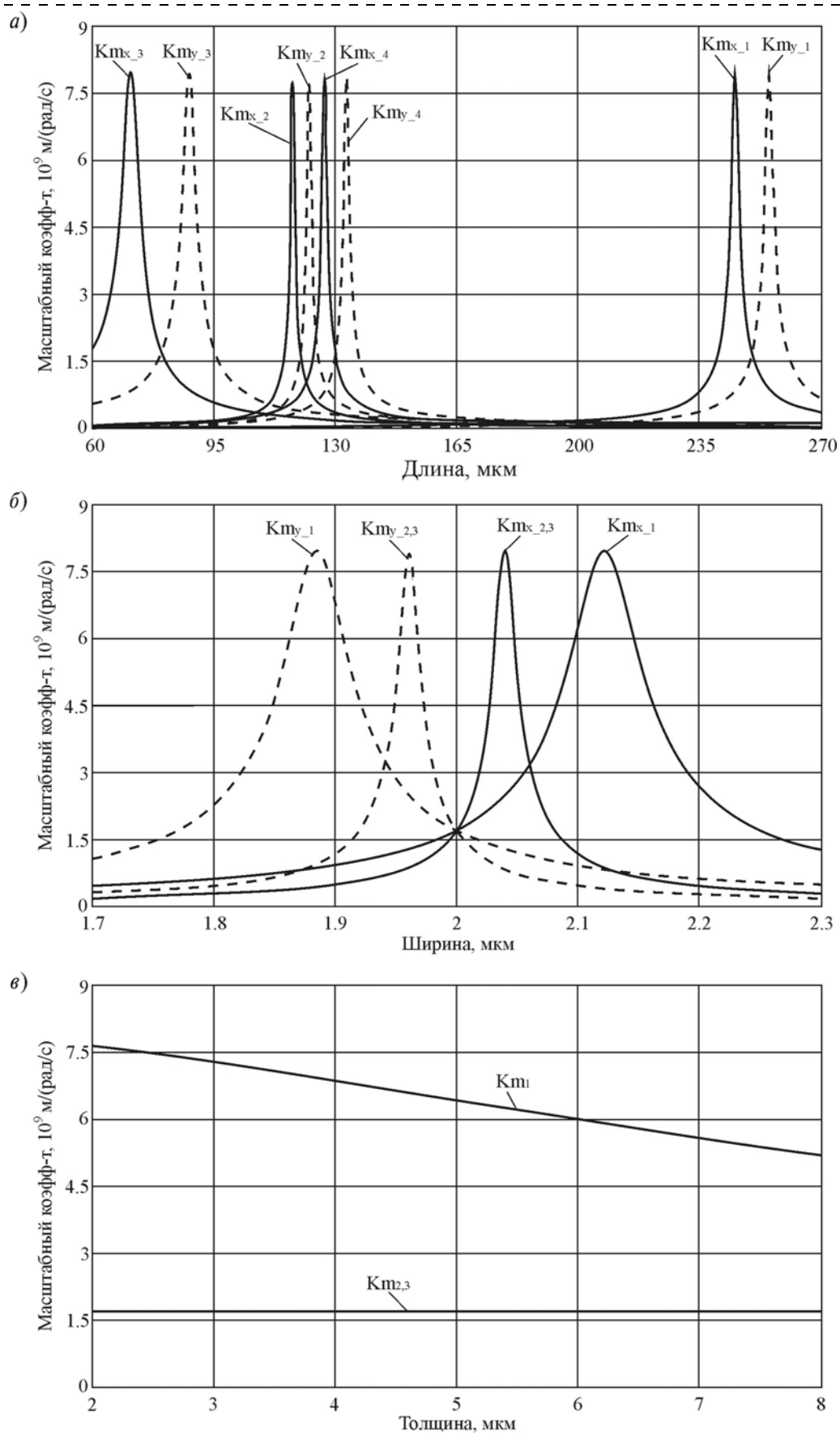


Рис. 5. Зависимость масштабных коэффициентов от изменения:

a — длины УЭ РД и РЧ; *б* — ширины УЭ РД и РЧ; *в* — толщины структуры

Таблица 3

Коэффициенты влияния изменения размеров УЭ

Параметр	Упругие элементы		
	1	2	3
Коэффициенты влияния на собственные частоты колебаний, Гц/мкм:			
Длина УЭ L (РД)	9,938	39,073	—
Длина УЭ L (РЧ)	10,395	40,245	—
Длина УЭ L_1 (РД)	—	—	10,427
Длина УЭ L_1 (РЧ)	—	—	10,74
Длина УЭ L_2 (РД)	—	—	28,317
Длина УЭ L_2 (РЧ)	—	—	29,168
Ширина УЭ b (РД)	2248	2248	2248
Ширина УЭ b (РЧ)	2315	2315	2315
Толщина УЭ c (РД)	600	0	0
Толщина УЭ c (РЧ)	800	0	0
Коэффициенты влияния на расстройку частот, Гц/мкм			
Длина УЭ L (РД)	18,169	39,073	—
Длина УЭ L (РЧ)	18,714	40,245	—
Длина УЭ L_1 (РД)	—	—	10,428
Длина УЭ L_1 (РЧ)	—	—	10,741
Длина УЭ L_2 (РД)	—	—	28,317
Длина УЭ L_2 (РЧ)	—	—	29,166
Ширина УЭ b (РД)	752,133	2247	2247
Ширина УЭ b (РЧ)	774,7	2315	2315
Толщина структуры c	18	0	0

При расчете использованы исходные данные, представленные в табл. 1, и приняты следующие ограничения: МГ прямого измерения и находится на неподвижном основании, толщина всей структуры одинаковая, материал структуры — поликристаллический кремний, УЭ работают в линейной зоне.

Геометрические параметры УЭ, обеспечивающие заданные в табл. 1 характеристики, а также выражения для вычисления их жесткости, использовавшиеся в расчетах, представлены в табл. 2.

Результаты расчета представлены на рис. 3—5, при этом были приняты следующие обозначения: ω — собственная частота колебаний; Δ — расстройка частот; Km — масштабный коэффициент; x, y — индексы, указывающие на упругий элемент РД или РЧ соответственно; индексы 1, 2 — номера упругих элементов 1 и 2 по табл. 2; индексы 3, 4 — индексы, указывающие на длины l_1 и l_2 элемента 3 (табл. 2) соответственно.

По полученным графикам зависимостей собственных частот колебаний (рис. 3) и расстройки частот (рис. 4) от геометрических размеров упругих элементов были вычислены коэффициенты влияния, представленные в табл. 3.

Полученные результаты, приведенные на рис. 3—5 и в табл. 3, позволяют сделать следующие выводы:

- частоты колебаний РД и РЧ и расстройка в большей степени зависят от изменения ширины и в меньшей степени от длины УЭ;
- УЭ, приведенный на рис. 1, *а*, имеет наименьший коэффициент влияния при изменении его длины, однако влияние на частоты колебаний и расстройку оказывает изменение толщины структуры, в отличие от УЭ, показанных на рис. 1, *б*, *в*, для которых изменение толщины структуры не оказывает влияния на частоты колебаний, а следовательно, и на расстройку частот и масштабный коэффициент;
- геометрические параметры упругих элементов, приведенных на рис. 1, *б*, *в*, оказывают большее влияние на частоты колебаний, расстройку и масштабный коэффициент, чем параметры УЭ, приведенного на рис. 1, *а*, вследствие чего для обеспечения требуемых характеристик ЧЭ МГ потребуется более высокая точность изготовления, однако постоянное развитие технологий производства позволит в скором времени обеспечить необходимые допуски;
- максимальный масштабный коэффициент достигается при нулевой расстройке частот РД и РЧ и убывает по мере ее возрастания;
- изменение толщины структуры не оказывает влияния на характеристики ЧЭ МГ в случае с УЭ, показанных на рис. 1, *б* и *в*, что позволяет уменьшить число технологических этапов при производстве (например, не использовать этап химико-механического шлифования для обеспечения требуемой толщины структуры);
- характеристики УЭ, показанных на рис. 1, *б* и *в*, имеют высокую степень идентичности, это позволяет говорить, что степень влияния изменения их геометрических размеров на частоты колебаний, расстройку и масштабный коэффициент будет аналогичной, однако УЭ, приведенный на рис. 1, *б*, является более предпочтительным, чем УЭ, показанный на рис. 1, *в*, поскольку при равенстве их жесткостей первый УЭ (см. рис. 1, *б*) будет иметь меньшие габаритные размеры.

Полученные коэффициенты влияния справедливы и в случае, если МГ находится на подвижном основании, вращающемся с угловой скоростью Ω_z . Аналогичным образом может быть выполнен анализ влияния изменения геометрических параметров других конструкций УЭ.

Список литературы

1. **Распопов В. Я.** Микромеханические приборы: учебное пособие. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
2. **Никулин А. В.** База данных конструкций и базовые расчетные схемы микромеханических гироскопов // Материалы VIII конференции молодых ученых "Навигация и управление движением". СПб.: ГНЦ РФЦНИИ "Электронприбор", 2007. С. 83—89.

В. А. Карташев, д-р. физ.-мат. наук., проф.,
В. В. Карташев,
 Институт прикладной математики РАН,
 vakart@keldysh.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАТОЧКИ ИГЛЫ ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА

Построена математическая модель изменения геометрии иглы в процессе электрохимической заточки. Для некоторых реализуемых на практике случаев найдены стационарные решения. Показано, что для получения игл с малыми радиусами закругления целесообразно использовать конические заготовки с предельно малыми углами раствора конуса.

Иглы для туннельного микроскопа в настоящее время изготавливаются вручную методом электрохимического травления. Недостатками ручного производства являются невозможность получать стабильные характеристики игл, иглы с заранее заданными свойствами и экстремальными геометрическими параметрами. Попытки автоматизировать процесс производства игл пока оказывались безуспешными. Сложность задачи состоит в том, что о ходе процесса травления можно судить только по силе тока, протекающего через иглу. Эта зависимость оказывается нелинейной и неоднозначной, поэтому не позволяет обойтись линейными регуляторами. Таким образом, построение автоматического управления процессом требует математического моделирования процесса и его аналитического исследования. Целью такого исследования должно быть нахождение таких способов управления, которые либо учитывают неоднозначность зависимости тока от параметров процесса, либо не зависят от нее.

Одним из решений представляется выход на стационарный процесс, в котором геометрические параметры иглы постоянны и поэтому предсказуемы заранее.

В настоящей статье исследуется стационарный процесс для случая, когда на начальный диаметр иглы не наложено никаких ограничений. Показано, что этот процесс описывается обыкновенным дифференциальным уравнением, которое допускает аналитическое исследование. В результате исследования получена оценка зависимости радиуса закругления иглы от параметров заготовки.

Получение игл методом электрохимического травления

В туннельной микроскопии используются иглы со сверхмалым радиусом закругления конца (до 1 нм и менее) [1, 2]. Только при таком радиусе закругления удастся получить рельеф поверхности с раз-

решением лучше 1 нм (вплоть до атомарного). Использование игл со сверхтонкими остриями делает возможным интерпретировать изображения с учетом механики конструкции зондового микроскопа [3, 4] и физических особенностей [5, 6] взаимодействия иглы с подложкой, так как в процессе сканирования туннельный зазор не превышает нескольких ангстрем.

Сверхтонкие острия можно получить в процессе электрохимического травления тонкой проволоки (диаметром 0,2–0,3 мм) из медленно окисляющихся металлов (например, вольфрама). Наибольшее распространение получил процесс травления в пленке едкого натра (рис. 1) [7].

Во время нахождения проволоки в пленке часть вещества металла стравливается, и к некоторому моменту времени нижняя часть проволоки (I на рис. 1) под действием собственной тяжести падает, при этом на месте разрыва образуется игла, так как слой металла уменьшается в процессе деформации постепенно.

Оценки показывают, что технология травления игл в пленке позволяет получать достаточно острые иглы. Действительно, деформация проволоки ε под действием веса P ее нижнего конца определяется формулой [8]

$$\varepsilon \approx \frac{P}{Ed^2},$$

где E — модуль упругости (примерно $1 \cdot 10^{-9}$ Н/м²); d — диаметр поперечного сечения проволоки в месте отрыва.

Из теории пластичности известно, что металлическая проволока разрывается при относительных деформациях, лежащих в диапазоне 0,03–0,1. Расчеты с использованием формулы для деформации показывают, что при диаметре иглы $d = 0,3$ мм и длине свешивающегося конца 3 мм диаметр в месте разрыва получается равным всего 30 нм.

Это значение само по себе достаточно мало. Выбирая подходящие материалы, можно получать еще более тонкие иглы. Например, предполагается, что у вольфрама в месте разрыва образуются волоски, диаметр которых имеет порядок нанометров.

В связи со сказанным представляет интерес исследование формы, которую принимает игла в процессе электрохимического травления. В настоящей работе делается попытка выяснить, существует ли такой профиль, который не изменяется

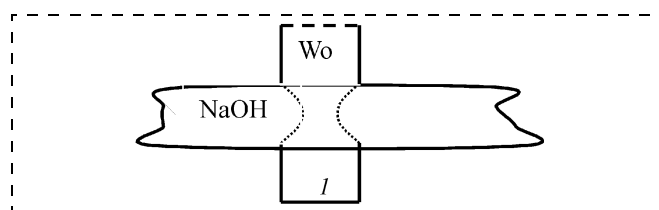


Рис. 1.

при травлении. Существование такого профиля позволило бы построить управление процессом получения иглы.

Сам факт существования такого профиля не является очевидным. Отличие рассматриваемой математической модели от реального процесса травления состоит в том, что на диаметр иглы не накладывается ограничений. В реальных условиях игла получается из проволоки конечного диаметра, поэтому диаметр получаемой иглы не может его превосходить. Если же в задачу добавить ограничение на диаметр, то форма иглы соответствующим образом изменится. В модели учтем, что коэффициент скорости растворения не является постоянным и может зависеть от различных факторов, например локальной кривизны проволоки.

Математические модели процесса электрохимической заточки иглы

Рассмотрим второй способ получения сверхострых игл — процесс электрохимической заточки проволоки в растворе. Он происходит следующим образом.

Тонкая проволока помещается в раствор едкого натра, и между электродом и проволокой подается напряжение. Постепенно проволока истончается и на своем конце приобретает форму иглы (рис. 2). Этот процесс обычно используется для подтравливания проволоки в целях уменьшения ее диаметра и получения более тонкой иглы в первом процессе.

Вместе с тем, представляется возможным получение иглы со сверхмалым закруглением только в этом процессе. Данное предположение основано на том, что в процессе электрохимического травления возможно уменьшение диаметра проволоки до сколь угодно малого значения и получение сколь угодно малого радиуса закругления. Кроме того, возможно использование технологий растяжения и отрыва конца иглы под действием силы тяжести. Момент отрыва гипотетически можно установить по скачку тока электрохимической реакции.

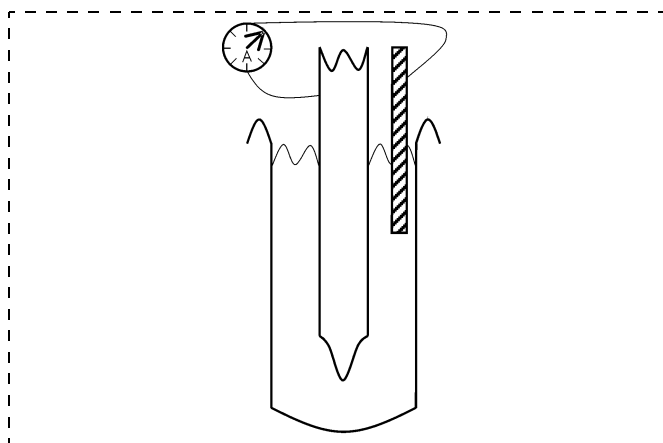


Рис. 2.

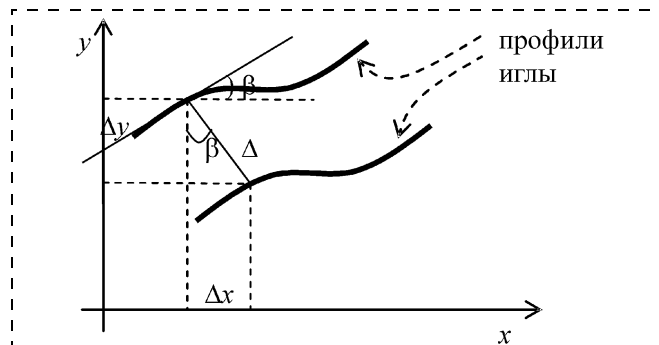


Рис. 3.

На рис. 3 изображены профили иглы в различные моменты времени. Из рисунка следует:

$$\Delta y = -\Delta \cos \beta = -\frac{\Delta}{\sqrt{1+y'^2}}; \Delta x = \Delta \sin \beta = \frac{\Delta y'}{\sqrt{1+y'^2}}.$$

Координаты каждой точки кривой преобразуются по следующему закону:

$$(x, y) \mapsto (x + \Delta x, y + \Delta y) = \left(x + \frac{y' \Delta}{\sqrt{1+y'^2}}, y - \frac{\Delta}{\sqrt{1+y'^2}} \right).$$

Для описания процесса электрохимического травления можно пользоваться различными моделями. Рассмотрим некоторые из них.

Система уравнений в частных производных от двух переменных. Зависимость смещения точки пропорционально времени протекания реакции выразим равенством $\Delta = k\Delta t$. На скорость реакции, которая задается коэффициентом k , пока не накладывается никаких ограничений.

Тогда получим систему уравнений, описывающую процесс травления для любого коэффициента скорости растворимости:

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{ky' \Delta t}{\sqrt{1+y'^2}}; \\ \Delta y = -\frac{k \Delta t}{\sqrt{1+y'^2}}. \end{cases}$$

В дифференциальной форме

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial t} = k \frac{\frac{\partial y}{\partial x}}{\sqrt{1+\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2}}; \\ \frac{\partial y}{\partial t} = -k \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2}}. \end{cases}$$

Система уравнений в частных производных от одной переменной. Предположим, что в любой момент времени игла является симметричной относительно своей оси.

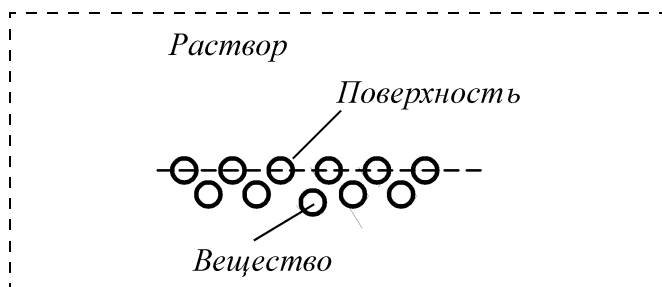


Рис. 4.

Обозначим ее профиль в виде функции $y = f(x, t)$ (переменная x направлена вдоль оси). Принимая во внимание, что $\frac{\partial y}{\partial t} = f'_x \frac{\partial x}{\partial t} + f'_t$, получим

$$-k \frac{1}{\sqrt{1 + (f'_x)^2}} = k \frac{f''_x}{\sqrt{1 + (f'_x)^2}} + f'_t.$$

После преобразований $f'_t = -k \sqrt{1 + f'^2_x}$ уравнение преобразуется к виду $f(x, 0) = \varphi(x)$, где $\varphi(x)$ — начальная форма иглы.

Учет зависимости скорости травления от кривизны профиля. Известно, что скорость реакции отличается от средней тем больше, чем большую кривизну имеет поверхность, причем на выпуклых участках она больше, на вогнутых — меньше.

В случае ровной поверхности (на рис. 4 кривизна равна нулю) атомы, расположенные на ней, испытывают примерно одинаковое влияние (притяжение) как атомов самого вещества, так и вещества растворителя. Однако соотношение между ними резко меняется на неровных участках (на рис. 5 кривизна отрицательна), так как степень влияния пропорциональна отношению площадей частей сферы, заключенной внутри телесных углов вещества и растворителя.

Характер изменения этого соотношения можно представить себе следующим образом. Если обозначить через ε отношение угла при вершине неровности к развернутому полному углу (π), то, принимая во внимание, что площадь поверхности внутри телесного угла пропорциональна его квадрату, получим, что отношение площадей можно

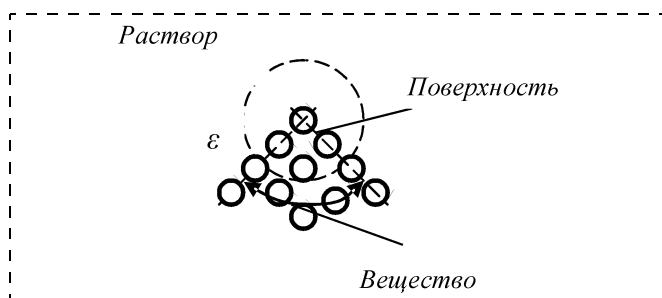


Рис. 5.

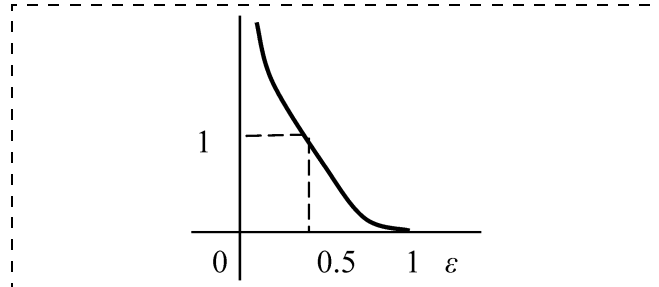


Рис. 6.

представить отношением $\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2}$. График этой зависимости приведен на рис. 6.

Непосредственно из рисунка следует, что скорость растворения быстро увеличивается при уменьшении угла ε (острая выпуклость) и уменьшается до 0 при его увеличении (глубокая впадина).

Зависимость скорости растворения от кривизны можно учесть с помощью формулы $k(x) = w(K(x))$, в которой $K(x)$ — кривизна поверхности в точке. Функция w учитывает знак кривизны с учетом того, что выпуклые части поверхности травятся быстрее, вогнутые — медленнее. Если поверхность иглы задается в виде функции $f(x, t)$, то

$$K(x) = \frac{f''_x}{(1 + f'^2_x)^{\frac{3}{2}}}.$$

В итоге уравнение для изменения поверхности иглы в процессе травления принимает вид

$$f'_t = w \left(\frac{f''_x}{(1 + f'^2_x)^{\frac{3}{2}}} \right) \sqrt{1 + f'^2_x}$$

с начальным условием в виде контура проволоки $\varphi(x)$: $f(x, 0) = \varphi(x)$.

Стационарные решения

Рассмотрим случай, когда в процессе травления иглы ее форма ($f(x, t)$) не меняется. Для этого достаточно, например, чтобы решение удовлетворяло равенству $f(x, t) = g(x - ct)$. Геометрически оно означает, что конец иглы движется (растворяясь) вдоль оси с постоянной скоростью c . Проволока, из которой получается игла, предполагается бесконечной.

Если скорость растворимости k постоянна для всех точек поверхности, то стационарное решение должно удовлетворять уравнению

$$g' = q \sqrt{1 + g'^2}, \quad q = k/c,$$

решение которого $g(x) = \frac{q}{\sqrt{1-q^2}}x$ дает конус.

Недостаток рассмотренной модели состоит в том, что острие конуса имеет нулевой радиус закругления и по этой причине не может быть взято в качестве приближения к результату процесса травления. Более существенно, что при этом не получается оценки на радиус закругления иглы ни снизу, ни сверху.

Для того чтобы учесть то обстоятельство, что участки с большой кривизной травятся быстрее, выберем коэффициент k пропорциональным кривизне. Будем также считать, что в любой момент времени игла является выпуклой. В этом случае функция w должна быть отрицательной. Примем ее равной константе. Рассмотрим плюсы и минусы такого подхода.

1. При нулевой кривизне скорость травления становится бесконечной. Поэтому трудно ожидать, что в качестве решения получатся фигуры со сверхмалым радиусом закругления. Полученная оценка радиуса закругления будет оценкой сверху.

2. При малой кривизне, т. е. для плоских участков, скорость травления приближается к нулевой, что не соответствует действительности. Противоречие с реальностью можно уменьшить, если предположить, что в процессе травления игла вдвигается в раствор.

Можно также принять во внимание, что в процессе реакции образуются пузырьки газа, которые, поднимаясь вверх, препятствуют поступлению щелочи к игле. Этот процесс приводит к существенному замедлению реакции в верхних слоях.

Уравнение образующего контура поверхности иглы примет вид

$$cg' = w \frac{g''}{1+g'^2}.$$

После преобразований приходим к уравнению

$$g'' = -qg'(1+g'^2), \quad q = -c/w.$$

Деля замену $z = g'$, понижаем порядок уравнения

$$\frac{dz}{z(1+z^2)} = -q$$

и приходим к решению

$$z = \sqrt{C_1 e^{2qx} - 1}.$$

Откуда следует, что

$$g(x) = \frac{1}{q} \arctg \sqrt{C_1 e^{2qx} - 1} + C_2,$$

где C_1 и C_2 — константы.

С учетом рассматриваемого случая, в котором принимается, что при нулевом радиусе закругления скорость травления иглы бесконечна, получаем условие $g'(0) = \infty$. Откуда $C_1 = 1$. Кроме того, не ограничивая общности рассмотрения, можно

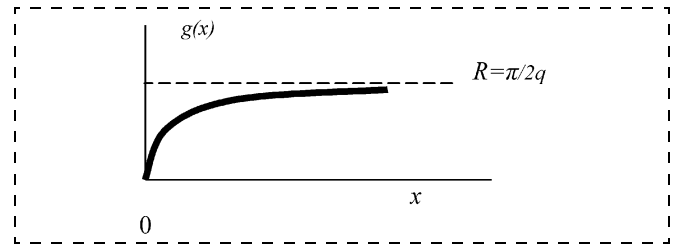


Рис. 7.

принять $g(0) = 0$. В этом случае $C_2 = 0$. График функции $g(x) = \frac{1}{q} \arctg \sqrt{e^{2qx} - 1}$ изображен на рис. 7. Он показывает форму иглы в стационарном случае.

Факт существования стационарного решения говорит о наличии таких условий, при которых форма иглы не меняется в процессе растворения. Вопрос о том, будет ли процесс формирования иглы из проволоки (имеющей форму цилиндра) сходиться к стационарной форме, требует отдельного рассмотрения.

На конце иглы (при $x \approx 0$)

$$g(x) \approx \sqrt{2 \frac{x}{q}} = 2 \sqrt{\frac{R}{\pi}} x.$$

Чем меньше коэффициент при $\sqrt{x}$, тем острее игла. В соответствии с полученной формулой в стационарном решении радиус закругления конца зависит только от диаметра проволоки. Записав это

равенство в виде $x = \frac{\pi}{4R} g^2$, находим, что радиус за-

кругления равен $\frac{2R}{\pi} \approx \frac{2}{3} R$, что означает, что ма-

лый радиус закругления может быть получен при малом диаметре проволоки. Это объясняется сделанным предположением о том, что при нулевом радиусе закругления скорость травления бесконечна. Покажем это.

Для того чтобы учесть особенности растворения при малых и больших значениях кривизны, предположим, что скорость растворения дается формулой

$$k(K) = \alpha - \beta \arctg K.$$

Коэффициенты α и β положительны, кривизна $K(x)$ отрицательна (так как функция $g(x)$ предполагается выпуклой). График зависимости приведен на рис. 8. Выбирая подходящими коэффициенты, можно получить любое соотношение между скоростями растворимости при малых и больших значениях кривизны. В итоге приходим к уравнению

$$cg' = \left(\alpha - \beta \arctg \frac{g''}{(1+g'^2)^{\frac{3}{2}}} \right) \sqrt{1+g'^2}.$$

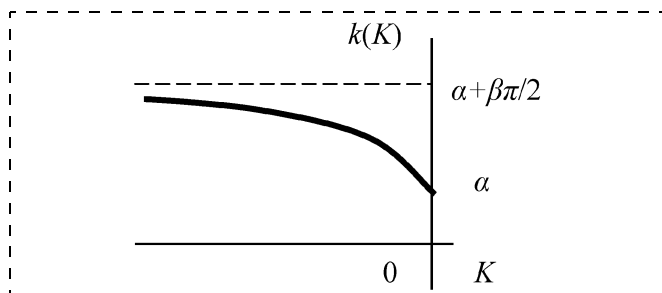


Рис. 8.

Оно запрещает решение в виде стержня, так как не существует решения для $\alpha \neq 0$ с асимптотическими условиями $g'(x) \rightarrow 0$, $g''(x) \rightarrow 0$ при $x \rightarrow \infty$. Вместе с тем, возможно решение типа конуса (рис. 9): $g'(x) \rightarrow \text{const}$, $g''(x) \rightarrow 0$ при $x \rightarrow \infty$.

Приняв угол раствора конуса за γ ($\gamma = \lim_{x \rightarrow \infty} g'(x)$), получим для него уравнение

$c\gamma = \alpha\sqrt{1+\gamma^2}$, которое имеет решение для всех значений α . При этом оказывается, что скорость растворения иглы в стационарном процессе зависит только от угла раствора конуса:

$$c = \alpha \sqrt{1 + \frac{1}{\gamma^2}}.$$

Для того чтобы найти радиус закругления иглы, рассмотрим решение, в котором $g'(x)$ велико. В этом случае уравнение упрощается:

$$g'' = -\text{tg} \frac{c-\alpha}{\beta} g'^3.$$

Решая его, получим:

$$g'(x) = \frac{1}{\sqrt{2\text{tg} \frac{c-\alpha}{\beta} x}}$$

$$\text{и } g(x) = \sqrt{\frac{2x}{\text{tg} \frac{c-\alpha}{\beta}}} = \sqrt{\frac{2x}{\alpha \left(\sqrt{1 + \frac{1}{\gamma^2}} - 1 \right)}}.$$

Непосредственно из формулы решения следует, что радиус закругления иглы явно зависит от угла

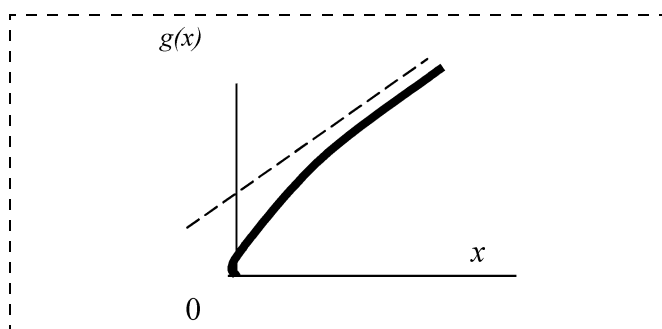


Рис. 9.

раствора конуса. Случаю малого радиуса закругления соответствуют большие значения знаменателя. Для того чтобы удовлетворить этому условию, достаточно взять $\gamma \ll 1$. Тогда формула решения упрощается:

$$g(x) = \sqrt{\frac{2x}{\text{tg} \frac{\alpha}{\beta\gamma}}}.$$

Эта формула позволяет сделать вывод о том, что за счет выбора заготовки в виде конуса с малым углом раствора можно обеспечить получение иглы со сколь угодно малым радиусом закругления.

Выводы

Построена математическая модель процесса электрохимического травления иглы в растворе конуса. Предложены способы ее упрощения. Рассмотрены стационарные решения. Получены следующие результаты.

- Установлено существование стационарных решений в случаях, если для всех точек поверхности скорость реакции постоянна либо пропорциональна кривизне поверхности. Последний случай приблизительно описывает технологию получения иглы, когда она в процессе травления вдвигается в раствор.
- Оценена возможная форма поверхности иглы в случае, когда зависимость скорости травления от кривизны имеет характеристику, близкую к реальной.
- Показано, что для получения игл с минимальными радиусами закругления можно использовать конические иглы с предельно малыми углами раствора конуса.

Список литературы

1. Неволин В. Л. Зондовые нанотехнологии в электронике. М.: Техносфера, 2006.
2. Колесов Д. В., Яминский И. В. Кантилеверы для сканирующей зондовой микроскопии // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 11. С. 5–11.
3. Карташев В. А., Бурухина Т. Ф. Влияние нерезонансных периодических возмущений на положение иглы туннельного микроскопа // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 8. С. 31–38.
4. Карташев В. А., Бурухина Т. Ф. Исследование зависимости отклонений иглы туннельного микроскопа от наклона его оси // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 9. С. 21–28.
5. Дедков Г. В. Физические аспекты взаимодействий зонд — поверхность в сканирующей зондовой микроскопии. Ч. I. // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 8. С. 2–12.
6. Симицына О. В. Обработка и анализ данных зондовой микроскопии. Обзор программного обеспечения // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 2. С. 2–7.
7. Миронов В. К. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004.
8. Тимошенко С. П. Сопротивление материалов. М.: Наука. 1965.

УДК 621.3.049.77

В. П. Пронин¹, канд. физ.-мат. наук,
А. Н. Пономарев², канд. техн. наук,
И. И. Хинич¹, канд. техн. наук,
И. А. Чистотин¹,

¹ Российский государственный педагогический университет им. А. М. Герцена, Санкт-Петербург,

² ООО "НТЦ прикладных нанотехнологий", Санкт-Петербург

СПЕКТРОСКОПИЯ УПРУГОГО ОТРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ КАК МЕТОД АНАЛИЗА ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА НАНОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

Для развития спектроскопии упругого отражения электронов предлагается модификация модели однократного упругого рассеяния, косвенно учитывающая кратное рассеяние электронов на атомах твердого тела. Обосновывается возможность использования этой модели для неразрушающего количественного метода определения распределения концентраций по глубине элементов многокомпонентных наноразмерных объектов.

Одним из условий развития нанотехнологий является совершенствование методов неразрушающего анализа и контроля наноразмерных систем. Эффективным методом анализа подобных систем является электронная спектроскопия. В настоящей статье рассматривается один из ее видов — спектроскопия упругого отражения электронов.

В области энергий $E > 100$ эВ упругое отражение параксиального пучка электронов твердым телом определяется в первую очередь их упругим рассеянием на отдельных атомах, сечение которого зависит от атомного номера, энергии электронов и угла рассеяния [1, 2]. В связи с этим метод спектроскопии упругого отражения электронов может быть использован для анализа элементного состава нанобъектов. Отметим, что при E порядка 0,1—10 кэВ глубина анализа может варьироваться от долей до десятков нанометров [3], что обеспечивает возможность построения концентрационных профилей.

Электроны, упруго отраженные твердым телом, могут выходить в окружающий объем, испытав несколько актов упругого рассеяния на атомах, при

этом аналитические выражения, описывающие интенсивность упругого отражения для многокомпонентных систем, оказываются нелинейными относительно концентрации элементов и не могут быть напрямую использованы для определения соответствующих концентраций. Между тем в указанной области энергий максимальный вклад в интенсивность упругого отражения вносят электроны, испытавшие однократное рассеяние [4]. В работе исследуется возможность применения модели однократного рассеяния для решения задач спектроскопии. В рамках этой модели интенсивность потока электронов, упруго рассеянных на угол θ со всех глубин, может быть представлена в виде

$$I(\theta, \varphi) = \int_0^{\infty} I(\theta, \varphi, z) dz, \quad (1)$$

где $I(\theta, \varphi, z)$ — интенсивность потока электронов, упруго рассеянных на угол θ с глубины $z \div z + dz$; φ — угол падения электронного пучка (рис. 1).

Ослабление моноэнергетического электронного пучка описывается экспоненциальным законом, при котором после прохождения пути d интенсивность пучка определяется выражением

$$I = I_0 \exp(-d/\lambda),$$

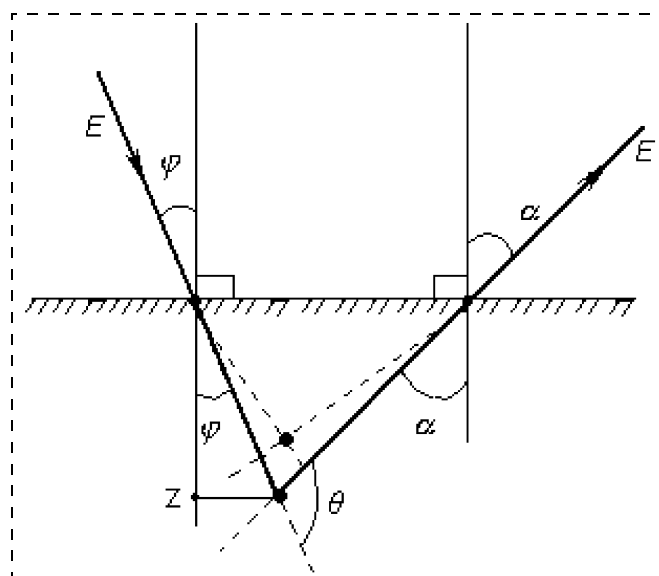


Рис. 1. Траектория упруго отраженного электрона в модели однократного рассеяния

где I_0 — интенсивность падающего пучка; λ — длина свободного пробега электрона в веществе.

Это ослабление определяется уменьшением числа электронов с исходной кинетической энергией за счет неупругого взаимодействия (с потерями энергии) и за счет упругого рассеяния. При этом

$$\lambda = \frac{\lambda_{in}\lambda_{el}}{\lambda_{in} + \lambda_{el}},$$

где λ_{in} и λ_{el} — длины свободных пробегов до неупругого и упругого соударений соответственно. Следовательно, интенсивность потока электронов, упруго рассеянных на угол θ на глубине $z \div z + dz$ и пересекающих поверхность, определяется формулой

$$I(\theta, \varphi, z) = I_0 e^{-\frac{z}{\lambda \cos \varphi}} \frac{ndz}{\cos \varphi} \frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} e^{-\frac{z}{\lambda \cos \alpha}}, \quad (2)$$

где α — угол выхода; второй множитель выражения определяет ослабление падающего пучка электронов до упругого рассеяния на глубине z ; третий — вероятность рассеяния на отрезке пути внутри слоя dz с плотностью рассеивающих центров n ; четвертый — дифференциальное сечение упругого рассеяния; пятый — ослабление рассеянного пучка электронов.

Дифференциальный коэффициент упругого отражения электронов $r_\theta(\theta)$ определяется подстановкой (2) в (1):

$$\begin{aligned} r_\theta(\theta, \varphi) &= I(\theta, \varphi) / I_0 = \\ &= \int_0^\infty e^{-\frac{z}{\lambda \cos \varphi}} \frac{ndz}{\cos \varphi} \frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} e^{-\frac{z}{\lambda \cos \alpha}} = \\ &= \frac{n\lambda}{1 + \frac{\cos \varphi}{\cos \alpha}} \frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega}. \end{aligned} \quad (3)$$

В [5] предлагается уточнение модели однократного упругого рассеяния введением дополнительного множителя $(1 - P(\varphi))$, где $P(\varphi)$ — вероятность поверхностных потерь. Для $P(\varphi)$ подобрано эмпирическое выражение

$$P(\varphi) = \frac{B(Z)}{E^{1/2} \cos \varphi},$$

где E измеряется в эВ; $B(Z)$ — параметр, определяемый материалом образца. С учетом вероятности поверхностных потерь дифференциальный коэффициент упругого отражения электронов в модели однократного рассеяния принимает вид

$$r_\theta(\theta, \varphi) = (1 - P(\alpha))(1 - P(\varphi)) \frac{n\lambda}{1 + \frac{\cos \varphi}{\cos \alpha}} \frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega}. \quad (4)$$

Обычно в качестве $d\sigma(\theta)/d\Omega$ используются дифференциальные сечения упругого рассеяния на изолированных атомах, которые в этой области энергий мало отличаются от дифференциальных сечений на атомах твердого тела. Знание дифференциальных сечений упругого рассеяния позволяет вычислить длину свободного пробега до упругого соударения

$$\lambda_{el}^{-1} = n2\pi \int_0^\pi \frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} \sin \theta d\theta. \quad (5)$$

Расчет $r_\theta(\theta)$ по данной модели приводит к существенно заниженным результатам по сравнению с экспериментом [5]. Это объясняется тем, что в модели однократного рассеяния не учитывается кратное рассеяние, что необходимо для корректного описания явления упругого отражения. Однако и в этой модели кратное рассеяние может быть учтено косвенно, чему соответствует изменение в (5) нижнего предела интегрирования:

$$\lambda_{el}^{-1} = n2\pi \int_{\theta_0}^\pi \frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} \sin \theta d\theta.$$

Интегрирование не по всему интервалу изменения θ соответствует тому, что "разрешается" выход в качестве упруго отраженных электронов, испытывавшим кратное упругое рассеяние в диапазоне углов $[0, \theta_0]$. Математически обсуждаемый косвенный учет кратного рассеяния приводит к росту λ и к пропорциональному росту абсолютной интенсивности упругого рассеяния в узком телесном угле $r_\theta(\theta, \varphi)$ при всех θ .

В настоящей работе для определения области применимости модифицированной модели однократного рассеяния проводилось сопоставление результатов расчета угловых распределений упруго отраженных электронов по этой модели с экспериментом. При выполнении расчетов дифференциальные сечения упругого рассеяния на отдельных атомах и длины свободных пробегов до неупругого соударения брались из баз данных [6, 7], где дифференциальные сечения упругого рассеяния рассчитаны на основе релятивистской волновой функции Дирака—Хартри—Фока с учетом обменных эффектов и поляризации.

Все экспериментальные исследования проводились в разработанном нами оригинальном экспериментальном приборе, который совмещал в одном измерительном пространстве квазисферический двухсеточный анализатор электронов для измерения интегральных характеристик и анализатор электронов в узком телесном угле для измерения дифференциальных характеристик. Экспериментальный прибор собран на базе сверхвысоковакуумной установки УСУ-4, исследования проводились в вакууме не хуже 10^{-7} — 10^{-8} Па. Общая от-

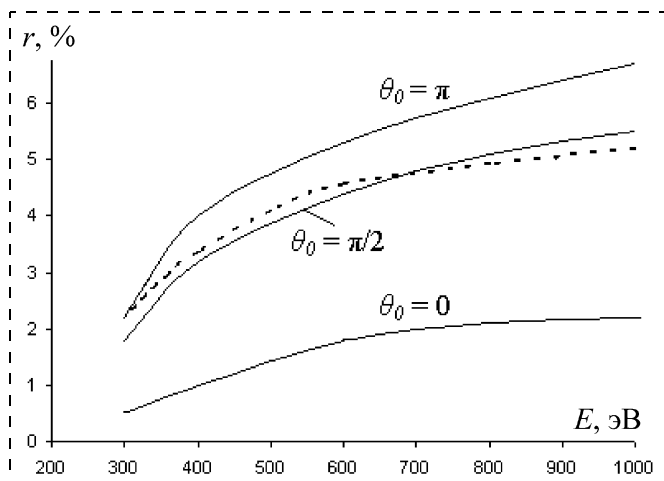


Рис. 2. Сравнение рассчитанных зависимостей интегрального коэффициента $r(E)$ при различных значениях θ_0 с экспериментом (штриховая кривая) для Ta, $\varphi = 0^\circ$

носительная погрешность при измерении интегрального коэффициента r составляла не более 4 % (0,95), а при определении абсолютных интенсивностей упруго отраженных электронов в узком телесном угле $r_\theta(\theta)$ (по методике [5]) — не превышала 5 % (0,95).

На рис. 2 и 3 приведено сопоставление результатов расчета характеристик упругого отражения электронов по модели однократного рассеяния при значениях $\theta_0 = 0$, $\theta_0 = \pi/2$, $\theta_0 = \pi$ с экспериментальными результатами для Ta. Видно, что подбор $\theta_0 = \pi/2$ позволяет с наименьшей погрешностью описать значения экспериментального интегрального коэффициента упругого отражения. Наилучшее согласие результатов расчета $r_\theta(\theta)$ с экспериментом наблюдается при том же $\theta_0 = \pi/2$ в области больших углов рассеяния. В общем случае рассмотренная модификация модели однократного рассеяния (с косвенным учетом кратности) позволяет рассчитывать $r_\theta(\theta)$ (для больших углов рассеяния) и интегральный коэффициент r

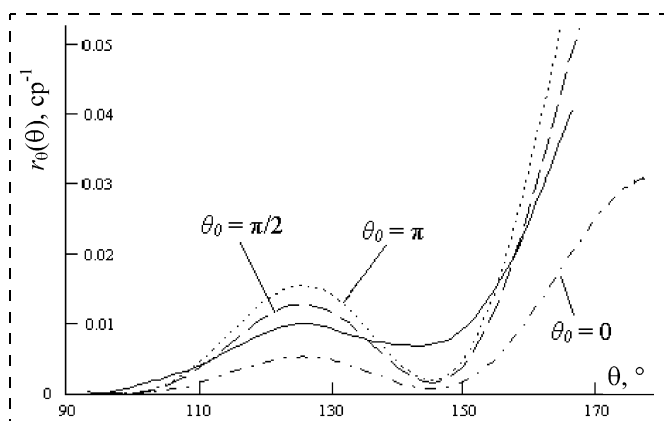


Рис. 3. Сравнение рассчитанных зависимостей дифференциального коэффициента $r_\theta(\theta)$ при различных значениях θ_0 с экспериментом (сплошная линия) для Ta при $E = 800$ эВ, $\varphi = 0^\circ$

с относительной погрешностью не более 10 % (0,95) для различных веществ в широком диапазоне энергий.

Возможность применения модифицированной модели однократного рассеяния для расчета характеристик упругого отражения позволяет на ее основе предложить методику определения концентраций компонентов образца, состоящего из двух и более известных элементов. Рассмотрим случай двухкомпонентного образца.

В предлагаемой методике сначала измеряются интенсивности $I(\theta)$ упруго отраженных электронов при $\varphi = 0^\circ$ при определенном значении энергии E для двух углов рассеяния θ_1 , θ_2 в диапазоне больших θ , где лучше "работает" модифицированная модель однократного рассеяния. Отношение $I(\theta_2)/I(\theta_1)$ интенсивностей упруго отраженных электронов в узком телесном угле для двухкомпонентной системы в модели однократного рассеяния не зависит от λ и может быть представлено в виде

$$\frac{I(\theta_1)}{I(\theta_2)} = \frac{(1 - P(\pi - \theta_1))}{(1 - P(\pi - \theta_2))} \left(\frac{1 + \frac{1}{\cos(\pi - \theta_2)}}{1 + \frac{1}{\cos(\pi - \theta_1)}} \right) \times \frac{\left(n_1 \frac{d\sigma_1(\theta_1)}{d\Omega} + n_2 \frac{d\sigma_2(\theta_1)}{d\Omega} \right)}{\left(n_1 \frac{d\sigma_1(\theta_2)}{d\Omega} + n_2 \frac{d\sigma_2(\theta_2)}{d\Omega} \right)},$$

где $I(\theta_1)$ и $I(\theta_2)$ измеряются в относительных единицах; n_1 и n_2 — неизвестные концентрации рассеивающих центров; $\frac{d\sigma_1(\theta)}{d\Omega}$, $\frac{d\sigma_2(\theta)}{d\Omega}$ — дифференциальные сечения упругого рассеяния для атомов 1-го и 2-го элементов.

Полученное выражение позволяет определить отношение атомных концентраций компонентов твердого тела n_1/n_2 . Для определения абсолютных концентраций n_1 и n_2 нужно дополнительно измерить плотность двухкомпонентного образца $\rho = n_1 m_1 + n_2 m_2$, где m_1 и m_2 — известные массы атомов. Практически этим методом концентрации элементов определяются с относительной погрешностью не более 20 % (0,95). Уточнение модели упругого отражения электронов при корректном учете кратного рассеяния позволит повысить точность метода определения концентрации компонентов образца.

Важной особенностью обсуждаемой методики является то обстоятельство, что она позволяет в одном эксперименте определить и длину свободного пробега электронов λ двухкомпонентной системы,

которая является общей для многокомпонентного образца и не может быть определена из λ_1 и λ_2 отдельных компонент. Для нахождения λ двухкомпонентной системы необходимо измерить абсолютную интенсивность упруго отраженных электронов для одного угла рассеяния при той же энергии и том же угле падения электронов на поверхность твердого тела. В модифицированной модели однократного рассеяния при $\varphi = 0^\circ$ значение $r_\theta(\theta)$ для двухкомпонентной системы имеет вид

$$r_\theta(0) = \lambda(1 - P(\pi - \theta))(1 - P(0)) \times \left(1 + \frac{1}{\cos(\pi - \theta)}\right) \left(n_1 \frac{d\sigma_1(\theta)}{d\Omega} + n_2 \frac{d\sigma_2(\theta)}{d\Omega}\right), \quad (6)$$

где $\lambda = \frac{\lambda_{in}\lambda_{el}}{\lambda_{in} + \lambda_{el}}$. Отметим, что длина свободного пробега электронов относительно упругого взаимодействия определяется по формуле

$$\lambda_{el} = \frac{1}{n_1 2\pi \int_{\pi/2}^{\pi} \frac{d\sigma_1(\theta)}{d\Omega} \sin\theta d\theta + n_2 2\pi \int_{\pi/2}^{\pi} \frac{d\sigma_2(\theta)}{d\Omega} \sin\theta d\theta}. \quad (7)$$

Подставляя в (6) n_1, n_2 , с учетом (7) можно рассчитать λ и λ_{in} для бинарной системы. Выбор больших углов рассеяния электронов θ удобен еще и тем, что в этом случае толщина анализируемого слоя ближе к определяемой по данной методике длине свободного пробега электронов. Одновременное определение абсолютных значений концентрации компонентов и толщины анализируемого слоя позволяет говорить о спектроскопии упругого отражения электронов как о неразрушающем количественном методе определения распределения концентраций компонентов по глубине образца. Отметим, что для определения λ двухкомпонентной системы вместо абсолютной интенсивности упруго отраженных электронов в узком телесном угле можно использовать и значение интегрального коэффициента упругого отражения электронов.

Рассмотренная выше методика была использована для анализа элементного состава и определения длины свободного пробега электронов в высокоомных полупроводниках As_2S_3 . Следует отметить, что исследование подобных образцов тради-

ционными методами электронной спектроскопии, например методом Оже-спектроскопии, вызывает затруднения из-за зарядки поверхности в процессе ее облучения интенсивными потоками электронов. Исследование характеристик упругого отражения проводилось при различных энергиях электронов, что позволило изучить распределение элементов по глубине. Результаты по определению концентраций компонентов образца показали, что приповерхностная область толщиной $\sim 0,6$ нм оказывается обогащена серой, что, возможно, объясняется образованием в данной области полисульфидных структур. Склонность серы к формированию цепочек $\dots S-S-S \dots$ хорошо известна из химических исследований [8] и реализуется в условиях отклонения от стехиометрии в разупорядоченных (частично аморфизированных) структурах. Начиная с глубины $\sim 0,9$ нм, состав исследованного образца близок к стехиометрическому.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 06-08-01306-а.

Список литературы

1. **Jablonski A.** Analytical applications of elastic electron backscattering from surfaces // *Progress in Surface Science*. 2003. V. 74. P. 357–374.
2. **Бронштейн И. М., Пронин В. П., Хинич И. И., Чистотин И. А.** Спектроскопия упругого отражения электронов как эффективный метод диагностики поверхности твердого тела // *Изв. РГПУ им. А. И. Герцена. Сер. физическая*. 2006. № 6 (15). С. 151–165.
3. **Фелдман Л., Майер Д.** Основы поверхности и тонких пленок / Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 344 с.
4. **Пронин В. П., Хинич И. И., Чистотин И. А.** Однократное и кратное рассеяние в упругом отражении электронов поверхностью твердого тела // *Физический вестник. Вып. 1. Сб. научн. статей. С.-Пб.: Ин-т профтехобразования*. 2007. С. 79–85.
5. **Бронштейн И. М., Васильев А. А., Пронин В. П., Хинич И. И.** Упругое отражение электронов средних энергий от неупорядоченных металлических поверхностей // *Изв. АН СССР. Сер. физическая*. 1985. Т. 49, № 9. С. 1755–1759.
6. **Powell C. J., Jablonski A.** NIST electron inelastic-mean-free-path database. Version 1.1 // *Standard Reference Data Program Database 71, US Department of commerce. National Institute of Standards and Technology*. Gaithersburg, MD. 2000.
7. **Powell C. J., Jablonski A.** NIST electron elastic-scattering cross-section database. Version 3.1 // *Standard Reference Data Program Database 64. National Institute of Standards and Technology*. Gaithersburg, MD, 2003.
8. **Гурвич А. М.** Введение в физическую химию кристаллофосфоров. М.: Высшая школа, 1982. 367 с.

Мировые новости нано- и микросистемной техники за 2007 г.

Микросистемы

(информация получена из открытых источников)*

<http://www.tcen.ru/cgi-bin/lenta/view.pl&type=3#news 844>

Разработка транзистора с рекордным быстродействием

Фирма Northrop Grumman Corp. объявила о разработке транзистора, работающего на максимальной частоте >1 ТГц (1000 ГГц). Транзистор с высокой подвижностью электронов изготовлен на фосфиде индия (InP НЕМТ). Были использованы несколько технологических усовершенствований. Во-первых, длина Т-образного затвора была уменьшена с 70 до < 50 нм. Для этой цели была использована установка электронно-лучевой литографии, работающая при 20 кэВ. Следует отметить, что в настоящее время экспонирование InP пластины диаметром 75 мм занимает более часа. Максимальная производительность экспонирования платин указанного диаметра составляет 150 пластин в неделю, а пластин диаметром 100 мм — 100 пластин в неделю при использовании одной установки.

Второе усовершенствование касается уменьшения сопротивления омического контакта посредством использования в конструкции верхнего слоя с повышенным легированием, выращенного посредством молекулярно-лучевой эпитаксии и связанного с каналом InAs/InGaAs. Поверхностное сопротивление было снижено до 75 Ом/квадрат и подвижность была увеличена до $15\,000\text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Низкое контактное сопротивление 0,05 Ом · мм и высокая пиковая крутизна 2300 мс/мм были измерены при смещении стока в 1 В с пробивным напряжением прибора 2,5 В и максимальным напряжением сток/исток 2 В и хорошими значениями отсечки.

Singer P. 1 THz InP Transistor Claims Speed Record. Semiconductor International, 12/20/2007.

* Информация взята с сайта МПО "Технологический центр" МИЭТ.

Успешные испытания нанодатчиков на орбите

Испытания химических нанодатчиков Nano Chem Sensor были выполнены 24 мая. Целью эксперимента было убедиться, что нанодатчики, изготовленные из углеродных нанотрубок и покрытые чувствительными материалами, могут быть использованы в условиях космического полета и должны выдерживать микрогравитацию, нагрев и космическую радиацию. Для каждого химического вещества использовался специальный чувствительный материал. Когда проверяемое химическое вещество касается чувствительного (считывающего) материала, это вызывает химическую реакцию, которая приводит к увеличению или уменьшению электрического тока, протекающего через датчик. Для выполнения тестирования в космосе в небольшую камеру был введен азот, содержащий двуокись азота в объеме 20 частей на миллион. В камере также был расположен тестовый кристалл с 32 нанодатчиками. При тестировании изменялся электрический ток, проходящий через нанодатчик после контакта двуокиси азота и считывающих материалов. Учеными разработаны химические датчики с использованием углеродных нанотрубок и других наноструктур для обнаружения аммиака, двуокиси азота, перекиси водорода, углеводорода, летучих органических соединений и других газов.

NASA Nanotechnology Space Sensor Test Successful in Orbit.

www.sciencedaily.com/releases/2007/06/070619105707.htm

Электроника на базе углерода

Промышленность по производству полупроводников в состоянии улучшать характеристики электронных систем еще в течение более четырех десятилетий за счет изготовления и использования приборов с постоянно уменьшающимися размерами. Тем не менее, этот подход скоро столкнется как с научными, так и с техническими проблемами, что вынуждает промышленность искать альтернативные технологии создания приборов. Заметен прогресс в использовании углеродных нанотрубок, графенов и нанолент. Уже продемонстрированы полевые транзисторы, реализованные на полупроводниковых нанотрубках и графеновых нанолентах. Металлические нанотрубки могут быть использованы для реализации межсоединений с высокой пропускной способностью. Кроме того, превосходные оптические свойства нанотрубок позволяют изготавливать

как электронные, так и оптоэлектронные приборы из одного и того же материала.

Avouris Ph. et al. Carbon-based electronics. Nature nanotechnology. Vol. 2. October 2007. P. 605—615.

Электрически восстанавливаемые датчики газа на базе углеродных нанотрубок

Сообщается о разработке электрически восстанавливаемых датчиков газа на базе углеродных нанотрубок (CNT) с использованием структуры полевого транзистора. Датчики могут восстанавливаться посредством приложения отрицательных импульсов затворного напряжения в случае NO_2 и положительных импульсов затворного напряжения в случае NH_3 . Кроме того, наблюдалась временная зависимость проводимости от импульсов затворного напряжения для различных видов газов, но вне зависимости от концентрации газов. Полученные результаты показывают возможность различать виды газов с использованием датчиков указанного типа.

Chang Y. W. et al. Electrically refreshable carbon-nanotube-based gas sensors. Nanotechnology, 31 October 2007. www.iop.org/EJ/abstract/0957-4484/18/43/435504

Реализация высокочастотного одноэлектронного транзистора с использованием одностенных углеродных нанотрубок

Была продемонстрирована работа высокочастотного одноэлектронного транзистора с использованием одностенных углеродных нанотрубок (SWNT). Прибор встраивается в параллельный резонансный контур и работает в режиме отражения при температурах порядка 5 К. Представлены как частотные, так и временные интервалы. При частоте модуляции на затворе 1 МГц была получена чувствительность к заряду $4,78 \cdot 10^{-4} \text{ е/Гц}^{-1/2}$, которая ограничивается большой паразитной емкостью между контактными площадками затвора и истока/стока. При использовании top-gated конфигурации с уменьшенной паразитной емкостью высокочастотные характеристики и зарядная чувствительность могут быть значительно улучшены.

Tang Y. et al. Operation of single-walled carbon nanotube as a radio-frequency single-electron transistor. Nanotechnology, 7 November 2007. www.iop.org/EJ/abstract/0957-4484/18/44/445203

Датчик водорода на базе нанопроволок

Датчики были изготовлены и протестированы на базе использования нанопроволок Pt/SnO₂ на подложке из SiC. Свойства материала нанопроволок, формирование и размеры анализировались с использованием сканирующего электронного микроскопа. Представлены вольт-амперные характеристики при различных значениях концентрации водорода. Были установлены значения эффективной высоты барьера 20,78 и 131,59 мэВ при концентрации водорода 0,06

и 1 % соответственно. Было измерено смещение напряжения 310 мВ при 530 Å для 1 % водорода.

Shariei M. et al. Pt/SnO₂ Nanowires/SiC Hydrogen Gas Sensor. Sensors, 2007 IEEE, 28—31 2007, pp. 166—169.

КНИ — MEMS-датчик для многомерного считывания состояния окружающей среды

Для многомерного считывания состояния окружающей среды использовано MEMS-устройство, в состав которого входит датчик и периферийная интерфейсная схема. В свою очередь, в состав датчика входят осевой акселерометр, датчик давления и датчик влажности. Все датчики реализованы на кристалле со структурой КНИ (кремний-на-изоляторе) площадью 5 мм² посредством объемной MEMS-технологии с использованием реактивного ионного травления. Интерфейсная схема для каждого датчика, представляющая собой специализированную ИС, была изготовлена с использованием Би-КМОП-технологии на Японском полупроводниковом заводе (foundry) MICS.

Fujita et al. SOI-MEMS Sensor for Multi-Environmental Sensing System.

Fourth International Conference on Networked Sensing Systems. 6—8 June 2008. P. 146—149.

Синхронизирующие наносхемы для нанокomпьютеров и других нанoeлектронных систем

Границы предполагаемых характеристик определяются имитационным моделированием класса всех нанoeлектронных синхронизирующих схем. Такие схемы могут быть использованы в качестве главных генераторов синхроиmпульсов на кристалле для автономных наносистем, локальных генераторов синхроиmпульсов в составе нанoeлектронных компьютеров или локальных генераторов нанoeлектронных устройств для обработки смешанного сигнала. Представлены результаты конструирования и моделирования указанных наносхем, которые используют для изготовления уже имеющиеся в распоряжении нанотехнологии и наноприборы. Результаты показывают, что с использованием таких синхронизирующих схем могут быть достигнуты рабочие частоты приблизительно до 1 ГГц для аналоговых применений и 150 МГц для цифровых нанoeлектронных систем.

Shamik D. et al. Clocking nanocircuits for nanocomputer and other nanoelectronic systems.

IEEE International Symposium on Nanoscale Architectures, 21—22 Oct. 2007. P. 123—128.

Зарождающаяся парадигма создания наносхем: электроника на базе графенов для выполнения вычислений на наноразмерном уровне

Продолжающаяся миниатюризация электронных схем на базе кремния быстро приближается к физическим и геометрическим пределам. Маловероятно, чтобы миниатюризация подобным образом

осуществлялась в новом тысячелетии. Будущее наноэлектроники будет за пределами кремниевой технологии. Новая схемная парадигма базируется на новых наноразмерных материалах, таких как молекулярные электронные схемы и схемы на основе углерода. Исследователи предсказывают, что ввиду своих уникальных квантовых эффектов и электронных свойств схемы на основе графенов заменят схемы на углеродных нанотрубках и станут базовыми блоками будущей наноразмерной вычислительной техники. Уникальные электронные свойства можно продемонстрировать в конструкциях переключателя, полевого транзистора и ОЗУ, общей платформе для моделирования схемы и платформе, которая может использоваться для конструирования вычислительных систем будущего на базе графена.

Wang Z. F. et al. Emerging nanocircuit paradigm: Graphene-based electronics for nanoscale computing.

IEEE International Symposium on Nanoscale Architectures, 21–22 Oct. 2007. P. 93–100.

Изготовление трехмерных рентгеновских шаблонов с использованием MEMS-технологии

Кремниевые микроструктуры с наклонными боковыми стенками на КНИ-пластине были изготовлены с использованием реактивного ионного травления (РИТ). Затем пластина обрабатывалась до уровня рентгеновской маски, что делает кремниевую структуру поглотителем рентгеновских лучей. Угол наклона боковой стенки кремниевого поглотителя рентгеновских лучей может меняться от 60 до 71° посредством настройки давления смеси газов в рабочей камере системы РИТ. Распределение толщины поглотителя рентгеновских лучей является различным согласно углу наклона поглотителя рентгеновских лучей. В результате интенсивность передачи рентгеновских лучей локально меняется, и распределение энергии рентгеновских лучей, излучаемых на резист, может контролироваться. Были выполнены экспериментальные исследования рентгеновской литографии с использованием рентгеновской маски и кольца BL-4 синхротрона TERAS Национального института исследований в области перспектив развития науки и техники промышленного назначения (AIST, Япония). В результате были успешно изготовлены трехмерные РММА-микроструктуры с использованием только одного рентгеновского экспонирования без сканирования и поворота столика экспонирования.

Mekaru et al. Fabrication of Three Dimensional X-ray Mask using MEMS Technology.

2nd IEEE International Conference on Mano/Micro Engineered and Molecular Systems. Jan. 2007. P. 447–451.

Интеграция наноструктур с микросистемами

В последние десятилетия применение микроэлектронных и (микро)нанотехнологий для изготовления твердотельных приборов стимулировало увеличивающийся объем исследований в области

(микро)нано датчиков и исполнительных устройств. Многообразие полупроводниковых и (микро)наноматериалов предполагает создание систем с улучшенными возможностями и с улучшенным соотношением характеристики/стоимость по сравнению с обычными приборами. Обсуждаются современные методики интеграции наноструктур с микросистемами на основе прошлого и текущего опыта. Охвачены различные проблемы синтеза и сборки одномерных наноструктур и гетерогенной интеграции с использованием MEMS как базовых блоков, включая синтез и сборку углеродных нанотрубок, кремниевых нанопроволок и нанопроволок из оксида цинка. Одной из общих инноваций в данных проектах является использование локализованного нагрева и синтеза таким образом, что наноструктуры могут выращиваться в камере при комнатной температуре. Продемонстрированы синтез, направленное выращивание и самосборка одномерных наноструктур посредством локализованных резистивного и индуктивного нагрева, процессы самосборки с мониторингом по месту в локальном направленном электрическом поле. В настоящее время выполняются программы исследований в следующих областях: интегральные наноэлектромеханические системы с использованием нанотрубок, нанопроволок и нановолокон. Приведены направления будущих исследований.

Lin, Liwei. Integration of Nanostructures with Microsystems.

2nd IEEE International Conference on Mano/Micro Engineered and Molecular Systems. Jan. 2007. P. nil30–nil30.

Конструирование и моделирование малоомощного CNT-КМОП-датчика

Многостенные углеродные нанотрубки (MWCNTs) проявили себя в качестве хороших считывающих элементов для многих целей, включая считывание изменений потока и химических паров. Тем не менее, они не были использованы в реальных применениях ввиду стоимости и габаритных размеров сложного оборудования для измерения чувствительности MWCNTs. Предложена новая методология, заключающаяся в интеграции MWCNT-датчиков с промышленной КМОП-схемой с использованием процесса диэлектрофореза (DEP). Чувствительность этих датчиков будет измеряться КМОП-схемой на одной подложке. Как полагают, указанный метод позволит создавать недорогие, компактные датчики для промышленных применений. Обсуждаются проблемы измерения сопротивления MWCNTs и интеграции считывающих элементов MWCNTs, которые оказывают большое влияние на конструкцию элементов КМОП-схемы. В демонстрационных целях была использована 0,35 мкм КМОП-технология. Приве-

дены результаты имитационного моделирования и данные реализации.

Chow et al. Design and Modeling of a CNT-CMOS Low-Power Sensor Chip.

2nd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. Jan. 2007. P. 1209–1214.

Датчик качества воздуха на базе MEMS

Представлено описание новой сенсорной матрицы на базе MEMS-технологии для измерений качества воздуха и новой стратегии измерений на основе новой модели. Сенсорная матрица состоит из газовых (SnO_2) датчиков, датчика влаги на базе пористого кремния и Pt-датчика температуры, интегрированных на одном кристалле. Были использованы КНИ-технология, Pt-металлизация и объемная микромеханическая обработка. Были получены хорошие показатели характеристик, касающиеся термических свойств, чувствительности, селективности и времени. Содержание газа и атмосферной влажности, оцениваемое на базе разработанных моделей датчика, находится в хорошем соответствии с действительными значениями.

Mesheder U. et al. MEMS-Based Air Quality Sensor.

International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2007. Transducers 2007. P. 1417–1420.

Сети на базе многостенных углеродных нанотрубок как датчики газа для обнаружения NO_2

Были исследованы сети на базе многостенных углеродных нанотрубок (MWNT) как резистивных датчиков газа для обнаружения двуокиси азота. Пленки датчика были изготовлены посредством дисперсии MWNT на подложке из оксида алюминия. Тестируемые MWNT-датчики были чувствительны к низким концентрациям NO_2 в воздушной атмосфере. Кроме того, эти датчики не реагируют на близкородственные газы, такие как H_2 , NH_3 , толуол и октан. Термоциклирование приводит к увеличению чувствительности датчика к NO_2 .

Sayago I. et al. Multi-Walled Carbon Nanotube Networks As Gas Sensors for NO_2 Detection.

International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2007. Transducers 2007. P. 1035–1038.

Использование MEMS для построения прибора и корпуса

Стоимость корпусирования MEMS-приборов часто доминирует в общей стоимости прибора. В последнее время сотрудники отделений механики и электротехники Стэнфордского университета совместно с сотрудниками фирмы Bosch разработали и продемонстрировали новый метод гермети-

зации MEMS на уровне пластины. В данном процессе используются MEMS технологические операции для построения прибора и корпуса одновременно. Главным преимуществом данного метода является то, что пластины поступают с завода с хрупкими MEMS-структурами, полностью скрытыми в пластине, что позволяет выполнять стандартные операции обработки и корпусирования. Этот процесс позволяет осуществлять КМОП-интеграцию, встраивание и миниатюризацию законченных систем. Приведено описание преимуществ использования данного подхода, касающихся характеристик, размеров и стоимости.

Kim B. et al. Using MEMS to Build the Device and the Package.

International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2007. Transducers 2007. P. 331–334.

Конструирование и изготовление монокристаллических топливных элементов на базе MEMS

Описываются конструкция, изготовление и характеристики небольших топливных элементов с использованием MEMS-технологии. Топливный элемент на базе MEMS состоит из трех компонентных слоев: электромеханически интегрированных анодного и катодного слоев, полимерной электромеханической мембраны. Был также использован углеродный материал в виде углеродной нанотрубки в качестве электропроводного материала, пригодного как для газовой диффузии, так и каталитического поддерживающего слоя. Был успешно продемонстрирован образец с максимальной выходной мощностью $0,075 \text{ Вт/см}^2$ при плотности тока приблизительно $0,2 \text{ А/см}^2$.

Kuriyama et al. Design and Fabrication of MEMS-Based Monolithic Fuel Cells.

International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2007. Transducers 2007. P. 283–286.

Газовые нанодатчики: изготовление, характеристики и будущие перспективы для военных применений и в интересах безопасности

В последнее время химические датчики на основе одномерных наноструктур привлекли большое внимание ввиду их превосходных характеристик считывания, обусловленных высоким отношением площади поверхности к объему и уникальными физическими и электрическими свойствами. Были разработаны несколько процессов для синтеза газовых микродатчиков с использованием одностенных углеродных нанотрубок (SWNT) из металлических наночастиц, наночастиц оксида металла или нанопокровов из проводящего полимера. Этот метод позволяет создавать высокоплотные матрицы нанодатчиков с индивидуальной адресацией. Например, наночастицы Pd, полученные методом электроосаждения в сетях SWNT, формиру-

ют датчик водорода, проводящие полимеры осаждаются для считывания аммиака, органические соединения наносятся для считывания летучих веществ. Меняя режимы нанотехнологии, можно настраивать характеристики считывания. Во многих случаях изготовленные образцы проявили чувствительность, превосходящую чувствительность существующих датчиков. Представлены последние результаты, касающиеся методов изготовления, механизмов считывания, и сведения о будущих применениях в области обороны и безопасности.

Beshusses M. A. et al. Gas sensors: fabrication, performance, and future perspectives for defense and security applications.

SPIE Defense & Security Symposium. 6556-49, Session 10. 9–13 April. 2007.

Разработка электронных приборов на базе углеродных нанотрубок для космической аппаратуры

В настоящее время в Центре космических полетов Goddard Space Flight Center реализуется программа по разработке и интеграции в научные приборы различных наноразмерных компонентов. В частности, ведется разработка магнетометра следующего поколения на базе использования углеродных нанотрубок и электронного устройства с холодным катодом для интеграции в миниатюрный бортовой масс-спектрометр. Представлено описание процессов выращивания, изготовления, электрических характеристик углеродных нанотрубок и использования их для построения прибора.

Getty S. A. et al. Carbon nanotube-based electronic device for spaceflight instruments.

SPIE Defense & Security Symposium. 6556-38, Session 8. 9–13 April. 2007.

Сложный MEMS-прибор: микроклапанная матричная система

Микроклапанная матричная система разрабатывается в NASA Goddard Space Flight Center для использования в качестве апертурной матрицы для спектрометра Near-Infrared Spectrometer (NirSpec). Прибор будет установлен на телескопе James Webb Space Telescope (JWST), который является следующим поколением космических телескопов после телескопа Hubble Space Telescope. Микроклапанные матрицы предназначены для селективной передачи света с высокими эффективностью и контрастностью. Матрицы представляют собой плотно упакованные мембраны 100×200 мкм. Для каждого клапана предусмотрены оптические экраны для предотвращения потерь света, что повышает оптическую контрастность. Клапаны запускаются в действие магнитным способом, защелкиваются и адресуются электростатическим способом. Клапанные матрицы изготавливаются с использованием объемной MEMS-технологии и

корпусирования активной стороной кристалла вниз. Полетный вариант состоит из четырех полностью адресуемых матриц 365×171 , располагаемых в оптическом тракте JWST в фокальной плоскости.

Li M. J. et al. Complex MEMS device: microshutter array system.

SPIE Defense & Security Symposium. 6556-01, Session 1. 9–13 April. 2007.

Прогресс в изготовлении интегрального многопараметрического MEMS-датчика

Представлены результаты изготовления интегрального многомодового многопараметрического датчика на базе MEMS. Такой тип ортогональной считывающей платформы может обеспечить достоверный сигнал высокого уровня при низкой стоимости с использованием миниатюрного корпуса. Параметры акустических, ИК, магнитных и химических сигналов формируются одновременно. Считывание отдельных MEMS-приборов осуществляется с использованием пьезорезистивных датчиков и оптических датчиков. В одном устройстве более миллиона приборов могут считываться одновременно, обеспечивая существенное резервирование считывающих элементов. Кроме того, используемый метод массового параллелизма позволяет формировать системы с большим динамическим диапазоном и высокой чувствительностью.

Rajic S. et al. Progress on the fabrication of integrated multi-parameter MEMS sensor.

SPIE Defense & Security Symposium. 6562-13, Session 4. 9–13 April. 2007.

Регулируемый цифровой MEMS-конденсатор

Фирма WiSpry Inc. приступила к выпуску образцов регулируемых цифровых MEMS-конденсаторов, которые интегрируют маломощный КМОП-контроллер, генератор напряжения и матрицу регулируемых ВЧ — MEMS цифровых генераторов. Регулируемые цифровые конденсаторы обеспечивают возможность мобильным беспроводным приборам реализовать цифровое программируемое согласование, фильтрацию и другие важные ВЧ функции в беспроводных системах предварительной обработки данных. Применения включают настройку антенн, полосовое программируемое согласование импеданса, настройку усилителя мощности, регулируемых ВЧ фильтров для мобильных телефонов, базовых станций, портативных компьютеров и прочих портативных устройств.

Scouras I. MEMS tunable digital capacitor samples for cellular applications.

Mobile Handset DesignLine, 29 October, 2007.

Монтаж специализированных ИС на MEMS-пластины

В настоящее время сначала создаются MEMS-пластины и затем соединяются со специализированной ИС (СПИС). Фирма VTI Technologies впер-

вые осуществила монтаж кристаллов СпИС активной стороной вниз на MEMS-пластины до резки. Процесс получил название Chip-on-MEMS (CoM). Для этой цели на MEMS-пластине заранее формируются места для пайки и наносятся слои перераспределения и изоляции. После монтажа СпИС оба набора кристаллов изолируются с использованием пассивирующего слоя. Результатом является получение более тонких устройств, на одну треть тоньше современных приборов.

Следующим шагом является разработка технологического процесса для обеспечения массового производства сложных считывающих компонентов.

VTI Bonds ASICs To MEMS Wafers. Electronic Design, November 2, 2007.

Процесс разработки КМОП — MEMS-датчиков с сильно электрически изолированными объемными кремниевыми микроструктурами

При создании трехосевых КМОП-MEMS-акселерометров имеют место некоторые технологические проблемы, включая загрязнения боковых стенок монокристаллических кремниевых микроструктур в процессе плазменного травления и заметное подтравливание кремния, вызванное перегревом подвешенных микроструктур. Были найдены и подробно обсуждаются пути решения указанных проблем. Был использован микромеханический процесс постКМОП на базе глубоко реактивного ионного травления (DRIE), который обеспечивает создание надежно электрически изолированных микроструктур из монокристаллического кремния для интегральных инерционных датчиков. В частности, была разработана модель элементов с сосредоточенными параметрами для оценки повышения температуры на подвешенных микроструктурах в ходе выполнения DRIE-процесса. На основе термического моделирования и экспериментов было предложено использовать толстый фоторезистивный слой в качестве термического канала для устранения подтравливания кремния. Проблема загрязнения боковых стенок решалась посредством модифицированного КМОП — MEMS-процесса. С использованием нового процесса был успешно изготовлен трехосевой акселерометр с малощумящим, маломощным усилителем на кристалле.

Qu H., Xie H. Process development for CMOS — MEMS sensors with robust electrically isolated bulk silicon Microsystems.

Journal of Microelectromechanical Systems. Oct. 2007. Vol.: 16, Issue: 5. P. 1152—1161.

Использование MEMS и нанотехники в портативных электронных устройствах и автомобилях

MEMS-техника уже освоена в автомобильной сфере, но имеются новые MEMS-приборы и новые нанодатчики, которые оказывают революционное воздействие на автомобильную технику благодаря возможности измерения новых физических харак-

теристик, которые раньше никогда не измерялись в области автомобильной техники. В этой области главными факторами являются стоимость и быстродействие. В случае портативных электронных устройств как MEMS, так и нанотехника будут использоваться для увеличения использования беспроводной связи, а затем для обеспечения дополнительных функциональных возможностей. Для таких электронных применений главными характеристиками являются быстродействие, размеры и потребляемая мощность. Приведены и проиллюстрированы различные примеры, отражающие общие тенденции на указанных рынках.

Pisano A. P. MEMS and nanotechnology for the handheld, portable electronic and the automotive markets.

International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, TRANSDUCERS 2007, 10—14 June 2007. P. 1—4.

Интеграция технологии ИС с MEMS: будущее кремниевой технологии

В ходе развития микроэлектроники технология одновременно масштабируется на меньшие размеры и модифицируется в новые типы приборов и связанные с этим новые сферы применения. Последними примерами такой модификации являются интеграция силовых приборов с микроэлектроникой, ВЧ системы (интеграция SiGe, GaAs и пассивных приборов с КМОП-приборами), микродисплеи (ЖК, светоизлучающие полимеры на кремнии), биоэлектроника (лаборатория на кристалле), кремниевая фотоника (интеграция оптических компонентов на кремниевой подложке). Все указанные примеры имеют общую особенность, а именно: использование кремниевой платформы для системной интеграции с добавлением нового качества, связанного с постобработкой и/или интеграцией, которая в большинстве случаев является стандартной промышленной технологией. По сути дела, кремниевая технология ИС выступает как объединяющий элемент системы с использованием базовой промышленной КМОП-технологии (foundry) и связанных сложных функциональных блоков (IP). Привлекательной особенностью этого метода является то, что доступной становится современная КМОП-технология без каких-либо капитальных затрат, что позволяет использовать ее существующими малыми и средними предприятиями и новыми фирмами для разработки изделий. Другой особенностью является то, что промышленные технологии foundry непрерывно совершенствуются и немедленно становятся доступными для выполнения перспективных разработок без капитальных затрат. Исследуются варианты, связанные с интеграцией промышленной технологии, технологии создания заказных ИС как с новыми материалами, так и с другими техноло-

гиями, такими как MEMS (датчики и исполнительные устройства).

В таблице приведено сравнение различных технологий интеграции КМОП/MEMS.

Процесс	Экономический барьер для освоения	Обработка на уровне пластины	Предварительно тестированные пластины	Наличие промышленного выпуска	Сборка кристаллов
Интегрированные предварительно обработанные КМОП ИС и MEMS	Средний/высокий	Да	Нет	Ограниченная	Нет
Постобработанные MEMS на КМОП	Средний	Да	Нет	Возможно для некоторых процессов	Нет
Интегрированные КМОП ИС и MEMS	Высокий	Да	Нет	Чрезвычайно ограниченная	Нет
КМОП и MEMS с использованием травления	Средний/высокий	Да	Нет	Да	Нет
Гибридизация	Низкий	Да	Да (кристаллы) Нет (пластина)	Да (кристалл)	Да
Микросхема на микросхеме	Низкий	Нет	Да	Да	Да
Многокристальный модуль	Низкий	Нет	Да	Да	Да
Приварка на пластине КМОП ИС/MEMS	Средний	Да	Нет	Нет	Нет

Walton A. J. et al. Integration of IC technology with MEMS: Silicon+ technology for the future.

IET Seminar on Micro Electro-Mechanical Systems, 25 April 2007. P. 1–11.

Концепция реализации датчиков на основе углеродных нанотрубок

Излагается концепция реализации механических и химических датчиков на основе углеродных нанотрубок. Внимание было сфокусировано на одностенных углеродных нанотрубках как "простых" макромолекулярных функциональных структурах с возможностью интеграции в микро- и наносистемы. Обсуждаются основные особенности изготовления. Прилагается обширный перечень ссылок.

Hierold Ch. Concepts for carbon nanotube sensors.

International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 10–14 June 2007. P. 5–10.

Реализация микро- и нанохимических систем на кристалле

Как ожидается, интегральные микрохимические системы станут эволюционным инструментом для создания быстродействующих компактных средств анализа и синтеза в биотехнике и связанных областях науки и техники. Были разработаны универсальные методы микроинтеграции химических систем на базе концепции, принятой в электронике. Только вместо резисторов, конденсаторов и диодов ИС операции по смешиванию, выделению, разделению фазы и т. д. осуществляются интегральными компонентами микрохимической системы. Существуют два направления химиче-

ской технологии с использованием микрочипов. Одно направление заключается в промышленном использовании химических систем с микрометровыми размерами на кристалле. Другое направление связано с развитием метода с использованием наноразмерных химических устройств на кристалле.

Kitamori T. Micro and nano chemical system on chip.

International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 10–14 June 2007. P. 11–16.

220 МГц КМОП — MEMS-смеситель

Приводится описание работы частного MEMS-смесителя, сконструированного и изготовленного с использованием 0,35 мкм промышленной КМОП-технологии. MEMS-прибор, в котором используется поликремниевая закреплённая балка, обеспечивает резонансную частоту в СВЧ диапазоне. Решена проблема ограничений конструкции смесителя КМОП — MEMS и приводится описание техники, основанной на дифференциальном усилении для улучшения характеристик.

Loez J. L. et al. Mixing in a 220MHz CMOS — MEMS.

IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 27–30 May 2007. P. 2630–2633.

DARPA вынашивает план по созданию насекомых-киборгов в целях разведки

Три группы ученых из Мичиганского университета, Массачусетского технологического института, института Бойса Томпсона в прошлом году получили финансирование от DARPA на выполнение работ по созданию насекомых-киборгов со встро-

енной MEMS для выполнения разведывательных военных операций с дистанционным управлением. Программа получила название Hybrid-Insect MEMS (HI-MEMS). Три первых фазы носят фундаментальный характер, предварительные результаты их выполнения будут рассматриваться ежегодно. Если результаты будут успешными, то состоится четвертая фаза по передаче техники военным. Первый срок намечен на начало 2008 г., когда исполнители должны продемонстрировать контролируемый полет привязанного насекомого. Полет должен быть совершен на расстояние 5 м от специальной цели, расположенной, в свою очередь, на расстоянии 100 м от устройства дистанционного контроля или системы глобального позиционирования. Если испытания пройдут успешно, то DARPA начнет относиться к проблеме самым серьезным образом. Рой насекомых с различными видами встроенных MEMS-датчиков (видеокамеры, аудиомикрофоны, химические анализаторы и др.) может проникать на вражескую территорию для выполнения разведывательных действий, невозможных или слишком опасных для солдат.

Johnson R. C. Darpa hatches plan for insect cyborgs to fly reconnaissance.
www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=202200707

Моделирование и конструирование материалов и приборов за пределами сетевого графика (roadmap) на основе нанопроволок, нанотрубок и молекул

По мере уменьшения размеров приборов до молекулярного уровня роль моделирования увеличивается. Пока еще отсутствует аналитическая способность экспериментально определять химические характеристики и геометрию отдельных молекулярных приборов. Беспрецедентные эксперименты могут потребоваться для изготовления приборов на этом уровне. С помощью теории и моделирования можно сравнительно быстро исследовать влияние микроскопических областей химии и геометрии, определяющих транспорт электронов и дырок. Благодаря масштабированию измеряемых характеристик могут быть сравнены конструкции, трудные для изготовления. Теория и моделирование могут способствовать идентификации многообещающих направлений и обеспечить понимание экспериментальных результатов. Теория и моделирование были применены для понимания, анализа и оптимизации приборов на основе углеродных нанотрубок (CNT), нанопроволок и молекул. Приведено описание теории, моделирования и конструирования химически и биологически собранных CNT. Приводится анализ приборов на базе CNT, молекулярных приборов и резонансных туннельных приборов. Показано, что геометрия интерфейса оказывает большое влияние на транспорт электронов и дырок. Приводится описание методики

измерения внутренних характеристик CNT полевого транзистора, реализованного на изолирующей подложке.

Brugue et al. Modeling and Design of Beyond the Roadmap Materials and Devices: Nanowire, Nanotubes and Molecules.

Proceedings of International Workshop on Electron Devices and Semiconductor Technology, 3—4 June 2007. P. 25—30.

Газотурбинный двигатель на кристалле — реализация мечты о персональном источнике питания

После десятилетних усилий в конце лета 2007 г. должен был быть выпущен образец первого газотурбинного двигателя (ГТД) миллиметровых размеров, разработанного специалистами Массачусетского технологического института (MIT). Новый ГТД позволяет создавать более мелкие и более мощные батареи, чем существующие в настоящее время. Они также могут послужить базой для создания миниатюрных мощных двигателей в применениях от миниатюрных беспилотных летающих средств (UAV) до детских игрушек. В более отдаленном будущем большие матрицы миллиметровых ГТД с водородным питанием могут стать основой чистых, удобных, эффективных по стоимости электростанций.

Genith I. Engine on a chip — the Dream of the Personal Turbine.
www.tfot.info/index2.php?option=com_content&task=view&id=114&Itemid=5...

Интегрированная MEMS-инфраструктура для получения и обработки топлива

Портативные топливные элементы являются элементами техники, представляющими собой поколение высокоэффективных, сверхплотных устройств распределения питания, которые имеют важное значение для многочисленных наземных и авиакосмических применений. Ключевым элементом источников питания на базе топливных элементов является топливный процессор, который должен иметь возможность эффективно реформировать жидкое топливо и производить высокочистый водород, потребляемый топливными элементами. Сообщается о разработке двух новых топливных MEMS-генераторов водорода с улучшенным функционированием, достигаемым за счет инновационной организации процесса и метода системной организации, в котором используются преимущества транспорта и катализа на микро/наноуровне. В конструкции одного топливного процессора используется переходная встречно-поточная работа автотермического MEMS-реактора, интегрированного с микромеханическим ультразвуковым топливным распылителем и Pd/Ag-мембраной для отделения водорода из производственного по-

тока. Другая конструкция отличается более простой, более плоской планарной структурой с распыленным топливом, направляемым непосредственно на каталитический слой, который связан с интегрированной мембраной, селективной к водороду.

Varady M. J. et al. An integrated MEMS infrastructure for fuel processing: hydrogen generation and aparation for pertable power generation.

Journal Micromechanics and Microengineering, September 2007, Issue 9. P. 257—264.

Быстродействующие электронные устройства с использованием плотных, качественно совмещенных одностенных углеродных нанотрубок

Одностенные углеродные нанотрубки (SWNTs) обладают исключительными электронными свойствами. Реализация полного потенциала SWNTs в реальных электронных системах требует масштабируемого подхода к интеграции прибора и схемы. Сообщается об использовании плотных, качественно совмещенных матриц длинных, качественно линейных SWNTs как эффективного тонкопленочного полупроводникового материала, пригодного для интеграции в транзисторы и другие классы электронных приборов. Большое число SWNTs обеспечивает превосходные характеристики на приборном уровне и хорошую однородность от прибора к прибору, даже если SWNTs являются гетерогенными с электронной точки зрения. С использованием данного подхода могут быть реализованы логические РМОП- и КМОП-вентили и механически гибкие транзисторы. В целом эти результаты могут указывать направление создания интегральных электронных устройств с высокой степенью интеграции на базе нанотрубок.

Kang S. J. et al. High-performance electronics using dense, perfectly aligned arrays of single-walled carbon nanotubes.

Nature Nanotechnology, 25 March 2007. P. 230—236.

Гигантский пьезорезистивный эффект в кремниевых нанопроволоках

Пьезорезистивный эффект кремния широко применяется в механических датчиках и в настоящее время широко используется для улучшения характеристик кремниевых транзисторов. Фактически техника создания напряжений в настоящее время рассматривается как одна из самых многообещающих стратегий для разработки быстродействующих суб-10 нм кремниевых приборов. Представляют интерес электромеханические свойства, наблюдаемые в углеродных нанотрубках. Сообщается, что кремниевые нанопроволоки обладают необычно большим пьезорезистивным эффектом по сравнению с объемным кремнием. Например, продольный пьезорезистивный коэффициент вдоль оси (III) увеличивается с уменьшением диаметра Si про-

волоки *p*-типа, достигая значения $3550 \times 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$, для сравнения значение данного коэффициента в объемном кремнии составляет $94 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$. Показано, что на пьезорезистивные коэффициенты оказывают выраженное воздействие изменение подвижности носителей, индуцированное напряжением, и модификация поверхности. Указанный гигантский пьезорезистивный эффект в Si-проводах может внести значительный вклад в создание гибких электронных устройств, а также нано-электромеханических систем.

He R., Yang P. Giant piezoresistance effect in silicon nanowires.

Nature Nanotechnology, 4 October 2006. P. 42—46.

Рынок MEMS в 2011 году достигнет уровня 10 млрд долларов

По данным исследовательской, консультационной фирмы Semiconductor Partners, рынок MEMS удвоится в 2011 г. по сравнению с рынком 2005 г. и составит 10 млрд долларов. Наибольший рост будет характерен для автомобильных MEMS, бытовой техники, техники связи и портативных устройств. Большие возможности для значительного увеличения выпуска имеют микрофоны, громкоговорители, генераторы синхросигналов, пульты для игровых устройств и сотовых телефонов, приводы жестких дисков, ВЧ переключатели и головки для струйной печати.

2011 MEMS Market to Hit 10B.

Semiconductor International, 9/11/2007.

Внимание Китая к развитию MEMS/микросистем

По данным германской исследовательской фирмы EnablingMNT, в настоящее время в Китае насчитывается более 600 фирм, работающих в области нанотехники, 1500 изготовителей датчиков, 60 фирм по созданию биочипов и 150 дизайн-центров (fabless). В отрасли создания MEMS/микросистем приоритет отдается изделиям для полупроводниковой, автомобильной и телекоммуникационной промышленности. Также уделяется внимание созданию изделий для медицинской, промышленной и бытовой аппаратуры. Выделяются два фактора сильного воздействия на рынок: зарубежные фирмы, действующие через совместные предприятия или филиалы; инвестиции от государства или региональных служб. Для инвестирующих органов наибольший интерес представляет изготовление технологического оборудования и компонентов/датчиков. Особое внимание уделяется созданию датчиков давления в шинах. В то время как организации, разрабатывающие технологическое оборудование для создания микросистем и формирующейся отрасли услуг (заводы и дизайн-центры), готовятся к будущему развитию экономики Китая, канал поставок все еще остается несо-

вершенным. Реально политика не поощряет создание малых предприятий и предприятий, ориентированных на гибкие технологии. Тем самым сохраняются интересные ниши для зарубежных фирм.

China moves MEMS/Microsystems from low cost to high value.

www.smalltimes.com.

КМОП ИС, интегрированная с микроматрицей ДНК, на основе GMR-датчиков

Высокоплотная матрица GMR-датчиков была интегрирована со стандартной КМОП ИС для обнаружения гибридизации ДНК. Поглощение магнитными частицами гибридизированной ДНК изменяет сопротивление датчика, и генерируемые электрические сигналы измеряются непосредственно схемой на кристалле. Изготовленный биочип может быть использован для обнаружения других биореакций, например, для анализа протеина через различные поверхностные модификации.

Han Shu-Jen et al. CMOS Integrated DNA Microarray Based on GMR Sensors.

IEEE Electron Device Meeting, Dec. 2006.

Нанолитография с использованием многозондовых кантилеверных матриц для изготовления кремниевых наноразмерных приборов

Были разработаны два типа многозондовых кантилеверных матриц для выполнения с высокой скоростью нанолитографии на основе использования зондового микроскопа с параллельным сканированием (SPM). Многозондовые кантилеверные матрицы были изготовлены с использованием анизотропного мокрого травления. Все зонды имеют острые наконечники квазитриэдральной пирамидальной формы с двумя плоскостями (311) и (411). Следовательно, появляется возможность успешного изготовления параллельных наноразмерных проволок и канавок на одной кремниевой пластине с использованием негативного и позитивного фоторезиста. Кроме того, с использованием позитивного фоторезиста была изготовлена свободно подвешенная кремниевая нанопроволока, используемая в качестве высокочастотного резонатора.

Gandjar H. et al. Scanning probe parallel nanolithography using multi-probes cantilever array for silicon nanodevices.

IEEE 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, June 5—9, 2005.

Характеристики промышленного кремний-на-изоляторе MEMS-материала

Приведено исследование некоторых характеристик, критичных для конструирования, обеспечиваемых технологией кремний-на-изоляторе (SOI)

MEMS (SOIMUMPs), и выполнено сравнение с поверхностной микромеханической технологией (polyMUMPs), которыми владеет фирма MEMSCAP, Inc. Диагностические структуры были использованы для оценки следующих характеристик: минимальные достижимые топологические размеры, отклонение размеров элементов от номинальных размеров конструкции, остаточный градиент напряжения по толщине, поверхностное остаточное напряжение, неровность поверхности, прочность на излом. В общем случае измеренные характеристики оказались одинаковыми для SOIMUMPs и polyMUMPs. Например, прочность на излом составила 1,97 и 1,43 ГПа со связанным модулем Вейбулла 8,9 и 14,0 соответственно. Эти значения оказались подобными для различных видов кремния: механически утонченных монокристаллических пластин и поликристаллических пленок, полученных химическим осаждением из паровой фазы при низком давлении. Данные фрактографии показывают, что прочность на излом для обеих технологий контролируется поверхностными топографическими особенностями: отдельные дефекты травления боковых стенок вызывают нарушения SOIMUMPs, а граничные трещины на поверхности вызывают нарушения polyMUMPs. Акцент обсуждения сделан на разветвлении характеристик материала в контролируемом процессе в SOIMUMPs и polyMUMPs при конструировании MEMS-компонентов.

Miller D. C. et al. Characteristics of a available silicon-on-isolator MEMS material.

Sensors and Actuators A: Physical, 20 July 2007. Vol. 138. Issue 1. P. 130—144.

Наноэнергетические материалы для MEMS

Новые энергетические материалы имеют решающее значение для развития микроразмерных систем, критичных к энергии, таких как исполнительные устройства, воспламенители, силовые устройства, устройства питания. Наноразмерные энергетические материалы (nEMs) особенно привлекательны с точки зрения повышенной энергетической плотности, более быстрого высвобождения энергии, большей стабильности и большей безопасности (нечувствительность к нежелательному иницированию). Представлен подробный обзор состояния исследований в области применения nEMs для микроэнергетических применений. Предлагается стратегия по выбору nEMs, основанная на анализе температуропроводности и теплоты реакции. В заключение после описания различных методов синтеза nEMs приведены некоторые рекомендации для проведения будущих исследований.

Rossi et al. Nanoenergetic materials for MEMS: a review.

Journal of Micromechanical Systems. Aug. 2007. Vol. 16. Issue 4. P. 919—931.

Микрофрезерование для MEMS

Представлены подробные исходные данные по технике микрофрезерования, новой технологии, пригодной для обработки многих материалов со сложными 3D-структурами с высоким аспектным отношением. По сравнению с другими методами микрообработки микрофрезерование имеет ряд преимуществ, в частности, низкую стоимость, гибкость. Основными элементами системы являются станочное устройство, микрофрезы, контрольные устройства. Изложены основные принципы микрофрезерования с акцентом на минимальную толщину кристалла и воздействия элементов микроструктуры. В заключение приведено исследование области микрофрезерования.

Wang et al. Micro milling technologies for MEMS.

International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design. 23–26 May 2007. P. 86–95.

Выращивание многослойных тонких пленок с одностенными углеродными нанотрубками посредством послойной наносамосборки

Представлено описание метода выращивания многослойных тонких пленок с одностенными углеродными нанотрубками (SWNT) с послойной (layer-by-layer (LbL)) наносамосборкой. Тонкая пленка собиралась на подложке посредством чередующейся адсорбции SWNTs и PDDA. Контроль с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) показал, что многочисленные слои образуются с плотной сетью нанотрубчатых пучков. Средняя толщина одного двойного слоя (PDDA/SWNT) составляет 7,6 нм.

Модуль Юнга SWNT тонкой пленки составил 17 ГПа. Электротермические свойства многослойной структуры SWNT исследовались с помощью вольт-амперного четырехконтактного зонда и техники быстрого термического отжига.

Xue W., Cui T. Deposition and characterization of layer-by-layer nano self-assembled carbon nanotube multilayer thin films.

Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. 2007, January 16–19, Bangkok, Thailand.

Конструирование и изготовление исполнительных устройств и датчиков для MEMS

Сообщается о результатах изготовления микроэлектромеханических систем, приборов и структур с использованием объемных и поверхностных микроэлектромеханических процессов. Эти микроэлектромеханические устройства сконструированы и изготовлены в лаборатории Рочестерского технологического института. Микроактуаторы и датчики были сконструированы и изготовлены для создания опытного образца лаборатории на кристалле. Приведены экспериментальные результаты тестирования, оценки и

характеристики микроэлектромеханических актуаторов и датчиков.

Puchades et al. Design and fabrication of microactuators and sensors for MEMS.

International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design. 23–26 May 2007. P. 38–44.

Новые применения MEMS

Приведен пример сетевой сенсорной системы. Рассмотрено влияние основных характеристик Si-MEMS, кварцевых MEMS, пьезоэлектрических приборов на общие системные характеристики как с технической точки зрения, так и с точки зрения пользователя. Представлено описание системы коррекции нечеткости изображения в цифровых камерах и видеоустройствах, вызванного дрожанием руки. Кроме того, была протестирована навигационная система с использованием датчиков. Все материалы датчиков имели превосходные характеристики на короткое время при использовании в камерах и видеоустройствах. Но при длительной работе в составе навигационных систем или следящих систем подвижного объекта для Si-MEMS-датчиков был характерен значительный дрейф сигнала. Было также выполнено сравнение потребляемой мощности различных сигналов на входе датчика и устройстве связи.

Tanaka M. An industrial and applied review of new MEMS devices features.

Microelectronic Engineering, May-August 2007, Vol. 84, Issues 5–8. P. 1341–1344.

MEMS-датчик давления Фабри-Перо

Для изготовления интерферометрического датчика давления, предназначенного для инвазивных биомедицинских применений, был использован биосовместимый полимер SU-8. Датчик состоит из полимерной крышки с отражательной диафрагмой, чувствительной к давлению, смонтированной на конце волоконно-оптического кабеля. Отклонение диафрагмы измерялось посредством анализа спектра, отраженного от интерферометра Фабри-Перо, образованного между диафрагмой и концом волокна. Прибор быстродействующий, простой и недорогой в изготовлении. Его небольшие размеры (внешний диаметр 300 мкм) уменьшают риск воспаления и инфекции и допускают ввод через катетер в малые сосуды и полости. Установлена чувствительность к линейному давлению в диапазоне от 0 до 125 мм рт. ст. с разрешением 1–2 мм рт. ст. Преобразователь интерферометрического смещения использован для выполнения измерений в целях оценки дрейфа и гистерезиса датчиков SU-8 в различных средах. Эти результаты могут послужить руководством для конструирования и изготовления микроприборов на базе SU-8.

Hill G. C. et al. SU-8 MEMS Fabry-Perot pressure sensor.

Sensors and Actuators A: Physical, 20 July 2007. Vol. 138, Issue 1. P. 52–62.

Моделирование датчиков на базе углеродных нанотрубок

Выполнены моделирование датчиков на базе углеродных нанотрубок и анализ их конструктивного пространства. Было установлено, что полупроводниковые нанотрубки почти всегда предпочтительнее металлических нанотрубок в плане быстродействия, статической потребляемой мощности, динамического диапазона и чувствительности. Рассмотрены конструкции наноразмерных датчиков для получения оптимальных характеристик и показано, что обнаружение вещества, определяемого при анализе, на уровне одной молекулы может быть легко достигнуто с использованием нанотрубки диаметром 1 нм и длиной до 30 мкм.

Deng J. et al. Modeling Carbon Nanotube Sensors.

IEEE Sensors Journal: Sept. 2007. Vol. 7. Issue 9. P. 1356—1357.

Новый институт США для подготовки следующего поколения специалистов в области нанотехники

В тесном партнерстве между промышленными фирмами, федеральным правительством и университетами в США создается Национальный институт нанотехники (National Institute for Nano-Engineering (Nine)), который призван популяризировать нанотехнику и углубить компетентность студентов в трех основных областях: нанoeлектронике, нанoэнергетике, производстве нанoизделий.

Создание института предложено правительством США, и он будет работать под эгидой Sandia National Labs. Недавно был подписан меморандум о взаимопонимании следующими известными фирмами: Corning Inc., Exxon Mobil Corp., Good-year Tire and Rubber, IBM Corp., Intel Corp., Lockheed Martin Corp; Rensselaer Polytechnic Institute; университетами: Rice, California, Florida, Harvard, Harvey Mudd College, Illinois, New Mexico, Notre Dame, Texas, Wisconsin, Yale.

Sandia будет служить центром работ с привлечением промышленных фирм, которые будут обеспечивать мониторинг, технические средства для исследований и опыт, предназначенные для насыщения академических программ участвующих университетов. В зависимости от требований каждого из проектов в области нанoeлектроники, нанoэнергетики и нанoпроизводства студенты будут привлекаться в университетские лаборатории, к оборудованию промышленных фирм и Sandia.

Jonnson R. Colin. New U. S. institute eyes next generation of nano engineers.

www.eetimes.com/showArticle.jhtmlarticleID=201801525

Правительство РФ утвердило концепцию программы "Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники" на 2008—2015 гг.

Правительство РФ распоряжением от 23 июля N 972-р утвердило концепцию федеральной целевой программы (ФЦП) "Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники" на 2008—2015 гг.

ФЦП призвана обеспечить создание современной инфраструктуры высокотехнологичной радиоэлектронной отрасли промышленности, способной производить конкурентоспособные на внутреннем и мировом рынках электронную компонентную базу и радиоэлектронную продукцию на ее основе.

Общая сумма инвестиций на реализацию программы оценивается 187 млрд руб. Установлено, что предельный прогнозный объем финансирования программы за счет средств федерального бюджета составляет 110 млрд руб. Финансовое обеспечение программы предусматривает смешанную систему инвестирования с привлечением средств федерального бюджета и внебюджетных средств, формируемых за счет собственных средств организаций-исполнителей, с возможным привлечением отечественных и иностранных инвесторов, займов и кредитов.

Постановлением правительства РФ от 29 января 2007 г. N 54 была утверждена федеральная целевая программа "Национальная технологическая база" на 2007—2011 гг., в состав которой входит подпрограмма "Развитие электронной компонентной базы" на 2007—2011 гг. Подпрограммой предусмотрен поэтапный выход электронной промышленности из кризиса за счет освоения новых технологий на приоритетных направлениях и завоевание необходимых рыночных позиций.

Основой новой программы являются мероприятия подпрограммы, которая с 2008 г. исключается из федеральной целевой программы "Национальная технологическая база" на 2007—2011 гг. При этом выполнение мероприятий подпрограммы, начавшихся в 2007 г., будет продолжено в соответствии с уже заключенными контрактами в рамках программы.

В рамках программы планируется выполнение мероприятий по таким приоритетным направлениям, как разработка и освоение производства сверхвысокочастотной техники, радиационно-стойкой электронной компонентной базы, микро-системной техники, микроэлектроники, электронных материалов и структур, пассивной электронной компонентной базы, создание унифицированных электронных модулей и базовых несущих конструкций, типовых базовых технологических процессов, разработка технологий создания радиоэлектронных систем и комплексов, а также выполнение обеспечивающих работ.

Первые шесть направлений, касающиеся развития электронной компонентной базы, сформированы на основе мероприятий подпрограммы с включением мероприятий по развитию вакуумной сверхвысокочастотной техники, оптоэлектроники и квантовой электроники. Следующие три направления относятся к радиоэлектронике и являются новыми по отношению к подпрограмме.

Госзаказчиком — координатором федеральной целевой программы определено Минпромэнерго РФ. Госзаказчиками также стали Роспром, Росатом, Роскосмос, Роснаука и Рособразование. Минпромэнерго РФ поручено обеспечить разработку проекта программы, а Минэкономразвития РФ — представить его в установленном порядке в правительство РФ.

На первом этапе выполнения программы предполагается (в основном за счет средств частных инвесторов) провести разработку базовых промышленных технологий микроэлектроники уровней 0,18 мкм и освоить в производстве к 2009 г. технологический уровень 0,13 мкм, а также разработать и освоить в производстве новые классы электронной компонентной базы.

Одновременно планируется осуществить разработку унифицированного ряда электронных модулей на основе новой отечественной электронной компонентной базы для построения широкой номенклатуры радиоэлектронных средств двойного и гражданского назначения, а также базовых технологических процессов их производства и необходимого технологического оборудования.

Уже в 2011 г. ожидается увеличение объемов производства радиоэлектроники в 2,2 раза по сравнению с 2008 г., качественное изменение технического уровня конечной продукции, создание разветвленной отраслевой и межотраслевой системы дизайн-центров разработки электронной компонентной базы, аппаратуры и систем.

На втором этапе реализации программы планируется сократить технологическое отставание радиоэлектронной промышленности от прогнозируемого мирового уровня и обеспечить отечественной электронике и радиоэлектронике интеграцию в международные программы развития на основе использования отечественных достижений в области наноматериалов и комплексных программно-аппаратных решений в области сложных систем. Будет построена единая сеть сквозного проектирования радиоэлектронной продукции, в которой на первом уровне будет обеспечиваться проектирование функционально сложной электронной компонентной базы, на втором уровне — проектирование управляющих электронных модулей и на третьем уровне — конечных радиоэлектронных изделий.

Ожидается, что объем выпуска радиоэлектронной продукции в 2015 г. составит 300 млрд руб. и увеличится по сравнению с 2008 г. более чем в 5 раз.

Предполагается, что в России к 2015 г. будет существовать реальная и востребованная рынком госзакупок возможность производства современной электронной компонентной базы с общим объемом сбыта более 80 млрд руб. в год и радиоэлектронной продукции — более 155 млрд руб. в год.

Реализация программы позволит получить в сфере производства за расчетный период чистый дисконтированный доход в размере 64 млрд 374,4 млн руб. Чистый дисконтированный доход государства (бюджетный эффект) составит 125 млрд 045,9 млн руб. Налоговые поступления от реализации программы с учетом бюджетных и внебюджетных ассигнований предусматриваются в размере 198 млрд 577,2 млн руб.

Срок окупаемости всех инвестиций — бюджетных и внебюджетных ассигнований — за счет чистой прибыли и амортизации составит 8,1 г., а бюджетных ассигнований за счет налоговых поступлений — один год.

<http://www.cybersecurity.ru/crypto/30768.html>

Использование углеродных нанотрубок для конструирования схем

Группа ученых Стэнфордского университета наложили сетку углеродных нанотрубок на топологию стандартных логических схем. Затем для каждого типа схемы были идентифицированы ячейки, через которые должны проходить полупроводниковые нанотрубки, где они могут оказаться полезными, и ячейки, где они не должны проходить. Моделирование показало, что удаление нанотрубок в ненужных ячейках позволяет создавать работающие логические схемы, даже если исследователи не знают точное расположение нанотрубок в сетке. Была создана программа, которая автоматически генерирует рисунок хороших и плохих мест расположения в сетке. Безусловно, проблемы существуют. Нет способа узнать, чем будет данная нанотрубка: транзистором, резистором или проводником. Нет гарантии того, что достаточное число полупроводниковых нанотрубок может соединить области и сформировать схему.

Wilson R. Circuit-design technique could make carbon nanotubes useful.

EDN — 7/19/2007.

Применения MEMS в источниках питания и схемах

Источники питания для электроники являются одной из последних областей применения, где исследуются возможности MEMS-приборов и технологии. Особенно активно ведутся исследования в области создания MEMS-источников питания для замены батарей в портативных электронных приборах, в частности, таких как беспроводные сенсорные узлы. Кроме того, имеются возможности

для схемной защиты, преобразования энергии и преобразования сигнала. Указанные применения рассматриваются в статье. Представлены более подробные описания работ, выполняемых Imperial College и касающихся источников извлечения энергии за счет преобразования движения и схемных MEMS-прерывателей. Также приведены примеры других работ в области устройств питания, выполняемых другими коллективами. В заключение обсуждаются возможные будущие направления работ.

Yetman E. M. Application of MEMS in power sources and circuits.

Journal of Micromechanics and Microengineering, July 2007. Issue 7. P. 184—188.

Обработка сигнала для магнитных GMR-датчиков

Магнитное поле Земли обеспечивает однородное магнитное поле на площади в несколько километров в пределах 30 и 60 мкТл в зависимости от местоположения. Таким образом, автомобили вызывают местные возмущения порядка 1 мкТл относительно магнитного поля Земли в зависимости от того, двигаются они или стоят на месте. GMR-датчики способны преобразовывать изменения магнитного поля Земли в электрическое напряжение. Однако выходные сигналы этих датчиков слишком слабы для работы с ними, поэтому они должны быть усилены и фильтрованы, чтобы можно было выполнить цифровую обработку. Представлено описание конструкции и реализации практической схемы обработки сигнала для GMR-датчиков и простой алгоритм расчета скорости, использованный в нашей встроенной системе контроля скорости автомобилей. Схема усиливает выходное напряжение датчика в 36 360 раз в полосе 0,19 и 48,23 кГц. В настоящее время осуществляются сравнение и анализ сигналов, захваченных встроенной системой. Полученная система контроля скорости, в которой используются небольшие, недорогие магнитные датчики и несколько дополнительных компонентов, пригодна для автомобильных применений, что позволяет уменьшить стоимость монтажных операций современных систем контроля скорости автомобилей и систем обнаружения автомобилей.

Sebastia J. P. et al. Signal conditioning for GMR magnetic sensors applied to traffic speed monitoring GMR sensors.

Sensors and Actuators A: Physical.

4 July 2007. Vol. 137. Issue 2. P. 230—235.

Сложная MEMS: полностью интегрированный спектрометр микромассы

MEMS-технология позволяет изготовить все критические структуры посредством глубокого анизотропного травления кремния с использованием одной маски. Поэтому изготовление мини-

турного масс-спектрометра (MMS) может оказаться очень эффективным. Его малый размер (5×10 мм) уменьшает требования к вакууму на несколько порядков. Работа основана на электронной ударной ионизации и времяпролетном фильтре массы. Электронный луч для ионизации получается от источника электронов, который работает с использованием СВЧ плазмы высокой плотности. Интегрированное ионное оптическое устройство выделяет луч и фокусирует его на сепараторе массы, где короткие ионные импульсы расходятся на основе отношения масса — заряд. Энергетический фильтр удерживает ионный луч монохроматичным до записи его детектором. Представлены спектры масс различных составов газов, измеренных с использованием MMS.

Waplehorst E. et al. Complex MEMS: a fully integrated TOF micro mass spectrometer.

Sensors and Actuators A: Physical. 20 July 2007. Vol. 138. Issue 1. P. 22—27.

Использование микродатчиков для диагноза микротопливных элементов

Топливные элементы имеют перспективы стать важным источником электрического питания. Однако необходимо решить некоторые проблемы. Измерение температуры и влажности внутри топливных элементов в настоящее время затруднительно. Была изготовлена матрица датчиков внутри топливных элементов, с помощью которых были выполнены измерения распределения температуры и влажности. Подложка биполярной платы топливного элемента была изготовлена из коррозионно-стойкой стали (SS-304) и было выполнено мокрое травление для изготовления канала в подложке. Затем была использована MEMS-технология для изготовления матрицы датчиков температуры и влажности на буртике канала. Преимущества матрицы датчиков температуры заключаются в их малом объеме, высокой точности, быстром времени отклика, простоте изготовления, возможности массового производства. Все это позволяет измерять температуру в точном месте более эффективно, чем при использовании обычных термодатчиков. Датчики влажности изготавливаются из золота и титана, как верхний и нижний электроды в канале. Максимальная плотность мощности биполярной платы без микродатчика составила 142 мВт/см^2 , а плотность тока 463 мА/см^2 .

Lee Chi-Yuan et al. Application of micro sensors on diagnosis of micro fuel cells.

2nd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. Jan. 2007.

Первый промышленный набор измерительных приборов для нанокантилеверных датчиков

Фирма Concentris GmbH (Швейцария) объявила о выпуске набора технических средств для выполнения измерений и обучения для наномехани-

ческих кантилеверных датчиков. Эти средства включают все химические вещества, расходные материалы, протоколы и инструкции, необходимые для функционирования кантилеверных матриц, и позволяют выполнять измерения.

Наномеханические кантилеверные датчики представляют собой высокочувствительные химические датчики и биодатчики. Сами по себе кантилеверы представляют собой кремниевые балки, изготовленные с использованием микромеханической технологии, которые преобразуют химические взаимодействия на их поверхности в механическое движение. Благодаря своей толщине (1 мкм или менее) они могут обнаруживать поверхностные процессы с высокой чувствительностью в реальном времени. Кантилеверы настраиваются на использование в широком диапазоне применений, включая обнаружение ионов, исследование гибридизации ДНК и (био)молекулярных взаимодействий и анализ динамики образования слоев и конформационных изменений.

Набор измерительных и обучающих средств дополняется кантилеверной сенсорной платформой, прибором, который считывает кантилеверные сенсорные матрицы в режиме до восьми кантилеверов в реальном времени. Первые два набора предназначены для обнаружения двух специфических последовательностей ДНК посредством измерения гибридизации и для обнаружения ионов кальция.

Новый инструментальный набор предоставляет значительные дополнительные возможности для всех исследователей, занятых в сфере кантилеверных датчиков. Они позволяют сразу использовать эту технику на базе тщательно составленных протоколов функционирования и процедур измерения. Они могут также служить исходной точкой для проведения новых экспериментов.

Concentris's "industry first" kits enable use of nano-cantilever sensors.

www.smalltimes.com/articles/article_display.cfm?ARTICLE_ID=300632&p=109

Высокочувствительный MEMS-датчик давления

Рассматривается пьезорезистивный эффект в датчике van der Pauw (VDP) напряжения, подверженного двухосному напряжению. Уравнения VDP-сопротивления совмещаются с уравнениями пьезоудельного сопротивления в кремнии для вывода соотношений для изменения сопротивления VDP-датчика исходя из прикладываемого напряжения. Затем чувствительность VDP-датчика к двухосному напряжению определялась аналитически, и осуществлялось цифровое моделирование. Состояния двухосного напряжения рассматривались для случая круглой диафрагмы под давлением. VDP-чувствительность к двухосным напряжениям сравнивалась с чувствительностью обычного пьезорезистивного датчика напряжения. Установле-

но, что теоретическая (основанная на аналитических результатах и результатах моделирования) чувствительность к напряжению нового VDP-датчика в 3 раза выше, чем у обычного аналога.

Law J. et al. A High Sensitivity MEMS Pressure Sensor. IEEE Workshop on Microelectronics and Electron Devices. 20 April. 2007. P. 51—52.

Конструирование и изготовление емкостных химических сенсорных MEMS

Описывается разработка сенсорных MEMS для обнаружения летучих соединений. Датчик состоит из емкостного сенсорного MEMS-элемента в монокристаллической форме, интегрированного со схемой считывания. Сенсорный элемент представляет собой конденсатор, состоящий из двух параллельных пластин с использованием химически чувствительного полимера как диэлектрика. При наличии вещества, определяемого при анализе, полимер разбухает и меняет емкость сенсорного элемента. Это изменение емкости считывается и преобразуется в цифровую форму посредством дельта-сигмы считывающей схемы. Приводится описание конструкции считывающего элемента, схемы считывания и технологического процесса их изготовления на одном кристалле.

Saxena V. et al. Design and fabrication of a MEMS capacitive chemical sensor system.

IEEE Workshop on Microelectronics and Electron Devices. 14 April. 2006.

Новая конструкция кантилевера с высоким уровнем контроля механических характеристик

Данная конструкция предлагает решение массового производства посредством решения хорошо известной проблемы при изготовлении очень тонких кристаллических кремниевых структур, а именно: изгиба вследствие деформации крепления. Были исследованы механические характеристики и сравнены с характеристиками стандартного кантилевера. Моделирование методом конечных элементов и экспериментальные результаты показали уменьшение исходного изгиба, дисперсии этого изгиба и дисперсии механических свойств кантилевера, что позволяет улучшить характеристики матриц.

Plaza J. A. et al. Novel cantilever design with high control of the mechanical performance.

Microelectron Engineering, May-August 2007. Vol. 84. Issues 5—8. P. 1292—1295.

САПР для конструирования MEMS "ProMIP"

Предлагается система для сквозного проектирования MEMS. Такая система включает подсистему моделирования технологического процесса изготовления ИС и MEMS ProMIS-T; подсистему моделирования твердотельных схем (ProMIP-Tv), функционального моделирования (ProMIP-F), системного моделирования (ProMIP-S).

Teslvuk V. et al. Кафедра САПР Львовского государственного политехнического университета.

Computer-Aided System for MEMS Design "ProMIP".

2nd International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design.

Использование MEMS-датчиков в GPS

Фирма *NemeriX* (Швейцария), представляющая собой дизайн-центр (*fabless*), специализирующийся на разработке сверхмаломощных полупроводниковых изделий и решений для GPS (глобальная система позиционирования и определения положения), и фирма *Bosch Sensortec GmbH* (Германия), поставщик MEMS-датчиков для бытовых рынков, объявили об успешной интеграции своих технологий для многомерного решения GPS. В системе интегрируется датчик давления высокого разрешения SMD500 фирмы Bosch с устройством высокоточной навигации фирмы *NemeriX*, обеспечивающим возможность идентификации перемещения автомобиля по верхнему или нижнему уровням шоссе и улучшающим поочередную навигацию в ситуациях, когда трафик осуществляется в одном и том же направлении на различных уровнях шоссе или при двустороннем движении. Система может быть успешно использована при вертикальном расстоянии между уровнями шоссе в 10 м или более. Ожидаются благоприятные результаты навигации городских загруженных дорожных систем, многоуровневых мостов и тоннелей.

NemeriX/Bosch collaboration promises "revolutionary" vertical accuracy in MEMS GPS.

www.smalltimes.com/articles/article_display.cfm?articleID=295205&p=109

Конструирование высокочувствительного кантилевера и его монолитная интеграция с КМОП-схемами

Были сконструированы и изготовлены прямоугольные пьезорезистивные прямоугольные кантилеверы с отверстиями для концентрации напряжений в целях усиления выходных сигналов. Результаты имитационного моделирования и измерений чувствительности показали, что данная конструкция может привести к повышению чувствительности к перемещению пьезорезистивного кантилевера. После изучения характеристик была выполнена монолитная интеграция микрокантилеверной матрицы с КМОП-схемой считывания на КНИ-подложке с использованием микромеханической технологии. Для получения окончательной интегрированной системы была использована КМОП-технология. В состав интегрированной сенсорной системы входят кантилеверная матрица, мультиплексор с цифровым контролем, измерительный усилитель. Результаты измерений подтвердили возможность интеграции.

Yu X. Design of High-Sensitivity Cantilever and its Monolithic Integration with CMOS Circuits // IEEE Sensors Journal. April 2007. Vol. 7. Issue 4. P. 489—495.

Роль MEMS в безмасочной литографии

Рассматриваются проблемы безмасочной литографии с производительностью несколько пластин в час при размерах узлов 45...32 нм. Сделан вывод, что такое быстроедействие может быть реализовано на принципе массового параллелизма, который базируется на световой оптике, электронной оптике и атомно-силовой микроскопии. Конструкция таких систем требует использования MEMS. Рассматриваются различные концепции использования MEMS. Представлены примеры изготовления матричных структур.

Kruit P. The role of MEMS in maskless lithography // Microelectronic Engineering. May-August 2007. Vol. 84. Issues 5—8. P. 1027—1032.

Изготовление трехмерного рентгеновского шаблона с использованием MEMS-технологии

Кремниевые микроструктуры с наклонными боковыми стенками на КНИ-пластине были изготовлены с использованием реактивного ионного травления (РИТ). Затем пластина обрабатывалась до уровня рентгеновской маски, что делает кремниевую структуру поглотителем рентгеновских лучей. Угол наклона боковой стенки кремниевого поглотителя рентгеновских лучей может меняться от 60 до 71° посредством настройки давления смеси газов в рабочей камере системы РИТ. Распределение толщины поглотителя рентгеновских лучей является различным — согласно углу наклона поглотителя рентгеновских лучей. В результате интенсивность передачи рентгеновских лучей локально меняется и распределение энергии рентгеновских лучей, излучаемых на резист, может контролироваться. Были выполнены экспериментальные исследования рентгеновской литографии с использованием рентгеновской маски и кольца BL-4 синхротрона TERAS Национального института исследований в области перспектив развития науки и техники промышленного назначения (AIST, Япония). В результате были успешно изготовлены трехмерные РММА микроструктуры с использованием только одного рентгеновского экспонирования без сканирования и поворота столика экспонирования.

Mekaru et al. Fabrication of Three Dimensional X-ray Mask using MEMS Technology. 2nd IEEE International Conference on Mano/Micro Engineered and Molecular Systems. Jan. 2007. P. 447—451.

Первые испытания MEMS в космосе

Специалисты NASA, работающие над спутниковой техникой по программе Space Technology 5 (ST5), были озабочены резкими температурными флуктуациями, влияющими на характеристики и

срок службы бортовой электроники. Конструкторы MEMS-техники фирмы *Sandia* совместно с учеными лаборатории прикладной физики университета Джона Гопкинса разработали решение термического контроля микроспутников на базе MEMS. Прибор, созданный с использованием технологии SUMMIT V, включает подвижную решетку из подвижек с предкрылками с шириной 6 мкм и длиной 1800 мкм. Электростатические актуаторы перемещают заслонки назад и вперед, управляя теплопередачей через обшивку спутника. Свой трехмесячный полет завершили три микроспутника, в которых были использованы последние достижения MEMS-техники и нанотехники. Каждый спутник с собственным питанием имел размеры с 13-дюймовый телевизор и при запуске с использованием микрореактивного двигателя весил приблизительно 55 фунтов. Были использованы миниатюрный магнетометр для измерения магнитного поля и миниатюрные космические радиоретрансляторы для связи космос — Земля и слежения.

Проект, разработанный и тестированный в Центре космических полетов Goddard, является частью программы Нового тысячелетия, руководимой Лабораторией реактивного движения NASA. Программа включает разработку и тестирование технологий, которые обеспечат будущие возможности научных полетов с высокой эффективностью и уменьшенными стоимостью и риском. В следующем варианте применений MEMS будет использована плотная интеграция MEMS-приборов. Микрозатворы являются простым примером из возможных.

Howard C. E. Science of the small.

Military & Aerospace Electronics. June 2007. P. 28, 30—33.

Рост выпуска MEMS

Французская исследовательская фирма *Yole Development* извещает, что рынок инерционных MEMS-приборов вырастет на 13 % в период с 2006 по 2011 год. Динамика рынка во многом зависит от акселерометров, продажи которых составят 65 % общих продаж инерционных приборов. Бытовые применения составят 40 % общих применений инерционных MEMS. Рынок гироскопов вырос в период с 2005 по 2006 год на 55 %, достигнув уровня 232 млн долл. Среднегодовой прирост на период с 2006 по 2011 год составит 35 %. Стратегия производства инерционных MEMS-приборов сохраняется, но в будущем изменится. Многие фирмы имеют свои заводы, но половина новых фирм будет использовать внешние заводы.

Увеличивающаяся роль в производстве играют специализированные полупроводниковые заводы (*foundry*). В 2006 году продажи 10 ведущих полупроводниковых заводов (*foundry*) составили 157 млн долл., что составляет ограниченную часть мировых продаж MEMS. Но эти заводы являются предпосылкой развития MEMS. В мире более 30 фирм

(США, Япония, Швеция, Канада, Франция) участвуют в производстве MEMS, как *foundary*, так и по контракту. В отличие от *foundary*, для производства СБИС, где господствуют четыре фирмы (TSMC, UMC, Chartered Semiconductor, SMIC) и занимают 84 % рынка (2006 год), в области MEMS примерно такая же доля распределена между десятью заводами: IMT, Sony, APM, Micralyne, DALSA Semiconductor, ELMOS SMI, Memstech, Colibrys, Silex, Memscap, Tronic's Microsystems.

Pele A-F. Firm predict MEMS growth. www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=199901694 — Yole's new MEMS foundry ranking reveals dramatic growth, key differences.

www.smalltimes.com/articles/article_display.cfm?ARTICLE_ID=2948298&p=109

Новые КНИ-пластины повышенной однородности для MEMS

Финская фирма *Okmetic Oyj*, поставщик кремниевых пластин для MEMS-датчиков, приступила к поставкам КНИ (кремний на изоляторе) пластин с повышенным уровнем однородности. Обеспечиваются допуски $\pm 0,5$ мкм при выполнении сварки. Выполняется разработка пластин следующего поколения с допуском по толщине приборного слоя $\pm 0,3$ мкм на пластине диаметром 150 мм при выполнении измерений по девяти точкам. Такая повышенная однородность материала обеспечит совершенно новый уровень чувствительности MEMS-компонентов. *Okmetic* занимается выпуском и последующей обработкой высококачественных полупроводниковых пластин для производства датчиков и других изделий полупроводниковой промышленности. Фирма имеет заводы в Вантаа (Финляндия) и Алене (штат Техас, США).

www.smalltimes.com/articles/article_display.cfm?ARTICLE_ID=294834&p=109

Особенности применения новых MEMS-приборов

MEMS-приборы на базе кремния имеют большие перспективы использования в мобильной технике. В статье рассматривается пример сенсорной сетевой системы. С технической и пользовательской точек зрения рассматривается влияние основных электромеханических свойств таких приборов, как Si-MEMS, кварцевых MEMS, пьезоэлектрических приборов, на общие характеристики системы. Приведено описание системы коррекции размытости изображений в цифровой камере или видеоустройстве, вызванной дрожанием руки. Кроме того, выполнено тестирование сенсорной навигационной системы. При коротком сроке работы все материалы датчиков имеют превосходные характеристики при использовании в камерах и видеоустройствах. Но при долгосрочной работе навигационных систем и систем наблюдения за подвижными объек-

тами Si-MEMS-датчик может иметь большое смещение сигнала. Также сравнивалась потребляемая мощность различных датчиков по входу. Предлагается, чтобы системный конструктор учитывал особенности каждой технологии и использовал MEMS-технику в случаях эффективно-го применения.

Tanaka M. An industrial an applied review of new MEMS features // *Microelectronic Engineering*. May-August 2007. Vol. 84, Issues 5—8. P. 1341—1344.

Конструирование, изготовление и тестирование новых MEMS-резонаторов для считывания массы

Микро- и нанoeлектромеханические системы (MEMS/NEMS) имеют большие перспективы применения для считывания массы. Посредством миниатюризации размеров может быть достигнута все более высокая чувствительность. В статье описаны моделирование по методу конечных элементов и оптимизация механического резонатора типа свободной балки. Задача состояла в оптимизации чувствительности массы посредством увеличения фактора Q , который, свою очередь, уменьшает модуляционный шум в системе. Кроме того, представлена новая последовательность технологического процесса для изготовления микро- и наномеханических резонаторов с интегрированным электростатическим исполнительным механизмом и пьезорезистивным считыванием. Наконец, представлены некоторые предварительные результаты, демонстрирующие значения Q фактора (добротности) до 38 000 в высоком вакууме и 13 000 в среднем вакууме на матрице кантилеверных приборов, и некоторые соображения по оптимизации механической конструкции для выполнения измерений.

Davis Z. J. et al. Design, fabrication and testing of a novel MEMS resonator for mass sensing applications // *Microelectronic Engineering*. May-August 2007. Vol. 84, Issues 5—8. P. 1601—1605.

Создание уникального акселерометра с использованием комбинированной технологии

Специалисты *US Navy and Space* и *Naval Warfare System Center* (SPAR-WAR) нашли способ совмещения MEMS- и электрооптической технологии для создания самых чувствительных акселерометров в мире. Один из разработчиков, Р. Уотерс, знакомый с особенностями реализации акселерометров на основе MEMS-технологии, посчитал, что они слишком дороги для большинства применений. Он обратил внимание на возможность объединения MEMS-технологии и технологии, используемой для создания интерферометров Фабри — Перо. При этом учитывалась возможность изготовления акселерометров по отработанной микроэлектронной технологии, используемой для произ-

водства ИС. В 2000 г. было получено финансирование и был составлен концептуальный проект. В 2001 г. были изготовлены несколько образцов для проверки концепции. В результате проверки были установлены характеристики, уровень которых превышал ожидаемый. Фактически был достигнут самый высокий уровень чувствительности в мире. В 2003 г. к группе разработчиков присоединилась производственная группа. В настоящее время создана фирма *Omega Sensors*, и работа будет продолжена при финансовой поддержке Центра коммерциализации передовой техники.

Finch S. Optics and MEMS combine for unique accelerometer // *Military Electronics*. June 2007. P. 9.

Новый MEMS-датчик

Фирма *Knowles Acoustics* приступила к выпуску ультразвукового акустического датчика (UAS) для обнаружения/приема ультразвукового сигнала в воздухе. При создании была использована самая современная MEMS-технология для обеспечения надежной конструкции механического прибора, работающего в широком диапазоне условий окружающей среды. По сравнению с обычными ультразвуковыми датчиками, для которых характерна узкая частотная полоса обнаружения, UAS может работать в широком частотном диапазоне в разнообразных применениях: установление ультразвукового диапазона, мониторинг условий, обнаружение дефектов, считывание уровня и местоположения. Датчик может быть использован для мониторинга и обнаружения частот в диапазоне от 10 до 65 кГц с минимальным затуханием.

Roos G. MEMS sensor detects/receives ultrasonic sound in air.

www.eeproductcenter.com/showArticle.jhtml?articleID=199501164

Успешное использование нанотехнологии в полупроводниковой технологии

На заводе в Ист Фишбилле фирмы IBM прошли успешные демонстрационные испытания 32-нанометрового нового технологического процесса, получившего название самосборки. В этом методе поверхность полупроводниковой пластины покрывали двумя полимерными слоями. Два типа молекул в покрытии затем сами собирались в тонкую пленку, оснащенную равномерно расположенными отверстиями, содержащими воздух. На пластине диаметром 300 мм были расположены миллиарды таких миниатюрных отверстий — эти вакуумные пространства с размерами 20 нм и расстояниями между ними в 40 нм. Фактически между медными проводниками на кристалле создается вакуум, что способствует охлаждению проводников и улучшению теплоотвода в ИС. На уровне серверных схем это может привести к сни-

жению потребляемой мощности на 15 % и повышению быстродействия на 30—35 %. Возможно, данная технология будет использована в промышленном масштабе для изготовления сложных ИС в 2009 году.

Detar J. IBM and HP tie nanotechnology to chipmaking. Investor's Business Daily. 5/2/2007.

Shinal J. IBM unveils chips made with nanotechnology. MarketWatch. 2007. May 3.

Walko J. IBM fills 'airgap' to create faster chips. www.eenrnes.com/showArticle.jhtml?articleID=199203454

Наногенератор, действующий от вибраций

Ученые Технического университета Джорджия, используя ультразвуковые волны для возбуждения колебаний матрицы нанопроволок из окиси цинка, получили миниатюрный генератор, который может производить постоянный ток. Тем самым сделан значительный шаг в создании наноразмерного силового генератора практического применения. Одним из важных применений является питание имплантируемых биологических датчиков. Генератор может также питать наноприборы. Первоначально были изготовлены наноразмерные проволочные датчики давления, которые могут обнаруживать силы на уровне пиконьютонов или выступать в качестве источника питания для датчиков газа. Главным нововведением в генераторе является конструкция электрода. Поверхность электрода, покрытого платиной, имеет ломаную форму, как зубья пилы, т. е. имеются параллельные выступы и пазы. Этот электрод помещается на поверхность нанопроволок, а зубья могут толкать большое число нанопроволок одновременно вверх и вниз. Для возбуждения колебаний в электроде прибор в корпусе помещался в воду и подвергался воздействию ультразвуковых волн. Поскольку электрод перемещался вверх и вниз, это вызывало колебания нанопроволок и генерирование электрического тока, который накапливается на электроде. Это была первая демонстрация получения постоянного тока от нанопроволок, возбуждаемых механической энергией. Для реальных применений ток, генерируемый наногенератором, должен иметь более высокие значения и более стабильные. В настоящее время нанопроволоки выращиваются беспорядочно и в формировании тока участвуют около 250—1000 нанопроволок, что составляет менее 1 % матрицы. Следующим этапом является выращивание более регулярной матрицы нанопроволок, однородных по размеру и высоте. Согласование рисунка с рисунком на электроде позволит использовать все нанопроволоки, увеличивая ток и делая его более стабильным.

Patel-Predd P. Nanogenerator Fueled by Vibration.

www.technologyreview.com/primer_friendly_article.aspx?id=18496

Новая измерительная система для двухстороннего совмещения и экспонирования пластин для производства MEMS

Фирма SUSS MicroTec приступила к выпуску автоматизированной измерительной системы DSM200 для выполнения операции двухстороннего совмещения и экспонирования. Система кассетного типа обеспечивает верификацию точности совмещения пластин диаметром от 50 до 200 мм. Располагая новой техникой распознавания рисунков, система обеспечивает точность измерений 0,2 мкм при минимальном вмешательстве оператора. Построенная на базе установки совмещения MA200Compact система DSM200 предназначена для изготовления MEMS-приборов, мощных полупроводниковых приборов и оптоэлектронных устройств.

SUSS targets MEMS production with double-sided alignment tool.

www.smalltimes.com/articles.com/article_display.cfm?ARTICLE_ID=291501&p=109

Формирование стандартов в области нанoeлектроники

Институт IEEE завершает формирование сетевого графика (*roadmap*) по учреждению стандартов в области нанoeлектроники для содействия переходу электронных устройств, созданных на базе нанотехнологии, от лабораторных образцов до промышленных изделий. В этом году намечается принятие пяти нанoeлектронных стандартов: три по наноматериалам, включая проводящие межсоединения, структуры органических датчиков и нанодисперсионные среды; два стандарта для наноприборов — датчиков и излучающих приборов.

Один стандарт, IEEE 1650 "Стандартные методы тестирования для измерения электрических характеристик углеродных нанотрубок", уже подготовлен. Этот документ является первым, который обеспечивает общий шаблон для получения воспроизводимых электрических данных на нанотрубках.

В стадии разработки находится второй стандарт, IEEE P1690 "Стандартные методы снятия характеристик углеродных нанотрубок, используемых в качестве добавок в объемные материалы".

IEEE планирует прокомментировать, помимо информации по электронной почте, ход работ 22 мая на конференции NSTI "Nanotech 2007" в Санта Клара.

IEEE invites input on nanoelectronics roadmap.

www.smalltimes.com/articles/article_display.cfm?ARTICLE_ID=291234&p=109

Гигантский магниторезистивный эффект в углеродных нанотрубках с никелевыми контактами

Представлены первые теоретические результаты гигантского магниторезистивного эффекта одностенных углеродных нанотрубок (CNT) в контакте с

никелевыми электродами. Показано, что атомы Ni, расположенные на поверхности или оси CNT контактов, могут вносить значительный магнитный момент на атомах углерода. Исследование проводилось группой сотрудников университетов Ланкастера и Бата (Великобритания), университета Овьедо (Испания), колледжа Тринити (Дублин, Ирландия).

Athanasopoulos S. et al. Giant magnetoresistance of nickel-contacted carbon nanotubes // J. Phys.: Condens. Matter. 23—31 January 2007. 19. Issue 4. P. 7.

Магниторезистивные датчики

Рассматриваются магниторезистивные датчики на основе спиновых затворов (*spin valve*) и магнитных туннельных переходов в плане использования в качестве считывателей памяти на жестких дисках, а также в применениях, где требуется установление границ предельного поля (от нанотесл до пикотесл). Приводится описание уровня помех датчика для ВЧ применений и рассмотрение конструкции датчика с точки зрения использования в биомедицинской технике и считывающих головках. Датчики на базе магнитных туннельных переходов, использующие MgO-барьеры, представляются одним из наилучших вариантов для детектирования сверхнизкого поля (пТл) или в квази-DC, или в ВЧ применениях.

Freitas P. P. et al. Magnetoresistive sensors // J. Phys.: Condens. Matter. 23 April 2007. 19. Issue 16. 21 p.

Новый метод удаления полиимидного жертвенного слоя

Вследствие торговых секретов и защиты интеллектуальной собственности многие аспекты работы MEMS-переключателей все еще не поняты и в настоящее время находятся на стадии исследования. В статье описывается метод травления на основе одновременного использования O₂ и небольшого количества углеродного порошка. Соотношение между временем удаления полиимида и температурой затвердевания устанавливается посредством использования углеродного порошка в кварцевой вакуумной полости во время травления полиимидного жертвенного слоя. Это значительно уменьшает время удаления полиимидного жертвенного слоя, что очень важно в процессе изготовления MEMS. Этот процесс может быть использован в различных вариантах поверхностной микромеханической технологии и для изготовления ВЧ MEMS-переключателей, регулируемых конденсаторов, подвешенных индукторов с высокими значениями Q, полевых транзисторов с подвешенным затвором.

Guo X. et al. A Novel Method of Removing Polyimide Sacrificial Layer // 1 st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. Jan. 2006. P. 209—212.

Интегральные датчики, MEMS и микросистемы: отражение фантастического пути

Прошло 40 лет с момента создания первых микромеханических кремниевых приборов до момента создания беспроводных интегрированных микросистем, которые совмещают быстродействующие преобразователи, изготовленные по групповой технологии, со встроенным устройством обработки сигнала и беспроводным интерфейсом. В статье отражена деятельность во время этого периода, связанная с созданием датчика. В качестве примера приведены три самых ранних прибора. Нейронные зонды для прецизионного отображения деятельности центральной нервной системы развивались от простых острых структур до сложных трехмерных электродных матриц, пригодных как для моделирования, так и для записи. Интегрированные со схемами усиления, мультиплексирования, обнаружения импульсов и беспроводной передачи мощности и двунаправленных данных, они произвели революцию в нанонауке и упростили создание протезных приборов. Датчики давления прошли путь от пьезорезистивных мостов с низкоуровневым выходом до беспроводных емкостных приборов с само-тестированием и герметизацией на уровне пластины. Наконец, усилия по миниатюризации газовых хроматографов позволили создать опытные образцы микросистем размером с маленький калькулятор, содержащие микроканалы, программируемые на измерение давления и температуры, которые способны разделять и идентифицировать сложные газовые смеси за секунды. Такие микросистемы являются ключевыми для решения многих проблем 21-го века.

Wise K. D. Integrated sensors, MEMS, and Microsystems: Reflection on a fantastic voyage // Sensors and Actuators A: Physical. 1 May 2007. Vol. 136. Issue 1. P. 39—50.

Наноэлектромеханические датчики на основе углеродных нанотрубок

В статье изложены концепции и демонстрационные примеры наноэлектромеханических датчиков на базе углеродных нанотрубок (CNT). В первых, приводятся и обсуждаются различные концепции преобразователей, основанных на уникальных электрических, механических и электромеханических свойствах одностенных углеродных нанотрубок (SWNT). Во-вторых, представлены технология изготовления и методы интеграции SWNTs в микро- и наносистемы. Наконец, приводятся описание и характеристики демонстрационных образцов кантилеверных структур на базе подвешенных SWNT и нанотрубчатого датчика давления на базе мембраны. Электромеханические измерения, выполненные на указанных тестовых приборах, подтвердили SWNT в качестве исключительного пьезорезистивного электромеханического преобразователя

с показаниями измерений, далеко превышающими значения современных тензодатчиков.

Hierold Ch. et al. Nano electromechanical sensors based on carbon nanotubes // *Sensors and Actuators A: Physical*. 1 May 2007. Vol. 136. Issue 1. P. 51—61.

Ведущие изготовители MEMS

Согласно данным исследовательской фирмы WTC (Германия) мировым лидером в производстве MEMS является фирма *Texas Instruments* благодаря поставкам устройств для цифровой обработки света. В 2006 г. был установлен новый рекорд в поставках, которые составили сумму 905 млн долл. За фирмой *Texas Instruments* следует фирма *Hewlett-Packard*. На значительном рынке MEMS-устройств для головок струйной печати лидерами являются *Hewlett-Packard*, *Canon*, *Lexmark*, *Seiko* со своим производством, *STMicroelectronics*, как главный производственный партнер для *Hewlett-Packard*. На следующем по объему рынка — автомобильном секторе — лидерами являются фирма *Bosch* (374 млн долл.), *Freescall* (200 млн долл.), *Honeywell* (122 млн долл.). Десять заводов, специализирующихся в производстве MEMS, выпустили по контрактам в 2006 г. продукцию на сумму 131 млн долл., что на 30 % больше, чем в предыдущем году. Ведущим заводом стал IMT, увеличив продажи с 13 до 21 млн долл. Фирма *Silex* удвоила продажи, доведя их до 13 млн долл.

WTC reveals MEMS industry drivers, ranking.

www.smalltimes.com/articles/stmprint_screen.cfm?ARTICLE_ID=290200

Кремниевая нанобалка, изготовленная посредством MEMS-технологии, и ее электронные свойства

Разработан технологический MEMS-метод формирования балок шириной и толщиной 10 нм. Размер нанобалки точно контролируется посредством использования анизотропного самоостанавливающегося процесса травления вместо электронно-лучевой литографии, что дает возможность в будущем создать недорогое массовое производство изделий. Измерения ВАХ показали, что для сопротивления кремниевых нанобалок характерно значительное старение, которое определенно увеличивается после травления. В этот процесс вносит вклад окисление поверхности кремния. Кроме того, было установлено, что сопротивление нанопроволоки может меняться в зависимости от напряжения на затворе. По мере увеличения напряжения на затворе наблюдается обеднение носителей в нанопроволоке. Этот факт дает новую мотивацию для исследований и установления резонирования нанобалки.

Liu W. et al. Silicon nanobeam fabricated by MEMS technology and its electronic properties // *Proc. 1-st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*. Jan. 2006. P. 932—935.

Монолитная интеграция микрокантилевера со схемами контроля, изготовленными по КНИ-технологии

Приводится описание монолитной интеграции пьезорезистивных микрокантилеверов с аналоговым КМОП-усилителем и цифровым мультиплексором с использованием КНИ- и MEMS-технологии. Операции обнаружения сигнала, выбора и усиления сигнала выполняются последовательно. Было установлено, что для реализации аналоговой ИС технология SOI-CMOS-PD (с частичным обеднением) имеет преимущество перед технологией SOI-CMOS-FD (с полным обеднением). Представлены результаты моделирования и тестирования.

Zhang H. et al. Monolithic integration of micro-cantilever with conditioning circuits based on SOI techniques // *Proc. 1-st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*. Jan. 2006. P. 970—973.

Настройка полупроводниковых свойств одной углеродной нанотрубки для изготовления наноприборов

В эксперименте была использована модификация диаметра одной многостенной углеродной нанотрубки (s-MWNT) посредством электрического пробоя стенки нанотрубки. В результате механизм проводимости одной углеродной нанотрубки (s-CNT) может меняться от проводимости до полупроводимости. Также высота барьера диода, основанного на s-CNT, изготавливаемого с использованием АСМ, может быть непосредственно модифицирована, что имеет тот же эффект, что и от легирования CNT. Пробой MWNT был исследован с использованием АСМ, и диаметр, изменяемый от 60 до 10 нм, был измерен на каждом этапе пробоя. Используя указанную технику модификации, диод на базе s-CNT в перспективе может быть использован в оптоэлектронике.

Ho-Yin Chan et al. Tuning semiconductor properties of single carbon nanotube for fabrication of nanodevices // *Proc. 1-st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*. Jan. 2006. P. 1410—1413.

Проблемы изготовления NEMS

Нанотехнология является базой для изготовления любых нано-микроэлектромеханических приборов (NEMS). В статье предлагается обзор современных нанотехнологий и проблем использования их для изготовления NEMS. В технологии изготовления наноструктур применяются прямые, косвенные методы и самосборка. Каждый метод проанализирован с точки зрения возможностей и ограничений, что может быть использовано исследователями при выборе приемлемого маршрута нанотехнологии для намеченного применения.

Zheng C., Changzhi G. Nanofabrication challenges for NEMS // *Proc. 1-st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*. Jan. 2006. P. 607—610.

Корпусирование микромеханических резонаторов на уровне пластины

Приводится описание недорогого метода корпусирования MEMS (например, микрорезонаторов на уровне пластины). В процессе не требуется приварки пластины к пластине и он может быть использован для большого диапазона MEMS-приборов. Сначала на поверхность MEMS-компонента наносится жертвенный полимерный слой с последующим нанесением полимерного покрытия с низким значением диэлектрической постоянной. Жертвенный полимерный слой разлагается при повышенной температуре, и летучие продукты из него проникают через верхний полимерный слой, оставляя встроенные воздушные полости вокруг MEMS-структуры, которая таким образом освобождаясь от жертвенного полимерного материала, оказывается в защитном покрытии. Затем защищенный MEMS-прибор может быть обработан и корпусирован, как ИС. Электрические характеристики микрорезонаторов до и после корпусирования были одинаковыми, т. е. корпусирование не меняет характеристик прибора. Метод годится как для поверхностных, так и для объемных микромеханических приборов.

Joseph P. J. et al. Wafer-level packaging of micromechanical resonators // Proc. of IEEE Transactions on advanced packaging. Feb. 2007. Vol. 30. Issue 1. P. 19—26.

Использование MEMS-датчиков в эффективных по мощности блоках космических систем

Приведено описание быстродействующего микродатчика для малых космических объектов, которые предназначаются для использования в автономных авиакосмических системах. Каскадный микродатчик создается с использованием MEMS-технологии и нанотехнологии и может быть включен обычным способом в новые маломощные космические конструкции для выполнения полетов (*power efficiency system for flight application* (PESFA)). Описана методология конструирования микродатчика с динамической конфигурацией. Результаты компьютерного моделирования указанных микродатчиков сравниваются с возможными усовершенствованиями и обеспечивают высокую эффективность по мощности в течение длительного срока службы в условиях полетных применений на авиакосмических объектах.

Jeong T. T., Amber A. P. Power efficiency system for flight application (PESFA) mission // Proc. of IEEE transactions on Aerospace and electronic systems. October 2006. Vol. 42. #4. P. 1515—1520.

Интегрированная система матриц микрокантилеверов с наконечниками углеродных нанотрубок для записи изображений, считывания и манипуляции 3D-элементов в нанодиапазоне

Представлены конструкция и контроль микрокантилеверных матриц с массовым параллелизмом с наконечниками от многостенных углеродных нано-

трубок. Интегрированная система может стать мощным инструментом для формирования изображений, считывания, 3D-манипуляции наночастицами и биологическими образцами. Обсуждается конструкция датчика с использованием наконечников углеродных нанотрубок в качестве наноэлектродов. Для исследования динамического поведения была разработана распределенная модель параметров системы. Имитационное моделирование было выполнено на микрокантилеверах трех различных размеров с наконечниками из нанотрубок. Было показано, что при использовании имитационного моделирования с тщательно выбранными размерами могут быть продемонстрированы превосходные возможности наноманипулирования образцами и регулируемого режима работы при формировании изображения с использованием простого ПИД-контроллера.

Lee E. An integrated system of microcantilever arrays with carbon nanotube tips for imaging, sensing, and 3D nanomanipulation: design and control // Sensor and Actuators A: Physical. 28 February 2007. Vol. 134. Issue 1. P. 286—295.

Расширение областей применения MEMS-акселерометров

Фирма *Kionix, Inc.* приступила к поставкам широкого ассортимента микромеханических кремниевых акселерометров для использования как в бытовой, так и автомобильной электронике. Последняя версия прибора KXR94 — универсального применения. Этот трехосевой акселерометр с размерами $5 \times 5 \times 1,2$ мм имеет хорошие характеристики (малые шумы, высокая стабильность смещения в диапазоне температур), отвечает большинству требований для использования в бытовой электронике, промышленном оборудовании, автомобилях. В настоящее время поставляются образцы акселерометра KSA00 с микропроцессором 8051 в одном корпусе.

Galvin G. J. Accelerometer applications converge. www.industrial-embedded.com/articles/galvin/

Использование микромеханических схем во входных ВЧ устройствах

Достигнув достаточного уровня Q , тепловой стабильности, устойчивости против старения, технологичности, ВЧ MEMS начинают находить применение в следующем поколении беспроводных устройств и устройств синхронизации. Схемы ВЧ MEMS по мере увеличения сложности становятся схемными базовыми блоками. Коротко рассматривается современное состояние технологии создания колебательных устройств ВЧ MEMS, описываются особенности механических схемных элементов, позволяющие расширить функциональные возможности будущих интегральных микромеханических схем.

Nguyen C. T.-C. Integrated micromechanical circuits for RF front ends // Proc. of the 32nd European Solid-State Circuit Conference. ESSCIRC 2006. Sept. 2006. P. 7—16.

Практическое применение MEMS с учетом корпусирования

Выполнено исследование применений различных MEMS с учетом корпусирования. Были разработаны интегрированный емкостной датчик давления, реле, гироскоп, многозондовое устройство хранения данных, многоколончатая система для электронно-лучевой литографии с размещением в корпусе по уровню пластины. В этих корпусах важную роль играет выполнение электрических вводов в стекло. Для реализации записывающих зондов был использован алмаз, для выполнения функций электронного полевого эмиттера MEMS были применены углеродные нанотрубки.

Esashi M. MEMS for practical application with attention to packaging. International Conference on Microsystems, Packaging, Assembly. Oct. 2006. P. 1—4.

Измерение энергии ведущих спортсменов с использованием трехосевых MEMS-акселерометров

Совершенствование физической подготовки и оценка затрачиваемых усилий ведущими спортсменами требует понимания многих физиологических факторов, некоторые из которых могут прямо или косвенно быть мерой затрат энергии спортсменом. Многие методики связаны с оценкой физиологических факторов и вынуждают спортсменов проходить обследование на лабораторном оборудовании или прерывать занятия для выполнения измерений, например, связанных с взятием проб крови. В статье представлен метод, который является полностью амбулаторным и неинвазивным с использованием MEMS-акселерометров. Известные промышленные акселерометры не позволяют выделить интересующую область деятельности из деятельности общего характера. Это в сочетании с разнообразием выходов различных систем и отсутствием унифицированности подхода разных изготовителей ограничивает полезность промышленных приборов. В этой статье идентифицированы антропометрические и кинематические источники разнообразия данных спортсменов на выходе акселерометра, откуда данные поступают к устройству оценки затрат энергии на основе частоты шага, модифицированной антропометрическими измерениями. Данное устройство оценки затрат энергии является более надежным и не подвержено воздействию многих факторов, которым подвержены существующие устройства оценки. В данной системе используется маломощная обработка сигнала для выделения как информации для устройства оценки энергии, так и другой информации физиологического и статистического характера.

Wixted A. J. et al. Measurement of energy expenditure in elite athletes using MEMS-based triaxial accelerometers // IEEE Sensors Journal. April 2007. Vol. 7. Issue 4. P. 481—488.

Конструкция высокочувствительного кантилевера и его монолитная интеграция с КМОП-схемами

Были сконструированы и изготовлены прямоугольные пьезорезистивные кантилеверы с открытыми отверстиями для концентрации напряжений в целях усиления сигналов отклика кантилевера. Результаты имитационного моделирования и измерения чувствительности кантилевера показали, что данная конструкция может вызывать повышение чувствительности к перемещениям кантилевера. После снятия характеристик кантилевера была совершена монолитная интеграция микрокантилеверной матрицы с КМОП-схемой считывания с использованием КМОП-КНИ и КНИ-микромеханической технологии. Интегрированную систему составили кантилеверная матрица, мультиплексор с цифровым контролем и измерительный усилитель. Результаты измерений подтвердили возможность реализации интегральной конструкции.

Xiaomei Yu. et al. Design of high-sensitivity cantilever and its monolithic integration with CMOS circuits // IEEE Sensors Journal. April 2007. Vol. 7. Issue 4. P. 489—495.

Развитие датчиков на основе углеродных нанотрубок (обзор)

Углеродные нанотрубки (CNT) проявили себя перспективным решением в качестве считывающих элементов в наноэлектромеханических датчиках. В данном обзоре обсуждаются электрические, механические и электромеханические свойства CNT, которые используются в таких применениях. В исследовании указывается, на какие свойства нанотрубок надо обращать особое внимание при конструировании датчиков на базе нанотрубок. Приведены первоочередные технические приемы, которые должны использоваться для интеграции нанотрубок в приборы, и дано описание датчиков, в которых использованы CNT в качестве активных считывающих элементов.

Mahar B. et al. Development of carbon nanotube-based sensors — a review / IEEE Sensors Journal. Feb. 2007. Vol. 7. Issue 2. P. 266—284.

Микромеханические датчики угловой скорости для автомобилей

Микромеханические датчики угловой скорости являются ключевыми элементами в нескольких автомобильных системах, обеспечивая применения высокой сложности, такие как обнаружение опрокидывания, системы навигации, программа электронной стабилизации, системы динамического контроля. Новые автомобильные системы требуют более высокой точности, лучшего соотношения сигнал/шум, повышенной устойчивости и нечувствительности к внешним помехам, лучших системных характеристик и надежности, а также легкости использования гироскопа. Представлено

описание последней разработки микромеханического углового датчика третьего поколения на фирме *Robert Bosch GmbH*. Массовое производство было начато весной 2005 года. Эти гироскопы, изготовленные с использованием поверхностной микромеханической обработки, показали лучшие по сравнению с аналогами характеристики, в особенности в плане разрешения, шумов и нечувствительности к внешним помехам.

Neul R. et al. Micromachined angular rate sensors for automotive applications // *IEEE Sensors Journal*. Feb. 2007. Vol. 7, Issue 2. P. 302–309.

Пьезорезистивная кантилеверная балка для считывания силы в двух направлениях

Приводится описание двухмерного пьезорезистивного кантилевера для считывания силы на уровне наноньютонов. Кремниевый кантилевер изготавливается с использованием микромеханической обработки. Эта структура обнаруживает как горизонтальные, так и вертикальные прилагаемые силы посредством электронного переключения между двумя конфигурациями моста Ветстоуна. Чувствительность силы измеряется в пределах от 100 до 540 В/Н для вертикальной и горизонтальной конфигурации соответственно. Соответствующее разрешение силы оценивается в 21 и 4 нН соответственно. Такой кантилевер для считывания силы может использоваться для измерения контактной силы между манипуляторами и малыми объектами, например, при работе с живыми клетками, при хирургии с минимальным воздействием и для микросборки.

Duc T. C. et al. Piezoresistive cantilever beam for force sensing in two dimensions // *IEEE Sensors Journal*. Jan. 2007. Vol. 7, Issue 1. P. 96–104.

Нанотемпературный датчик, полученный с использованием селективного горизонтального выращивания углеродных нанотрубок между электродами

Приводится описание горизонтального выращивания углеродных нанотрубок (CNT) между двумя электродами и использования их в качестве нанотемпературного датчика. Electroды изготавливаются с использованием MEMS-технологии. CNT выращивается селективно между двумя электродами с использованием химического осаждения из паровой фазы в ВЧ плазме. После приварки проводников выращенная CNT тестируется и калибруется. Для получения высококачественного датчика на CNT варьировались условия выращивания CNT, такие как скорость потока CH_4 или газа N_2 . Сканирующий электронный микроскоп использовался для наблюдения формы и структуры CNT, в то же время Рамановский спектральный анализ использовался для определения степени графитизации или аморфной структуры в CNT. Вольтамперная характеристи-

ка CNT измерялась при различной температуре, и была установлена линейная зависимость между электрическим сопротивлением CNT и температурой. Результаты показывают, что CNT может использоваться в качестве температурного датчика.

Kuo C. Y. et al. Nano temperature sensor using selective lateral growth of carbon nanotube between electrodes // *IEEE Transactions on Nanotechnology*. Jan. 2007. Vol. 6. Issue 1. P. 63–69.

Интегральные микромеханические схемы для ВЧ входных каскадов

В настоящее время ВЧ MEMS-технология позволяет создавать схемы с достаточным уровнем Q , тепловой стабильности, долговечности и возможности производства. На очереди новые применения, касающиеся синхронизации и беспроводной техники. На этом пути нужно создать схемы большей сложности и степени интеграции. ВЧ MEMS все больше становятся базовыми блоками, а схемы обработки частоты становятся все более сложными, приводя к новому виду технологии изготовления интегральных микромеханических схем, а по уровню функциональной сложности — к конкуренции с ИС. Коротко представлен современный уровень ВЧ MEMS-приборов и характеристики новых механических схемных элементов, которые могут привести к расширению функциональных возможностей будущих интегральных микромеханических схем.

Nguyen. Integrated micromechanical circuits for RF front ends // *Proc. of the 36th European Solid-State Device Research Conference*. Sept. 2006. P. 7–16.

Выращивание горизонтально совмещенных одномерных матриц углеродных нанотрубок на кремниевой подложке

Одномерная матрица углеродных нанотрубок, горизонтально совмещенная на кремниевой подложке, была успешно выращена с использованием метода синтеза пламенем на шаблоне одномерной нанопористой матрицы из анодного оксида алюминия. Диаметр и длина нанотрубок контролируются геометрией нанопор. Такая одномерная матрица углеродных нанотрубок может иметь большие перспективы для изготовления наноэлектронных приборов и наноэлектромеханических систем (NEMS), совместимых с планарной технологией.

Hongguo Zh. et al. Growth of horizontally aligned one-dimensional carbon nanotubes array on a Si substrate // *Sixth IEEE conference on nanotechnology*. 17–20 June 2006. Vol. 1. P. 211–214.

Новая архитектура на базе CNT-NEMS-переключателей с плавающим затвором

Предлагается новая архитектура логических схем с использованием наноэлектромеханических переключателей на базе углеродных нанотрубок

(CNT-NEMS), которая имеет перспективы преодолеть ограничения обычной архитектуры на основе обычных КМОП-логических схем. Кроме того, возможна реализация чрезвычайно широкой полосы пропускания с использованием шинных 3D-структур на базе CNT-NEMS-переключателей, что позволит резко увеличить быстродействие микросистем на кристалле.

Fujita S. et al. Novel architecture based on floating gate CNT-NEMS switches and its application to 3D-on-chip bus beyond CMOS architecture // Sixth IEEE conference on nanotechnology. 17–20 June 2006. Vol. 1. P. 314–317.

Новый SV-GMR-датчик игольчатого типа для биомедицинских применений

В современной действительности рак является наиболее смертным заболеванием. Существуют различные способы лечения рака, включая радиотерапию, химиотерапию с антираковыми лекарствами, которые используются в течение длительного периода времени. Гипертермия является одним из методов лечения рака, в котором используются свойства раковых клеток, заключающиеся в том, что эти клетки более чувствительны к температуре, чем обычные клетки. Контроль температуры является важной задачей для успешного использования этого метода лечения. В статье сообщается о разработке нового нанодатчика игольчатого типа на основе техники *spin-valve* гигантского магниторезистивного эффекта (*spin-valve GMR*) для измерения плотности магнитного потока внутри тела посредством прокалывания иглой. Был изготовлен датчик. Сообщаются результаты моделирования и экспериментальные результаты измерений плотности потока. По данным плотности потока может быть выполнена оценка возрастания температуры для обеспечения контролируемого нагрева в точно определенных местах в процессе контролируемого гипертермического лечения рака. Находится в стадии исследования вопрос проведения эксперимента на человеке.

Mikhopadhyay S. C. et al. A Novel Needle-Type SV-GMR Sensor for biomedical applications // IEEE Sensors Journal. March 2007. Vol. 7. Issue 3. P. 401–408.

Высокопроизводительная система считывания напряжения на базе MEMS

Описывается конструкция функционального модуля считывания напряжения в большом динамическом диапазоне (80 дБ), с частотным диапазоном от DC до 10 кГц, с высоким разрешением и минимальными размерами для промышленных применений, например, при исследовании элементов качения подшипников. В конструкции MEMS емкостного датчика напряжения используются данные механических усиления конструкции корпуса и балок, а также линейного дифференци-

ального гребенчатого конденсатора. Датчик имеет интерфейс с малошумящим усилителем заряда, смесителем и фильтрующими схемами для обеспечения аналогового выхода. Датчик и электронные схемы, включая датчик температуры, могут быть интегрированы на кристалле и смонтированы, как небольшой функциональный прибор. Дополнительные электронные схемы были интегрированы с интерфейсной схемой на кристалле, чтобы обеспечить АЦ преобразование, источник ВЧ питания и телеметрическое устройство цифрового сигнала для расположенного вблизи контрольного устройства. Предварительные результаты тестирования были сравнены с данными имитационного моделирования конструкции.

Ko W. H. et al. A high-performance MEMS capacitive strain sensing system // Sensors and Actuators A: Physical. 12 February 2007. Vol. 133. Issue 2. P. 272–277.

Считывающие электронные устройства, встроенные в механические структуры

Обсуждаются особенности КМОП-MEMS-устройства, изготовленного с использованием 3D-КНИ-КМОП-технологии. Представлены архитектура топологии, моделирование механики с использованием анализа конечного элемента и описан технологический процесс. В качестве модели системы используется структура акселерометра с электроникой, встроенной в подвешенную расчетную массу. Образец был изготовлен в MIT Lincoln Laboratories и включает тестовые структуры и системы как для емкостных, так и для интерферометрических акселерометров.

Tejada F. et al. Microelectromechanical systems in 3D SOI-CMOS: sensing electronics embedded in mechanical structures // Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 21–24 May. 2006. P. 4.

MEMS-резонатор, интегрированный с КМОП-схемой для ВЧ-применений

Представлено описание новой полностью интегрированной микроэлектромеханической системы (MEMS) для ВЧ-целей. Она состоит из электростатически возбуждаемого резонатора и трансимпедансного считывающего КМОП-усилителя. Микрорезонатор изготавливают с использованием промышленной КМОП-технологии, требуются лишь операции мокрого травления для формирования резонансной структуры после полной КМОП-интеграции. Электрические характеристики резонансного прибора на кристалле снимали с использованием считывающего усилителя, получили резонансную частоту около 100 МГц с напряжением смещения поляризации менее чем 3В.

Uranga et al. CMOS integrated MEMS resonator for RF application // Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 21–24 May. 2006. P. 4.

Корпусирование MEMS

В последние 10 лет для MEMS в значительной мере осваивалась техника корпусирования, исходно разработанная для военных высоконадежных применений. В то время как эта техника хорошо себя зарекомендовала для MEMS, стоимость этой операции, составляющая 70 % стоимости прибора, не может устраивать.

Рынок корпусирования MEMS в высшей степени фрагментирован, поскольку включает такие приборы, как акселерометры, системы автомобильных воздушных мешков, гироскопы, струйные картриджи, схемы на кристалле цифровых проекторов, микрозеркала и различные датчики. По мнению фирмы *Gartner Dataquest*, мировой рынок корпусирования MEMS в 2006 году превысил 2 млрд долл. В настоящее время решение задачи связывается с достижениями в области корпусирования на уровне пластины (*wafer-level packaging* (WLP)). Как полагают, это должно привести к значительному уменьшению общей стоимости MEMS-приборов. WLP обеспечивает создание корпуса при сохранении MEMS-приборов на пластине, а также нанесение защитного покрытия (*capping*) и герметизацию MEMS-приборов в сверхчистой заводской среде. Данную технологию осваивают фирмы *Analog Devices*, *Motorola*, *Texas Instruments*, *STMicroelectronics* для инерционных датчиков. Корпус в конечном итоге представляет собой квадратный QFN, полимерную версию старого керамического безвыводного кристаллоносителя. Такой корпус может стоить 5 или 7 центов.

Johnson S. C. MEMS: Beyond 'Borrowed' Packaging. // *Semiconductor International*. 2007. N 1.

Возможности использования нанотрубок для реализации приборов и межсоединений

Дальнейшее масштабирование кремниевых приборов столкнется в будущем с рядом препятствий, которые не могут быть преодолены средствами стандартной технологии. Помочь в этом может внедрение новых материалов, но проблемы интеграции должны быть решены заблаговременно. Усовершенствования могут быть достигнуты посредством использования конфигурации из новых материалов, таких как нанокристаллы, сформированных не методом субтрактивного формирования рисунка, а методом самоорганизации по принципу "снизу-вверх". В данной статье рассматриваются возможности использования для этой цели кремниевых нанотрубок (CNT). Приведено краткое описание CNT и методов их выращивания. Дана оценка использования CNT в качестве межсоединений. Выполнено сравнение современных кремниевых MOSFETs с CNT-FETs, которое выявило значительно лучшие характеристики CNT-приборов. Однако формирование рисунка CNT-прибо-

ров все еще остается нерешенной проблемой. Дана оценка некоторых наиболее перспективных технологий в плане интеграции их в кремниевую технологию. Наконец, представлен новый прибор, в котором решены проблемы создания одиночных транзисторов на базе CNT.

Hoenlem W. Carbon nanotubes for potential device and interconnect applications // *Proc. IEEE International Conference on Integrated Circuits Design and Technology. ICICDT'06*. 24–26 May 2006. P. 1–6.

Роль нанотехнологии в зарождающейся наноэлектронике

Будущие миниатюрные приборы, уже следующие после кремниевой эры, подчиненной закону Мура, как ожидается, будут реализованы с помощью новых, оригинальных методов для реализации пространственно контролируемых, наноразмерных компонентов с высокими функциональными возможностями, синтезируемых недорогими средствами химии. Технология создания схемы на кристалле на основе самосборки позволит увеличить быстродействие и плотность упаковки на порядки величины, обеспечит высокий уровень функциональных возможностей и работу на молекулярном уровне. Малоразмерные полупроводниковые наноструктуры и органические молекулы, которые открывают уникальные возможности, заключающиеся в чрезвычайно малой рассеиваемой мощности, квантовых эффектах, поверхностной чувствительности и невысокой стоимости синтеза, могут стать базовыми блоками для следующего поколения электроники. В статье обсуждаются потенциальные преемники кремниевой КМОП-технологии в конце срока известной маршрутной карты ITRS (примерно через 15 лет). Технологии, своими корнями исходящие из наноразмерной науки, могли бы помочь в дальнейшем совершенствовании технологии ИС (но не посредством прямого масштабирования геометрии транзистора) для основополагающих применений, таких как вычисления и хранение данных.

Yu B., Meryappan M. Nanotechnology: Role in emerging nanoelectronics // *Solid-State Electronics*. 2006. 50. P. 536–544.

Возможный новый прорыв в технологии

Исследователи фирмы *Hewlett Packard* объявили о прорыве, который может привести к созданию вентиляемых матриц, программируемых пользователем (ВМПП), с плотностью, в 8 раз превышающей существующую, при меньшей потребляемой мощности. При этом в конструкции были использованы транзисторы тех же размеров, что и в современных конструкциях при незначительной модификации. Новая конструкция получила название "*field programmable nanowire interconnect*" (FPNI) — нано-

проволочные межсоединения, программируемые пользователем. В данном случае все логические операции выполняются КМОП-схемой, основная маршрутизация сигнала выполняется нанопроволочным координатным переключателем, который располагается над транзисторным слоем. Была выполнена презентация "консервативной" модели схемы на кристалле с шириной проволоки 15 нм и полушагом КМОП-схемы, равным 45 нм. Полагают, что данная конструкция технологически будет возможна в 2010 г. Также была использована модель с шириной проволоки 4,5 нм. Архитектура с координатными соединителями шириной 4,5 нм, совмещенная с 45 нм КМОП-схемой, может привести к созданию гибридной ВМПП с размерами, составляющими 4 % от ВМПП, изготовленной только на 45 нм КМОП-схеме. Такая конструкция может быть подготовлена к 2020 г.

Taylor C. HP touts FPGA technology breakthrough // Electronic News. 1/16/2007. Kanellos M. Can HP fool Moore's Law? http://news.com.com/2102-1008_3-6150057.html?tag=st.util.print

Первое использование MEMS-гироскопа в космической системе

Draper Laboratory объявила, что в ее астроинерциальном компасе (*Inertial Stellar Compass (ISC)*), работающем на борту космического объекта Tascat-2, впервые использован MEMS-гироскоп в системе определения пространственного положения. ISC включает звездную камеру и MEMS-гироскоп с микропроцессором для определения позиции по трем осям и имеет потребляемую мощность 3,6 Вт.

MEMS in space: Draper inertial stellar compass fully operational.

www.smalltimes.com/articles/article_display.cfm?ARTICLE_ID=281488&p=109

Разработка MEMS-RFID-схемы на кристалле

Австралийская фирма *MEMS-ID Pty Ltd*, основанная в 2003 г., осуществляет разработку MEMS-RFID-технологии, основными особенностями которой являются:

- интеграция функций идентификации, памяти, датчика и обеспечения безопасности на одном кристалле;
- способность противостоять высоким температурам и излучениям;
- способность работать при низких температурах;
- малые габаритные размеры;
- наиболее благоприятное соотношение диапазона считывания и размера тега;
- способность работать в непосредственной близости к металлам и жидкостям;
- память с перезаписываемыми, но не стираемыми данными;

- сравнительно недорогие теги.

Основными элементами системы являются: пассивный MEMS-ID-тег, антенная система, ЗУ, температурный датчик, интерфейсная система для связи с внешними информационными системами. Предполагаемым первым применением являются медицинские приборы.

A mechanical RFID chip is born? www.usingrfid.com/news/read.asp?lc=c62017bx953zi&version=printable

The Mems-ID System. www.mems-id.com/products.htm

Перспективы использования MEMS в бытовой электронике

Согласно данным торговой Ассоциации MEMS Industry Group (MIG) 2006 год был годом, в котором MEMS сделали значительное вторжение на рынок бытовой электроники. В частности, MEMS были использованы: для считывания перемещения на базе акселерометра в дистанционных игровых консолях; в интегрированных двухосевых гироскопах для стабилизации изображения в мобильных телефонах и цифровых камерах; в кремниевых микрофонах акустических модулей; в кремниевых резонаторах для многочисленных применений, например для замены кварца в часах. Исследовательская фирма *Yole Developpement* ожидает, что рынок MEMS в последующие 6 лет удвоится с 5 до 10 млрд долларов. Этому способствуют улучшенные производственные возможности, технологические достижения, обеспечивающие большие функциональные возможности схемы на кристалле, преобладание производственных линий для обработки пластин диаметром 150 мм, новые технологии вакуумной сварки и геттерирования, достижения в области корпусирования.

Steffora A. S. MEMS prolific in consumer electronics // Electronic News. 1/24/2007.

Одностенные углеродные нанотрубки для реализации магнетометра на базе напряжения

В принципе работы магнетометра используется чувствительность электронных свойств одностенных углеродных нанотрубок (SWCNT) к напряжению. Конструкция датчика состоит из матрицы свободно висящих SWCNT, которые механически связаны с магниточувствительным Fe-элементом с высоким аспектным отношением. Во время работы вращающий момент на Fe-игле преобразует магнитное поле в электрический сигнал. Представлены предварительные результаты использования SWCNT материала, включая измерения зависимости магнитного поля и температуры от транспорта электронов, и обсуждаются результаты работы магнетометра.

Getty S. A., Kletetschka G. Single-walled carbon nanotubes for a strain-based magnetometer // Proc. of Sixth IEEE Conference on Nanotechnology. 17–20 June 2006. Vol. 2. P. 465–468.

Конструирование и тестирование беспроводных портативных химических сенсорных систем на углеродных нанотрубках

Полная сенсорная система состоит из химического сенсорного модуля, модуля сбора данных на базе микроконтроллера, мультиплексора, модуля источника постоянного тока и модуля беспроводной связи. Химический сенсорный модуль базируется на использовании встречно-штыревой электродной (IDE) конфигурации. Слой одностенных углеродных нанотрубок (SWNT) прилагается к IDE электродам. Химическое считывание основано на обнаружении изменений проводимости в SWNT. Система имеет 32 канала химических считывающих элементов. Система является автономной и портативной и осуществляет беспроводную передачу измерительных данных на ПК через беспроводную локальную сеть 802.11b. Приведено описание предварительных результатов обнаружения и избирательности химических элементов.

Calusdian J. et al. Design and testing of a wireless portable carbon nanotube-based chemical sensor system // Proc. of Sixth IEEE Conference on Nanotechnology. 17–20 June 2006. Vol. 2. P. 794–797.

Топливные элементы, интегрированные на кристалле

В автономных микросистемах, используемых для мониторинга параметров окружающей среды и помещений, помимо датчика и передающего устройства требуется источник энергии для обеспечения функционирования датчика и для передачи собранных данных приемнику. Источник энергии, интегрированный на кристалле, должен отвечать различным требованиям конструкции. Ввиду очень ограниченного пространства в миниатюрной системе на кремниевом кристалле интегрированный источник энергии должен иметь большую объемную плотность энергии. Поскольку речь идет о монолитной интеграции, должна быть возможность изготавливать источник энергии с использованием КМОП-технологии. Кроме того, источник энергии должен быть экологически чистым, т. е. должен изготавливаться только из нетоксичных материалов. В статье представлено описание реализации интегрированного топливного элемента, отвечающего указанным требованиям. Изготовлен первый образец и проверена его работа. Образец работал в течение 170 ч., среднее напряжение без нагрузки составило 0,531 В.

Erdler G. et al. Chip integrated fuel cell // Sensors and Actuators A: Physical. 8 November 2006. Vol. 132. Issue 1. P. 331–336.

Тонкопленочные акустические актуаторы и датчики на базе углеродных нанотрубок

Разработанный преобразователь состоит из пьезоэлектрической PVDF пленки, покрытой прозрачными проводниками на базе углеродных нанотрубок (CNT). Прибор изготавливается посредством кислотной обработки CNT и модификации поверхности PVDF подложек посредством послойной наносборки. Разработанные тонкопленочные преобразователи обладают превосходными акустическими характеристиками в широком частотном диапазоне и имеют преимущества в прозрачности, гибкости, толщине и массе. Разработанные преобразователи могут быть использованы в комнатной акустике в качестве невидимых громкоговорителей и микрофонов в окнах, компьютерных экранах, сенсорных панелях.

Rajamani X. Yu. et al. Carbon nanotube-based transparent thin film acoustic actuators and sensors // Sensors and Actuators A: Physical. 20 November 2006. Vol. 132. Issue 2. P. 626–631.

Усовершенствование высокочастотного MEMS-переключателя

Была усовершенствована система восстановления высокочастотного MEMS-переключателя, с которой обычно связаны проблемы при практическом применении, посредством использования нелинейной пружинной системы в качестве электростатического исполнительного устройства. Когда электростатический актуатор с перемещаемой площадью электрода $1,4 \text{ мм}^2$ возбуждается напряжением в 24 В, анализ показал силу восстановления в три раза большую, чем в случае обычной линейной пружинной системы, и устойчивое действие контрольного сигнала включения-выключения. Было также установлено по результатам имитационного моделирования и наблюдения ВЧ характеристик прибора в пластмассовом корпусе, что актуатор имеет сравнимые характеристики или превышающие по сравнению с PIN диодами или полевыми GaAs транзисторами.

Seki T. et al. Development of a large-force low-loss metal-contact RF MEMS Switch // Sensors and Actuators A: Physical. 20 November 2006. Vol. 132. Issue 2. P. 683–688.

Исследование возможности создания MEMS-переключателей с двумя устойчивыми состояниями на основе пространственного заряда

Выполнено теоретическое исследование нового принципа создания MEMS с двумя устойчивыми состояниями на базе остаточной электростатической силы, генерируемой плотностью пространственного заряда, который формируется, если два полупроводника, имеющие различные плотности примеси, входят в контакт. Приведены описание прибора, полная аналитическая формулировка не-

которых основных параметров, которые могут быть получены, например напряжение срабатывания и напряжение выхода из режима. Модель позволила установить, что как открытая, так и закрытая конфигурации MEMS-переключателя могут иметь устойчивые состояния при нулевом приложенном напряжении. Также подробно обсуждаются различные технологические параметры, подтверждая версию, что MEMS с переходом могут быть интересной альтернативой создания двух состояний в MEMS при сохранении полной совместимости со стандартной технологией микроэлектроники.

Sallese J. M., Bouvet D. Principle of space-charge based bi-stable MEMS: The junction-MEMS. // *Sensors and Actuators A: Physical*. 8 January 2007. Vol. 133. Issue 1. P. 173—179.

Перспективы рынка MEMS

В последнем аналитическом материале фирмы *Yole Development* указывается, что рынок MEMS вырастет с 5,1 млрд долл. в 2005 г. до 9,7 млрд долл. в 2010 г. при среднегодовом приросте в 15 %. Ввиду сильного роста бытовых применений, особенно в промышленности мобильных телефонов, прирост в стоимостном выражении ниже, чем в предыдущие годы; однако прирост в штучном выражении гораздо выше и близок к 20 %. В настоящее время к производству и разработке конструкций с использованием MEMS приступили 50 ведущих полупроводниковых компаний. В производстве появилась новая стратегия, ориентированная на поставки модулей, а не датчиков, для того, чтобы обеспечить большую добавленную стоимость и избежать эрозии цен. Приведено описание перспективных разработок, включающих микродвигатели на кремнии для бытовых применений, системы накопления энергии с использованием MEMS в качестве базовых блоков, интегральные двухосевые гироскопы, жидкие линзы для бытовых применений, портативные проекционные модули, память на базе MEMS, микротопливные элементы, жидкостные системы, MEMS-дисплеи. Приводится детальный анализ различных компаний, вовлеченных в сферу MEMS: изготовители ИС, дизайн-центры (*fabless*), заводы (*foundries*), субпоярщики, системные компании с заводами.

Holland C. Consumer designs set to drive MEMS adoption. www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=1967000741

Заводы для производства MEMS-устройств

Согласно ревизии, выполненной *Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI)*, в Европе насчитывается 77 заводов для производства

MEMS-устройств. Это больше числа заводов для производства мощных полупроводниковых приборов (34 завода) и приборов на смешанных полупроводниковых соединениях (24 завода). Такое число заводов для производства MEMS-устройств, в частности, связано с тем, что устаревшие заводы для производства ИС не закрываются, а перепрофилируются для производства MEMS. Кроме того, безусловно, росту рынка MEMS способствует увеличивающийся спрос со стороны автомобильной промышленности и бытовой электроники. Из 77 изготовителей MEMS только два (фирмы *Bosch* и *STMicroelectronics*) входят в десятку лучших. По мнению SEMI, мировой рынок систем с использованием MEMS возрастет с 48 млрд долл. в 2005 г. до 72 млрд долл. в 2008 г. и до 95 млрд долл. в 2010 г. Рынок MEMS-приборов возрастет с 3,8 млрд долл. в 2005 г. до 7,8 млрд долл. в 2008 г. и до 9,9 млрд долл. в 2010 году. Продукция Европейских MEMS-фирм в 2006 г. составила 16 % от 16 млрд мирового рынка. В целом ревизия выявила в Европе 285 полупроводниковых заводов, чистые помещения площадью 2,5 млн м², 30 000 работников. Исследовательские институты мирового уровня располагают чистыми помещениями площадью 30 000 м². 102 завода выпускают обычные аналоговые и цифровые ИС. На пяти заводах осуществляется обработка пластин диаметром 300 мм. 48 заводов заняты корпусированием.

Clarke P. SEMI audit reveals 77 MEMS fabs in Europe. www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=1967000042

Платформа для монолитной интеграции КМОП — MEMS-устройств на КНИ-пластинах

Представлена новая платформа для реализации микро- и нанoeлектромеханических систем на базе кристаллического кремния, как структурного слоя на КМОП-подложке. Эта платформа изготавливается с использованием подложек со структурой кремний на изоляторе (КНИ), которая позволяет монолитную интеграцию механического преобразователя на кристаллическом кремнии, при этом характеристики структурного слоя остаются независимыми от КМОП-технологии. Приведены характеристики конструкции, технологического процесса и пример применения платформы КМОП КНИ-MEMS для получения датчика массы на базе использования резонирующего кантилевера из кристаллического кремния.

Villarroya M. et al. A platform for monolithic CMOS-MEMS integration on SOI wafers // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2006. 16. P. 2203—2210.

Составил В. А. Юдинцев

Нанотехнологический приоритет российской науки

Л. С. Раткин, канд. техн. наук

Одним из главных событий в жизни научного сообщества РФ, отечественной электронной промышленности и российских деловых кругов, произошедших в последние месяцы, несомненно, является подписание 19 июля 2007 года Президентом Российской Федерации В. В. Путиным Федерального Закона № 139-ФЗ "О Российской корпорации нанотехнологий" (Роснанотех) [1, 2]. Этому решению предшествовал довольно долгий период поиска оптимальных путей развития наноиндустрии в РФ. Существенный вклад в становление и развитие отечественной нанопромышленности внесла Российская академия наук (РАН). Именно кропотливая непрестанная работа сотрудников РАН сложная, и поэтому со стороны не всегда понятная, позволила достичь результатов, сопоставимых, а нередко и превосходящих достижения ведущих научных школ мировых индустриальных держав.

Например, 15 мая на очередном заседании Президиума РАН, открывшемся церемонией вручения диплома иностранного члена РАН профессору Пейну Дэвиду Нилу (Великобритания), был заслушан доклад "Радиовселенная" академика Кардашева Н. С. (Астрономический центр Физического института имени П. Н. Лебедева РАН), в котором, в частности, были затронуты методы определения основных параметров модели Вселенной с помощью картографирования реликтового космологического излучения (КИ), способы обнаружения нового класса внегалактических радиоастрономических объектов, возникающих во время гамма-всплесков источников КИ, и принципы диагностики импульсов пульсаров, превышающих по потоку солнечное радиоизлучение. Среди отмеченных докладчиком перспектив исследования — создание более мощных радиотелескопов (РТ), запуск в 2008 году космической обсерватории РАДИОАСТРОН, образующей совместно с наземными РТ интерферометр с базой, много большей диаметра Земли, обеспечивая угловое разрешение (УР) в 30 раз лучше земного, с последующим повышением УР за счет миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, например, УР до 30 наносекунд дуги достижимо по проекту МИЛЛИМЕТРОН.

Научное сообщение "Нелинейные волны: некоторые биомедицинские приложения" было представлено на заседании Президиума РАН чл.-корр. РАН Руденко О. В. Физика нелинейных волн (ФНВ) имеет четко выраженные направления исследований, в том числе "силовые", связанные с иницированием различных процессов и реакций, воздействием на материалы и транспортировкой энергии высоких плотностей, и "информационные", ориентированные преимущественно на диагностику сред и использование ФНВ для передачи и обработки сигналов.

Среди сфер применения ФНВ можно выделить, в частности, астрономическую и медицинскую, как

наиболее востребованные области вследствие новых возможностей, не реализованных в большинстве производимых в настоящее время научных приборов. Универсальность медоборудования позволяет с помощью одного и того же прибора проводить диагностику и лечение травм (например, обнаружение внутреннего кровотечения с последующей локализацией сосудистых повреждений и дистанционным нагревом тканей сфокусированным мощным ультразвуком (УЗ) для заварки трещин и разрывов в стенках сосудов) и заболеваний (для иллюстрации — идентификация опухоли с дальнейшей дифференциацией, определением степени злокачественности и ультразвуковой визуализацией процесса разрушения).

Перспективными направлениями исследований, в частности, являются акустические нанотехнологии (АНТ), связанные с механизмами создания микропузырьков (МП) внутри клотов (микротромбов), опухолей и отдельных клеток. Для исследования и лечения внутреннего органа больному вводится эмульсия наночастиц, которые при облучении мощным акустическим импульсом превращаются в кавитационные МП. Другим примером АНТ является инъекция нанокapель жидкости с температурой кипения чуть ниже температуры тела, находящихся после инъектирования в организм больного в субкритическом (перегретом) состоянии, переходящем во взрывное кипение перегретой жидкости с образованием МП при воздействии УЗ. Метод инъекций жидких наночастиц и стабильных газовых пузырьков для микропорционной доставки лекарственных препаратов (ЛП) "*Target Drug Delivery*" базируется на принципе акустически визуализируемого накопления ЛП в больных органах, в том числе в быстрорастущей опухолевой ткани с пористой структурой, при этом радиационное давление УЗ или ультразвуковой "взрыв" перегретых нанокapель может значительно ускорить "точечную доставку" ЛП [3].

Также в июне—июле в РАН была проведена серия мероприятий, свидетельствующих о неуклонно возрастающем в отечественной науке нанотехнологическом приоритете. В частности, в НИИ системных исследований РАН состоялось совещание по применению в нанотехнологиях суперЭВМ терафlopного класса, в Новосибирске Институтом физики полупроводников СО РАН и Физико-техническим институтом им. А. Ф. Иоффе РАН был организован Международный симпозиум "Наноструктуры — физика и технология", в Екатеринбурге проводилась первая в российской истории Международная конференция по жидким и аморфным металлам. Поэтому создание Роснанотех — не только знак формирования в РФ высокотехнологичной промышленности, но и стимул развития инновационной экономики России на долгосрочную перспективу.

Источники

1. <http://kremlin.ru>.
2. Нормативно-правовая система "Консультант Плюс", 2007.
3. <http://www.ras.ru>.

ОТ СОВМЕСТНЫХ ПРОЕКТОВ — К СОВМЕСТНЫМ КОНКУРСАМ

Международное научно-техническое сотрудничество России является одним из важных инструментов интеграции страны в мировое научно-техническое пространство, сохранения и развития отечественной научно-технологической школы и обеспечения перехода экономики на инновационный путь развития.

Основными направлениями деятельности Роснауки в области международного сотрудничества являются, в первую очередь, представление интересов Российской Федерации в международных организациях, научных сообществах и программах (ЮНЕСКО, ЮНИДО, АТЭС, ЦЕРН, 6-я, 7-я Рамочные программы ЕС, международная программа "Эврика", проекты ИТЭР, XFEL и др.), а также выполнение обязательств России в рамках Межправительственных соглашений по линии научно-технического взаимодействия на двусторонней основе.

Россия поддерживает сейчас международное научно-техническое сотрудничество в рамках двустороннего взаимодействия с 88 странами, из которых с 50 имеются межправительственные соглашения, протоколы и меморандумы о научно-техническом сотрудничестве.

Одним из инструментов реализации двустороннего сотрудничества является ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2012 гг.". Только в рамках блока "Генерация знаний" Программы по пяти приоритетным направлениям (живые системы; индустрия наносистем и материалов; информационно-коммуникационные системы; рациональное природопользование; энергетика и энергосбережение) реализуется более 130 проектов с 40 ведущими странами Европы, Азии и Америки.

Наиболее активное сотрудничество ведется с Германией (в рамках Программы реализуется 28 совместных проектов, на которые Российской стороной выделено 257 млн руб. бюджетного финансирования на 2007—2008 гг. для российских участников проектов) и Китаем (16 проектов и более 118 млн руб. бюджетного финансирования на 2007—2008 гг. для российских участников). Финансирование этих проектов ведется на паритетной основе каждой из сторон.

В интересах формирования национальной инновационной системы с привлечением междуна-

родного опыта Роснаукой в рамках ФЦНТП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники" на 2002—2006 гг. создано 16 международных научно-технических центров и лабораторий с ЕС, СНГ, АТЭС, Китаем, США, Германией, Финляндией, Голландией, Францией, Израилем и странами Латинской Америки.

В 2006 г. проводился Год России в Китае, а в 2007 г. — Год Китая в России. В ходе его проведения в России Роснаука отвечала и организовывала комплекс научно-технических мероприятий (всего 29), для выполнения которых было привлечено более 1 тыс. российских и более 300 китайских представителей научных и деловых кругов. Проведены впервые также конкурсы совместных научно-технических проектов с Миннауки Китая. Результаты нашего сотрудничества были представлены на выставках научно-технических достижений.

Кроме того, Роснаука в 2007 г. участвовала в проведении 16 межправительственных комиссий (Китай, Индия, Украина, ЮАР, Венесуэла, Венгрия, Киргизия, Иран и ряд других) в качестве руководителей комитетов, подкомиссий и рабочих групп по научно-техническому сотрудничеству.

Впервые Агентством подготовлены и организованы совместно с тремя специализированными директораторами Генерального директората по исследованиям Европейской Комиссии скоординированные конкурсы. Роснаука взаимодействует с Европейской Комиссией по направлениям исследований, представляющим взаимный интерес. В этих целях были выбраны такие приоритеты, как живые системы и энергетика. Их финансирование осуществляется через федеральную целевую программу "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2012 гг." и 7-ю Рамочную программу ЕС на паритетной основе. Российская сторона окажет финансовую поддержку российским победителям в размере 2 млн евро на каждый проект.

Россия выступает за объединение усилий всего международного сообщества для солидарного научно-технологического решения глобальных экологических, энергетических, инфокоммуникационных проблем и задач.

*Сергей МАЗУРЕНКО,
руководитель Федерального агентства по науке
и инновациям (Роснаука) // Советник Президента.
Информационно-аналитическое издание.*

Декабрь 2007. № 52.

<http://www.fasi.gov.ru/news/press/1205/>

CONTENTS

Goltsova M. M., Yuditsey V. A. <i>MEMS: The Big Markets of Small Facilities</i>	9
Kovalevsky A. A., Labunov V. A., Strogova A. C., Shevchenok A. A. <i>Research of Conformities to the Law of Transport of Hydrogen in Powder Silicon</i>	13
Mustafaev A. G., Mustafaev A. G. <i>Problems of Gate Dielectric Scaling for MOS-Technology</i>	17
Myasnikova T. P., Gershanov V. Yu., Zakharchenko I. N., Garmashov S. I. <i>Optical Spectra of BiPS₄ Thin Films on Glass and Si at Phase transitions</i>	22
Nepochatenko V. A. <i>Operation Matching at a Thin Interface Between two Phases in Improper Ferroelastic</i>	24
Astahov M. V., Dutov I. V., Rodin A. O. <i>Electromagnetic Radiation Effect on Amorphous Ferromagnetic Microwire</i>	28
Lihosherst V. V., Raspopov V. Ya. <i>Contour of a Rigid Feedback in Micromechanical Devices and Calculation of its Parametres</i>	30
Nikulin A. V. <i>Influence Analysis of Elastic Elements Geometrical Sizes on Own Parameters of LL-Type Micromechanical Gyroscopes</i>	34
Kartashev V. A., Kartashev V. V. <i>Investigation of STM Tip Grinding in Electrochemical Process</i>	40
Pronin V. P., Ponomarev A. N., Khinich I. I., Chistotin I. A. <i>Elastic Peak Electron Spectroscopy — Analysis Method of Elemental Composition of Nanodimensional Systems</i>	45

For foreign subscribers:

Journal of "NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE" (Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, ISSN 1813-8586)

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: it@novtex.ru; http://www.microsystems.ru

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4/1. Телефон редакции журнала **(495) 269-5510**. E-mail: **it@novtex.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 *Е. М. Патрушева*. Корректор *З. В. Наумова*

Сдано в набор 18.02.2008. Подписано в печать 21.03.2008. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 11,65. Заказ 304. Цена договорная

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15