TATO- & MIKPOCICIEMEAC TEXTIO Nº 4 (105) <> 2009

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

и в Российский индекс научного цитирования

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. Квардаков В. В. Климов Д. М. Ковальчук М. В. Нарайкин О. С. Никитов С. А. Сауров А. Н. Сигов А. С. Чаплыгин Ю. А. Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И. Андриевский 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. Захаревич В. Г. Кальнов В. А. Карякин А. А Колобов Ю. Р. Кузин А. Ю. Мокров Е. А Норенков И. П. Панич А. Е. Панфилов Ю. В. Петросянц К. О. Петрунин В. Ф. Путилов А. В. Пятышев Е. Н. 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

Раткин Л. С. Российский нанокомплекс как самодостаточная воспроизводящая система взаимоувязанных технологий	2
КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ	
Тарнавский Г. А., Анищик В. С. Решатели процессорной системы программного комплекса NanoMod	6
МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ	
Ковалевский А. А., Строгова А. С., Плякин Д. В., Борисевич В. М. Исследование самоорганизации высокоупорядоченных нанокластеров германия при осаждении пленок поликристаллического кремния, легированного германием	14
Рехвиашвили С. Ш., Шомахов З. В., Кармоков А. М. Акустическая эмиссия при взаимодействии зонда с поверхностью металлов	19
частотные характеристики магнитоэлектрического напряжения в многослойной пленочной структуре феррит—пьезоэлектрик	23
ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ	
Егоров В. В. Влияние микронеровностей поверхности на характеристики изо- бражений в оптических прецизионных измерителях. Скалярное приближение.	26
Часть П	26
подобия	32
преобразования	35
ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ	
Яшин К. Д., Осипович В. С., Меденко П. В., Логин В. М. Микросистемная техника для космических аппаратов	38
НОВОСТИ НАНО- И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ	43
Contents	55

Информация о журнале доступна на сайте журнала: http://www.microsystems.ru. http://eLIBRARY.ru

ПОДПИСКА:

по каталогу Роспечати (индекс 79493);
по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)
в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10)

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2009.

Общие вопросы

Л. С. Раткин, канд. техн. наук,

РОССИЙСКИЙ НАНОКОМПЛЕКС КАК САМОДОСТАТОЧНАЯ ВОСПРОИЗВОДЯШАЯ СИСТЕМА ВЗАИМОУВЯЗАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В конце апреля 2008 года в российской столице состоялся IX международный форум "Высокие технологии XXI века". Одним из важнейших мероприятий форума явилось секционное заседание "Нанотехнологии и новые материалы", на котором рассматривались инновации российской наноиндустрии и перспективы развития наноотрасли.

Во вступительном слове Председатель секции, генеральный директор НИИИН МНПО "Спектр" академик РАН В. Клюев кратко охарактеризовал основные направления развития российской нанотехнологической промышленности.

О применении нанотехнологии при создании перспективных материалов для ракетно-космической и авиационной техники повествовалось в докладе генерального директора ФГУП "ОНПП "Технология" В. Викулина. Разработчики углепластиковых панелей адаптивного крыла истребителя СУ-47 "Беркут" и композиционных конструкций с керамической теплозащитой и остеклением ВКС "Буран", радиопрозрачных керамических обтекателей ЗРК С-300 и керамических деталей газотурбинных двигателей, коллектив ФГУП работает по тематике производства трехслойных панелей и сотовых заполнителей для интерьерных и силовых конструкций, высоконагруженных агрегатов И компонентов для авиатехники Ил-114, Су-29, Су-31, Су-47, Ту-204 и Ту-334 и оболочек головных обтекателей ракет-носителей "Ангара", "Протон" и "Рокот". В портфеле заказов предприятия — прецизионные элементы Европейского ускорителя ядерных частиц (CERN) и терморазмеростабильные конструкции для космических аппаратов "Кондор", "Кулон", "Спектр" и "RAMOS". Помимо антенных обтекателей ракетной и авиационно-космической техники, в том числе для ЗРК С-300, "Уран" и "Бук", наноразмерных многофункциональных покрытий фонарей кабин пилотов военной и гражданской авиатехники, термостойких высокопрочных стекол и ситаллов, предприятием

разрабатываются методы модифицирования эпоксидной матрицы наночастицами и углеродными нанотрубками, обеспечивающими увеличение температуры стеклования на 20 %, и повышение прочности и модуля упругости углепластика вдоль волокон на 25...40 %. С использованием магнетронного метода создаются защищенные от ЭМИ антибликовые наноразмерные покрытия на изделия из оргстекла, снижающие тепловую составляющую солнечной радиации в 3-5 раз. Нанотехнология керамики на основе частично-стабилизированного диоксида циркония позволяет синтезировать наноразмерные частицы химическим зольгель методом. Использование золь-гель метода позволяет синтезировать керамику на основе частично-стабилизированных наноразмерных частиц диоксида циркония. Развитие концепции влияния наноразмера кристаллических частиц на протекание физико-химических процессов дало возможность идентифицировать механизм получения наночастиц посредством полиморфных обратных превращений с изменением объема, сочетаемых с механохимической активацией. Разрабатываемые ФГУП на основе такого материала твердые электролиты из диоксида циркония для электрохимических устройств применимы в датчиках для измерения концентрации кислорода систем управления подачей топлива в автотранспорте, термодинамической активности для атомной промышленности и контроля раскисленности жидкой стали в металлургии.

Выступление начальника ФГУ "61 Научно-исследовательский испытательный институт (Железнодорожных войск)" МО РФ генерал-майора В. Поплавского затрагивало проблему создания нового поколения нанодисперсных порошков и их многокомпонентных смесей, влияющих на структуру жидких углеводородов при переменных внешних воздействиях, со значительным сокращением вредного влияния на экологию. На фоне насыщения высокотехнологичного рынка присадками и добавками в масла, ремитализантами и кондиционерами металлов отмечено, в частности, что отечественная разработка "Эконовит" при концентрации 0,001...0,002 % выгодно отличается от аналогов, увеличивает срок службы масел до 5 раз, обеспечивая пробег на расстояниях до 150 тыс. км. Достигаемый эффект объясняется тем, что многослойное антифрикционное покрытие формируется посредством объединения молекул масла в нанокомплексы, повышая тем самым защиту от износа рабочих поверхностей двигателя и снижая расход топлива и токсичность выхлопных газов. При стоимости бензина в 240 тыс. руб. для пробега 100 тыс. км на автомобиле ГАЗ 3110 расчетная экономия от применения "Эконовита" составит порядка 49 тыс. руб. Наряду со снижением механических потерь также повышается прочность металлических поверхностей, что подтвердили проведенные в 2008 году испытания в Санкт-Петербургском политехническом университете.

Перспективам промышленного внедрения нанотехнологий посвятил свой доклад генеральный директор концерна "Наноиндустрия" М. Ананян. Новый уровень знаний о физико-химических свойствах материи способствует выработке концептуальных изменений в направлениях развития медицины, АПК, военной сферы и экологии. Для создания механизмов запуска инновационных проектов на основе внедрения нанопродукции необходимо формирование завершенных технологических циклов с анализом отраслевой проблематики и современных требований к компонентной базе и наноматериалам, а также мультиплицирование опыта работы с заказчиками на нанорынке. В частности, перспективными областями применения наночастиц Ag, Co, Cu, Fe, Pd и Zn являются биоцидные и антимикробные средства, антикоррозионные и антисептические лакокрасочные материалы, системы кондиционирования и очистки жидкостей, фильтры и наноструктурированные конструкционные сплавы и металлы, многослойные сложнолегированные покрытия, полимерные пленки и нанокомпозиты с заданными свойствами. Наночастицы серебра используются как для придания биоцидных свойств традиционным материалам, так и для изготовления бесхлорных высокоэффективных средств нового поколения для обработки мебели, текстиля, красок и лаков, полимеров и бумаги, стекла и керамики. Эффективным биоцидом на основании данных НИЦ "Икар" по методике анализа Official Chemistry Analytical Association (США) признан концентрат коллоидных растворов АgБион-2, сокращающий численность грибов в 5 раз, бактерий — в 3 раза.

Износостойкие и жаропрочные медные наногранулированные композиционные материалы перспективны для использования в токосъемных элементах, сильноточных контактах электросварочного оборудования и электродах для точечной контактной сварки. Антифрикционный противоизносный состав "Стрибойл" применяется в ЖКХ, энергетике, автотранспорте и строительстве. Нанодисперсное армирование пенобетона при массовой доле добавки от 0,001 до 0,1 % в 1,5—2 раза увеличивает трещиностойкость и прочность изделий и в 1,2 раза — теплоизоляционные свойства.

Стойкие к длительному УФ воздействию лаки и краски используют принцип поглощения фотона УФ диапазона без переизлучения кванта, реализуемый с помощью УФ протектного агента — нанокристаллического кремния. Получаемые с использованием наночастиц корунда дорожные асфальтовые покрытия эксплуатируются в 1,5-3 раза больше, а стойкие к истиранию и выгоранию от солнца полимерные составы для разметки дорог имеют рабочий ресурс, в 2 раза превышающий аналогичный показатель традиционных материалов. Наночастицы корунда также применимы для упрочнения наливных полов посредством модификации шпаклевочного материала. Модифицированная наночастицами силикатного типа эпоксиуретановая композиция при повышении адгезии к металлу с 20 до 32 МПа дает объемную усадку с 0,5 % до 0, что используется при оперативном ремонте труб в ЖКХ и ТЭК.

Предназначенный для изучения поверхностей и проведения исследований на атомно-молекулярном уровне нанотехнологический комплекс "Умка" с разрешением по осям *X*, *Y* и *Z* $0,02 \times 0,2 \times 0,01$ нм и минимальным шагом сканирования 1 Å позволяет определять характеристики электропроводности для материалов и сред, проводить экспрессанализы в медицинских лабораториях и контролировать состояние покрытий обрабатываемых деталей. Нанотехнологический контроль при анализе структур тонких поверхностных слоев и состояний поверхности, измерении диэлектрических свойств материалов и оптических спектров и толщин многослойных пленочных структур и тонких пленок достигается применением спектроэллипсометра "Эльф" с показателем преломления 0,005 и точностью не хуже 0,1 нм (для тестовой системы SiO_2/Si) и со спектральным разрешением не хуже 2 нм.

Основными задачами Национальной ассоциации наноиндустрии являются формирование единого информационного пространства в сфере нанотехнологий, построение в России цивилизованного внутреннего нанорынка, стимулирование инновационных нанопроизводств и законодательная защита не только потребителей, производителей, но и разработчиков нанотоваров и наноуслуг, а также содействие продвижению российской нанопродукции на внешний рынок.

Проблемы и перспективы развития промышленных наноэлектронных технологий были темой выступления заместителя генерального директора ОАО "НИИМЭ и Микрон" (Зеленоград) по науке главного конструктора, д-ра техн. наук Н. А. Шелепина. Проанализировав нормативно-правовую базу и организационное обеспечение наноиндустриального развития России, докладчик обратил внимание на основные компоненты законодательного регулирования развития наноэлектроники в стране. Помимо отраслевых капиталовложений посредством реализации механизмов государственно-частного партнерства и координации исследований по схеме "академические институты — вузы — НИИ", наноэлектронную отрасль в России регулируют Федеральные целевые программы (ФЦП). Детальный анализ всех действующих ФЦП свидетельствует, что управление наноэлектронной промышленностью до сих пор децентрализовано и скоординированных госпрограмм по развитию отрасли в России пока нет. Также отсутствуют НИОКР по комплексному развитию наноэлектроники — их финансирование рассеяно по направлениям производства оборудования для наноиндустрии, производству композитных наноуглеродных наноматериалов, технологий двойного назначения, для биомедицины и нанофотоники, и инфраструктура для разработки промышленной наноэлектроники находится только в начальной стадии формирования. В заключение выступления докладчик представил инвестиционный проект по созданию производства по технологии 65-45 нм на пластинах 300 мм со сметной стоимостью 58,5 млрд руб., площадью 30 тыс. кв. м и полной производственной мощностью 10 тыс. пластин/месяц.

Генеральный директор ООО "Лаборатория "Амфора" П. Осипов сообщил, что более чем за 10 лет работы на рынке фирмой развито производство изделий для лазерной модуляционной интерференционной микроскопии серии МИМ, перспективных для использования нанобиотехнологами, наноэлектронщиками и материаловедами. Микроскоп МИМ включает в себя 3D-профилометр с фазово-поляризационной модуляцией, обеспечивающей сверхвысокое пространственное разрешение с нанодинамической чувствительностью к оптоэлектронным параметрам и его физическому состоянию. Измерения МИМ базируются на когерентной оптической микроскопии дальнего поля с полным контролем поляризации, при этом оптическая информация интерпретируется с учетом всех известных поляризационных и фазовых эффектов, в том числе топологических фаз и сдвигов Френеля. В отличие от релеевского предела для амплитудных методов принцип МИМ с учетом дифракционных ограничений для фазового метода на практике обеспечивает принципиально достижимое максимальное пространственное разрешение, на основе которого в режиме реального времени "нанокино" формируется полная нанодинамическая картина с 3D-рельефом и распределением оптических материальных параметров (ОМП). Методология МИМ, основанная на учете топологических фаз, управлением и модуляцией поляризацией, фазовой модуляции, оптимальном сигналпроцессинге и оригинальном принципе обработки и выбора интерферограмм позволяет строить карты распределения ОМП и исследовать вибрации в обычной среде (без вакуума) с разрешением в плоскостях Хи Уот 100 до 15 нм в зависимости от объекта, и с разрешением 0,1 нм по вертикали. Приборам серии МИМ доступна сверхгладкая профилометрия пустот и подложек под прозрачным покрытием, исследование поляризационных пленок, наноморфологии и дихроичности, высокое разрешение поверхностного рельефа, эллипсометрических данных и изучение тончайших поверхностей живых организмов. Конструкция приборов серии МИМ позволяет определять внутреннее строение и формы вещества живых клеток, их нанодинамики и физического состояния, идентифицировать различные микрообъекты в микрокристаллических, коллоидных и многофазных нанокластерных структурах, распознавать неметаллические вставки, обнаруживать невидимые интерфейсы в композитных и керамических образцах, анализировать намагниченные образцы с металлургическим фазовым различием без декорирования.

Технологии промышленного производства наноуглеродного материала получили освещение в докладе ректора Тамбовского государственного технического университета (ТГТУ) д-ра техн. наук, профессора С. Мищенко. Докладчик отметил, что при переходе от пилотных к промышленным технологиям оптимальным является размещение нагревательных элементов внутри реактора с неподвижным слоем мелкодисперсного сыпучего катализатора и применение полунепрерывного режима работы для емкостных цилиндрических аппаратов вертикального исполнения. Исследования показали увеличение прочностных характеристик композитов на основе ЭД-20 в 1,5-2 раза при их наполнении углеродными нанотрубками, при этом предполагается обязательное предварительное активирование в смеси с органическими растворителями. Повышение объема содержания углеродных нанотрубок более 1 масс. % приводит к значительному сокращению прочности композита, а оптимальная концентрация углеродных нанотрубок в композите составляет от 0,4 до 0,8 масс. %. Созданные ТГТУ совместно с Воронежским госуниверситетом полимерные композиты на основе угленаполненного полиамида 6 (УПА 6/15), полиэтилена низкого давления и углеродного наноматериала "Таунит" в 2 раза снижают коэффициент трения, в 8 раз увеличивают допускаемую нагрузку и в 1,5 раз — удельную ударную вязкость композита. На 25...30 % возрастает теплопроводность модифицированного полимера с увеличением скорости сдвига при получении наномодифицированных композитов на основе синтетического каучука.

В ходе совместных исследований ТГТУ с ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН по поглощению СВЧ-излучения пленками углеродного наноматериала "Таунит" в полимерной матрице установлен эффект значительного ослабления СВЧ-проводимости покрытий на частотах порядка 40 ГГц, при этом коэффициент поглощения высок вследствие специфики морфологии и диэлектрической проницаемости. В сотрудничестве с Владимирским ЗАО НТУ "Владипор" проведено сравнение коэффициентов стандартных и наномодифицированных мембран и содержания примесей в пермеате, подтвердившее высокие потребительские характеристики нанопродукции. Например, благодаря высокой термостабильности углеродный наноматериал "Таунит" выгодно отличается от аналогов на российском рынке, в частности, от импортного носителя "Vulcan". Разработанные совместно с НТЦ "Конверс-Ресурс" нанодисперсные противоизносные антифрикционные ремонтно-восстановительные составы формируют в зонах контакта поверхностей пар модифицированный слой — выращенный на кристаллической решетке металла монокристалл, способствующий прочному сцеплению частиц при инициировании высокими температурами микрометаллургических процессов. Обладающие высокими абразивными свойствами составы востребованы на внутреннем рынке России, а также экспортируются в Болгарию, Италию и КНР.

Нанопреобразователи и средства нанотомографии были представлены в выступлении В. Матвеева (Ассоциация "Спектр-Групп"), нанокомпозиты на основе опаловых матриц — в докладе Е. Булыгиной (МГТУ им. Н. Э. Баумана). Методология диагностики и контроля наноматериалов и нанообъектов, основные принципы и системный подход к построению учебно-производственного центра по созданию наноматериалов и нанодиагностике микроэлектронных изделий на примере Наноцентра МИРЭА были анонсированы в докладе А. Беспалова (МИРЭА).

Разработанное автоматизированное рабочее место (АРМ) УЗ-микроскопии ориентировано на визуализацию внутренней структуры контролируемых объектов с использованием методов неразрушающего УЗ-контроля, динамического и статического контроля характеристик интегральных микросхем и их функциональных узлов с элементами микросхемной аналитики. АРМ электронномикроскопического контроля отдела нанодиагностики материалов и изделий микроэлектроники предназначен для анализа объектов с наноразмерными топологическими нормами — размер распознаваемого компонента в зоне контроля составляет 5 нм. Отказ интегральных микросхем диагностируется при различных режимах работы отдельных частей схемы на АРМ ИК-контроля. Прецизионные операции реконструкции интегральных микросхем и других сложных многослойных нано- и микрообъектов посредством сверхлокального определения элементного состава и наблюдения исследуемых образцов в рабочей камере в высокоразрешающем просвечивающем режиме выполняются в МИРЭА на АРМ наноразмерного препарирования и зондового контроля.

О разработке методов получения полимер-силикатных нанокомпозитов и исследовании их свойств в Институте нефтехимического синтеза (ИНХС) РАН им. А. В. Топчиева и ООО "НПК "СпецПолимер" сообщил В. Герасин (ИНХС). В числе областей применения Na⁺-монтмориллонита указывались полимерные наполнители, средства для седиментации пигментов в водоэмульсионных красках, чистящие сорбенты и осветлители напитков, катализаторы при крекинге нефтяных углеводородов, применяемые в буровых растворах глинистые минералы, компоненты высокотемпературных консистентных смазок и фармацевтических и косметологических изделий. В частности, посредством модификации слоистого силиката достигается высокий уровень адгезионного взаимодействия на поверхности наполнителя, соответствующий качественно новым физико-химическим свойствам материала, формирование адсорбционных слоев активных веществ требуемой полярности на поверхности силикатных пластинок. Деструкция образованной в результате слипания отдельных кристаллитов слоистого силиката иерархии обеспечивает проникновение макромолекул в пространство между силикатных пластин и увеличение расстояния между слоями в кристаллите.

Методику высокочувствительного элементного анализа поверхности с диагностикой тонкопленочных структур с помощью рентгенофлуоресцентной спектроскопии в специальных условиях озвучил В. Егоров (ИПТМ РАН, г. Черноголовка), перспективы развития наномеханики — заместитель директора ООО "Лаборатории "Амфора" К. Индукаев.

По проблемам применения и аналитических возможностей сверхвысоковакуумных сканирующих туннельных микроскопов серии GP1 в нанотехнологических исследованиях выступил К. Ельцов (ЗАО НПФ "Сигма Скан"). Также состоялся ряд других докладов, в частности, по вопросам исследования микроструктуры глубоко очищенной воды по измерениям элементов матрицы рассеяния лазерного излучения и инноваций в неорганических биотехнологиях.

Выводы

1. Получение нанопродукции для различных отраслей промышленности РФ позволяет позиционировать российский нанокомплекс как *самодостаточную воспроизводящую систему взаимоувязанных технологий*, конкурентоспособных на внешнем рынке.

2. При структурировании наноиндустриального базиса наноиндустрии, помимо формирования отраслевых кластеров и консорциумов, немаловажное внимание следует уделять развитию региональных центров наноиндустрии, способствующих интеграции специалистов и ученых и формированию благоприятных условий развития нанотехнологий в России.

3. Целесообразно внесение изменений в действующее законодательство РФ с усилением роли *рациональной промышленной политики* при внедрении нанопродукции на региональных производствах и проведении инвентаризации региональных нанотехнологических разработок и проектов с созданием единой информационной базы.

4. В сложившихся условиях настоятельно *необходимо создание в России оснащенного современным оборудованием межведомственного научного центра*, обеспечивающего координацию и консолидацию усилий и финансовое взаимодействие РАН, университетов, вузов, НИИ и промышленных предприятий, и взаимоувязывающего объем инвестиций для каждой организации с качеством разработок и уровнем технологий. Наличие такого центра позволит сконцентрировать материальные ресурсы микро- и наноэлектроники России для осуществления инновационного скачка в сфере Hi-Tech.

Конструирование и моделирование МНСТ

УДК 519.2:541.1

Г. А. Тарнавский, д-р физ.-мат. наук, e-mail:gennady.tarnavsky@gmail.com В. С. Анищик, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск

РЕШАТЕЛИ ПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА NANOMOD

Приведено краткое описание основных программ-решателей комплекса NanoMod для компьютерного проектирования наноструктурированных полупроводниковых материалов.

Ключевые слова: наноэлектроника, полупроводниковые материалы, компьютерное проектирование, решатели процессорной системы.

Введение

Программный комплекс NanoMod [1] предназначен для проведения научных исследований и прикладных разработок в области микроэлектроники, в том числе микропроцессорной техники. Комплекс может быть использован для обучения специалистов, аспирантов и студентов в данной области знания. Вычислительный инструментарий NanoMod создан на базе современных оригинальных алгоритмов моделирования электрофизических, термохимических и механических процессов (см. работы [2—4] и библиографии в них) для компьютерной поддержки автоматизированного проектирования наноструктурированных полупроводниковых материалов.

Программный комплекс NanoMod может использоваться в индивидуальном режиме на персональных компьютерах, а также в режиме удаленного доступа по сети Интернет — для дистанционного решения задач в Центре компьютерного моделирования [5].

Процессорная система: функциональное назначение и алгоритмика программ-решателей

Процессорная система программного комплекса NanoMod предназначена для проведения математического моделирования электрофизических, термохимических и механических процессов, применяемых для формирования специальных наноструктурированных полупроводниковых материалов.

Процессорная система состоит из нескольких программ-решателей: MESH, SOLV, SUBS, MASK, IMPL, EPIT, ETCH, OXID, ANNE, DIFF, SEGR (рис. 1), обеспечивающих решение отдельных подзадач, входящих в сценарий полной задачи. Кратко



Рис. 1. Структурная схема программного комплекса NanoMod

рассмотрим функциональное назначение и алгоритмику решателей.

Решатель MESH предназначен для программной конкретизации области моделирования (постановки задачи) и построения дискретной расчетной сетки, единообразной для всех сегментов (решателей), вхо-дящих в вычислительный сценарий.

Математическое моделирование проводится в области R(x, y):

$$R(x, y): x \in [0, x_{\max}], y \in [0, y_{\max}].$$
(1)

Полная область (1) составлена из двух подобластей *R*₁ и *R*₂:

$$R(x, y) = R_1(x, y) + R_2(x, y);$$
(2)

$$R_1(x, y): x \in [0, x_{\max}], y \in [0, y_0];$$
(3)

$$R_2(x, y): x \in [0, x_{\max}], y \in [y_0, y_{\max}].$$
(4)

В начальный момент процесса моделирования в подобласти R_1 располагается базовая подложка кремния, а в подобласти R_2 — другая среда: вакуум, воздух, оксидант или травитель, в зависимости от вычислительного сценария.

В области (2)—(4) строится дискретная расчетная сетка $M(x_i, y_i)$:

$$M(x_i, y_j) = x_i y_j, \ i = \overline{1, i_{\max}}, \ j = \overline{1, j_{\max}},$$
(5)

 $x_1 = 0, x_{i\max} = x_{\max}, y_1 = 0, y_{j\max} = y_{\max}.$

Расчетная сетка (5) может быть как равномерной, так и неравномерной, в зависимости от выбранного пользователем режима построения сетки — индекса I_M (0 или 1 соответственно). При выборе режима неравномерности сетки осуществляется экспоненциальное сгущение ее узлов с коэффициентами сгущения a_x и a_y по соответствующим координатным направлениям. При этом сгущение узлов сетки по *х*-направлению проводится к координатной линии x = 0, а по *у*-направлению — к координатной линии $y = y_0$.

Значения величин x_{\max} , y_{\max} , y_0 , i_{\max} , j_{\max} , I_M , a_x и a_y вводятся пользователем.

Решатель MASK. Маскирование (*masking*) — процесс установки защитных масок, предохраняющих часть поверхности от физико-химических и механических воздействий.

Выбор материала масок S_M определяется целями защиты поверхности от конкретного вида воздействия. В частности, в операциях легирования кремния (Si) донорными и/или акцепторными примесями (P, As, Sb, B, Ga, Al, ...) методом ионной имплантации используются преимущественно защитные маски из диоксида кремния (SiO₂). В операциях оксидирования (при различных типах оксидантов) преимущественно используются защитные маски из нитрида кремния (Si₃N₄).

В операциях травления тип материалов масок определяется способом операции (ионно-лучевое или химическое травление). Все эти материалы носят общее название — "фоторезист" и обладают двумя главными свойствами. Во-первых, это специальные фотографические свойства (в оптическом или ультрафиолетовом диапазоне) — способность становиться после облучения растворимыми и вымываться (позитивные фоторезисты) или, наоборот, твердеть и закрепляться (негативные фоторезисты). Процесс облучения участков фоторезиста по заданному рисунку (шаблону) называется фотолитографией и включает в себя большую группу подпроцессов (подготовка поверхности для улучшения сцепления, нанесение фоторезиста с центрифугированием изделия для обеспечения однородности, экспонирование, проявление, смыв, сушка и др.).

Рис. 2 (см. третью сторону обложки) иллюстрирует вычислительный процесс установки масок любого типа S_M на поверхность любого материала.

Алгоритм сегмента не моделирует какой-либо физический процесс установки масок, используемый в производственных технологиях [6] и является "чисто геометрическим".

Маска прямоугольной формы устанавливается в области моделирования (2) в позицию, определяемую *х*-координатами своих левой x_L и правой x_R границ и толщиной d_M . При этом маска не "висит" в пространстве: ее *у*-координаты не задаются пользователем, а генерируются системой следующим образом.

К моменту времени вычислительного сценария, когда в программе вызывается сегмент MASK, сформирована некоторая НЭМС-конструкция. Ее верхняя поверхность описывается уравнением

$$y = y^{*}(x).$$
 (6)

В частности, на рис. 2 граница (6) есть планарная поверхность y = 35 (здесь и ниже размеры и значения координат приводятся в нанометрах). В общем случае поверхность (6) может быть непланарной и представляться кусочно-гладкой функцией. Кроме того, поверхность (6) отграничивает от внешней среды любую материальную субстанцию, необязательно Si. Форма укладываемой маски отслеживает нанорельеф поверхности (6). Это имитирует (не моделирует) реальные физические процессы технологии формирования масок — напыление, осаждение, депозит и др. (см. [6]). Таким образом, маска занимает следующее положение в пространстве:

> $MASK(x, y): x \in [x_L, x_R],$ (7) $y \in [y^*(x), y^*(x) + d_M].$

Значения величин S_M , x_L , x_R , d_M вводятся пользователем.

Решатель ЕРІТ. Эпитаксия (*epitaxy*) — технология выращивания монокристаллических, поликристаллических или аморфных тонких пленок в соответствии с кристаллической структурой подложки.

Фактически чипы микроизделий создаются не в теле полупроводниковой подложки, а в тонком эпитаксиальном слое, сформированном над этой подложкой. В частности, в КНИ-технологии эпитаксия кремния проводится на слой оксида кремния. При этом образуется трехслойный пакет Si — SiO₂ — Si.

Существуют два варианта процесса эпитаксии: гомо- и гетероэпитаксия. Гомоэпитаксия — процесс осаждения на подложку материала того же типа. В частности, выращивание слоя Si на подложке из Si. Для гетероэпитаксиального процесса характерно выращивание монокристаллического кремния на поликремнии.

Разработан ряд эпитаксиальных технологий: молекулярно-лучевая эпитаксия, послойная эпитаксия и др. Имеют место существенные проблемы, например, при выращивании слоев Si на подложках с ориентацией кристаллической решетки (111) на поверхности эпитаксиального слоя образуется мелкая сыпь, затрудняющая ведение литографии и других последующих операций.

Аналогично алгоритму сегмента MASK, алгоритм сегмента EPIT в настоящее время не моделирует какой-либо физический процесс, а является "чисто геометрическим". Эпитаксиальный слой толщиной d_E наносится на всю верхнюю поверхность HЭMC-конструкции (6), сформированной к данному моменту вычислительного сценария:

$$EPIT(x, y): x \in [0, x_{\max}],$$

$$y \in [y^*(x), y^*(x) + d_E].$$
(8)

В настоящее время в программном сегменте моделируется эпитаксия "кремний-на-поверхность" одновременно с допингом легирующих примесей донорного и/или акцепторного типов (P, As, B) требуемой концентрации для формирования каналов *n*и *p*-электропроводности.

Например, на рис. 3 (см. третью сторону обложки) показаны три слоя Si. Нижний слой — базовая подложка. На этот слой проводится эпитаксия кремния, легированного примесями фосфора, мышьяка и бора с концентрациями C_P , C_{As} , C_B , равными 10^{21} см⁻³ (1 нм⁻³). Процесс проведен при высокой температуре $T_C = 1300$ °C, что обеспечивает сильную диффузию примесей и получение, вследствие этого, слоя с достаточно равномерным распределением примесей и, соответственно, равномерной электропроводностью.

На этот слой проведена эпитаксия слаболегированного слоя с концентрациями примесей 10^{12} см⁻³. Процесс проводился при низкой температуре $T_C = 500$ °C, поэтому диффузии примесей из нижнего слоя в верхний не происходило, и этот слой является низкоэлектропроводным (фактически непроводящим).

Значения величин d_E , T_C , C_P , C_{As} , C_B вводятся пользователем.

Решатель ЕТСН. Травление (*etching*) — процесс контролируемого удаления материала в различных целях, определяемых технологической картой производства. В основном травление применяется для создания нужного микрорельефа поверхности пластин с формированием ямок или выступов. Эти структуры могут быть созданы на поверхности кристалла, если неоднородность в нормальной структуре решетки пересекает эту поверхность. В частности, U-образные профили травления формируются на подложке кремния с ориентацией (110), а V-образные — на подложках с ориентацией (111).



Рис. 4. Решатель ЕТСН. Травление подложки кремния для получения требуемого нанорельефа поверхности:



На практике реальные профили не вполне удовлетворяют идеализированным контурам, требуемым технологической картой, что существенно препятствует миниатюризации НЭМС-устройств и более плотной паковке интегральных схем. Разработаны многочисленные технологии травления: жидкое (химическое с различными составами растворов), сухое (плазменное, ионное, с бомбардировкой поверхности пластин ионами инертных газов, галогенов и т. п.). При проведении операции травления часть поверхности закрывается защитными масками, формирующими рисунок. Серьезными проблемами травления является смазывание изображений вследствие подтекания жидкого травителя под края масок или из-за эффектов интерференции излучения на границах масок.

Травление какого-либо материала S_M (кремния, его оксида, нитрида) на глубину d_E от верхней поверхности (6) НЭМС-контрукции, сформированной к данному моменту вычислительного сценария, проводится в области, ограниченной слева и справа координатами x_L и x_R соответственно.

Таким образом, в результате операции вытравливается материал в области

$$ETCH(x, y): x \in [x_L, x_R],$$
(9)
$$y \in [y^*(x) - d_E, y^*(x)].$$

Следует подчеркнуть, что травление проводится только в том случае, если тип травителя (или режим травления) соответствует типу вытравливаемого материала.

В программной реализации сегмента это означает, что операция травления области (9) выполняется только при совпадении индекса травителя I_E и типа материала S_M , т. е. только при условии

$$I_E = S_M. \tag{10}$$

Если в области (9) дислоцировано несколько материалов различных типов, то вытравливание проводится только в той части области (9), в которой находится материал, удовлетворяющий условию (10). При этом данный материал должен располагаться в верхней части НЭМС-конструкции, т. е. с выходом непосредственно на границу (6). С физических позиций это означает, что для осуществления травления необходим прямой непосредственный контакт травителя с материалом, для которого эта операция предназначена.

Рис. 4 иллюстрирует три стадии операции травления кремниевой подложки и получения заданного нанорельефа поверхности.

Значения величин x_L , x_R , d_E , I_E вводятся пользователем.

Решатељ IMPL. Легирование (допинг) — процесс внедрения в кремниевую пластину примесей акцепторного и/или донорного типа (фосфора, мышьяка, сурьмы, бора, галлия и т. п.) в целях создания в полупроводнике зон повышенной проводимости *n*- и *p*-типа для организации диодных и транзисторных каналов.

Кроме этого, легирование может быть направлено на достижение иных, технологических целей. Например, легирование бором останавливает процесс травления основного материала.

Среди технологий легирования наиболее эффективной и применяемой в настоящее время является ионная имплантация (*implantation*), которая заключается во внедрении в полупроводниковый материал ионизированных атомов, разогнанных в электрическом поле и имеющих высокую энергию. Эта технология требует специализированных сложных установок, но является намного более точной, чем диффузионный метод, и применяется для создания скрытых слоев, *p*- и *n*-карманов, доменов в чипе, формирующих транзисторные каналы.

Алгоритм сегмента основан на методе численного расчета закона Гаусса для распределения в кремниевой подложке концентраций допинг-примесей различных элементов, внедренных способом ионной имплантации [7]:

$$C(\xi) = A \cdot \mathbf{e}^{-B(\xi - \xi_0)^2}.$$
 (11)

9

В выражении (11) координатное направление ξ есть направление движения ионов от разгонного устройства к подложке. В общем случае это направление не является перпендикулярным к поверхности подложки, а составляет с нормалью к ней угол α_I . Значение координаты ξ отсчитывается от точки начала внедрения иона в подложку с увеличением значения ξ при движении вглубь материала. Величины *A*, *B* и ξ_0 являются константами, зависящими от физических факторов — типа *S*_I и дозы *D*_I имплантанта, энергии ускорения ионов *E*_j:

$$A = A(S_{I}, D_{I}, E_{I}); B = B(S_{I}, D_{I}, E_{I});$$
(12)
$$\xi_{0} = \xi_{0}(S_{I}, D_{I}, E_{I}).$$

Величина ξ_0 в (12) является глубиной максимума внедрения ионов в подложку — пиком распределения Гаусса (11) с экспоненциально уменьшающейся вглубь материала и к его поверхности концентрации примесей. Рис. 5 (см. третью сторону обложки) иллюстрирует результаты вычислений сегмента. Показана схема имплантации (слева) и распределение концентраций мышьяка As и бора B в кремнии Si. Заметим, что при одной и той же энергии имплантации глубина внедрения B в Si больше, чем As в Si. Процесс диффузии примесей с течением времени размывает это распределение со скоростью, зависящей от ряда факторов (температуры, типа кристаллической решетки и др.).

Значения A, B и ξ_0 содержатся в специализированной БД комплекса и вводятся системой поддержки заданий без участия пользователя. Значения величин S_I , D_I , E_I , α_I вводятся пользователем.

Решатель ANNE. Отжиг (*annealing*) — вид термической обработки, который заключается в нагреве материала, выдержке при температуре нагрева в течение некоторого времени с последующим постепенным охлаждением для удаления внутренних напряжений. Этот процесс требуется для получения менее хрупкого материала или для изменения структуры исходного материала. В КНИ-технологиях отжиг совмещается с процессом оксидирования.

Кроме этого, в ряде технологических схем отжиг применяется для перераспределения легирующих примесей в кремниевом материале, в основном для создания более равномерной их концентрации. При повышении температуры T в процессе отжига усиливается диффузия примесей. Если время процесса $t_{\rm max}$ достаточно велико, то концентрации примесей в различных областях создаваемого НЭМС-узла существенно выравниваются. Расчет процесса диффузии проводится решателем DIFF, с которым решатель ANNE обменивается необходимой информацией без участия пользователя. Для организации вычислений пользователь вводит значения величин T, t_{max} и τ (временной шаг вычислительного алгоритма).

Решатель OXID. Оксидирование (oxidation) процесс формирования оксидных пленок. Оксидирование является одним из главных процессов в КМОП- и КНИ-технологиях. Применяется для локального оксидирования определенных выбранных микрообластей кремниевых пластин с одновременным маскированием оксидирования в других микрообластях. В частности, в широко применяемых MUMPs-технологиях формирования наноструктурированных полупроводниковых материалов используется следующая последовательность операций. На кремниевой подложке (монокристаллической пластине) вначале формируется однородный слой диоксида кремния SiO₂, затем на него осаждается слой нитрида кремния Si₃N₄. На нитрид кремния фотолитографическим способом наносится изображение. Затем относительно тонкий слой диоксида кремния выращивается в окнах масок Si₃N₄. Нитрид кремния блокирует (маскирует) оксидирование Si везде, где он присутствует. Постепенное оксидирование слоя Si₃N₄ отделяет это оксидирование от пластины. Тонкий начальный слой SiO₂ используется для предотвращения напряжений в кремниевой структуре, возникающих от прямого контакта между Si и Si₃N₄.

Установлено, что свойства оксида в основном зависят от температуры процесса и, в меньшей мере, от давления. Однако преимущество оксидирования Si при высоком давлении заключается в том, что это позволяет выращивать слои термического оксида при относительно низких температурах в течение времени, сравнимого со временем, необходимым для обычного высокотемпературного процесса при атмосферном давлении. Например, при оксидировании во влажном кислороде при давлении 1 МПа и температуре 750 °С пленка SiO₂ толщиной 30 нм выращивается в течение 30 мин (см. рис. 6 на третьей стороне обложки).

Для изменения толщины можно варьировать временем процесса, его температурой и давлением. Такой метод применяется при выращивании тонких подзатворных оксидов. Одновременно с выращиванием тонкой оксидной пленки происходит формирование толстого оксида в слое легированного поликремния. Концентрационно-ускоренное оксидирование позволяет свести к минимуму процесс перераспределения предварительно введенной в подложку примеси. Это весьма важно при формировании биполярных структур с изопланарной изоляцией элементов толстыми оксидными слоями и высокой плотностью компоновки этих элементов, используемых в качестве динамических запоминающих устройств с произвольной выборкой.

Математическое моделирование процесса оксидирования имеет значительные проблемы не только в построении собственно модели оксидирования (как электрофизического и термохимического процесса) с приемлемой точностью и необходимыми приближениями для возможности проведения расчетов реальных задач на современных компьютерах. Одной из сложнейших проблем моделирования этого процесса является проблема, лежащая в области механики сплошных сред и связанная с трудностями математической формулировки задачи. Ее сущность заключается в следующем.

При оксидировании кремния и переходе его в диоксид кремния SiO₂ имеет место эффект "наработки" объема вещества. Из единицы объема Si возникает 2,27 единиц объема SiO₂. Область оксида располагается между двумя границами G_1 и G_2 : оксид/материал (SiO₂/Si) и оксид/оксидант (SiO₂/O₂). Наработка объема происходит на границе волны оксидирования SiO₂/Si при движении ее фронта вглубь Si. При этом меняется и конфигурация всего SiO₂ вследствие роста его объема в 2,27 раз.

Из всего этого объема одна его единица занимает место оксидированного Si, перешедшего в SiO₂, а наработанный дополнительный объем SiO₂ в 1,27 единиц может расшириться только в область оксиданта O₂.

Таким образом, движение границы SiO_2/Si генерирует движение границы SiO_2/O_2 .

В одномерном или квазиодномерном процессе оксидирования плоской поверхности Si решение этой проблемы является весьма простым. При движении плоской границы SiO_2/Si вглубь Si на одну единицу длины плоская граница SiO_2/O_2 продвигается на 1,27 единиц в область O_2 . При этом планарность поверхности обеих границ не меняется.

В 2D- и, тем более, 3D-процессах решение этой проблемы чрезвычайно сложно. Конфигурация и скорость движения границы SiO₂/O₂ зависят от целого ряда факторов.

Во-первых, существенную роль играет собственно форма SiO₂, непрерывно изменяющаяся в процессе оксидирования. Во-вторых, весьма существенным является наличие ограничителей роста границы SiO₂/Si, таких как, например, защитные маски (или иная субстанция), лежащие на участках этой границы. Влияние таких масок на подвижность границы SiO₂/O₂ может быть различным в зависимости от их размеров, массы, механических свойств материала (эластичности, прочности и т. п.).

В настоящее время нет универсальных моделей оксидирования, которые бы удовлетворительно описывали процесс влияния границы SiO_2/Si на SiO_2/O_2 в широком диапазоне определяющих параметров.

Квазиодномерная классическая модель "птичьего клюва" Дила — Гроува [8] дает удовлетворительные (иногда даже очень хорошие) результаты в слишком ограниченном спектре задач. Современные модели с представлением диоксида кремния некоей "знакомой" (по другим задачам) субстанцией: идеальной жидкостью, вязкой жидкостью, вязко-пластическим или вязко-эластичным материалом и т. п., имеют существенные трудности в определении значений эмпирических констант, изобилующих в этих моделях (аналоги чисел Рейнольдса, Прандтля, модуля Юнга, коэффициента Пуассона и др.). Подбор этих констант для удовлетворительного решения одного класса задач не гарантирует их пригодности для решения других классов задач.

Вычислительный комплекс NanoMod использует специальный оригинальный алгоритм "когерентных точек" (подробно описанный в работе [9]), который позволяет моделировать процесс движения границ при оксидировании с высокой эффективностью (хорошая точность с приемлемыми затратами компьютерных ресурсов) для широкого спектра задач.

Алгоритм [9] решателя OXID можно кратко записать в следующем формализованном виде:

$$G_{1} \leq [SiO_{2}(t, x, y)] \leq G_{2},$$

$$G_{1} = G_{1}(t, x, y, I, T, P, \tau, d, G_{2}),$$

$$G_{2} = G_{2}(t, x, y, I, T, P, \tau, d, G_{1}).$$
(13)

Запись (13) означает, что пленка оксида SiO₂ развивается во времени t и пространстве (x, y) между границами G_1 и G_2 , положение и конфигурация которых зависят друг от друга, а также от физических (температуры T и давления P оксиданта, типа I оксиданта) и алгоритмических (временного шага τ и начальной толщины d оксида) параметров.

На рис. 7 (см. третью сторону обложки) представлены результаты моделирования процесса. Формулировка задачи: оксидируется пластина непланарной поверхности с вытравленной на ее левом участке траншеей глубиной 15 нм и шириной 55 нм. Правый участок пластины закрыт защитной нитридной маской шириной 40 нм и толщиной 5 нм. Маска препятствует процессу проникновения оксиданта в пластину сверху, и оксидирование под маской протекает только вследствие проникновения оксиданта из оксида, расположенного слева от маски. Процесс "влажного" оксидирования (оксидант — пары H_2O) протекает при температуре 1200 °С и давлении 1,3 атм в течение заданного времени. На рис. 7 показана динамика процесса (0 мин, 1 мин, 3 мин).

Горизонтальные и вертикальные участки поверхности в начале процесса, пока пленка SiO_2 очень тонкая, оксидируются с одинаковой скоростью. При этом объем твердого материала (Si + SiO₂) непрерывно возрастает. Граница SiO_2/O_2 движется вверх на горизонтальных участках, влево — на вертикальном участке, а движение вертикального участка под защитную маску несколько отстает.

За определенный интервал времени траншея "зарастает", а в окрестности маски конфигурация оксида приобретает форму птичьего клюва. Подчеркнем, что эта форма получена не применением аналитических формул Дила — Гроува, а в результате прямого численного моделирования.

Вычислительный инструментарий NanoMod позволяет провести подробное изучение этого класса задач с вариацией всех определяющих параметров: геометрии траншеи (ее ширины и глубины) и режима оксидирования (тип оксиданта, температура, давление и время процесса).

Значения величин *I*, *T*, *P*, *d*, t_{final} , τ вводятся пользователем.

Решатель SEGR. Сегрегация (*segregation*) — сложный электрофизический процесс воздействия фронта волны оксидирования кремния Si на допинг-примеси различных химических элементов, которые внедрены в пластину Si.

Главной физической характеристикой процесса сегрегации является то, что фронт G_1 волны оксидирования воздействует совершенно противоположным образом на примеси донорного (элементы V группы Периодической системы) и акцепторного (элементы III группы) типов.

Донорные (*D*) примеси — фосфор Р, мышьяк As, сурьма Sb — выталкиваются фронтом *G*₁ из области возникающего оксида. Фронт *G*₁ при своем движе-

нии толкает перед собой D-примесь ("эффект бульдозера"), концентрация которой непосредственно перед фронтом G_1 непрерывно возрастает. Концентрация D-примеси приобретает форму типа "горного хребта" с образованием максимума высокой интенсивности. В области Si формируется узколокализованная зона высокой электронной проводимости. Это используется при создании каналов транзисторов и других элементов интегральных схем.

Акцепторные (A) примеси — бор B, галлий Ga, индий In — наоборот, втягиваются фронтом G_1 из области материала Si в область его оксида ("эффект пылесоса").

При этом за фронтом, в оксиде, образуется зона повышенных концентраций *А*-примеси, а непосредственно перед фронтом *G*₁ — узколокализованная зона "провала" — пониженной концентрации.

Эффект сегрегации используется при создании специальных наноструктур в полупроводниковом материале Si с внедренными в него примесями D (P, As, Sb) и A (B, Ga, In).

Закон сегрегации записывается в следующей форме:

$$G_1(x^*, y^*): \frac{C_+}{C_-} = m(E_S, T, Ph);$$
 (14)

$$C_{+} = C(x^{*} + \varepsilon, y^{*} + \varepsilon), \varepsilon \to 0; \qquad (15)$$

$$C_{-} = C(x^* - \varepsilon, y^* - \varepsilon) \varepsilon \to 0.$$
 (16)

Запись (14)—(16) означает, что в любой точке (x^*, y^*) фронта волны оксидирования $G_1(x, y)$ кремния для любой легирующей примеси имеет место скачок ее концентрации перед фронтом C_+ и за фронтом C_- . Интенсивность скачка *m* постоянна в любой точке фронта и определяется потенциалом сег-



Рис. 8. Решатель SEGR. Сегрегация донорных и акцепторных легирующих примесей в кремнии на фронте волны оксидирования Si/SiO₂. Схема процесса (*a*) и топология алгоритма 1ДЗП (*b*). Результаты расчета (*b*): существенно неравномерное результирующее распределение примесей фосфора P (кривая 2) и бора B (кривая 1), равномерно распределенных в кремниевой пластине до начала оксидирования и отнормированных к их начальным значениям в Si

регации E_S , различным для разных примесей, и температурой T операции оксидирования, а также рядом других физических факторов Ph, такими как степень неравновесности и т. д. (подробнее см. [10, 11]).

Для определенности вид (15)—(16) приведен для случая движения фронта в направлении возрастания координат x, y (рис. 8, a).

Соотношения (14)—(16) аналогичны, с математической точки зрения, соотношениям Рэнкина — Гюгонио на ударных волнах в физической газовой динамике (см., например, [12]). Вследствие этого опыт создания алгоритмов расчета динамики процессов со скачкообразным изменением параметров (модели бесконечно тонких разрывов) в аэродинамике высокоскоростного полета [13] был успешно использован в области нанотехнологий проектирования полупроводниковых материалов.

Вообще говоря, построение алгоритмов расчета (14)—(16) представляет собой сложную проблему в 2D-, и особенно, 3D-задачах. В 1D-задачах алгоритм решения (14)—(16) может быть выписан в квазианалитической форме в виде системы рекуррентных формул [11].

В решателе SEGR используется специально разработанный алгоритм "прицельных направлений" 1Д3П ("одна клетка-донор — три клетки-перципиента", рис. 8, *б*), который показал свою эффективность при решении широкого класса задач (см. [2—4] и рис. 8, *в*).

Решатель SEGR интегрирован в решатель OXID и не требует от пользователя ввода каких-либо входных параметров и указаний в вычислительном сценарии.

Решатели OXID и SEGR являются ключевыми и наиболее сложными в процессорной системе программного комплекса NanoMod.

Заключение

Приведено общее описание функционального назначения алгоритмов программ-решателей процессорной системы комплекса NanoMod, которые предназначены для моделирования электрофизических, термохимических и механических процессов формирования наноструктур в полупроводниковых материалах. Опыт использования решателей показал их высокую эффективность при решении широкого спектра научных и прикладных задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-07-12001-офи).

Список литературы

1. Тарнавский Г. А., Анищик В. С. Программный комплекс NanoMod для компьютерной поддержки научных исследований в наноэлектронике: система ввода данных и инициализации процессорных систем // Труды ИВМиМГ СО РАН. Серия: Информатика. 2008. Т. 8. С. 5—12.

2. Тарнавский Г. А., Анищик В. С., Тарнавский А. Г. Влияние защитных масок при отжиге кремниевой пластины на формирование наноразмерных гетероструктур легирующих примесей фосфора // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 3. С. 57—65.

3. Тарнавский Г. А., Жибинов С. Б., Алиев А. В., Анищик В. С., Тарнавский А. Г. Компьютерное моделирование технологических процессов травления и оксидирования кремния и формирования наноструктур легирующих примесей в подложке базового материала // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Изд-во СПб Политехнического университета. 2008. Т. 13. С. 241—246.

4. **Tarnavsky G. A.** Design of semiconductor materials for nanoelectronics. Technological process segment: annealing of water and formation of doping nanostructures // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2008. V. 81. N 5. P. 994–1004.

5. Тарнавский Г. А., Жибинов С. Б., Алиев А. В., Анищик В. С., Тарнавский А. Г. Интернет-центр компьютерного моделирования в научных исследованиях и прикладном проектировании // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. СПб: Изд-во СПб Политехнического университета. 2008. Т. 13. С. 114—119.

6. **Тарнавский Г. А.** Нанотехнологии в электронике: краткий обзор основных процессов производства современных микроэлектромеханических систем // Справочник. Инженерный журнал. 2008. № 11. С. 49—57.

7. **Runge H.** Distribution of implanted ions under arbitrarily shaped mask // Phys. Stat. Sol., 1977. V. 39 (a). P. 595–607.

8. **Deal B. E., Grove A. S.** General relationship for the thermal oxidation of silicon // Appl. Phys. 1965. V. 36. P. 37–70.

9. Александров А. Л., Тарнавский Г. А., Шпак С. И., Гулидов А. С., Обрехт М. С. Численное моделирование задачи динамики роста пленки окисла в полупроводниковых подложках на основе геометрического подхода и метода Дила — Гроува // Вычислительные методы и программирование. 2001. Т. 2. № 1. С. 92—111.

10. **Grove A. S.** et al. Redistribution of acceptor and donor impurities under oxidation of silicon // J. Appl. Phys. 1964. V. 35. P. 2695–2716.

11. **Тарнавский Г. А., Шпак С. И., Обрехт М. С.** Численное моделирование и компьютерный алгоритм процесса сегрегации легирующих примесей на границе волны окисления в полупроводниковых подложках // Вычислительные методы и программирование. 2001. Т. 2. № 1. С. 16—30.

12. **Тарнавский Г. А.** Ударные волны в газах с различными показателями адиабаты до и после фронта скачка // Вычислительные методы и программирование. 2002. Т. 3. № 2. С. 222—236.

13. **Тарнавский Г. А., Алиев А. В., Тарнавский А. Г.** Компьютерное моделирование в аэромеханике: программный комплекс "Поток-5" // Авиакосмическая техника и технология. 2007. № 4. С. 27—38.

Материаловедческие и технологические основы МНСТ

УДК 621.315.593:539.216.2

А. А. Ковалевский, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., А. С. Строгова, аспирант, Д. В. Плякин, мл. науч. сотр., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, В. М. Борисевич, вед. технолог, НПО "Интеграл", e-mail: a_kovalevsky@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ САМООРГАНИЗАЦИИ ВЫСОКОУПОРЯДОЧЕННЫХ НАНОКЛАСТЕРОВ ГЕРМАНИЯ ПРИ ОСАЖДЕНИИ ПЛЕНОК ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ГЕРМАНИЕМ

Исследованы особенности образования самоорганизованных кластеров германия (Ge) и твердого раствора SiGe в режиме осаждения субтонких пленок поликристаллического кремния, легированного Ge, на поверхность наноразмерных пленок диэлектриков. Установлена взаимосвязь формы, размера и плотности нанокластеров Ge с условиями их самоорганизации.

Ключевые слова: нанокластеры, пленка, поликристаллический кремний, германий, твердый раствор, самоорганизация.

Введение

С использованием методов атомно-силовой микроскопии и комбинационного рассеяния света на оптических фононах в кластерах германия исследованы особенности образования самоорганизованных кластеров германия (Ge) и твердого раствора SiGe, впервые сформированных в режиме осаждения субтонких пленок поликристаллического кремния (ПКК), легированного Ge, на наноразмерные пленки диэлектриков. Обнаружено, что в субтонких пленках ПКК, легированного Ge, на наноразмерных пленках диэлектриков в условиях осаждения пленки ПКК проявляется пространственное коррелированное распределение кластеров германия (а в опреде-

ленных условиях — кластеров, обогащенных кремнием, т. е. кластеров твердого раствора SiGe) с режимами их формирования. Рассмотрена взаимосвязь формы, размера и плотности нанокластеров (НК) Ge с условиями их самоорганизации. Установлено влияние на процесс самоорганизации кластеров интердиффузионных процессов, существенных при высоких температурах осаждения и легирования ПКК. Обнаружено, что кластеры (островки) могут проявляться на поверхности скола в виде четырех типов топографических особенностей в виде классических пирамид, пирамид с плоской вершиной, куполов и острых шипов в зависимости от условий осаждения пленок ПКК, легированного Ge. Получены системы высокоупорядоченных НК германия размерами (3.5-40 нм) и плотностью $2.7 \cdot 10^7 - 3.5 \cdot 10^9$ см⁻². Показана принципиальная возможность в режиме осаждения пленок ПКК, легированного Ge, управлять геометрическими параметрами самоорганизующихся НК (наноостровков) за счет выбора условий их самоорганизации.

В последние десятилетия наблюдается устойчивый интерес исследователей во всем мире к НК Ge (SiGe) из-за высокого технологического потенциала Ge (SiGe) островков для возможных приборных приложений. Несмотря на большое число экспериментальных работ, направленных на изучение формирования и эволюции островков Ge (SiGe) на подложках различной ориентации [1-5], задача создания структур с кластерами, как элементной базы приборов нового поколения, пока еще далека от своего окончательного решения. Основные проблемы, препятствующие получению качественных структур с однородными кластерами, заключаются в отсутствии соответствующего оборудования и в больших размерах самоорганизующихся островков Ge (SiGe), не позволяющих проявляться квантовым свойствам системы, а также в случайном характере локализации островков в плоскости гетероперехода пленкаподложка. В связи с этим актуальными являются работы, ориентированные на изучение возможности использования существующего оборудования и технологии осаждения поликристаллических пленок кремния для создания самоорганизующихся НК Ge (SiGe) и отработки элементов технологии получения подобных структур.

В данной работе представлены предварительные результаты исследования процесса самоорганизации НК германия при осаждении пленок ПКК, легированного Ge, на тонкие (4,0—4,5 нм) слои диоксидов кремния, диспрозия и иттрия.

Методика эксперимента

Исследуемые образцы были получены методом пиролиза моногидридов Si и Ge в установке "Изотрон 4-150" при общем давлении газовой смеси 35-40 Па и объемном соотношении моногермана к моносилану 0,001-0,003. Температура осаждения при этом не превышала 680 °С. В качестве подложек использовались кремниевые пластины КЭФ 4,5, ориентированные в плоскости (100). На поверхность пластин наносился тонкий оксид кремния в процессе окисления в сухом кислороде, а оксиды диспрозия и иттрия формировались в процессе их нанесения и последующего окисления [6]. Температура образцов в процессе осаждения контролировалась с помощью платино-родиевой термопары. Топография поверхности полученных структур исследовалась с помощью атомно-силового микроскопа Ntegra Prima. В качестве зондов применялись кремниевые кантилеверы с радиусом закругления вершин зондирующих пирамид 15-20 нм (SCNC12, NT-MDT), а также вискеры, отличительной особенностью которых является завершение зондирующей пирамиды вытянутым узким и более острым конусом из материала на основе углерода (NCC05, NT-MDT). Применение вискеров заметно улучшало контраст изображений островков Ge и SiGe. Кроме того, с помощью атомного силового микроскопа определялись концентрация, размеры и форма кластеров. Изменение структуры Geи SiGe-кластеров анализировалось на основании данных спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС). Спектры КРС на оптических фононах получали при облучении структур Ar лазером с длиной волны $\lambda = 514,5$ нм и регистрировали с помощью спектрометра ДФС-52. Спектры регистрировались при комнатной температуре.

Эксперимент и обсуждение результатов

В результате проведенных исследований влияния температуры подложки на процесс формирования НК выяснено, что до температуры 560 °С при концентрации Ge в объеме пленки ПКК $5 \cdot 10^{19}$ ат · см⁻³ на поверхности самоорганизуется система НК Ge правильной огранки. Причем с повышением температуры от 540 до 560 °С развитие НК Ge инициируется и их плотность увеличивается с $2 \cdot 10^7$ до $3,5 \cdot 10^9$ см⁻². Применение данной методики позволило получить массивы высокоупорядоченных НК (наноостровков) Ge высотой 3,5-40 нм (рис. 1—4). Линейная зависимость логарифма плотности НК от температуры осаждения пленок ПКК свидетельствует о кинетическом ограничении процессов зарождения НК Ge (SiGe). Следовательно, непосредственно на поверхности наноразмерного диэлектрика (2—4 нм) можно формировать массивы кластеров германия с включениями кластеров твердого раствора кремний—германий (SiGe) с плотностью 2 · 10⁷ — 3,5 · 10⁹ см⁻².

Рост НК в высоту в режиме осаждения пленок ПКК, легированных Ge, по-видимому, осуществляется за счет выброса атомов германия с нижних уровней плоскости осаждения на верхние, поскольку на вершину кластера попадает слишком мало Ge, чтобы обеспечить формирование последовательно второго и третьего слоев Ge. Эффект выброса атомов Ge — это одна из особенностей самоорганизации кластеров германия на исходной поверхности. При низких температурах осаждения пленок ПКК, легированных Ge, ($T_{\Pi} \leq 560$ °C) даже при большом количестве Ge в процессе легирования $(5 \cdot 10^{19} \text{ at} \cdot \text{см}^{-3})$ кластеры германия самоорганизуются и растут до некоторого объема в форме пирамид (см. рис. 1, а) с квадратным основанием. При концентрации германия $5 \cdot 10^{19}$ ат \cdot см⁻³ и температуре 560 °C происходит переход пирамидальных кластеров (островков) в куполообразные (рис. 1, б). При более высоких температурах 560-620 °C, как правило, зарождаются и начинают расти кластеры в форме пирамид с плоской вершиной (рис. 1, в, г).

Анализ АСМ-изображений в полном объеме показал, что рост таких кластеров в этом случае происходит также лишь до некоторого критического объема, а затем они трансформируются в купола за счет возникновения новых боковых граней, образующих больший угол с подложкой по сравнению с пирамидами. Подобные изменения формы кластеров объяснялись в работе [7] более эффективной релаксацией напряжений в куполообразных кластерах за счет большого отношения их высоты к латеральным размерам. То же можно сказать и в отношении кластеров в виде усеченных пирамид. Скорее всего, усеченные пирамиды представляют собой не что иное как твердый раствор SiGe. Поскольку увеличение температуры осаждения приводит к усилению поверхностной диффузии атомов германия и атомов кремния из подложки в НК (островки), то как следствие, наблюдается уменьшение поверхностной плотности НК, увеличение их размеров и содержания в них кремния, т. е. образование твердого раствора SiGe. Поскольку температура осаждения пленок ПКК, легированных Ge, далека от температуры плавления как кремния, так и германия, равновесная форма кристалла содержит грани с малой поверхностной энергией. Как правило, это грани с низкими индексами Миллера.

Для разреженного массива кластеров (см. рис. 1, *в*, *г*), когда среднее расстояние между ними велико по сравнению с размером отдельного кластера (островка), время миграции атомов по его поверхности значительно меньше, чем время миграции между островками. Поэтому равновесная форма отдельного кластера устанавливается быстрее, чем равновесная структура массива кластеров в целом. Для островка любого объема существует равновесная форма, которая определяется минимумом его полной 15 энергии. При формировании кластеров появление наклонных граней (см. рис. 2, а, б) с общей площадью, большей площади основания кластера, сопровождается исчезновением участков плоской поверхности осаждаемого материала за счет химических связей. Этим можно объяснить влияние на размер, форму и плотность НК германия, разных по толщине оксидов кремния, диспрозия, иттрия и нитрида кремния на кремниевой подложке (рис. 2). Как показали проведенные исследования, с увеличением температуры осаждения с 580 до 620 °С (см. рис. 1) становится заметной интердиффузия, вызывающая увеличение содержания кремния в НК (возможно образование твердого раствора SiGe) (рис. 3-5). Этот факт, а также уменьшение поверхностной плотности НК приводит к существенному увеличению средних размеров НК (островков) при неизменном содержании германия в осажденных пленках ПКК (см. рис. 1-4). Типичные изображения топографии поверхности, полученные с помощью атомно-силового микроскопа структур с высокоупорядоченными HK Ge, представлено на рис. 1-4. Следует отметить, что пространственные характеристики получаемых кластеров определяются температурой осаждения (рис. 1), типом диэлектрической пленки на подложке (рис. 2), эффективной толщиной пленки ПКК (рис. 3) и содержанием германия в ПКК (рис. 4).

Варьируя данные ростовые парастадии перестройки поверхности, на-

чиная от отдельных пирамид и заканчивая образованием больших НК как Ge, так и твердого раствора Si-Ge, одновременно (рис. 4) самоорганизующихся в результате взаимодействия Si с Ge в области температур выше 580 °С и коалесценции маленьких НК. В частности, на рис. 4, г представлено изображение стадии самоорганизации одновременно как островков Ge, так и островков твердого раствора SiGe. В данном случае в режиме осаждения пленки ПКК, легированного Ge, при температуре подложки 640 °C с эффективной толщиной 45-50 нм происходит взаимодействие Si с Ge. Проведение процесса осаждения пленок ПКК, легированного Ge, до концентрации Ge в объеме пленки $5 \cdot 10^{19}$ ат \cdot см⁻³ при достаточно вы-



Рис. 1. Температурная зависимость плотности и размера НК Ge (SiGe), сформированных в пленках поликристаллического кремния толщиной 25 нм. Температура осаждения, °С: *a* — 540; *б* — 560; *в* — 580; *г* — 620



Рис. 2. Зависимость плотности и размера НК Ge (SiGe) от типа тонкого слоя диэлектрика на кремниевой подложке с кристаллографической ориентацией (100). Варьируя данные ростовые пара-толщина пленки ПКК – 25 нм, толщина диэлектрической пленки – 4 нм: *a* – метры, можно наблюдать различные SiO₂; *b* – Si₃N₄; *b* – Dy₂O₃; *c* – Y₂O₃

соких температурах подложки позволяет, по нашему мнению, создать конгломерат различного рода островков, а именно, Ge и твердого раствора SiGe в одном технологическом процессе.

Следует отметить, что пространственные характеристики получаемых кластеров Ge и твердого раствора Si—Ge определяются также эффективной толщиной осаждаемой пленки ПКК. Варьируя толщиной осаждаемой пленки ПКК при одном и том же содержании в ней Ge, можно наблюдать различные стадии перестройки поверхности заполненной НК. С изменением толщины пленки ПКК с 10 до 100 нм при малой толщине (10-25 нм) пленки ПКК наблюдается образование кластеров пирамид германия вы-



Рис. 3. Зависимость плотности и размера НК Ge (SiGe) от эффективной толщины пленки ПКК.

Толщина, нм: *a* — 10; *б* — 25; *в* — 50; *г* — 100



Рис. 4. Зависимость плотности и размера НК Ge (SiGe) от концентрации германия в пленке ППК толщиной 25 нм.

Концентрация германия в пленке ПКК, ат \cdot см⁻³: $a - 10^{16}$; $\delta - 10^{17}$; $e - 10^{18}$; $e - 5 \cdot 10^{19}$

сотой 6—20 нм и плотностью $10^8 - 3,5 \cdot 10^9$ см⁻². При этом уже на толщине пленки ПКК 25 нм наблюдается формирование более больших по размеру кластеров в результате коалесценции кластеров более малого размера (см. рис. 3, *a*, *б*). Увеличение толщины пленки ПКК до 50 нм стимулирует этот процесс и приводит к самоорганизации крупных кластеров высотой до 40 нм, причем высота кластера значительно превышает его латеральные размеры. При толщине пленки ПКК 100 нм основная масса кластеров трансформируется в островки в виде шипов высотой до 60 нм (рис. 3, *г*).

Особо следует отметить появление упорядоченных густозаселенных областей кластеров с повышением содержания Ge в пленках ПКК в процессе их осаждения и легирования (см. рис. 4). Возникновение упорядоченных областей с высоким содержанием германия можно объяснить следующим образом. Границы зерен в пленках ПКК представляют собой не что иное, как кристалл с множеством дислокаций [8—10], вокруг которых, как правило, возникают поля упругих напряжений. Взаимодействие этих полей, в свою очередь, приводит к перераспределению и пространственному упорядочению дислокаций.

Пространственно упорядоченные дислокации являются центрами геттерирования германия [11]. Это, в свою очередь, приводит к периодическому распределению областей с повышенным содержанием НК Ge. Повышение концентрации Ge в ПКК приводит к увеличению поверхностной плотности НК как Ge, так и твердого раствора SiGe (рис. 4 и 5). При низких концентрациях Ge в ПКК порядка 10^{16} ат \cdot см⁻³ наблюдается явная разреженность НК (рис. 4, *a*), которая с повышением концентрации Ge до $5 \cdot 10^{19}$ ат \cdot см⁻³ приводит к эффективному увеличению их поверхностной плотности (рис. 4). Увеличение поверхностной плотности кластеров и более равномерное их распределение по размеру и форме обусловлено оборванными (свободными) связями по границам зерен пленок ПКК. Оборванные связи являются центрами захвата германия в результате легирования кластеров. В одновременном увеличении поверхностной плотности и размеров кластеров (островков) принимает участие большое число атомов, поскольку общий объем кластеров воз-

растает. Сегрегация Ge, которая не исключается в наших условиях осаждения ПКК, способствует увеличению плотности кластеров. Возможное формирование кластеров твердого раствора SiGe обусловлено увеличением диффузии Si в кластеры и изовалентным замещением атомов кремния на атомы германия [8-10]. Наша концепция состоит в том, что оборванные (свободные) связи по границам зерен пленок ПКК, как и оборванные (свободные) связи в наноразмерных диэлектрических слоях, являются центрами захвата германия в результате осаждения и легирования пленок ПКК. Спектры КРС образцов рис. 4, б, в, г и чистой кремниевой подложки (100) представлены на рис. 5. На этих спектрах четко очерчены спектры в области частот колебаний как связей Ge—Ge (299...302 см⁻¹), так и связей



Рис. 5. Спектры комбинационного рассеяния в образцах с НК германия, сформированными в пленках ПКК толщиной 25 нм с различным содержанием германия.

Концентрация германия, ат · см $^{-3}$: a — чистая кремниевая подложка (100); δ — 10^{17} ; e — $10^{18};$ e — $5\cdot10^{19}$

Ge-Si (350...450 см⁻¹). Для сравнения приведен спектр подложки Si (100), зарегистрированный в тех же условиях. В данном спектре видны особенности в районе 300 см^{-1} , связанные с двухфононным рассеянием на поперечных акустических фононах в кремнии. Из экспериментальных же спектров видно, что сигнал КРС даже для образцов с минимальным содержанием германия 10¹⁷ ат · см⁻ ³ существенно превышает сигнал от подложки. Самый интенсивный пик в спектрах соответствует КРС на локализованной моде 1-го порядка. На рис. 5 видно, что положение пика КРС от связей Ge-Ge практически не зависит от содержания германия в ПКК и составляет 299...302 см⁻¹. Для всех образцов проявляются пики, связанные с КРС на колебаниях связей Ge-Si, наблюдаемые в промежутке от 350 до 450 см $^{-1}$. Это не противоречит известным литературным данным [12].

Интенсивность пиков КРС от связей Ge—Ge очень значительно и непропорционально увеличивается с концентрацией Ge в ПКК. В свою очередь, пики от связей Ge—Si, напротив, выражены слабо. В этом случае можно говорить, что геттерограница достаточно четкая без переходного слоя из твердого раствора SiGe.

Заключение

Совокупность полученных экспериментальных результатов в сопоставлении с имеющимися литературными данными позволяет сделать следующие выводы. В результате осаждения субтонких пленок поликристаллического кремния, легированного германием, на наноразмерные слои диэлектриков впервые сформирован массив самоорганизованных упорядоченных кластеров германия. Приведенные результаты экспериментов по обнаружению кластеризации внедренных атомов германия в кремний в результате легирования ПКК Ge в режиме осаждения пленок ПКК открывает новые возможности формирования наноразмерных структур.

Механизм проявления НК Ge и твердого раствора SiGe в топографии первоначально гладких поверхностей связан с множеством дислокаций по границам зерен пленок ПКК, вокруг которых, как правило, возникают поля упругих напряжений и их взаимодействие приводит к перераспределению и пространственному упорядочению дислокаций. Дислокации, в свою очередь, являются источником оборванных (незаполненных) связей в кремниевой матрице. Наша концепция состоит в том, что незаполненные (свободные) связи по границам зерен в пленках ПКК и наноразмерных пленках диэлектриков являются центрами захвата германия и кремния в процессе их осаждения и легирования. Пространственно упорядоченные дислокации являются центрами геттерирования Ge, что, в свою очередь, приводит к периодическому распределению областей с его повышенным содержанием, а следовательно, и НК. Таким образом, в данной работе предложен новый оригинальный подход к формированию высокоупорядоченных НК Ge и твердого раствора Si—Ge на кремниевой подложке с наноразмерными оксидами различных элементов в режиме осаждения пленок ПКК, легированного Ge.

В результате самоорганизованы плотные массивы островков высотой 3,5...40 нм и плотностью $2,7 \cdot 10^7 ...3,5 \cdot 10^9$ см⁻². Полученные результаты указывают на принципиальную возможность осуществить самоорганизацию НК Ge и твердого раствора Si—Ge в результате разложения моногидридов Si и Ge в режиме осаждения пленок ПКК.

Список литературы

1. Востоков Н. В., Гусев С. Н., Дроздов Ю. Н., Красильник З. Ф., Лобанов Д. Н. и др. Упругие напряжения и состав самоорганизующихся наноостровков Si—Ge на Si (001) // ФТП. 2000. Т. 34. № 1. С. 8–12.

2. Володин В. А., Ефремов М. В., Никифоров Ф. И., Орехов Д. А., Пчеляков О. П., Ульянов В. В. Резонансное комбинационное рассеяние света в наноостровках Ge, сформированных на подложке Si (111), покрытой ультратонким слоем SiO₂ // ФТП. 2003. Т. 37. № 10. С. 1220—1224. 3. Востоков Н. В., Дроздов Ю. Н., Красильник З. Ф.

3. Востоков Н. В., Дроздов Ю. Н., Красильник З. Ф. и др. Влияние предосаждения Si_{1-x}Ge_x слоя на рост SiGe/Si самоформирующихся островков // ФТТ. 2005. Т. 47. № 1. С. 29—32.

4. Никифоров Ф. И., Ульянов В. В., Пчеляков О. П., Тийс С. А., Гутоковский А. К. Рост и структура наноостровков Ge на атомарночистой поверхности окиси Si // ФТТ. 2004. Т. 46. № 1. С. 80-82.

5. **Герасименко Н. Н.** Наноразмерные структуры в имплантированных полупроводниках // Российский химический журнал. 2002. Т. XLVI. № 5. С. 30—41.

6. Жигулин Д. В., Бабушкина Н. В., Ковалевский А. А. Исследование зарядовых свойств границы раздела оксид иттрия—кремний // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Приложение к журналу "Молодежь в науке" 2007. Ч. 3. С. 16—18.

7. Яремко А. М., Волах М. Я., Джаган В. Н., Литвин П. М., Юхимчук В. А. Взаимосвязь минимумов поверхностной энергии самоиндуцированных наноостровков SiGe и их формы // Физика и техника полупроводников. 2006. Т. 40. Вып. 4. С. 391—396.

8. Ковалевский А. А. Особенности взаимодействия германия с пленками поликристаллического кремния // Материалы. Технологии. Инструменты. 2006. Т. 11. № 1. С. 51–56.

УДК 534.24

С. Ш. Рехвиашвили, канд. физ.-мат. наук, З. В. Шомахов, аспирант, А. М. Кармоков, д-р физ.-мат. наук, Кабардино-Балкарский государственный университет, г. Нальчик, e-mail: rsergo@mail.ru

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЗОНДА С ПОВЕРХНОСТЬЮ МЕТАЛЛОВ

Экспериментально исследована акустическая эмиссия, возникающая при ударе твердого зонда (корунд) о поверхность металлов. Измерения показали, что интенсивность звука возрастает прямо пропорционально амплитуде колебаний зонда, что согласуется с теоретическими представлениями. Акустическая эмиссия при взаимодействии зонда с поверхностью может использоваться для диагностики вязкоупругих свойств материалов, а также в атомно-силовом микроскопе при построении изображений поверхности.

Ключевые слова: удар зонда по поверхности твердого тела, акустическая эмиссия, скорость звука, металлы, атомно-силовой микроскоп.

Введение

Зондовые методы исследования поверхности твердых тел в последнее время стали во многом незаменимыми. К таким методам относятся туннельная зондовая микроскопия, атомно-силовая микроскопия, магнитно-силовая микроскопия и емкостная зондовая микроскопия. Одним из традиционных методов диагностики твердых тел является метод регистрации акустической эмиссии [1—3]. Идея акустических измерений нашла новое применение и в зондовой микроскопии. По всей видимости, впервые звуковое детектирование в атомно-силовом микроскопе (ACM) предложено в работе [4]. 9. Ковалевский А. А. Подавление рекристаллизационных процессов в поликристаллических пленках кремния аморфными слоями кремния // Микроэлектроника. 1998. Т. 27. № 1. С. 16—21.

10. Ковалевский А. А., Долбик А. В. Особенности структуры германосодержащих поликристаллических пленок кремния // Материалы. Технологии. Инструменты. 2006. Т. 11. № 2. С. 60—65.

11. Пархоменко Ю. Н., Белогорохов А. И., Герасименко Н. Н., Иржак А. В., Лисаченко М. Г. Свойства самоорганизованных SiGe — наноструктур, полученных методом ионной имплантации // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 39. Вып. 5. С. 593—596.

12. Володин В. А., Гацкевич Е. И., Двуреченский А. В., Ефремов М. Д., Ивлев Г. Д. Модифицирование НК германия в кремнии под действием импульсного лазерного изучения // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 23. Вып. 11. С. 1352—1357.

Затем эта идея развивалась в других работах (в частности, в работах [5-8]). В классических ультразвуковых методах зондирования разрешающая способность определяется длиной волны акустического источника. В лучших акустических микроскопах она достигает 1 мкм. При использовании в качестве передатчика акустических колебаний детектирующей системы АСМ удается значительно повысить разрешающую способность. В данном случае разрешающая способность ограничивается размерами кончика зонда (~10...20 нм). Акустические измерения проводятся в контактом режиме АСМ. При этом между сканером и образцом размещают специальный пьезоэлектрический элемент, который возбуждает звуковые колебания в полосе частот от 1 до 15 МГц. Акустические волны, возникающие в образце, передаются в консоль, отклонения которой в процессе сканирования измеряются прецизионным оптическим методом. Указанным способом удается получать достаточно контрастные акустические изображения поверхности исследуемого образца. Имеется также возможность измерять амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики системы зонд-образец в заданной точке сканирования, которые отражают упругие свойства поверхности [7]. Положения экстремумов этих характеристик определяются физическими свойствами системы зонд-образец. В работе [9] рассматривалась иная возможность. С помощью макета АСМ измерялась трибоакустическая эмиссия при скольжении зонда по поверхности твердого тела. Здесь звуковой сигнал перспективно применять для визуализации топографии поверхностей твердых тел, изучения процессов трения и изнашивания, а также для исследования различных физических процессов, связанных с распространением звука в твердых телах. В качестве датчика акустического сигнала используется чувствительный пьезоэлектрический элемент, установленный

либо на поверхности исследуемого образца, либо с тыльной его стороны. В зависимости от способа закрепления датчика имеется возможность регистрировать как поверхностные (рэлеевские), так и объемные звуковые волны. В отсутствие износа интенсивность звуковых волн будет характеризовать топографию поверхности исследуемого образца.

В настоящей работе развивается идея работы [9]. Проведены измерения акустической эмиссии, возникающей при вертикальном простукивании зондом поверхности металлических образцов (так называемая тэйппинг-мода ACM от англ. *tapping* — простукивающий). Метод предлагается использовать для определения вязкоупругих свойств материалов. Несмотря на всю простоту, использованный метод по основной своей сути отличается от всех известных методов акустических исследований твердых тел [1—8]. Дана теоретическая интерпретация экспериментальных результатов.

Эксперимент

В эксперименте использовали измерительный стенд [9], конструкция которого была несколько модифицирована. Структурная схема стенда приведена на рис. 1, а. Его принцип работы заключается в следующем. С задающего генератора 1 переменный сигнал синусоидальной формы подается на катушку индукционного механического осциллятора 2, упругий элемент которого изготовлен в виде тонкой металлической балки. В результате этого корундовый зонд 3, закрепленный на балке, совершает механические колебания, нанося удары по поверхности исследуемого образца 4. Амплитуда колебаний балки зависит от значения прикладываемого к катушке переменного напряжения. Звукосниматель 5 измеряет интенсивность поверхностных звуковых волн, вызванных ударами зонда о поверхность образца. Сигналы с генератора и звукоснимателя подаются на двухканальный осциллограф 6.

В качестве образцов использовались круглые металлические пластины Pb, Al, Cu и Ta диаметром 6 см и толщиной 3 мм. Радиус кривизны кончика зонда равнялся приблизительно 100 мкм. Расстояние между зондом и звукоснимателем было фиксировано и составляло 7 мм. Частота возбуждающего сигнала 24 Гц. Виброизоляция и акустическая развязка в стенде позволили надежно избавиться от механических шумов в пределах чувствительности звукоснимателя, которая по напряжению была не хуже 10 мкВ.

Сигнал акустической эмиссии в процессе измерений зависит от выбранного первоначально расстояния зонд—образец. Это расстояние в эксперименте устанавливали следующим образом. Колеблющийся с минимальной амплитудой зонд с помощью микровинта подводили к образцу, и при этом измеряли сигнал акустической эмиссии. Расстояние зонд—образец фиксировали в тот момент, когда интенсивность эмиссии достигала максимального значения. Отметим, что в стандартных АСМ этому соответствует подвод зонда к образцу в тэйппинг-моде при заданном "Set Point".

На рис. 1, δ показана измеренная с помощью стенда осциллограмма: 1 — сигнал, подаваемый на катушку осциллятора; 2 — акустический сигнал. В моменты времени, соответствующие минимуму и максимуму задающего сигнала 1, происходят смещения балки с зондом. При этом балка с зондом по инерции продолжает совершать затухающие колебания, налетая и отскакивая от исследуемой поверхности с частотой, близкой к собственной частоте. Как продемонстрировали многочисленные эксперименты, степень затухания этих колебаний существенным образом зависит от вязкоупругих свойств образца. Максимумам сигнала 2 соответствуют удары зонда о поверхность.

Амплитуду колебаний балки изменяли с помощью генератора. Вместе с этим измеряли интенсивность акустической эмиссии. Как и ожидалось, интенсивность звука оказалась пропорциональной силе удара зонда о поверхность образца. На рис. 2 приведены зависимости интенсивности акустического сигнала от амплитуды возбуждающего сигнала для различных металлов. По координатным осям отло-



Рис. 1. Измерение акустической эмиссии:

а — структурная схема стенда; *б* — осциллограмма акустической эмиссии при ударах корундового зонда о поверхность алюминия

жены максимальные измеренные амплитуды напряжений с генератора и звукоснимателя. Для каждого образца проводилась серия из пяти измерений. При этом средняя абсолютная погрешность составила ~5 % при доверительной вероятности 0,9.

Анализ

Представляет интерес физическая интерпретация зависимостей, приведенных на рис. 2, а также приложение описанного выше метода регистрации акустической эмиссии к диагностике упругих свойств материалов. При ударе зонда о поверхность образца в нем могут возбуждаться как продольные,



так и поперечные упругие волны. Поскольку в нашем случае звукосниматель установлен на поверхности образца, то в процессе эксперимента регистрируются поверхностные акустические волны с вертикальной поляризацией — волны Рэлея, распространяющиеся вдоль поверхности. Правомерно считать [10], что фазовая скорость волны Рэлея пропорциональна фазовой скорости соответствующей плоской поперечной волны и не имеет дисперсии:

$$c_R \approx 0.9 c_t = 0.9 \sqrt{\frac{G}{\rho}},\tag{1}$$

где c_t — фазовая скорость поперечной упругой волны; G — модуль сдвига; ρ — плотность. Следует иметь в виду, что волна Рэлея отличается своими свойствами от идеальной сдвиговой плоской волны. Однако, как известно из геометрической акустики, волну, не являющуюся плоской, в небольшом участке пространства можно рассматривать как плоскую. Для этого необходимо, чтобы направление и амплитуда волны не менялись на протяжении расстояний порядка длины волны. Если среда является линейной и непоглощающей, то амплитуда волны Рэлея должна однозначно определяться силой удара твердого зонда о поверхность образца.

Для описания поставленного эксперимента в качестве простой модели можно принять сталкивающиеся шары (зонд и звукосниматель) с пружиной (образцом) между ними. Уравнения, определяющие движение зонда и звукоснимателя, записываются на основе законов сохранения импульса и энергии:

$$m_1 v_0 = m_2 u - m_1 v; (2)$$

$$\frac{m_1 v_0^2}{2} = \frac{m_2 u^2}{2} + \frac{m_1 v^2}{2} + W,$$
 (3)

где m_1, m_2 — эффективные массы зонда и образца со звукоснимателем, v_0 — начальная скорость зонда; v — скорость отскока зонда после соударения с образцом; u — скорость отклонения звукоснимателя; W — энергия, затрачиваемая на деформацию поверхности образца. Совместное решение уравнений (2), (3) дает

$$m_2 u = M v_0 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{2W}{M v_0^2}} \right), \tag{4}$$

где $M = m_1 m_2/(m_1 + m_2)$ — приведенная масса. Упругую энергию можно представить в виде $W = kx^2/2$, поэтому из (4) получаем дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$m_2 \frac{dx}{dt} = M v_0 \left(1 + \sqrt{1 - (x/x_0)^2} \right),$$
 (5)

где $x_0 = v_0 \sqrt{M/k}$, k — коэффициент жесткости. Точное решение уравнения (5) есть

$$\frac{\sqrt{x_0^2 - x^2 + x \arcsin(x/x_0) - x_0}}{x/x_0} = \frac{m_1 v_0 \tau}{m_1 + m_2}, \qquad (6)$$

где т — продолжительность удара. Если для металлических поверхностей и зонда выполняются естественные условия $m_1 \ll m_2$, $x \ll x_0$, $\sqrt{x_0^2 - x^2} \approx x_0 - x^2/(2x_0)$ и $\arcsin(x/x_0) \approx x/x_0$, то из (6) окончательно находим

$$x = \frac{2m_1}{m_2} v_0 \tau.$$
 (7)

Сила удара, которая в конечном счете передается в звукосниматель, с учетом (7) и (1) равна

$$F = 2m_1 v_0 \sqrt{k/m_2} \propto c_R. \tag{8}$$

При записи выражения (8) подразумевалось, что $\tau^{-1} = \sqrt{k/m_2} \propto \sqrt{G/\rho}$. Физический смысл результата (8) очевиден: сила удара твердого зонда о поверхность более мягкого образца пропорциональна скорости поверхностной волны, т. е. определяется упругими свойствами исследуемого образца.

Для практического применения акустической эмиссии в целях определения скорости поперечной упругой волны требуются калибровка измерительного тракта стенда и эталонный образец. Если тракт линейный, то с учетом (8) и (1) для максимальной амплитуды выходного напряжения можно написать следующую формулу:

$$U_s = Bc_t U_g, \tag{9}$$

где B — калибровочный коэффициент, зависящий от характеристик измерительного тракта; U_g — амплитуда напряжения возбуждающего сигнала. Поскольку

Характеристики материалов

Металл	<i>c_t</i> , 10 ³ , м/с [11]	<i>c_t</i> , 10 ³ , м/с (наст. работа)	Е, ГПа [11]	δ
Pb	0,7	0,9	1418	3
Al	3,08	3,4	6972	2,3
Cu	2,26	1,7	110130	1,2
Ta	—	1,5	190	0,9

условия эксперимента не меняются (что принципиально важно), то коэффициент B должен оставаться постоянным. В нашем случае калибровка осуществлялась с помощью метода наименьших квадратов на основе измеренных зависимостей U_s от U_g и справочных значений скоростей поперечной упругой волны, взятых из работы [11], для трех образцов Al, Си и Рb. Найденный оптимальный калибровочный коэффициент составил $B = 1,45 \cdot 10^{-5}$ с/м. Далее определялись скорости поперечной упругой волны, которые вместе со справочными данными из работы [11] сведены в таблице. Так как качество использованных образцов (состав, дефекты, оксиды на поверхности и т.п.) специально нами не контролировалось, то совпадение с литературными данными можно считать приемлемым. Это позволяет рекомендовать зондовый метод возбуждения акустической эмиссии как достаточно надежный и несложный (например, по сравнению с современной разрывной машиной и склерометром [12]) способ изучения упругих свойств металлов.

В последнем столбце таблицы приведены логарифмические декременты затухания, которые характеризуют уменьшение амплитуды колебаний зонда со временем и, следовательно, вязкоупругие свойства образца. При максимальном возбуждающем сигнале декременты рассчитывались по формуле

$$\delta = \ln \left(\frac{U_s(t)}{U_s(t+T)} \right), \tag{10}$$

где T — условный период колебаний. Как видно из таблицы, декремент затухания обратно пропорционален модулю упругости металлов. Коэффициент корреляции для зависимости δ^{-1} от *E* достигает 0,97.

Заключение

Особый интерес представляет изучение акустической эмиссии, возникающей при вертикальном движении зонда на субмикронном уровне масштаба. Здесь открываются новые возможности для исследования особенностей зарождения и последующего движения дислокаций в контактной зоне [9, 13], а также взаимодействия зонда с электронной и фононной подсистемой [14]. Для этих целей требуется применение ACM с кардинально модернизированной системой детектирования. Необходимыми условиями применения такого ACM являются хорошая вибрационная изоляция и акустическая развязка между пьезоэлементом зонда и звукоснимателем. Перспективным здесь представляется применение высокоточных интерферометров для измерений колебаний поверхности твердого тела.

В качестве резюме выделим основные результаты статьи:

 реализована методика измерения акустической эмиссии при взаимодействии зонда с поверхностью металлов;

 на основе экспериментов и теоретических представлений показана возможность использования методики для исследования вязкоупругих свойств металлов;

3) полученные в рамках методики значения скорости поперечной упругой волны для металлов удовлетворительно согласуются с известными литературными данными.

Список литературы

1. **Красильников В. А.** Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах. — М.: Физматгиз, 1960. — 560 с.

2. **Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б.** Ультразвуковые методы в физике твердого тела. — М.: Мир, 1972. — 308 с.

3. Грешников В. А., Дработ Ю. Б. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. — М.: Стандартиздат, 1976. — 272 с.

4. Kolosov O., Yamanaka K. Nonlinear detection of ultrasonic in an atomic force microscope // Jap. J. Appl. Phys. 1993. Pt. 2. V. 32. N. 8A. P. 1095–1098.

5. **Rabe U., Arnold W.** Acoustic microscopy by atomic force microscopy // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. N. 12. P. 1493–1495.

6. **Rabe U., Dvorak M., Arnold W.** The atomic force microscope as a near-field probe for ultrasound // Thin Solid Films. 1995. V. 264. N. 2. P. 165–168.

7. Efimov A. E., Saunin S. A. Atomic force acoustic microscopy as a tool for polymer elasticity analysis // Proc. of the All-Russia Conference "Scanning probe microscopy-2002", N. Novgorod, IPM RAS. 2002. P. 79–81.

8. Батог Г. С., Батурин А. С., Бормашов В. С., Шешин Е. П. Расчет толщин и упругих свойств тонкопленочных покрытий на основании данных атомно-силовой акустической микроскопии // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 8. С. 123—128.

9. Рехвиашвили С. Ш. Дислокационный механизм трения в наноконтактах // ЖТФ. 2002. Т. 72. № 2. С. 140—142.

10. Викторов И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. — М.: Наука, 1981. — 286 с.

11. Физические величины: справочник / Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др.; Под ред. Григорьева И. С., Мейлихова Е. З. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.

12. Новые решения для испытаний материалов. Каталог INSTRON (www.instron.com), 2007.

13. Саралидзе З. К., Галусташвили М. В. Дриаев Д. Г. О механизмах массопереноса при наноиндентировании // ФТТ. 2006. Т. 48. № 7. С. 1229—1230.

14. **Попов В. Л.** Электронный и фононный механизмы трения в атомно-плотном контакте кристаллических тел при низких температурах // ЖТФ. 2000. Т. 70. № 5. С. 51—60.

К. Е. Каменцев¹, научный сотрудник, А. Ю. Остащенко¹, канд. физ.-мат. наук, ассистент, Л. Ю. Фетисов², студент, ¹ Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

ВЛИЯНИЕ ПРОВОДИМОСТИ НА ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛЕНОЧНОЙ СТРУКТУРЕ ФЕРРИТ— ПЬЕЗОЭЛЕКТРИК

Исследован магнитоэлектрический эффект в многослойной структуре, изготовленной методом толстопленочной керамической технологии и содержащей слои никель-цинкового феррита и цирконата-титаната свинца. Показано, что частотная зависимость проводимости слоев приводит к формированию максимума напряжения, генерируемого структурой под действием переменного внешнего поля. Структуры перспективны для создания датчиков переменных магнитных полей.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, пленочная структура, пьезоэлектрик, феррит, датчик магнитного поля.

Введение

Электрическое напряжение в многослойных планарных структурах, содержащих слои ферромагнетика и пьезоэлектрика, генерируется благодаря магнитоэлектрическому (МЭ) взаимодействию, возникающему в результате комбинации свойств отдельных слоев [1]. При приложении к структуре внешнего магнитного поля Н магнитострикция вызывает деформацию магнитных слоев в плоскости структуры, вследствие механической связи между слоями деформация передается слоям пьезоэлектрика, пьезоэффект приводит к возникновению электрического поля Е в пьезоэлектрических слоях и появлению электрического напряжения U на гранях структуры. Эффективность МЭ взаимодействия характеризуют коэффициентом $\alpha_E = U/(H \cdot b)$, где b толщина структуры. Для структур, содержащих слои с большой магнитострикцией и большим пьезомодулем, МЭ коэффициент может достигать значений $\alpha_E \approx 0,1...10$ В · см⁻¹Э⁻¹, что на несколько порядков выше, чем для однофазных кристаллов.

Высокая эффективность МЭ взаимодействия в многослойных структурах делает их перспективными для создания датчиков и преобразователей магнитных полей [1, 2]. Важной характеристикой устройств является частотная зависимость генерируемого напряжения, которая определяется в основном видом зависимости коэффициента $\alpha_E(f)$ от частоты f изменения магнитного поля. Экспериментально обнаружено, что для структур никелевый феррит — цирконат-титанат свинца коэффициент α_E в области низких частот, вдали от акустических резонансов, либо медленно увеличивается [3], либо резко падает с увеличением частоты [4]. Объяснение такого различного поведения коэффициента $\alpha_E(f)$ и его связи с электрическими характеристиками МЭ структур до настоящего времени отсутствовало.

В данной работе показано, что значение напряжения, генерируемого структурами ферромагнетик—пьезоэлектрик, определяется не только эффективностью МЭ взаимодействия, но и существенно зависит от электрической проводимости слоев структуры. Проводимость слоев приводит к экранированию связанных зарядов, возникающих на границах пьезоэлектрика, и уменьшению амплитуды напряжения. Учет частотной зависимости проводимости слоев объясняет формирование низкочастотного максимума МЭ напряжения в многослойных пленочных структурах феррит—пьезоэлектрик.

Структуры и методики измерений

В исследованиях использовали многослойные структуры, изготовленные методом толстопленочной керамической технологии [3]. Структуры содержали N = 10...15 слоев цирконата-титаната свинца (PZT) состава PbZr_{0,52}Ti_{0,48}O₃ и N + 1 слоев никельцинкового феррита (NZFO) состава Ni_{0,7}Zn_{0,3}F₂O₄. Толщина PZT слоев равнялась толщине NZFO слоев и для различных образцов составляла 10...30 мкм. Структуры спекали при температуре 1350 °C, а затем медленно охлаждали до комнатной температуры. На поверхности изготовленных структур наносили проводящие контакты и поляризовали PZT слои, прикладывая к контактам постоянное напряжение 5 кВ в течение 5 ч при температуре 100 °C.

Геометрия структуры схематически изображена на вставке рис. 1. Боковая грань рисунка структуры представляет собой фотографию участка поперечного сечения реального образца. Видно, что после обжига сохраняется четкая слоистая структура, неравномерность толщины слоев не превышает 10 %. Рентгеноструктурный анализ показал, что обжиг структур не приводит к образованию каких-либо новых фаз. После тестирования диэлектрических и магнитных параметров серии структур был выбран типичный образец, результаты исследований которого приведены ниже. Образец имел размеры $7,3 \times 7,1 \times 0,5$ мм и содержал 10 слоев РZT и 11 слоев NZFO толщиной по ~18 мкм каждый.

В ходе измерений образец помещали между полюсами электромагнита в постоянное магнитное поле смещения H = 0...3 кЭ, направленное параллельно либо перпендикулярно к плоскости слоев струк-



Рис. 1. Зависимости напряжения U, генерируемого NZFO—PZT структурой, от частоты f модуляции поля при разных полях смещения H, Э:

I-240 Э; 2-620 Э; 3-1750 Э. На вставке показана геометрия структуры

туры. Одновременно к образцу прикладывали переменное поле $h(t) = h_0 \cos(2\pi f t)$ того же направления с частотой f = 20 Гц ... 200 кГц и амплитудой до $h_0 = 6$ Э, созданное катушками с сопротивлением 12 Ом и индуктивностью 20 мГн, подключенными к генератору. С помощью цифрового осциллографа с входным сопротивлением 1 МОм регистрировали амплитуду U низкочастотного переменного напряжения, генерируемого на контактах образца вследствие МЭ взаимодействия. Частотные зависимости сопротивления R(f) и емкости C(f) структуры снимали с помощью *LRC*-измерителя Quadtech.

Результаты измерений и расчетов

На рис. 1 показаны измеренные зависимости амплитуды МЭ напряжения U, генерируемого структурой, от частоты f модуляции магнитного поля. Кривые 1 и 2 соответствуют касательно намагниченной структуре, а кривая 3 — нормально намагниченной структуре. Выбранные значения полей смещения отвечают максимальному (при $H_1 = 240$ Э) и промежуточному (при $H_2 = 620$ Э) значениям МЭ напряжения для касательно намагниченной структуры и максимальном значении напряжения (при $H_3 = 1750$ Э) для нормально намагниченной структуры. Для данной структуры динамический МЭ коэффициент достигал наибольшего значения $\alpha_E = U/(h_0 \cdot b) = 25$ мВ \cdot см⁻¹Э⁻¹.

Из рис. 1. видно, что форма частотной зависимости МЭ напряжения U(f) практически не зависит от значения и ориентации постоянного магнитного поля смещения H, изменяется только амплитуда генерируемого напряжения. Во всех случаях U достигает максимума вблизи частоты $f \approx 1,5$ кГц, резко и примерно линейно падает при уменьшении частоты до 20 Гц и плавно снижается при увеличении частоты до 200 кГц. Для анализа полученных частотных зависимостей используем теоретически найденную связь между амплитудой МЭ напряжения *U*, генерируемого структурой с непроводящими слоями, и параметрами структуры [5]:

$$U = \alpha_E bh_0 = A \frac{qd_{13}}{B\epsilon - d_{13}^2} bh_0.$$
 (1)

В соотношении (1) пьезомагнитный коэффициент $q = q_{11} + q_{12}$ для касательно намагниченной структуры и $q = q_{13}$ для нормально намагниченной структуры, d_{13} — пьезоэлектрический коэффициент, ε — эффективная диэлектрическая проницаемость структуры. Выражения для коэффициентов *A* и *B* приведены в работе [5], их значения определяются механическими свойствами, соотношением толщин и площадью слоев структуры.

В низкочастотной области f < 200 кГц коэффициенты $q_{11}, q_{12}, q_{13}, d_{13}, A$ и B от частоты не зависят. Эффективная проницаемость ε , как показали измерения емкости структуры, незначительно уменьшается с ростом частоты. Поле h_0 падает с ростом частоты вследствие индуктивности модулирующих катушек. В целом, частотная зависимость перечисленных параметров не позволяет даже качественно описать форму кривых U(f) на рис. 1.

Объяснить вид частотной зависимости МЭ напряжения U(f) можно, приняв во внимание проводимость слоев структуры. Представим структуру в виде конденсатора с емкостью *C* и сопротивлением *R*. При гармонической модуляции поля на обкладках конденсатора вследствие МЭ эффекта генерируются связанные заряды $Q = Q_0 \cos(2\pi ft)$ противоположных знаков. Амплитуда связанного заряда пропорциональна амплитуде поля $Q_0 = Kh_0$, где коэффициент *K* определяется значениями *q*, d_{13} , механическими свойствами и площадью слоев структуры и не зависит от частоты. Напряжение на обкладках конденсатора определяется выражением

$$U(f) = \frac{Kh_0}{C} \frac{2\pi fRC}{\sqrt{1 + (2\pi fRC)^2}} \cos\left[2\pi ft - \arctan\left(\frac{1}{2\pi fRC}\right)\right].$$
(2)

Из выражения (2) следует, что амплитуда и фаза генерируемого МЭ напряжения зависят, главным образом, от произведения $2\pi fRC$. Амплитуда напряжения прямо пропорциональна этому произведению при $2\pi fRC \ll 1$ и выходит на постоянный уровень насыщения при $2\pi fRC > 1$. Напряжение всегда отстает по фазе от модулирующего магнитного поля, причем сдвиг фаз в области низких частот может достигать $\sim \pi/2$ при $2\pi fRC \ll 1$. Амплитуда и фаза МЭ напряжения зависят от частоты модуляции поля f явно и, кроме того, неявно через частотную зависимость сопротивления R и емкости C структуры.



Рис. 2. Измеренные частотные зависимости для NFZO-PZT структуры:

a — сопротивления R и емкости C; δ — произведения $2\pi fRC$ и амплитуды h_0 модулирующего поля



структурой, от частоты *f* **модуляции поля:** точки — эксперимент, треугольники — расчет

Физическая причина появления частотной зависимости напряжения состоит в экранировании связанных зарядов свободными зарядами, существующими в конденсаторе с конечной проводимостью. Для рассматриваемых МЭ структур вклад в экранирование вносят как магнитострикционные, так и пьезоэлектрические слои, причем основную роль играют слои с наименьшей проводимостью, как правило — слои феррита [6].

На рис. 2, *а* приведены измеренные зависимости R(f) и C(f) для исследованной NZFO—PZT структуры. В диапазоне изменения частоты от 20 Гц до 100 кГц емкость структуры уменьшалась приблизительно в 6 раз, а сопротивление падало более, чем на 3 порядка. Уменьшение *R* с ростом частоты типично для диэлектриков, обусловлено прыжковым

механизмом проводимости и для однородных материалов подчиняется закону $R \sim 1/f$ [7]. Несколько более быстрое уменьшение R с ростом частоты в данном случае может быть обусловлено слоистостью образцов и различной зависимостью сопротивления слоев РZT и NZFO от частоты.

На рис. 2, б показана частотная зависимость произведения $2\pi fRC$, построенная с использованием данных рис. 2, *а*. Зависимость имеет четко выраженный максимум в области частот вблизи ~1 кГц. Уменьшение значения $2\pi fRC$ на частотах ниже 1 кГц происходит, главным образом вследствие уменьшения частоты *f*, а на частотах выше максимума вследствие резкого падения сопротивления *R* структуры. На рис. 2, б приведена также измеренная частотная зависимость амплитуды модулирующего поля $h_0(f)$. Видно, что уменьшение амплитуды поля вследствие индуктивности модулирующих катушек начинается в области более высоких частот (f >> 10 кГц), чем частота, где расположен максимум произведения $2\pi fRC$.

На рис. З показаны измеренная и рассчитанная частотные зависимости напряжения U(f), генерируемого многослойной NZFO—PZT структурой. Теоретическая кривая рассчитана по формуле (2) с использованием экспериментально найденных зависимостей R(f), C(f) и $h_0(f)$. Для удобства сравнения обе кривые нормированы на максимальное значение напряжения. Видно, что учет частотной зависимости проводимости и диэлектрической проницаемости структуры позволяет хорошо объяснить экспериментальные данные.

Заключение

Таким образом, проводимость слоев многослойных МЭ структур приводит к появлению частотной зависимости электрического напряжения, генерируемого структурой. В области низких частот амплитуда напряжения падает примерно линейно с уменьшением частоты, напряжение отстает по фазе от модулирующего поля. В области более высоких частот вид зависимости напряжения от частоты определяется главным образом частотной зависимостью проводимости слоев структуры. Если сопротивление слоев структуры постоянно или падает с ростом частоты медленнее, чем ~1/f, то амплитуда генерируемого напряжения не зависит от частоты. Если сопротивление слоев с ростом частоты падает быстрее, чем $\sim 1/f$, то амплитуда напряжения уменьшается, что приводит к формированию максимума МЭ напряжения в низкочастотной области. Исследованные структуры перспективны для создания датчиков переменных магнитных полей.

Работа поддержана Министерством образования и науки России (проект 1351) и Российским фондом фундаментальных исследований (грант 08-02-12151-офи).

Список литературы

1. Nan C., Bichurin M. I., Dong S. et al. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspectives, status, and future directions // J. Appl. Phys. 2008. V. 103. P. 031101.

2. Bush A. A., Fetisov Y. K., Kamentsev K. E. et al. Ferritepiezoelectric multilayers for magnetic field sensors // IEEE Sensors J. 2006. V. 6. N 4. P. 935–938.

3. Srinivasan G., Rasmussen E. T., Gallegous J. et al. Magnetoelectric bilayer and multilayer structures of magnetostrictive and piezoelectric oxides // Phys. Rev. B. 2001. V. 64. Paper 214408.



УДК 621.3.049.77 + 62-791.2

В. В. Егоров, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ЦНИТИ "Техномаш", г. Москва, e-mail: v-sphinks@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИЧЕСКИХ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЯХ. СКАЛЯРНОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ. ЧАСТЬ II*

Проведены вычисления статистических характеристик поля, рассеянного статистически неровной в среднем плоской абсолютно мягкой поверхностью. Показано, что так же, как и для граничного поля, характеристики рассеянного сигнала, рассчитанного в приближении интегрального уравнения, могут существенно отличаться от своих аналогов, рассчитанных в приближении метода Кирхгофа.

Ключевые слова: граничная задача, метод интегрального уравнения, радиус корреляции неровностей, граничное поле, рассеянное поле.

Мы продолжаем изучение статистических характеристик поля, рассеянного неровной в среднем плоской абсолютно мягкой поверхностью. Нас интересуют его параметры в дальней зоне. Интерес представляют такие характеристики эхосигнала (рассеянного поля), как уровень полезной составляющей по отношению к уровню сигнала, отражен-

* Часть I опубликована в № 3, 2009.

4. Остащенко А. Ю., Каменцев К. Е., Фетисов Ю. К., Srinivasan G. Магнитоэлектрический отклик многослойной структуры феррит-пьезоэлектрик на импульс магнитного поля // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. № 18. С. 36-41.

5. Harshe G., Dougherty J. P., Newnham R. E. Theoretical modeling of multilayer magnetoelectric composites // Int. J. Appl. Electromag. Mater., 1993. V. 4. P. 145–155.

6. Петров В. М., Бичурин М. И., Srinivasan G. Максвелл-Вагнеровская релаксация в магнитодиэлектрических композиционных материалах // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. № 8. С. 81–87.

7. Jonscher A. K. Dielectric relaxation in solids. London: Chelsea Dielectric Press, 1983. 380 p.

ного от граничной поверхности и маскирующего полезный сигнал. Другой тип задач приходится решать при определении микроструктуры поверхности наблюдаемого объекта. Приближение Кирхгофа, традиционно применяемое для таких задач, не всегда приемлемо. Поэтому в качестве альтернативного варианта в данной работе был использован метод интегрального уравнения. Считаем, что поверхность в среднем плоская, абсолютно мягкая, а неровности пологие. Поле неровностей полагается Гауссовым и изотропным. Напомним, что в приближении Лысанова (метод интегрального уравнения) граничное поле описывается выражением

$$g(r') = -\frac{1}{\pi} k^2 (n_i, n_0)^2 \times$$
$$U_0 \int_S \frac{\mathbf{e}^{ik|r-r'|}}{|r-r'|} \mathbf{e}^{ik([[n_i, n_0], n_0], r) + ik(n_1, n_0)z(r)} d^2r, \quad (1)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число; n_i — нормаль к фронту падающей волны; n_0 — нормаль к поверхности; *r* и *r'* — точки на подстилающей поверхности; U_0 — амплитуда падающей волны.

Падающая на поверхность волна определяется выражением

$$U(r; z) =$$

$$= U_0 \int_{S} \frac{\mathbf{e}^{ik|r-r'|}}{|r-r'|} \mathbf{e}^{ik([[n_i, n_0], n_0], r) + ik(n_1 n_0)z(r)} d^2r.$$
(2)

Здесь [,] — векторное и (,) — скалярное произведение соответственно; z(r) — высота неровности в точке (r).

Интегрирование в (1) проводится по точкам подстилающей поверхности. Пусть точка наблюдения находится в дальней зоне, область взаимодействия

Х

падающего поля с рассеивающей поверхностью совпадает с самой поверхностью. Тогда

$$MU(R) \approx \frac{1}{4\pi^2} k^2 (n_0, n_i)^2 U_0 \frac{\mathbf{e}^{ikR}}{R} \int_{S} \mathbf{e}^{ik([[n_s, n_0], n_0], r)} d^2 r \times \int_{S} \frac{\mathbf{e}^{ik|r-r'|}}{|r-r'|} \mathbf{e}^{ik([[n_0, n_i], n_0], r')} f_2(q_s, q_i, r, r') d^2 r', \quad (3)$$

где
$$f_2(q_s, q_i, r, r') = M \mathbf{e}^{ik(n_s, n_0)z(r) + ik(n_i, n_0)z(r')};$$
 (4)

 n_s — единичный вектор поверхности, направленный в точку R; M — оператор математического ожидания; $q_s = k(n_s, n_0); q_i = k(n_i, n_0).$

Представим двумерную характеристическую функцию поля неровностей в виде

$$f_2(q_s, q_i, r, r') = f_2(q_s, q_i, r, r') - -f_1(q_s)f_1(q_i) + f_1(q_s)f_1(q_i),$$
(5)

где f_1 — одномерные характеристические функции поля неровностей.

Полагая неровности крупными ($k^2 \sigma_z^2 \gg 1$, где σ_z^2 — дисперсия высоты неровностей), аппроксимируем разность первых двух слагаемых в (5) Гауссовой функцией

$$f_2(q_s, q_i, r, r') - f_1(q_s) f_1(q_i) \cong C \mathbf{e}^{-\beta^2 |r - r'|^2}, \qquad (6)$$

где

 $C = f_2(q_s, q_i, r, r') - f_1(q_s)f_1(q_i)|_{r = r'};$ $\beta^2 = f_2''(q_s, q_i, r, r')|_{r = r'}.$

В представлении (5) рассеянное поле является суммой двух полей: поля, отраженного от зеркальной поверхности *S*, ослабленного в $f_1(q_s)f_1(q_i)$ раз, и поля, статистические характеристики которого рассчитываются ниже. Для вычисления рассмотрим внутренний интеграл в (3), который, с учетом (5) и (6), перепишется в виде

$$I = C_{S} \frac{\mathbf{e}^{ik|r-r'|+ik([[n_{0}, n_{i}], n_{0}], r')}}{|r-r'|} \mathbf{e}^{-\beta^{2}|r-r'|^{2}} d^{2}r' =$$
$$= C \mathbf{e}^{ik([[n_{0}, n_{i}]n_{0}], r)} \int_{0}^{2\pi} d\phi \times$$
$$\times \int_{0}^{\infty} \mathbf{e}^{ik|\xi|+ik([[n_{0}, n_{i}], n_{0}], \xi)-\beta^{2}\xi^{2}} d\xi, \qquad (7)$$

где $\xi = r - r'$.

Учитывая, что $k^2 \sigma_z^2 \gg 1$, конечные пределы интегрирования можно заменить на бесконечные. При вычислении внутреннего интеграла в (7) полагаем, что

$$\frac{k(1 + |[n_0, n_i]|\cos\varphi)}{\beta} \gg 1,$$

где $\cos\varphi = \cos\{[[n_0, n_i], n_0]; \xi\}.$ (8)

Вместе с тем, (8) следует из соотношения

$$\frac{k(1+|[n_0,n_i]|)}{\beta} \gg 1,$$
(9)

которое мы также полагаем справедливым.

Выделяя в показателе экспоненты в интеграле по ξ в (7) полный квадрат и делая замену переменной, приводим интеграл к виду

$$I = \frac{C \mathbf{e}^{ik([[n_0, n_i]n_0], r)}}{\beta} \int_{0}^{2\pi} d\mathbf{\varphi} \mathbf{e}^{-\frac{k^2(1 + |[n_0, n_i]|\cos\varphi)^2}{4\beta^2}} \times \frac{\sum_{j=1}^{\infty} \frac{k^2}{\beta} \int_{0}^{1} \frac{k^2}{\beta} d\mathbf{\varphi} \mathbf{e}^{-s^2}}{s} ds,$$

rge $T = \frac{ik(1 + |[n_0, n_i]|\cos\varphi)}{2\beta}.$

В интеграле по *s* преобразуем путь интегрирования, т. е.

$$\int_{0+T}^{\infty+T} \mathbf{e}^{-s^2} ds = \int_{0}^{\infty} \mathbf{e}^{-s^2} ds - \int_{0}^{T} \mathbf{e}^{-s^2} ds.$$
(10)

Тогда, согласно (9) можно записать

$$I \approx C \mathbf{e}^{ik([[n_0, n_i]n_0], r)} \frac{2\pi}{ik(n_0, n_i)}.$$
 (11)

Заметим, что выражение (11) описывает граничное поле на плоской поверхности, индуцированное падающей волной. Таким образом, вторая компонента среднего поля, в пренебрежении краевыми эффектами, совпадает по величине с первой и противоположна ей по знаку, т. е. в рассматриваемом приближении среднее поле равно нулю. Раскладывая интеграл по *s* в (10) по малому параметру, получаем более точное значение. Действительно, первый интеграл в правой части (10) равен $\sqrt{\pi}$, а для второго интеграла в (10) рассмотрим выражение

$$I_{1} = i\mathbf{e}^{-\frac{k^{2}(1+|[n_{0},n_{i}]|\cos\varphi)^{2}}{4\beta^{2}}}\int_{0}^{T}\mathbf{e}^{t^{2}}dt,$$
 (12)

полученное подстановкой s = it. Вносим экспоненту под знак интеграла, преобразуем разность квадратов в показателе экспоненты в произведение и делаем замену переменной

$$y = \frac{ik(1 + |[n_0, n_i]|\cos\phi)}{2\beta} - i$$

после чего интеграл в (12) перепишется в виде

$$I_{1} = i \int_{0}^{\frac{1}{2}\tau} \mathbf{e}^{-\tau y + y^{2}} dy = \frac{i}{\tau} \int_{0}^{\frac{1}{2}\tau^{2}} \mathbf{e}^{-z + \frac{z^{2}}{\tau^{2}}} dz,$$

rge $\frac{1}{\tau} = \frac{\beta}{ik(1 + |[n_{0}, n_{i}]|\cos\varphi)}, \tau. e.$

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 4, 2009 -

$$I_{1} = \frac{i}{\tau} \left[1 + \frac{2}{\tau^{2}} + \dots \right] = i \left[\frac{\beta}{ik(1 + \left| [n_{0}, n_{i}] \right| \cos \phi)} + \frac{2\beta^{3}}{ik^{3}(1 + \left| [n_{0}, n_{i}] \right| \cos \phi)^{3}} + \dots \right].$$
(13)

Подстановкой (13) в (12) с последующим интегрированием по ϕ получаем выражение для расчета среднего поля:

$$MU(R) \approx \left[-\frac{1}{2\pi} k(n_0, n_i) U_0 \frac{\mathbf{e}^{ikR}}{R} \int_{s} e^{ik([[n_s, n_0], n_0] + (n_0, n_i), r)} d^2 r \right] \left\{ \frac{1}{2} \frac{\beta^2}{k^2} \frac{3 - 2(n_0, n_i)^2}{(n_0, n_i)^4} f_1(q_s) f_1(q_i) \right\}.$$
 (14)

Выражение в фигурных скобках в (14) описывает коэффициент ослабления среднего поля, а выражение в квадратных скобках определяет поле, отраженное зеркальной поверхностью *S*. Можно отметить, что ко-эффициент ослабления отличается от аналогичного параметра, полученного в Кирхгофовом приближении.

Согласно (1), второй момент рассеянного поля, наблюдаемого в точке *R*, находящейся в дальней зоне, определяется формулой

$$M[U(R)U * (R)] \approx \left(\frac{1}{4\pi^2}\right)^2 \frac{k^4(n_0, n_i)^4 U_0^2}{R^2} \int_{S} \mathbf{e}^{ik([[n_s, n_0], n_0], r-\nu)} d^2r d^2\nu \int_{S} \frac{\mathbf{e}^{ik|r-r'|}}{|r-r'|} \frac{\mathbf{e}^{ik|\nu-\nu'|}}{|\nu-\nu'|} \mathbf{e}^{ik([[n_0, n_i], n_0], r'-\nu')} \times f_4(q_s, -q_s, q_i, -q_i, r, r', \nu, \nu') d^2r' d^2\nu',$$
(15)

где

$$f_4 = M \mathbf{e}^{iq_s z(r) - iq_s z(v) + iq_i z(r') - iq_i z(r')},$$
(16)

* — комплексное сопряжение.

В соответствии с принятой моделью поля неровностей и предположения, что $k^2 \sigma_z^2 \gg 1$, можем разложить корреляционную функцию поля неровностей K_z в ряд Тейлора:

$$f_{4} = \exp\left\{\frac{1}{2}\sigma_{z}^{2}K_{z}''(0)\left[q_{s}^{2}(r-\nu)^{2} + q_{i}^{2}(r'-\nu')^{2} - q_{s}q_{i}(r'-\nu)^{2} + (r-\nu')^{2} - (r'-r)^{2} - (\nu-\nu')^{2}\right]\right\} = \\ = \exp\left\{\frac{1}{2}\sigma_{z}^{2}K_{z}''(0)\left[q_{s}(r-\nu) + q_{i}(r'-\nu')\right]^{2}\right\}.$$
(17)

При вычислении интеграла по r', обозначаемого через $I_{r'}$, заменой переменной $r' \to r' - r = \xi$ и переходом к полярным координатам приводим его к виду

$$I_{r'} = \mathbf{e}^{ik([[n_0, n_i], n_0], r) - \theta^2 u^2} \int_{0}^{2\pi} d\phi \int_{0}^{\infty} \mathbf{e}^{ik\xi + ik[[n_0, n_i]]\xi\cos(\psi - \phi) - \theta^2 q_i^2 \xi^2 + 2\theta^2 q_i u\xi\cos\phi} d\xi,$$
(18)

где ψ — угол между вектором $u = (q_s - q_i)(r - v) - q_i(v - v')$ и вектором $[[n_0, n_i], n_0]; \theta = \frac{1}{2} \sigma_z^2 K_z''(0) q_s^2$.

Выполнив замену переменной $\theta q_i = z$, выделяя полный квадрат в показателе экспоненты для слагаемых

$$i\frac{k}{\theta q_i}z + i\frac{k}{\theta q_i}|[n_0, n_i]|z\cos(\psi - \varphi) - z^2$$

и выполнив замену переменной

$$s = z + \frac{1}{2} \frac{k}{\Theta q_i} [n_0, n_i] |\cos(\psi - \phi)|,$$

преобразуя путь интегрирования так, как это было сделано при вычислении интеграла (7), и, наконец, проводя интегрирование по *s* в интеграле по полуинтервалу $[0, \infty)$, получаем

28 –

$$I_{r'} = \frac{\mathbf{e}^{ik([[n_{0}, n_{i}], n_{0}], r)}}{\theta q_{i}} \left\{ \frac{\sqrt{\pi}}{2} \int_{0}^{2\pi} d\phi \mathbf{e}^{-\frac{k^{2}}{4\theta^{2}q_{i}^{2}} [1 + |[n_{0}, n_{i}]| \cos(\psi - \phi)]^{2} + \frac{iku}{q_{i}} [1 + |[n_{0}, n_{i}]| \cos(\psi - \phi)] \cos\phi - \theta^{2} u^{2} \sin^{2}\phi}{\left[1 + ([n_{0}, n_{i}]] \cos(\psi - \phi)]^{2} + \frac{iku}{q_{i}} [1 + |[n_{0}, n_{i}]| \cos(\psi - \phi)] \cos\phi - \theta^{2} u^{2}}{\left[1 + ([n_{0}, n_{i}]] \cos(\psi - \phi)]^{2} + \frac{iku}{q_{i}} [1 + [[n_{0}, n_{i}]] \cos(\psi - \phi)] \cos\phi - \theta^{2} u^{2}}{\left[1 + ([n_{0}, n_{i}]] \cos(\psi - \phi)]^{2} + \frac{iku}{q_{i}} [1 + [[n_{0}, n_{i}]] \cos(\psi - \phi)] \cos\phi - \theta^{2} u^{2}}{\left[1 + ([n_{0}, n_{i}]] \cos(\psi - \phi)]^{2} + \frac{iku}{q_{i}} [1 + [[n_{0}, n_{i}]] \cos(\psi - \phi)] \cos\phi - \theta^{2} u^{2}}{\left[1 + ([n_{0}, n_{i}]] \cos(\psi - \phi)]^{2} + \frac{iku}{q_{i}} [1 + [[n_{0}, n_{i}]] \cos(\psi - \phi)] \cos\phi - \theta^{2} u^{2}}{\left[1 + ([n_{0}, n_{i}]] \cos(\psi - \phi)]^{2} + \frac{iku}{q_{i}} [1 + [[n_{0}, n_{i}]] \cos(\psi - \phi)] \cos\phi - \theta^{2} u^{2}}{\left[1 + ([n_{0}, n_{i}]] \cos(\psi - \phi)]^{2} + \frac{iku}{q_{i}} [1 + [[n_{0}, n_{i}]] \cos(\psi - \phi)] \cos\phi - \theta^{2} u^{2}}{\left[1 + ([n_{0}, n_{i}]] \cos(\psi - \phi)]^{2} + \frac{iku}{q_{i}} [1 + [[n_{0}, n_{i}]] \cos(\psi - \phi)] \cos\phi - \theta^{2} u^{2}}{\left[1 + ([n_{0}, n_{i}]] \cos(\psi - \phi)]^{2} + \frac{iku}{q_{i}} [1 + [[n_{0}, n_{i}]] \cos(\psi - \phi)] \cos\phi - \theta^{2} u^{2}}{\left[1 + ([n_{0}, n_{i}]] \cos(\psi - \phi)]^{2} + \frac{iku}{q_{i}} [1 + [[n_{0}, n_{i}]] \cos(\psi - \phi)] \cos\phi - \theta^{2} u^{2}}{\left[1 + ([n_{0}, n_{i}]] \cos(\psi - \phi)]} \right]} \right\}$$

где Ф — функция ошибок.

Предполагая выполнение условия (9), приводим интеграл $I_{r'}$ к виду

$$I_{r'} \approx 2\pi \frac{\mathbf{e}^{ik([[n_0, n_i], n_0], r)}}{ik(n_0, n_i)} \mathbf{e}^{-\theta^2 u^2},$$
(20)

поскольку первым слагаемым в (19) можно пренебречь по сравнению со вторым (условия, при которых возможно такое приближение, уточняются ниже). При вычислении интеграла по v' воспользуемся тем, что в соответствии с принятыми в (18) обозначениями, имеет место

$$u^{2} = ((q_{s} - q_{i})(r - v) - q_{i}(v - v'))^{2}.$$

Поэтому, выделяя в интеграле по v' только те члены, которые зависят от v - v', и, делая замену переменной $v \rightarrow v - v'$, приводим его к виду, аналогичному (18):

$$I_{v'} = \mathbf{e}^{ik([[n_0, n_i], n_0], v) - \theta^2 w^2} \int_{0}^{2\pi} d\phi \int_{0}^{\infty} \mathbf{e}^{ik\xi + ik | [[n_0, n_i], n_i] | \xi \cos(\psi - \phi)]^2 - \theta^2 q_i^2 \xi^2 + 2\theta^2 q_i v \xi \cos\phi} d\xi,$$
(21)

где $w = (q_s - q_i)(r - v); \psi$ — угол между векторами [[n_0, n_i], n_0] и w.

Таким образом, при выполнении условия (9), получаем выражение, аналогичное (20), с тем отличием, что вместо вектора u появляется вектор w, а вместо r — вектор v. Теперь подынтегральное выражение для интегралов по r и по v полностью соответствует тому, которое получается в приближении Кирхгофа. Поэтому окончательное выражение для второго момента полностью совпадает с тем, кото-

рое получается при условии $k^2 \sigma_z^2 \gg 1$.

Как уже отмечалось выше, полученное приближение соответствует вычислению интеграла в (19) методом стационарной фазы. Как следует из структуры выражения (19), первое слагаемое в фигурных скобках при больших значениях *и* убывает обратно пропорционально *и*, в то время как второе слагаемое

убывает не медленнее чем $e^{-\theta^2 u^2}$. Поэтому при более тщательной оценке составляющей поля, не связанной с Кирхгофовым приближением, необходимо рассмотреть только первое слагаемое в интеграле $I_{r'}$

по
$$r'$$
 в (19) и аналогично ему в интеграле $I_{v'}$ по v' .

Ниже мы рассмотрим пример, позволяющий определить приближенное соотношение между Кирхгофовой и некирхгофовой составляющими, иллюстрирующий в явной форме отличие принятого метода расчета от метода Кирхгофа. Для простоты анализа полагается, что поверхность абсолютно мягкая, $k^2 \sigma_z^2 \gg 1$. Пусть область засветки — круговая радиуса $R_{\rm B3}$, рассевающая поверхность имеет радиус R_s и, кроме того, выполнены условия: центры областей совпадают,

$$R_{\rm s} \gg R_{\rm B3}, \tag{22}$$

а для области засветки справедливо Кирхгофово приближение (например, область засветки "точечная"). Вычислим дисперсию рассеянного поля, находящегося в дальней зоне. Согласно принятым приближениям, можно считать, что

$$\sigma_{u(R)}^2 \approx \sigma_{\mathrm{K}_u(R)}^2 + \sigma_{\mathrm{HK}_u(R)}^2, \qquad (23)$$

где $\sigma_{K_u(R)}^2$ — дисперсия рассеянного поля в точке *R* от области засветки, вычисленная в Кирхгофовом приближении; $\sigma_{HK_u(R)}^2$ — некирхгофова составляющая рассеянного поля от области, дополнительной к области засветки.

При оценке интегралов мы учитываем только вклад области, в которой

$$\frac{|\mathbf{r}|}{R_{_{\mathrm{B3}}}} \gg 1 \quad \mathrm{M} \quad \frac{|\mathbf{v}|}{R_{_{\mathrm{B3}}}} \gg 1. \tag{24}$$

Выпишем интегралы по r' и v':

$$I = \int \frac{\mathbf{e}^{ik|r-r'|}}{|r-r'|} \frac{\mathbf{e}^{ik|\nu-\nu'|}}{|\nu-\nu'|} \times \mathbf{e}^{ik([[n_0, n_i], n_0]r'-\nu') + \frac{1}{2}\sigma_z^2 K_z''(0)[q_s(r-\nu) + q_i(r'-\nu')]^2} \times \frac{d^2r'd^2\nu'}{|\nu-\nu'|}$$

или

>

$$I \approx \frac{\mathbf{e}^{ik(|r| - |\nu|)}}{|r||\nu|} \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{\nu} - 1_{r},\nu')} d^{2}\nu' \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([[n_{0},n_{i}],n_{0}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([n_{0},n_{i}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([n_{0},n_{i}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu') + ik([n_{0},n_{i}]r' - \nu')} \times \int_{S_{B3}} \mathbf{e}^{ik(1_{r},r' - \nu')} \times \int_{$$

где 1_r и 1_v — единичные векторы, направленные в точки r' и v'.

Теперь примем условие, что в области, определяющей значение интеграла, выполнены условия, при которых можно считать:

$$(1_v - 1_r, v') \approx 0.$$
 (26)

Последнее, например, выполняется, когда $R_{\rm B3}$ соизмерим с длиной волны падающего излучения, q_s и q_i имеют одинаковый порядок, что следует из условия (24), а также экспоненциального убывания мо-

дуля подынтегральной функции при $\left| \frac{q_s}{q_i}(r-v) \right| > 2R_{\rm B3}$. Поэтому в (25) при интегрировании по v основной вклад в интеграл дают сомножители

$$\frac{\mathbf{e}^{ik(|r|-|\nu|)}}{|r||\nu|} \quad \mathbf{H} \quad \mathbf{e}^{\frac{1}{2}\sigma_z^2 K_z''(0)[q_s(r-\nu)+q_i(r'-\nu')]^2}$$

В силу предыдущего замечания из (15) и (25) следует, что интеграл $I_{\rm v}$ по v имеет вид

$$\approx \frac{1}{r^2} \int_{B_3} d^2 v' \int_{B_3} \mathbf{e}^{ik(1_r, r' - v') + ik([[n_0, n_i], n_0]r' - v')} d^2 r' \int_{S} \mathbf{e}^{ik([[n_s, n_i], n_0]r - v) - ik(1_r, r - v) + \frac{1}{2}\sigma_z^2 K_z''(0)(q_s(r - v) + q_i(r' - v'))} d^2 v, \quad (27)$$

 $I_{v} \approx$

поскольку в области, определяющей значение интеграла, справедливо $|v| \approx |v| + (1_r, r - v)$. Выполнив замену переменной $v \rightarrow r - v$ и заменив пределы интегрирования в интеграле по v на бесконечные, получаем:

$$I_{\nu} \approx \frac{\pi}{r^{2}} \frac{\mathbf{e}}{-\frac{1}{2} \sigma_{z}^{2} K_{z}^{"}(0) q_{s}^{2}}{-\frac{1}{2} \sigma_{z}^{2} K_{z}^{"}(0) q_{s}^{2}} \int_{s_{B3}} \mathbf{e}^{ik \left(1_{r} \left(1 + \frac{q_{i}}{q_{s}}\right) + \left[[n_{0}, n_{i}], n_{0}\right] + \frac{q_{i}}{q_{s}}[[n_{s}, n_{0}], n_{0}], \nu'\right)} d^{2} \nu' = \frac{4\pi}{r^{2}} S_{B3}^{2} \frac{\mathbf{e}^{\frac{k^{2}(1_{r} + \left[[n_{s}, n_{i}], n_{0}\right])^{2}}{2\sigma_{z}^{2} K_{z}^{"}(0) q_{s}^{2}}}{-\frac{1}{2} \sigma_{z}^{2} K_{z}^{"}(0) q_{s}^{2}} J_{1} \left(\frac{kR_{B3} \left|1_{r} \left(1 + \frac{q_{i}}{q_{s}}\right) + \left[[n_{0}, n_{i}], n_{0}\right] + \frac{q_{i}}{q_{s}}[[n_{s}, n_{0}], n_{0}]}{kR_{B3} \left|1_{r} \left(1 + \frac{q_{i}}{q_{s}}\right) + \left[[n_{0}, n_{i}], n_{0}\right] + \frac{q_{i}}{q_{s}}[[n_{s}, n_{0}], n_{0}]}\right|^{2},$$

$$(28)$$

>

где *J*₁ — функция Бесселя первого порядка.

Чтобы закончить вычисление некирхгофовой составляющей рассеянного поля, необходимо проинтегрировать по *r*. В частном случае $[n_0, n_i] =$ $= [n_s, n_0] = 0$, сомножитель в круглых скобках в (28) равен единице, поэтому для некирхгофовой составляющей рассеянного поля получаем:

$$\sigma_{\mathrm{HK}_U(R)}^{2} \approx \left(\frac{1}{4\pi^{2}}\right) \frac{k^{2} U_{0}^{2} S_{\mathrm{B3}}^{2}}{2R^{2}} \frac{e^{\frac{1}{2\sigma_{z}^{2} K_{z}^{''}(0)}}}{-\frac{1}{2} \sigma_{z}^{2} K_{z}^{''}(0)} \ln \frac{R_{S}}{NR_{\mathrm{B3}}},$$
(29)

где $1 \ll N < \infty$, а само *N* выбирается, с одной стороны, так, чтобы обеспечить выполнение условий (24) и (26), а с другой — не настолько большим, чтобы можно было пренебречь вкладом области, прилегающей к области засветки. В том случае, когда направление в точку наблюдения рассеянного поля совпадает с направлением падающей волны, из (28) следует:

$$\sigma_{\mathrm{HK}_U(R)}^{2} \approx \left(\frac{1}{4\pi^{2}}\right) \times \left(\frac{k^{4} U_{0}^{2} S_{B3}^{2}}{2R^{2}} \ln \frac{R_{S}}{NR_{B3}} \frac{e^{\frac{k^{2}(1+\left[[n_{s},n_{0}]\right])^{2}}{2\sigma_{z}^{2}K_{z}^{"}(0)q_{s}^{2}}}}{-\frac{1}{2}\sigma_{z}^{2}K_{z}^{"}(0)q_{s}^{2}}} \times I_{0}\left(\frac{k^{2}}{\sigma_{z}^{2}K_{z}^{"}(0)q_{s}^{2}}\right), \quad (30)$$

где I₀ — функция Бесселя мнимого аргумента.

Легко видеть, что (29) — частный случай (30). Как следует из (29), радиус R_S , при котором интенсивность некирхгофовой составляющей рассеянного поля, определяется из соотношения

$$R_{S} \approx NR_{\rm B3} {\bf e}^{\frac{4\pi}{k^{2}S_{\rm B3}} {\bf e}^{-\frac{1}{2\sigma_{z}^{2}K_{z}^{''}(0)}}}, \qquad (31)$$

причем, $N > \frac{kR_{_{\rm B3}}}{4}$, т. е.

$$R_{S} > \frac{\pi}{2} \frac{R_{B3}^{2}}{\lambda} \mathbf{e}^{\frac{4\pi}{k^{2}}S_{B3}} \mathbf{e}^{-\frac{1}{2\sigma_{z}^{2}K_{z}^{''}(0)}}.$$
 (32)

На основании (31) и (32) можно определить нижнюю границу для R_S , при которой некирхгофова составляющая имеет тот же порядок, что и Кирхгофова, при условии, что радиус взаимодействия равен R_S :

$$R_{S} > \frac{\pi}{2} \frac{l^{2}}{\lambda} e^{\frac{1}{\pi^{2}} l^{2}} e^{\frac{l^{2}}{2\sigma_{z}^{2}}},$$
(33)

где $l^2 \approx -K_z''(0)$; l — радиус корреляции поля неровностей; λ — длина волны падающего на поверхность поля.

Выводы

В соответствии с полученными результатами мощность рассеянного шероховатой поверхностью сигнала зависит и от радиуса засвечиваемого пятна $R_{\rm B3}$, и от радиуса области взаимодействия R_S (радиуса рассеивающей поверхности). Если $R_S \gg R_{\rm B3}$, то мощность некирхгофовой составляющей волнового поля, попадающего в плоскость приема, может оказаться сравнимой с мощностью Кирхгофовой составляющей компоненте поля в классическом представлении. Такой результат в большей степени соответствует интуиции, поскольку отражает физическую природу волнового поля, "растекающегося" (за счет индукции) при рассеивании за область засветки на

всю рассеивающую поверхность (которая и представляет собой область взаимодействия).

Например, в машиностроении задача интерпретации результатов наблюдения при использовании оптических методов измерения расстояния до обработанной (неровной) поверхности стоит особенно остро. Как правило, можно считать, что характерный параметр задачи рассеяния соизмерим с единицей, т. е. начиная со значений радиуса области взаимодействия

$$R_S \approx \frac{\pi}{2} \frac{l^2}{\lambda}$$

где *l* — радиус корреляции неровностей; λ — длина волны поля, облучающего поверхность, некирхгофова составляющая представляет серьезную помеху, которую уже нельзя не учитывать, поскольку она искажает и фазу, и амплитуду принимаемого приемной системой оптического сигнала, причем искажения амплитуды и фазы носят случайный характер и не могут быть скомпенсированы. В случае датчика, работающего в оптическом диапазоне (длина волны равна 0,5 мкм), радиус области взаимодействия R_S не должен превышать 2—4 мкм. Для ближнего инфракрасного диапазона (длина волны равна 1 мкм) R_S не должен превышать 4 мкм. Как правило, в датчиках рассматриваемого типа стремятся обеспечить плоский фронт падающего на рассеивающую поверхность поля, т. е. размер области взаимодействия заведомо во много раз больше названных цифр. Это приводит к тому, что наряду с регулярным сигналом на фотоприемник поступает случайный быстроосциллирующий по фазе и амплитуде сигнал. Поэтому в практических приложениях интерпретация результатов измерения расстояния от базовой поверхности до детали, имеющей шероховатую (обработанную) поверхность, классическими приборами требует некоторой осторожности.

Список литературы

1. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука. Главная ред. физ.мат. лит. 1972.

2. Канторович Л. В., Акилов Г. П. Функциональный анализ. СПб.: Невский Диалект, БХВ-Петербург, 2004.

3. Шмелев А. Б. Рассеяние волн статистически неровными поверхностями // УФН. 1972. Т. 106. Вып. 3. С. 459—481.

В. А. Карташев, д-р. физ.-мат. наук., проф., Институт прикладной математики РАН, им. М. В. Келдыша, г. Москва, e-mail: kart@list.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОНОМНЫХ ПОДВИЖНЫХ МИКРОСИСТЕМ МЕТОДОМ ПОДОБИЯ

Современная технология позволяет создавать миниатюрные автономно функционирующие мехатронные устройства (MEMS), которые по уровню интеллекта сопоставимы с возможностями полноразмерных устройств. Потенциальные возможности таких устройств в настоящее время активно изучаются. Продвижение этой работы затрудняется неадекватным перенесением возможностей полномасштабных устройств на микроустройства, которое объективно связано с полномасштабной моделью мира в нашем сознании.

В настоящей работе делается попытка оценить границы возможностей микроустройств исходя из модели подобия. Исследование показывает, что в потенциальных областях применения микроустройств условия их функционирования оказываются более сложными, чем у полномасштабных аналогов, вследствие чего подвижность устройств, конструкция которых основывается на традиционных технологиях, оказывается сильно ограниченной.

Ключевые слова: автономные микроустройства, подвижность, метод масштабных коэффициентов.

Родоначальником нанотехнологий считается американский физик Ричард Фейнман, который высказал идею о возможности освоения техникой нанометровых размеров в своем выступлении "Там внизу много места" (англ. "There's Plenty of Room at the Bottom"), сделанным им еще в 1959 г. [1]. В нем он предлагает гипотетический способ создания микро- и наноустройств и первым дает оценку их предельных размеров. В докладе Р. Фейнман предупреждает о тех препятствиях, которые нас ожидают на этом пути, на примере изготовления микроавтомобиля длиной всего 1 мм. Так как детали обычного автомобиля сделаны с точностью 10^{-5} м, то детали микроавтомобиля следует изготовлять с точностью в 4000 раз выше, т. е. 2,5 · 10⁻⁹ м. Таким образом, размеры деталей микроавтомобиля должны соответствовать расчетным с точностью ±10 слоев атомов.

Следует заметить, что за прошедшие 50 лет технологические возможности человечества значительно расширились. В результате некоторые теоретические выводы, которые казались бесспорными, в настоящее время требуют корректировки.

В работе метод подобия, который применил Р. Фейнман, используется для оценки двигательной способности микроустройств.

Рассмотрим микроустройство размером $10 \times 10 \times 10$ мм. Будем предполагать, что оно содер-

жит двигатель, емкость для хранения энергии, подвижные элементы для передвижения в среде, устройство управления и датчики среды.

Каждый из перечисленных узлов занимает определенный объем. Поэтому его характерный размер окажется в несколько раз меньше размера всего устройства. Соответственно характерный размер детали, из которого состоит каждый узел, в несколько раз меньше размера узла. Отсюда можно сделать вывод о том, что микроустройство размером $10 \times 10 \times 10$ мм будет состоять из деталей с характерным размером не более 1 мм. Рабочие элементы этих деталей окажутся в несколько раз меньше.

Для того чтобы деталь могла правильно выполнять свою функцию, погрешность изготовления рабочего элемента детали должна составлять порядка 1 % от характерного размера. Следовательно, в микроустройстве с характерным размером 10 мм некоторые детали должны изготавливаться с точностью 0,01 мм. Такие точности изготовления механизмов вполне достижимы в настоящее время даже при массовом производстве. В качестве примера можно привести часы с механическим и электромеханическим приводом.

Можно ли изготовить микроустройство с характерным размером 1 мм? В этом устройстве некоторые части деталей должны изготавливаться с точностью 0,001 мм (т. е. 1 мкм). Такие точности достигнуты только в массовом производстве микросхем совсем недавно — в начале 90-х годов. В настоящее время электронная промышленность изготавливает микросхемы с разрешением порядка 0,1 мкм. Это позволяет создавать микроустройства с характерным размером порядка 0,1 мм. Такие устройства существуют. Например, создан торсионный шаговый привод размером 0,2 мм. Главная часть привода показана на рис. 1. Конструкция привода подробно представлена на сайте правительственной организации США Sandia national Laboratories [2]. Однако, в от-





личие от устройств, базирующихся на давно существующей технологии часовых механизмов, новые технологии еще не стали массовыми и, следовательно, не имеют широкодоступной базы для производства сложных объемных конструкций.

Из приведенных рассуждений также следует, что имеются определенные ограничения на возможные размеры микроустройств. Эти ограничения связаны с технологией изготовления, которая основана на сборке устройства из отдельных узлов. Если использовать такую технологию для создания подвижного устройства величиной с бактерию, которая имеет размер 1 мкм, то потребуется изготавливать детали с точностью до 1 нм.

Для микроустройств необходимо развивать технологии, которые основаны не на сборке, а, например, на выращивании устройства в целом, по аналогии с тем, как это делает природа. Несмотря на кажущуюся фантастичность такого подхода, он не слишком противоречит современной технологии, так как подобным образом изготавливаются современные микросхемы и проводники электронных плат.

В конструкции подвижных элементов автономного устройства размером с бактерию, скорее всего, не будет традиционных шарниров, шестерен и электродвигателей. Для микроустройств также целесообразно развивать нетрадиционные для современной техники способы перемещения, например, с помощью ворсинок и волновыми движениями змеи или рыбы.

Неразработанность вопросов осуществления перемещения устройств субмиллиметровых и микрометровых размеров приводит к выводу о том, что в настоящее время методами современной технологии реально создание автономного подвижного устройства массового применения с характерным размером, соизмеримым только с 1 см.

Очевидно, объем такого устройства не будет заполнен металлом полностью. Металл нас интересует как вещество, имеющее наибольшую плотность. Если принять, что металл занимает не более 30 % объема микроустройства, то его вклад в массу устройства окажется соизмеримым с вкладом остальных веществ, плотность которых только в 2—3 раза меньше. Следовательно, реальная масса микроустройства в объеме $10 \times 10 \times 10$ мм может составлять 2—3 г.

Современные технические реализации автономных подвижных устройств содержат узел, который можно назвать резервуаром энергии. В нем запасается энергия, которая используется для движения. В микроустройстве размером $10 \times 10 \times 10$ мм в качестве резервуара может служить часть общего объема, не занятая двигателем, системой управления и т. д. Поэтому размер емкости для хранения энергии может составить порядка $3 \times 10 \times 10$ мм, т. е. такого же размера, как и батарейка для часов.

Для реализации автономного устройства наиболее удобно использовать электропривод. Емкость батареи указанного размера составляет около 50 мА·ч при напряжении 1,5 В. Если принять, что время движения микроустройства должно составлять 1 ч, то отдаваемая мощность двигателя при коэффициенте полезного действия 50 % окажется менее 0,025 Вт. Здесь учтено также, что батарея не может разряжаться максимальным током до полного разряда. При пересчете энерговооруженности микроустройства на устройство размером $1 \times 1 \times 1$ м получим, что его масса составит 2—3 т, мощность 25 кВт (35 л. с). Эта величина в несколько раз хуже, чем у современного автомобиля.

Предполагается, что автономные микроустройства должны функционировать в реальных условиях окружающей среды. С уменьшением размера транспортного средства с 1 м до 10 мм, т. е. в 100 раз, мощность двигателя уменьшается в 100³ раз. Сопротивление среды уменьшается только в 100² раз (если сопротивление зависит от поперечного сечения, например, при движении в воздухе или в воде), и в 100 раз (если сопротивление зависит от линейного размера, например, при движении по пересеченной местности). С учетом этого относительная энерговооруженность микроустройства на базе электропривода окажется более чем на два порядка меньше, чем у современных транспортных средств. Соответственно при движении в реальных условиях среды у микроустройства на порядок меньше окажется время функционирования (возможно минуты) и пройденный путь по отношению к размеру корпуса.

Рассмотрим *примеры*. Оценим расстояние, которое способен преодолеть микровертолет с характерным размером корпуса 10 мм.

В качестве прототипа выберем малый вертолет с характерным размером 1 м. Примеры описания таких вертолетов имеются в литературе [3, 4]. Мощность двигателей малого вертолета порядка 10 кВт. Скорость движения — 30 м/с.

Для полета микровертолета потребуется мощность, которая при тех же оборотах винта пропорциональна второй степени его размера, т. е. в 100^2 раз меньше — 1 Вт. При том же шаге винта скорость полета уменьшится в 100 раз, т. е. не превысит 0,3 м/с. Габаритные размеры микровертолета позволяют установить в его корпусе литиевую батарейку от часов размером $3 \times 10 \times 10$ мм емкостью 100 мА·ч. Запас энергии батарейки не превышает 500 Дж. При мощности двигателя 1 Вт заряда хватит на 500 с. Даже если учесть, что КПД электрического привода в 2 раза выше, дальность полета (при скорости 0,3 м/с) составит 300 м.

Полученные оценки соответствуют возможностям министрекозы (рис. 2) голландской фирмы DelFly, которую она продемонстрировала в 2006 г. [5]. Модель имеет размеры 100 мм, что меньше прототипов, взятых для расчета, в 15 раз. Для полета модели должна требоваться мощность 30 Вт. Из описания следует, что масса электрической батареи мо-



Рис. 2

дели 1 г. При такой массе емкость литиевой (3 В) батареи составляет 200 мА·ч, или 2000 Дж. Таким образом, оценки показывают, что с учетом более высокого КПД продолжительность полета должна составлять примерно 2 мин, скорость около 0,2 м/с. Эти значения близки к заявленным характеристикам модели: продолжительность полета 3 мин, максимальная скорость 5 м/с. Следовательно, дальность полета заведомо меньше 900 м.

Рассмотренные примеры позволяют сделать вывод о том, что микровертолет с характерным размером 10 мм скорее всего будет малоподвижным устройством. Для того чтобы на порядок увеличить радиус действия, также на порядок необходимо увеличить удельную емкость батареи (т. е. емкость при тех же габаритных размерах), что в настоящее время технологически недостижимо.

Применение микродвигателя внутреннего сгорания (даже если его удастся изготовить) не сильно изменит ситуацию, так как мощность пропорциональна объему камеры сгорания, а удельная мощность больше удельной мощности электропривода только в несколько раз. Этот вывод подтверждается примером из авиации спортивного моделирования. Микродвигатель занимает большую долю модели, чем в полномасштабном прототипе. Сами модели обычно изготавливают из бумаги и перемещают они только себя, в то время как реальный самолет перевозит летчика и груз.

Удельная мощность турбинного двигателя на порядок больше, чем у двигателя внутреннего сгорания. Мощность турбореактивного двигателя также определяется объемом его камеры сгорания. Малогабаритные турбореактивные самолеты в настоящее время используются в качестве фоторазведчиков. С недавнего времени (последние несколько лет) в соревнованиях по спортивному моделированию принимают участие модели турбореактивных самолетов. Однако, при 100-кратном уменьшении размеров турбореактивного устройства его удельная энерговооруженность по отношению к сопротивлению среды уменьшится до удельной энерговооруженности двигателя внутреннего сгорания современного автомобиля.

Недостатком турбореактивного двигателя является сложность его конструкции. Проще использовать двигатель реактивного типа, который имеет даже большую удельную энерговооруженность. Наибольший интерес представляют твердотопливные двигатели, так как они легко масштабируются и легко запускаются. Эти качества используются в различных областях техники. Они единственные из известных двигателей, в которых мощность зависит от второй степени линейного размера, так как тяга создается при горении слоя рабочего вещества. Это означает, что удельная мощность по отношению к сопротивлению среды с уменьшением размеров останется того же порядка, что и в полномасштабном устройстве. Для реактивных двигателей проблемой является малое время выгорания рабочего тела. В результате активный участок движения микроустройства скорее всего будет составлять секунды, после чего движение будет происходить по инерции. Тем не менее, возможно создание активно маневрирующего устройства, оснащенного множеством микрореактивных двигателей. Недостатком устройств с реактивным двигателем является ограниченность их применения во всех областях, кроме полетов.

В настоящее время многие полезные для практики задачи могут быть решены с помощью не автономных микроустройств (т. е. движущихся от внешнего привода или источника питания), а автономных устройств, перемещающихся по течению среды, а также малоподвижных. Для таких устройств отпадает необходимость в двигателях и емких хранилищах энергии.

Представляют интерес также биотроники, в которых функция движения реализуется биологическим объектом микроскопического размера, а направление движения и функционирование корректируются микроустройством, а также хемиотроники, в которых функционирование молекулярного комплекса корректируются устройством управления. В этих устройствах высокие энергетические характеристики движителя обеспечиваются природой.

Выволы

Полученные оценки позволяют сделать следующие выводы.

- Современная технология массового производства позволяет создать автономное подвижное микроустройство с характерным размером 1 см. Новые достижения электроники делают возможным создание устройства субмиллиметровых размеров. Для устройств существенно меньшего размера требуется развитие нетрадиционных технологий перемещения.
- Отношение сопротивления среды к размеру устройства для микроустройства существенно хуже, чем для полномасштабного устройства. Использование традиционных схем построения авто-

номных подвижных устройств для микроустройств оказывается неэффективным, так как время их активного движения составляет минуты. Следует также иметь в виду, что удачные решения в области микроустройств, достигнутые традиционными методами (необычно высокая энергоемкость батареи или удельная мощность двигателя), легко масштабируются до полномасштабных устройств. Поэтому достижение необходимых характеристик микроустройств определяется прогрессом современной технологии приводов и методов хранения энергии, причем их характеристики должны быть улучшены на порядок.

- По этой причине следует уделить серьезное внимание разработке таких подвижных микроустройств, применение которых возможно без двигателя и хранилища энергии движения, т. е. движущихся от внешнего привода или источника питания, устройств, перемещающихся по течению среды, а также малоподвижных.
- Возможно также создание микроустройств, в которых энергия движения высвобождается чрезвычайно быстро, например, имеющих реактив-

ный движитель или использующих кинетическую энергию толчка.

Представляют также интерес устройства, использующие для движения биологические организмы (биотроники) [6] и макромолекулы (хемиотроники), так как энергетические характеристики природных движителей намного превышают возможности современной технологии.

Работа выполнена в рамках программы ОМН 3.5 РАН.

Список литературы

1. http://www.its.caltech.edu/@feynman/plenty.html

2. http://mems.sandia.gov

3. **Михеев В. Р.** Трехместные малые вертолеты второго поколения // Аэрокосмическое обозрение. Аналитика, Комментарии, Обзоры. 2004. № 4. С. 124—127.

4. Петросян Э. А., Никифорова Л. Н. Беспилотные вертолеты — от мини- до микроаппаратов // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 33—36.

5. Популярная механика. 2008. № 9. С. 22.

6. **Рубцов И. В., Нестеров В. Е., Рубцов В. И.** Современная зарубежная военная микро- и мини-робототехника // Микросистемная техника. 2000. № 3. С. 36–42.

УДК 531.383

Д. М. Малютин, канд. техн. наук, доц., **М. Д. Малютина**, магистрант, ГОУ ВПО "Тульский государственный университет"

МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Рассмотрены динамические характеристики и возможность коррекции динамических свойств микромеханического акселерометра прямого преобразования. Показано, что коррекция динамических свойств акселерометра позволяет уменьшить динамическую ошибку измеряемого сигнала.

Ключевые слова: микромеханический акселерометр, коррекция динамических свойств, динамическая ошибка.

Перспективы современного приборостроения связаны с созданием приборов, имеющих малые массу, габаритные размеры, время готовности, энергопотребление и себестоимость при безусловном выполнении целевой функции с заданной точностью. Микромеханические акселерометры находят широкое применение в самых различных областях, особенно в тех, где требования миниатюризации в сочетании с малой стоимостью и низким энергопотреблением имеют решающее значение. Это, прежде всего, медицина, робототехника, подушки безопасности и антиблокировочные автомобильные устройства. Однако в связи с наметившейся перспективой их использования в составе контуров управления пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов, для измерения параметров движения объекта при телеметрических пусках, использования в составе малогабаритных инерциальных навигационных систем, актуальной становится задача повышения динамической точности этих приборов. Рассмотрим возможности повышения динамической точности микромеханического акселерометра.

Микромеханический акселерометр [1] прямого преобразования, структурная схема которого приведена на рис. 1, работает следующим образом. Постоянное напряжение $+U_0$ с выхода источника 1 опорного напряжения подается на вход ключевого устройства 3, на другой вход которого подается напряжение $-U_0$ с выхода источника 2 опорного напряжения. Тактовый генератор 4 выполнен по схеме мультивибратора [2]. Сигналы с выходов генератора 4 поступают на ключевое устройство 3. В результате на выходе устройства формируются прямоугольные импульсы с амплитудой $\pm U_0$ и $\mp U_0$, сдвинутые по фазе на 180° относительно друг друга. Неподвижные пластины конденсаторов 6 и 7 совместно с центральной подвижной пластиной 8 образуют последовательно включенные измерительные емкости С1 и С2, которые представляют собой два плеча емкостного моста, а два других плеча моста образованы источниками опорного напряжения 1 и 2. Воздействие ускорения приводит к перемещению чувствительного элемента (ЧЭ) 9 посредством упругого подвеса 10 и появлению разности емкостей C_1 и C_2 и выходного сигнала ΔU . Передаточная функция, связывающая это напряжение с ускорением w, имеет вид:

$$\frac{\Delta U}{w} = \frac{m U_0 k_y}{h_0 (T_y^2 p^2 + 2\xi_y T_y p + 1)},$$
 (1)

где k_y — коэффициент передачи ЧЭ; h_0 — зазор между центральной подвижной пластиной и неподвижной пластиной δ конденсатора при нулевом значении ускорения w; m — масса ЧЭ; $T_y = \sqrt{m/G_y}$ — постоянная времени ЧЭ; G_y — линейная жесткость упругого подвеса ЧЭ; ξ_y — коэффициент затухания колебаний ЧЭ, определяемый его геометрическими параметрами и параметрами демпфирующей среды.

Выходной сигнал поступает на вход повторителя 11 и далее на вход детектора 12. Выходной сигнал детектора, имеющий форму меандра с частотой ω_{Γ} тактового генератора, модулирован напряжением рассогласования мостовой схемы. Этот сигнал поступает на вход фильтра низкой частоты (ФНЧ) второго порядка 13 с передаточной функцией

$$W_{\phi 1}(p) = \frac{k_{\phi 1}}{(T_{\phi 1}^2 p^2 + 2T_{\phi 1}\xi_{\phi 1}p + 1)},$$
 (2)

где $T_{\Phi 1}$ — постоянная времени фильтра нижних частот второго порядка; $k_{\Phi 1}$ — коэффициент передачи фильтра нижних частот второго порядка; $\xi_{\Phi 1}$ — ко-



Рис. 1. Структурная схема микромеханического акселерометра прямого преобразования

эффициент затухания фильтра нижних частот второго порядка.

Значение коэффициента затухания $\xi_{\phi 1}$ выбирается равным 0,707.

Фильтр нижних частот 13 второго порядка осуществляет преобразование переменного напряжения на выходе синхронного детектора 12 в сигнал постоянного напряжения. Передаточная функция, связывающая ускорение и сигнал на выходе фильтра нижних частот 13 второго порядка, имеет вид

$$\frac{U}{w} = \frac{mU_0k_yk_{\phi 1}}{h_0(T_y^2p^2 + 2\xi_yT_yp + 1)(T_{\phi 1}^2p^2 + 2T_{\phi 1}\xi_{\phi 1}p + 1)}, \quad (3)$$

где *U*— напряжение на выходе фильтра нижних частот второго порядка.

Вследствие большого демпфирования чувствительного элемента соответствующее ему колебательное звено с постоянной времени T_y преобразуется в два апериодических звена и передаточная функция (3) преобразуется к виду

$$\frac{U}{w} = \frac{mU_0k_yk_{\phi 1}}{h_0(T_1p+1)(T_2p+1)(T_{\phi 1}^2p^2 + 2T_{\phi 1}\xi_{\phi 1}p+1)},$$
 (4)

где T_1 — первая (бо́льшая по значению) постоянная времени чувствительного элемента; T_2 — вторая (меньшая по значению) постоянная времени чувствительного элемента. Передаточная функция (4) описывает динамику микромеханического акселерометра прямого преобразования при традиционном способе построения измерительной цепи акселерометра и может быть использована как прототип.

Рассмотрим случай, когда сигнал с выхода фильтра нижних частот второго порядка поступает на вход интегро-дифференцирующего фильтра *14* первого порядка с передаточной функцией

$$W_{\oplus 2}(p) = \frac{(T_3 p + 1)}{(T_4 p + 1)}.$$
 (5)

Постоянная времени T_4 интегро-дифференцирующего фильтра первого порядка выбирается равной постоянной времени $T_{\phi 1}$ фильтра нижних частот второго порядка.

Сигнал с выхода интегро-дифференцирующего фильтра 14 первого порядка поступает на вход фильтра нижних частот 15 первого порядка с передаточной функцией

$$W_{\oplus 3}(p) = \frac{1}{(T_5 p + 1)}.$$
 (6)

Фильтр нижних частот первого порядка 15 обеспечивает одинаковый уровень пульсации выходного сигнала предлагаемого микромеханического акселерометра по сравнению с прототипом. Использование интегро-дифференцирующего фильтра 14 первого порядка и фильтра нижних частот 15 первого порядка позволяет реализовать микромеханический акселерометр прямого преобразования [3] с передаточной функцией вида

$$\frac{U_{\text{Bbix}}}{w} = \frac{mU_0k_yk_{\phi 1}(T_3p+1)}{h_0(T_{\phi 1}^2p^2 + 2\xi_{\phi 1}T_{\phi 1}p+1)(T_1p+1)(T_2p+1)(T_4p+1)(T_5p+1)}.$$
 (7)

Передаточная функция относительной ошибки такого микромеханического акселерометра имеет вид

$$\begin{split} & \frac{\Delta W}{w} = \\ & = 1 - \frac{(T_3 p + 1)}{(T_{\phi 1}^2 p^2 + 2\xi_{\phi 1} T_{\phi 1} p + 1)(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_4 p + 1)(T_5 p + 1)} \,, (8) \end{split}$$

где ΔW — динамическая ошибка акселерометра.

Постоянная времени T_3 интегро-дифференцирующего фильтра 14 первого порядка и постоянная времени T_5 фильтра нижних частот первого порядка определяются путем решения системы уравнений:

$$T_{3} = T_{1} + T_{2} + T_{\phi 1}(1 + 2\xi) + T_{5}$$

$$\frac{\sqrt{1 + \omega_{\Gamma}^{2} T_{3}^{2}}}{\sqrt{\left(1 + \omega_{\Gamma}^{2} T_{4}^{2}\right)\left(1 + \omega_{\Gamma}^{2} T_{5}^{2}\right)}} = 1$$
(9)

при этом передаточная функция относительной ошибки (8) имеет нуль второго порядка в точке p = 0, что соответствует астатизму второго порядка, а следовательно наклону логарифмической амплитудно-частотной характеристики в области частот ниже частоты среза -40 дБ/дек. Передаточная функция относительной ошибки прототипа имеет нуль первого порядка в точке p = 0, что соответствует астатизму первого порядка, а следовательно наклону логарифмической амплитудно-частотной характеристики в области частот ниже частоты среза -20 дБ/дек. Выбор постоянной времени Т₅ в соответствии с системой уравнений (9) обеспечивает одинаковый уровень пульсации выходного сигнала предлагаемого микромеханического акселерометра по сравнению с прототипом.

График логарифмической амплитудно-частотной характеристики передаточной функции относительной ошибки, являющейся отношением динамической ошибки к измеряемому ускорению, прототипа при следующих его числовых параметрах: $U_0 = 5$ B;

$$\begin{split} m &= 0,0002 \text{ Kr}; \ h_0 = 0,00002 \text{ M}; \ \omega_{\Gamma} = 628 \ 000 \text{ c}^{-1}; \ T_y^2 = \\ &= 0,000355 \text{ c}; \ \xi_y = 15,28; \ (T_1 = 0,0108 \text{ c}, \ T_2 = \\ &= 0,00001162 \text{ c}); \ k_y = 0,000634 \text{ M/H}; \ k_{\Phi 1} = 3,5; \end{split}$$

 $T_{\phi 1} = 0,00561$ с; $\xi_{\phi 1} = 0,707$; $\Delta U_{\Pi} = 0,157 \cdot 10^{-5}$ В (ΔU_{Π} — уровень пульсации выходного сигнала) приведен на рис. 2 (кривая *I*).

График логарифмической амплитудно-частотной

характеристики $L(\omega)$ передаточной функции (8) предлагаемого микромеханического акселерометра прямого преобразования приведен на рис. 2 (кривая 2) при следующих его числовых параметрах: $(U_0 = 5 \text{ B}; m = 0,0002 \text{ кг};$ $h_0 = 0,00002 \text{ м}; \omega_{\Gamma} = 628 000 \text{ c}^{-1}; T_y^2 =$ $= 0,000355 \text{ c}; \xi_y = 15,28; (T_1 = 0,0108 \text{ c},$ $T_2 = 0,00001162 \text{ c}); k_y = 0,000634 \text{ м/H};$ $k_{\phi 1} = 3,5; T_{\phi 1} = 0,00561 \text{ c}; \xi_{\phi 1} = 0,707;$ $T_4 = 0,00561 \text{ c}.$ Постоянные времени T_3 и T_5 определены путем решения системы уравнений (9) и соответственно равны 0,024361 с и 0,00000675 с.

На рис. 3 приведен график динамической ошибки предлагаемого микромеханического акселерометра прямого преобразования при измерении ускорения с амплитудой 1 м/с² и частотой 6,28 с⁻¹. На рис. 4 приведен график динамической ошибки прототипа при измерении ускорения с амплитудой 1 м/с² и круговой частотой 6,28 с⁻¹. Из приведенных графиков видно, что амплитуда ошибки прототипа в установившемся режиме составляет 0,1174 м/с², а амплитуда ошибки предлагаемого микромеханического акселерометра в установившемся режиме в 13,5 раз меньше и составляет 0,00875 м/с².

Таким образом, рассмотрена структура построения измерительной цепи акселерометра прямого преобразования, в которой по сравнению с традиционным способом построения дополнительно включена комбинация интегро-дифференцирующего фильтра первого порядка и фильтра нижних частот первого поряд-





Рис. 3. График динамической ошибки предлагаемого микромеханического акселерометра прямого преобразования

ка. Выбор параметров интегро-дифференцирующего фильтра первого порядка и фильтра нижних частот первого порядка осуществляется однозначно путем решения системы уравнений (9), что позволяет провести коррекцию динамических свойств микромеханического акселерометра прямого преобразования и существенно уменьшить его динамические ошибки при неизменном уровне пульсаций выходного сигнала.



Рис. 4. График динамической ошибки микромеханического акселерометра прямого преобразования, являющегося прототипом

Список литературы

1. Распопов В. Я. Микромеханический акселерометр прямого преобразования // Датчики и системы. 2002. № 8. С. 5—8.

2. Распонов В. Я. Микромеханические приборы. Тула: ИПП "Гриф и К", 2002. 107 с.

3. Микромеханический акселерометр прямого преобразования. Патент РФ 2328700 / Малютин Д. М., Малютина М. Д. Опуб. 10.07.2008. Бюл. № 19.

Применение МНСТ

УДК 621.3.049.77:629.7

К. Д. Яшин, канд. техн. наук, В. С. Осипович, аспирант, П. В. Меденко, аспирант, В. М. Логин, аспирант, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь e-mail: seth22@mail.ru

МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассмотрены вопросы конструирования микрокосмических аппаратов с применением микросистемной техники.

Ключевые слова: микроспутник, наноспутник, пикоспутник, конструкция микроскопического annapama, космическая группировка.

Введение

В журнале "Нано- и микросистемная техника" (№ 1 и № 5, 2008 г.) представлен обзор ведущих разработчиков МЭМС, освещены вопросы применения МЭМС в современной аппаратуре [1, 2]. Важнейшей тенденцией в области развития современной космической техники является миниатюризация ее компонентов и систем [3]. Именно благодаря внедрению технологии миниатюризации становится возможным резкое уменьшение массы, объема космического аппарата и расхода топлива, что обеспечивает снижение затрат на каждый пуск и открывает новые возможности для космических систем. Другое существенное преимущество использования технологии миниатюризации — это обеспечение значительно более высокой надежности аппаратов и повышение их безопасности.

Целью настоящей работы является разработка конструкции космического аппарата (КА) на основе микросистемной техники. Микроспутники — это

класс КА массой 1—100 кг [4, 5]. Помимо обеспечения связи микроспутники могут использоваться для съемки поверхности Земли со средним разрешением. Такие микрокосмические аппараты (МКА) применяются для обнаружения очагов пожаров, съемки в интересах контроля чрезвычайных ситуаций и оценки последствий стихийных бедствий, экологического мониторинга и метеонаблюдения [6, 7]. Рассмотрим уже существующие МКА, в которых применяются элементы, созданные по технологии микросистемной техники.

Микроспутники

Лаборатория Surrey Satellite Technology (SSTL, Beликобритания), разработала серию аппаратов (массой 80—90 кг) для глобальной космической системы мониторинга районов стихийных бедствий DMC (Disaster Monitoring Constellation). Аппаратура системы DMC позволяет вести многоспектральную съемку с разрешением 30-40 м. Техническим университетом Берлина (Германия) разработана серия МКА Tubsat, предназначенных для проведения экспериментов в области спутниковой связи, съемки Земли, отработки технологий бортовых систем энергообеспечения и др. Особо стоит отметить DlrTubsat, на борту которого установлены три камеры, причем одна из них позволяет проводить съемку с разрешением 6-8 м. В прошлом году на орбиту выведен аппарат Lapant-Tubsat (57 кг), который обеспечивает съемку с разрешением 5 м.

Российский микроспутник ТНС-1 конструктивно представляет собой круглую панель, одна сторона которой занята солнечными батареями, а на другой стороне крепятся все приборы, относящиеся как к служебным системам, так и к целевой нагрузке. Микроспутник стабилизируется вращением в плоскости синхронно-солнечной орбиты с высотой примерно 650 км. Вращение происходит вокруг центральной оси, перпендикулярной установочной панели со скоростью 1-3 мин⁻¹. Стабилизация поддерживается с помощью системы магнитных токовых катушек, которые управляются от микропроцессора, обрабатывающего показания трехосного магнетометра и двух солнечных датчиков. На краях базовой панели МКА установлены две цифровые фотокамеры Sony (Япония). Они выполняют съемку поверхности Земли с разрешением 100 м и максимальным захватом 290 км. Экспонирование каждой из двух камер происходит в момент, когда она направлена в надир. Этот момент определяется по показаниям датчика горизонта. Через половину оборота спутника экспонируется вторая камера. Изображения, полученные камерами в стандарте RGB, запоминаются и передаются по специальному радиоканалу с помощью передатчика мощностью 5 Вт в радиодиапазоне 1,7 ГГц со скоростью 665 кбит/с. Бортовой антенной служит полуволновой диполь, расположенный по оси вращения спутника. На Земле используются станции с антеннами диаметром 2,5 м и персональными компьютерами.

Технология представляет интерес для решения задач широкого круга в области землеведения, экологии и образовательных нужд. Проект может стать основой для создания группировки МКА. Важным моментом являются экспериментальные исследования каналов передачи и приема информации с использованием глобальных космических систем связи Глобалстар и Орбкомм. Обе эти системы находятся в режиме постоянной эксплуатации и устойчиво работают с большим числом наземных абонентов. Система Глобалстар обеспечивает передачу голосовой информации и цифровых потоков со скоростью 9,6 кбит/с. Ее рабочие спутники летают на высоте 800 км.

Условия работы абонентской аппаратуры на борту рабочего и экспериментального космических аппаратов существенно различаются по относительным скоростям движения и взаимному расположению системы спутник-абонент, а также по диаграммам направленности приемно-передающих антенн. Моделирование условий связи показывает, что свободный бесперебойный доступ с Земли к экспериментальному космическому аппарату не гарантирован. Более точную оценку сделать затруднительно вследствие случайного характера взаимодействия THC-1 с космическими группировками систем связи. Аппарат ТНС-1 является платформой, которая может быть использована для отработки методов и приборов, требующих более длительного функционирования в космосе. Это могут быть также научные исследования околоземного космического пространства и атмосферы Земли, а также отработка новых систем связи.

Наноспутники

В России разработан технологический наноспутник ТНС-0, для проведения радиотехнических экспериментов. ТНС-0 имеет массу 4,5 кг, не требует сложной системы ориентации и стабилизации, поскольку не оснащен солнечными батареями. В качестве источника энергии использована литиевая батарея емкостью 10 А/ч. Установлены два модема и соответствующие антенно-фидерные устройства систем Глобалстар и Орбкомм, а также простейшая телеметрическая система и бортовой таймер. Последний обеспечивает программное включение указанных модемов, позволяющих периодически проводить оценку условий передачи данных по линии связи. Платформу THC-0 можно использовать для краткосрочных экспериментов в космосе. Учитывая малую массу THC-0, представляется возможным его запуск в качестве дополнительной полезной нагрузки при запуске космических аппаратов, а также с борта космической станции.

DARPA-проект позволил разработать в Государственном университете Аризона (США) наноспутник ASUSat (массой 6 кг), на борту которого установлены две миниатюрные оптикоэлектронные камеры, обеспечивающие съемку с разрешением 15 м. Значительных успехов в разработке наноспутников достигла лаборатория Surrey Satellite Technology (Великобритания), ее аппарат SNAP1 массой 6,5 кг является единственным наноспутником с двигательной установкой на жидком топливе. Аппарат предназначен для отработки технологии сближения с другим космическим аппаратом и наблюдения за его работой с помощью четырех камер.

В канадском университете г. Торонто разработана серия наноспутников CanX. Первый аппарат CanX1 выведен на орбиту в 2003 г. Завершена разработка второго космического аппарата CanX2, запуск которого выполнен в 2008 г. С помощью космического аппарата исследуются искажения навигационных сигналов системы GPS, испытываются многослойные солнечные батареи, миниатюрные LiIon аккумуляторные батареи, CMOS-камера, датчик Солнца и гироскопическая система, изготовленная на основе нанотехнологий.

Пикоспутники

Первые пикоспутники массой 1,7 кг были разработаны в США и в 2000 г. выведены на орбиту с помощью вспомогательного устройства OPAL (*Orbiting Picosatellite Automated Launcher*). В число задач, которые должны решать запущенные пикоспутники, вошли:

- испытания радиочастотного переключателя на базе МЭМС (DAPRA Picosat);
- эксперименты в области передачи сигналов с помощью маломощных передающих устройств;
- отработка технологий датчиков системы ориентации (ARTEMIS) и др.

Основной целью разработки пикоспутников является отработка перспективных технологий, которые могут быть использованы при создании космических аппаратов нового поколения (рис. 1, см. четвертую сторону обложки).

Вывод пикоспутников на орбиту в качестве попутного полезного груза позволяет сократить общую стоимость исследований и экспериментов. Срок разработки КА данного класса составляет от нескольких месяцев до года. Большая часть программ по разработке пикоспутников принадлежит учебным заведениям США. Кроме того, они также разрабатываются в Норвегии, Японии, Южной Корее, Великобритании, Германии, Италии, Канаде, Дании и др. В 2007 г. состоялся запуск серии пикоспутников CalPoly (CP3, CP4), разработанных Калифорнийским университетом (США). На них отрабатывались технологии применения: миниатюрного датчика Солнца; систем приема/передачи данных; систем ориентации и стабилизации; бортового зарядного устройства и др. Масса установленного на космическом аппарате экспериментального оборудования составляет около 33 % общей массы аппарата. Срок активного существования пикоКА определяется возможностями системы энергообеспечения и в среднем составляет 5—8 месяцев. Для пикоКА, оборудованных маломощными аккумуляторами, он составляет несколько недель, а при установке дополнительных солнечных батарей — год и более.

Выбор элементной базы, созданной по технологии микросистемной техники [8—10]

Для разработки конструкции МКА был выбран микродвигатель SSTL FASat-Alpha (рис. 2, см. четвертую сторону обложки); он может использоваться как реактивный или импульсный. Микродвигатель работает либо в режиме управления вращающим моментом, либо в режиме управления скоростью аппарата. Двигатель функционирует с помощью автоматической системы управления CAN bus и поддерживает интерфейсы RS 232 или RS 422/485. Автоматическая система управления через эти интерфейсы осуществляет контроль питания двигателя во время работы, измеряет его скорость и температуру. Максимальная движущая сила двигателя 0,04 H, максимальный вращающий момент 5 H · м, масса 0,5 кг, постоянная мощность 1,2 Bт.

В качестве оптических приборов МКА выбраны приборы, основанные на использовании отражателей, представляющих собой массивы микрозеркал, ориентация которых может управляемо изменяться (рис. 3, см. четвертую сторону обложки). Такие зеркала можно использовать в качестве микроминиатюрных пространственных модуляторов света. Микрозеркала могут модулировать либо амплитуду, либо фазу падающего светового сигнала за счет изменения направления или длины оптического пути луча соответственно. Каждое зеркало имеет размеры 100 × 100 мкм, ширина зазоров между ними составляет 1 мкм, максимальный угол поворота каждого микрозеркала — 10°. Эффективный способ управления положением микрозеркала, обеспечивающий минимальную массу изделия, основан на применении электростатических микроприводов [2]. В Национальном центре интеллектуальной собственности Белоруссии в 2008 г. по заявке № С20080031 от 9.10.2008 зарегистрирована компьютерная программа, разработанная в БГУИР (Минск) и предназначенная для расчетов параметров микроприводов.

В качестве систем навигации и ориентации микроспутника выбраны микрогироскопы Analog Devices (США) [2]. Размеры чипа — 3×4 мм, объем преобразователя порядка 10^{-2} см³, поперечное сечение кремниевого подвеса — единицы микрометров. Малая стоимость микрогироскопических систем позволяет использовать их в устройствах, где необходимо точное позиционирование объекта на основе анализа траектории его движения: в аэрокосмической технике, высокоточном оружии, авиации, мореплавании, робототехнике, биморфных медицинских протезах и др. Микрогироскоп ADXRS представляет собой интегральную микросхему. Полученный с емкостного датчика высокочастотный сигнал поступает на каскады усилителя и демодуляции, преобразующие его в выходное напряжение, пропорциональное угловой скорости. Наличие в микросхеме двух перпендикулярно расположенных однотипных датчиков позволяет избежать влияния на выходной сигнал гироскопа вибрации и ускорения. Масса прибора не превышает 0,5 г. Гироскопы при номинальном напряжении питания 5 В потребляют ток 5 мА. Эти гироскопы используются в астроинерциальном компасе (Inertial Stellar Compass, ISC) для более точного позиционирования космического аппарата. В системе определения пространственного положения ISC включает камеру и микроэлектромеханический гироскоп с микропроцессором для определения позиции по трем осям; компас потребляет мощность 3,6 Вт.

Для управления всеми системами космического аппарата выбран 64-разрядный сигнальный микропроцессор высокой производительности (ADSP-21060, TMS-320S6x). Использование этого процессора обусловлено высоким соотношением вычислительных и логико-управленческих функций в алгоритмах обработки информации микроспутника [10]. Этот процессор обеспечивает производительность 40 MIPS (миллионов команд в секунду) и содержит три исполнительных устройства для работы с числами с плавающей запятой. Исполнительные устройства могут работать параллельно, следовательно, пиковая производительность процессора при работе с числами с плавающей запятой составляет 120 MFLOPS (миллионов операций с плавающей запятой в секунду). Кроме того, ADSP-21060 имеет шесть параллельных четырехбитовых линк-портов, которые могут работать с удвоенной тактовой частотой и обеспечивать скорость передачи данных между процессорами до 40 Мбайт/с, каждый в режиме прямого доступа к памяти, т. е. без приостановки работы ядра процессора. Наличие таких высокоскоростных линк-портов практически неограниченно расширяет возможности по созданию мультипроцессорных архитектур [10]. Для уменьшения рассеиваемой мощности на плате установлены процессоры с напряжением питания 3,3 В, тогда как интерфейс несущей платы с SHARCPAC-модулем предполагает уровни сигналов 5 В. Для согласования уровней TTL и LVTTL использованы МОП-ключи с пониженным напряжением питания. На плате также установлен импульсный преобразователь напряжения питания из 5 В в 3,3 В.

Микроспутник в составе космической группировки

Одна из важнейших задач микроспутников — инспекция космических станций для выявления дефектов. На рис. 4 (см. четвертую сторону обложки) представлена многоцелевая станция, окруженная созвездием микроспутников. Каждый МКА выполняет определенную задачу. Специальный микроспут-



Рис. 5. Микроспутник-дозаправщик

ник снабжения сконструирован в качестве "дозаправщика" (рис. 5). Он поможет значительно увеличить сроки эксплуатации больших спутников, особенно имеющих ограниченное число солнечных панелей. Подзарядка может осуществляться с помощью интерфейса USB (рис. 6, см. четвертую сторону обложки).

Микроспутники обеспечивают осмотр, обслуживание, монтаж и услуги связи для больших спутников. Камеры, установленные на микроспутниках, обеспечивают отображение главной платформы космической станции, которая по-другому не может быть осмотрена. Из-за простоты, небольших габаритных размеров и массы, минимальной необходимости взаимодействия с наземными диспетчерами эти специализированные микроспутники будут в ближайшее время очень востребованными [4, 11, 12].

Технология стыковки микроспутника

Размер микроспутников уменьшается, их способность нести топливо и электроэнергию ограничена. Ожидается, что это вынудит микроспутники часто состыковываться, чтобы пополнить свои ресурсы (рис. 4, 6, см. четвертую сторону обложки). Время, потраченное на стыковку, уменьшает время, отпущенное на выполнение других задач микроспутником. Следовательно, процедура стыковки должна быть проста и быстра. При этом есть две основные задачи:

- ориентация микроспутника, чтобы соединить топливные, информационные и электрические элементы;
- собственно стыковка микроспутника и большого спутника.

Время, затраченное на стыковку, зависит от скорости позиционирования спутника для соединения электрических и других элементов. Уменьшение времени стыковки зависит также от скорости регуляторов на определенном этапе стыковки.

В качестве систем высокоточного позиционирования и стыковки микроспутника применена система, построенная на основе микросистемной техники [9, 13]. На рис. 7 и 8 показано устройство из так называемых микроресниц для стыковки МКА. Специальная панель на спутнике покрыта микроресницами. Конструкция является альтернативой обычным системам стыковки космических аппаратов. Вместо традиционных механических стыковочных узлов такая конструкция использует плиточную поверхность с системой микроресниц. Микроточность обеспечивается реактивным воздушным потоком. Для этого используется алюминиевый бак в форме шайбы массой 40-45 г. Воздушный поток накло-



Рис. 7. Ячейка микроресниц

Рис. 8. Стыковка микроресниц



Рис. 9. Стыковочная площадка

нен к микроресницам, создавая заданную нормальную силу против лицевой стороны чипов, встроенных в стыковочную панель. Эта сила может быть отрегулирована независимо от массы ориентируемого микроспутника. При этом считывание положения и обратная связь положения управляются компьютером. Каждая ячейка 1,1 × 1,1 мм (рис. 9) содержит четыре ортогонально ориентируемых привода движения микроресниц. Линия управления приводит в действие независимо каждый привод движения микроресниц. Все приводы головок ориентированы в том же самом направлении, что и каждая ячейка движения. Рука микроресниц приводится в движение вольфрам-титановым разогревающимся резистором, который зажат между двумя слоями нитрида кремния и двумя слоями полиамида. Вся конструкция позволяет на стыковочной плиточной поверхности радиусом 25 см установить спутник массой более 40 кг.

Заключение

Развитие миниатюризованной космической техники требует реализации высоких требований к материалам, элементной базе и технологиям изготовления космических аппаратов, а также обеспечения низкого энергопотребления бортовых систем и создания высокоэффективных, небольших по массе и размерам источников энергии. В качестве примеров успешного применения МЭМС в космической тех-

нике можно упомянуть кремниевые гироскопы, акселерометры, датчики давления, клапаны, микроисточники энергии, системы химического и биологического анализа, высокочастотные, оптические и механические фильтры и высокочастотные ключи. Приводы и двигатели, созданные по технологии микросистемной техники, способны обеспечить значительные силы и крутящие моменты и заменяют обычные механизмы. На сегодняшний день можно полностью сконструировать и построить космический аппарат на базе МЭМС.

Список литературы

 Яшин К. Д., Осипович В. С., Божко Т. Г. Разработка МЭМС // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 1. С. 28—34.
 Яшин К. Д., Осипович В. С., Божко Т. Г.

2. Яшин К. Д., Осипович В. С., Божко Т. Г. Современные разработки МЭМС // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 5. С. 57—64.

3. Стреж С. В., Тропин Е. В. Создание космических систем на базе микроаппаратов // Микросистемная техника. 2003. № 11. С. 33—41.

Яшин К. Д., Золотой С. А., Осипович
 В. С. Микрокосмические аппараты и квантовые ключи // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 7. С. 5–10.
 Яшин К. Д., Золотой С. А., Осипо-

5. Яшин К. Д., Золотой С. А., Осипович В. С., Павлов А. В. Квантовые микросистемы // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 2. С. 62—67.

6. Яшин К. Д., Мельниченко Д. А. Концепция развития информационных микроспутников в Беларуси // Сб. тез. докл. II Международной научно-практ. конф. "Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация", Мн., 2003. Ч. 1. С. 111–112. 7. Яшин К. Д., Золотой С. А., Осилович В. С., Павлов А. В.

7. Япин К. Д., Золотой С. А., Осипович В. С., Павлов А. В. Информационные микрокосмические аппараты // Докл. IV Междунар. конгресса "Обеспечение развития научно-технической информации в Республике Беларусь. Безопасные телематические приложения в проектах национального масштаба" (Минск, 22—24 ноября 2006 г.), Мн., 2006. С. 131—135.

8. Яшин К. Д., Осипович В. С., Павлов А. В. Микрокосмический аппарат дистанционного зондирования Земли // Матер. докл. V Белорусско-российской научно-техн. конф. "Технические средства защиты информации", 28 мая — 1 июня 2007, Минск, Мн.: БГУИР, 2007. С. 88—89.

9. Япин К. Д., Осипович В. С., Павлов А. В. Микросистемная техника для космических аппаратов // Сб. матер. Междунар. научно-практ. конф. "Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров" (Минск, 23—24 апреля 2008 г.). Ч. 1, Мн., 2008. С. 162—164.

10. Япин К. Д., Осипович В. С., Павлов А. В. Микрокосмический аппарат дистанционного зондирования Земли // III Белорусский космический конгресс (октябрь 2007 года, Минск). Мн.: ОИПИ НАН Беларуси. 2007. С. 188—193.

11. Яшин К. Д., Осипович В. С. Построение распределенных робототехнических микронных схем // Матер. Республиканской научно-практ. конф. "Современные технологии: проблемы и перспективы" (Минск, 25—26 марта 2004 г.), Мн., 2004. С. 112—114.

12. Япин К. Д., Осипович В. С., Золотой С. А. Микрокосмические аппараты и квантовые ключи // Матер. II Белорусского космического конгресса (25—27 октября 2005 г., Минск), Мн.: ОИПИ НАН Беларуси, 2005. С. 163—167.

13. Janson S. W., Helvajian H. MEMS, Microengineering and Aerospace System // Интернет-ресурс: http://www.mrs.org

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: наноэлектронике, наноэнергетике, производстве наноизделий.

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., Goodyear 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, предназначенные для насыщения академических программ участвующих университетов.

В зависимости от требований каждого из проектов в области наноэлектроники, наноэнергетики и нанопроизводства студенты будут привлекаться в университетские лаборатории, к оборудованию промышленных фирм и Sandia.

www.eetimes.com/showArticle.jhtmlarticleID = 201801525

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

Правительство РФ утвердило распоряжением от 23 июля 2007 г. N972-р 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 конкурентоспособную на внутреннем и мировом рынках электронную компонентную базу и радиоэлектронную продукцию на ее основе.

Общая сумма инвестиций на реализацию программы оценивается величиной 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. N54 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 в производстве сверхвысокочастотной техники, радиационно стойкой электронной компонентной базы, микросистемной техники, микроэлектроники, электронных материалов и структур, пассивной электронных материалов и структур, пассивной электронных мощонентной 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 разработать базовые промышленные технологии

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

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 разработать унифицированный ряд 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 дизайнцентров 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.

Гигантский пьезорезистивный эффект в кремниевых нанопроволоках

Пьезорезистивный эффект кремния широко используется 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 многообешающих стратегий для разработки быстродействующих субдесятинанометровых 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 кремниевой проволоки р-типа, достигая значения $3550 \cdot 10^{-11}$ Па, для сравнения значение данного коэффициента в объемном кремнии составляет $94 \cdot 10^{-11}$ Па. Показано, что на пьезорезистивные коэффициенты оказывают выраженное воздействие изменение подвижности носителей, индуцированное напряжением, и модификация поверхности. Указанный гигантский пьезорезистивный эффект в кремниевых проволоках может внести значительный вклад в создание гибких электронных устройств, а также наноэлектромеханических систем.

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 долл. Наибольший рост будет характерен для автомобильных MEMS. Значительный рост MEMS будет характерен для 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 на-

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

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

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

нотехники, 1500 изготовителей датчиков, 60 фирм, работающих над созданием биочипов, и 150 — над созданием дизайн-центров (fabless). В разработках 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), готовят к будущему развитию экономику Китая, канал поставок все еще остается несовершенным. 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.

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.

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

Характеристики промышленного кремний-на-изоляторе MEMS-материала

В статье приведено исследование некоторых характеристик, критичных для конструирования, обеспечиваемых технологией кремний-на-изоляторе (SOI) MEMS (SOIMUMPs), и выполнено сравнение с поверхностной микромеханической технологией (poly-MUMPs), которыми владеет фирма MEMSCAP, Inc. Диагностические структуры были использованы для оценки характеристик материала: 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 обшем случае измеренные характеристики оказались одинаковыми для SOIMUMPs и polyMUMPs несмотря на их очень различные фундаментальные ограничения технологического процесса. 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 утоньшенных монокристаллических пластин и поликристаллических пленок, полученных химическим осажлением 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 poly-MUMPs при конструировании MEMS-компонентов.

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

IEEE Electron Device Meeting, Dec. 2006.

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

D. C. Miller et al. Characteristics of a available silicon-onisolator MEMS material. Sensors and Actuators A: Physical, 20 July 2007. Volume 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 инициированию). В статье 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. Volume: 16, Issue: 4. P. 919–931.

Микрофрезерование для MEMS

В статье 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 (layerby-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 76 Å. Отношение объема и массы SWNTs в многослойной структуре рассчитывается, как 63,2 и 75 % соответственно. 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. Проводимость тонкой пленки SWNT при 300 °C составила 2,29 мСм, что в 50 раз выше, чем при комнатной температуре (0,045 мСм).

W. Xue, T. Cui. Deposition and characterization of layer-bylayer 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

В статье сообщается о результатах изготовления микроэлектромеханических систем, приборов и структур с использованием объемных и поверхностных микромеханических процессов. Эти микроэлектромеханические устройства сконструированы и изготовлены в лаборатории Рочестерского технологического института. Микроактуаторы и датчики были разработаны 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

В статье 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, вызванной дрожанием руки. Кроме того, была тестирована 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 проведено сравнение потребляемой мощности различных сигналов на входе датчика и устройстве связи.

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

Microelectronic Engineering, May—August 2007, Volume 84, Issues 5—8. P. 1341—1344.

МЕМЅ-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 недорог для изготовления. Его небольшие размеры (внешний диаметр 300 мкм) уменьшают риск воспламенения 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.

Моделирование датчиков на базе углеродных нанотрубок

Выполнено моделирование датчиков на базе углеродных нанотрубок и проведен анализ их конструктивного пространства. Было установлено, что полупроводниковые нанотрубки почти всегда предпочтительнее металлических нанотрубок в плане быстродействия, статической потребляемой мощности, динамического диапазона и чувствительности. Представлено рассмотрение 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.

Интегрированная MEMSинфраструктура 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/нано уровне. В конструкции одного топливного процессора используется переходная встречно потоковая работа автотермического MEMS-реактора, интегрированного с микромеханическим ультразвуковым топливным распылителем и Pd/Ag мембраной для отделения водорода из производственного потока. 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.

Быстродействующие электронные устройства с использованием плотных, качественно совмешенных 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 РМОП- и КМОП-логические вентили и механически гибкие транзисторы. В целом эти результаты могут указывать направление создания интегральных электронных устройств с высокой степенью интеграции на базе нанотрубок.

G. C. Hill et al. SU-8 MEMS Fabry-Perot pressure sensor. Sensors and Actuators A: Physical, 20 July 2007, Volume 138, Issue 1. P. 52–62.

J. Deng et al. Modeling Carbon Nanotube Sensors. IEEE Sensors Journal: Sept. 2007, Volume: 7, Issue: 9. P. 1356–1357.

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

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

S. J. Kang et al. High-performance electronics using dense, perfectly aligned arrays of single-walled carbon nanotubes. Nature Nanotechnology, 25 March 2007. P. 230–236.

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), представляющем собой следующее поколение космических телескопов после телескопа Hubble Space Telescope. Микроклапанные матрицы предназначаются 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 приводятся в действие магнитным способом, защелкиваются и адресуются электростатическим способом. Клапанные матрицы изготавливаются с использованием объемной микромеханической 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.

SPIE Defence & 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 доверительный сигнал высокого уровня при низкой стоимости с использованием миниатюрного корпуса. Считывание отдельных MEMS-приборов осуществляется с использованием пьезорезистивных датчиков и оптических датчиков/ПЗС. 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.

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. Применяются при настройке антенн, полосовом программируемом согласовании импеданса, настройке усилителя мощности, в регулируемых ВЧ фильтрах для мобильных телефонов, базовых станций, портативных компьютеров и прочих портативных устройств.

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

Mobile Handset DesignLine, 29 October, 2007.

Монтаж специализированных ИС на MEMS-пластины

В настоящее время сначала создаются MEMSпластины и затем соединяются со специализированной ИС (СпИС). Фирма VTI Technologies впервые осуществила монтаж кристаллов СпИС активной стороной вниз на MEMS-пластины до резки. Процесс получил название Chip-on-MEMS (CoM). 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 возникают 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 в

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

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

SPIE Defence W Security Symposium. 6562-13, Session 4. 9–13 April. 2007.

статье пути решения указанных проблем. Был использован постмикромеханический КМОП-процесс на базе глубоко реактивного ионного травления (DRIE), который обеспечивает создание надежно электрически изолированных микроструктур из монокристаллического кремния для создания 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 выполнения термического моделирования и экспериментов был использован толстый фоторезистный слой в качестве термического канала для устранения подтравливания кремния. Проблема загрязнения боковых стенок решалась посредством использования модифицированного КМОП — MEMS-процесса. С использованием нового процесса был успешно изготовлен трехосевой акселерометр с малошумящим, маломощным усилителем на кристалле.

H. Qu, H. Xie. Process development for CMOS_MEMES sensors with robust electrically isolated bulk silicon Microsystems. Journal of Microelectromechanical Systems. Oct. 2007. Volume: 16, Issue: 5. P. 1152–1161.

Использование MEMS и нанотехники в портативных электронных устройствах и автомобилях

MEMS-техника является уже освоенной в автомобильной сфере, но имеются новые MEMS-приборы и новые нанодатчики, которые оказывают революционное воздействие на автомобильную технику благодаря измерениям новых физических характеристик, которые раньше никогда не измерялись в автомобильной области. В случае автомобильных применений главными факторами являются стоимость и быстродействие. В случае портативных электронных устройств MEMS и нанотехника будут применяться 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.

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 КМОПприборами), 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 какихлибо капитальных затрат, чем могут воспользоваться существующие малые и средние предприятия и новые фирмы для разработки изделий. Другой особенностью является то, что промышленные технологии foundry непрерывно совершенствуются и немедленно становятся доступными для выполнения перспективных разработок без капитальных затрат.

В статье исследуются варианты, связанные с интеграцией промышленной технологии, технологии создания заказных ИС как с новыми материалами, так и другими технологиями, такими как MEMS (датчики и исполнительные устройства), и представлены различные примеры.

Процесс	Эконо- миче- ский барьер для ос- воения	Обра- ботка на уров- не плас- тины	Предва- ритель- но тестиро- ванные пласти- ны	Наличие промыш- ленного выпуска	Сбор- ка крис- таллов
Интегриро- ванные предвари- тельно об- работанные КМОП ИС и MEMS	Сред- ний/вы- сокий	Да	Нет	Ограни- ченная	Нет
Постобра- ботанные MEMS на КМОП	Средний	Да	Нет	Возмож- но для некото- рых про- цессов	Нет
Интегри- рованные КМОП ИС и MEMS	Высокий	Дa	Нет	Чрезвы- чайно ог- раничен- ная	Нет
КМОП и MEMS c использо- ванием травления	Сред- ний/вы- сокий	Да	Нет	Да	Нет

A. P. Pisano. MEMS and nano technology 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.

Процесс	Эконо- миче- ский барьер для ос- воения	Обра- ботка на уров- не плас- тины	Предва- ритель- но тестиро- ванные пласти- ны	Наличие промыш- ленного выпуска	Сбор- ка крис- таллов
Гибридиза- ция	Низкий	Дa	Да (крис- таллы) Нет (пласти- на)	Да (крис- таллы)	Да
Микросхе- ма на мик- росхеме	Низкий	Нет	Дa	Да	Дa
Много- кристаль- ный модуль	Низкий	Нет	Дa	Да	Да
Приварка на пласти- не КМОП ИС/МЕМS	Средний	Да	Нет	Нет	Нет

В таблице приведено сравнение различных технологий интеграции КМОП/MEMS.

A. J. Walton 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

В статье 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.

Ch. Hierold. Concepts for carbon nanotubes 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. осуществляют интегральные компоненты микрохимической системы. Существуют два направления химической 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.

T. Kitamori. 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 MEMSсмесителя, сконструированного и изготовленного с использованием промышленной КМОП-технологии 0,35 мкм. MEMS-прибор, в котором используется поликремниевая закрепленная 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.

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 нет возможности 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 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 пониманию 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. Дан 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.

J. L. Loez et al. Mixing in a 220 MHz CMOS-MEMS. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 27–30 May 2007. P. 2630–2633.

Bruque 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 OT 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.

I. Genith. Engine on a chip — the Dream of the Personal Turbine.

www.tfot.info/index2.php?option=com_content&task= view&id-114&-Itemid-5...

Сети на базе многостенных углеродных нанотрубок как датчиков газа для обнаружения NO₂

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. Датчики характеризовались измерениями сопротивления в диапазоне от 25 до 250 °C в атмосфере воздуха для того, чтобы обнаружить оптимальную температуру. Наивысшая чувствительность к NO₂ была получена при 250 А. Тестированные MWNT-датчики были чувствительны к низким концентрациям NO₂ в воздушной атмосфере. Кроме того, эти датчики не реагируют на близкородственные газы, такие как H₂, NH₃, толуол и октан. Термоциклирование приводит к увеличению чувствительности датчика к NO₂.

Использование MEMS для построения прибора и корпуса

Корпусирование MEMS-приборов часто доминирует в определении стоимости прибора. В последнее время сотрудники отделений механики и электротехники Стэнфордского университета совместно с сотрудниками фирмы Bosch разработали и продемонстрировали новый метод герметизации MEMS на уровне пластины. В данном процессе используются технологические MEMSоперации 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.

B. Kim 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 монолитных топливных элементов на базе MEMS

В статье описываются конструкция, изготовление и характеристики небольших топливных элементов с использованием MEMS-технологии. Топливный элемент на базе MEMS состоит из трех слоев: электромеханически интегрированные анодный и катодный слои, полимерная и электромеханическая мембрана. 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 Вт

при плотности тока приблизительно 0,2 А/см².

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 будушие 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 вследствие высокого значения отношения площади поверхности к объему и уникальных физических и электрических свойств. Были разработаны несколько процессов для синтеза газовых микродатчиков с использованием одностенных углеродных нанотрубок (SWNT), функционирующих на электрохимическом принципе, из металлических наночастиц, наночастиц оксида металла или нанопокрытий из проводящего полимера. Этот метод позволяет создавать высокоплотные матрицы нанодатчиков с индивидуальной адресацией. Например, наночастицы Pd, полученные методом электроосаждения в сетях SWNT, формируют

I. Sayago et al. Multi-Walled Carbon Nanotube Networks As Gas Sensors for NO₂ Detection.

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

датчик водорода, проводящие полимеры осаждаются для считывания аммиака, органические соединения наносятся для считывания NO_x и летучих веществ. Меняя режимы, можно настраивать характеристики считывания. Во многих случаях изготовленные образцы проявили чувствительность, превосходящую чувствительность существующих датчиков. Систематические исследования влияния определенных параметров на характеристики датчика позволяют углубить фундаментальное понимание датчиков. Представлены последние результаты, касающиеся методов изготовления, механизмов считывания и сведения о будущих применениях в области обороны и безопасности.

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 электромеханических свойств 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.

Прогноз мирового спроса на наноматериалы

По данным аналитической фирмы Freedonia Group Inc., мировой спрос на наноматериалы в 2011 г. составит 4,2 млрд долл., а к 2025 г. увеличится до 100 млрд долл. В 2025 г. использование наноматериалов выйдет далеко за пределы первоначальных применений, таких как суспензии для полировки полупроводниковых пластин, суперпрочные композитные материалы, прозрачные солнечные экраны, изделия личной гигиены, самоочищающиеся стекла, оборудование для спорта высокого уровня. Электроника является крупнейшей областью применения наноматериалов, и основным регионом развития будет Азиатский/Тихоокеанский. Пока Япония имеет самый крупный рынок наноматериалов в Азии, но самый быстрорастущий рынок — в Китае, и со временем он станет самым крупным в указанном регионе.

Значительны масштабы применения наноматериалов в области здравоохранения. Этот рынок в 2025 г. достигнет 50 млрд долл. Использование наноматериалов в здравоохранении будет сконцентрировано в США и Западной Европе, где выпускается значительная доля фармацевтических изделий от мирового выпуска. На переднем крае разработки наноматериалов для фармацевтической промышленности находятся Франция и Швейцария.

Наноматериалы будут широко использоваться в системах доставки лекарства, создавая возможности для более надежного, более эффективного дозирования лекарств при лечении болезни. В последующие один — два десятилетия новые материалы, такие как нанотрубки и дендримеры, составят большую долю от общих используемых наноматериалов.

World demand for nanomaterials to reach \$4.2 billion by 2011. Military & Aerospace Electronics. December, 2007.

Успешные испытания нанодатчиков на орбите

Устройство из системы химических нанодатчиков Nano ChemSensor в качестве полезной нагрузки спутника MidSTAR-1 было испытано 24 мая 2007 г. Целью эксперимента было убедиться, что изготовленные из углеродных нанотрубок нанодатчики, покрытые чувствительными материалами, могут быть использованы в условиях космического полета и выдержать 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 вызывает увеличение или уменьшение электрического тока, протекающего через датчик. Для выполнения тестирования в космосе в небольшую камеру был введен азот, содержащий двуокись азота в объеме 20 частей на 10⁶. В камере также был расположен тестовый кристалл с 32 нанодатчиками. При тестировании изменялся электрический ток, проходящий через нанодатчики после контакта двуокиси азота и считывающих материалов. Учеными выполнена разработка химических датчиков 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

Полупроводниковая промышленность 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 техническими проблемами, что вынуждает искать альтернативные технологии соз-

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

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

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

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

дания приборов. В настоящее время наметился прогресс, который был сделан в использовании углеродных нанотрубок, а также 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, благодаря превосходным оптическим свойствам нанотрубок возможно изготовление как электронных, так и оптоэлектронных приборов из одного и того же материала.

Ph. Avouris 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 NO₂, положительных импульсов затворного напряжения в случае NH₃. Кроме того, наблюдалась временная зависимость проводимости от импульсов затворного напряжения для различных видов газов вне зависимости от концентрации газов. Полученные результаты показывают возможность различать виды газов с использованием датчиков указанного типа.

Nanotechnology, 31 October 2007. www.iop.org/EJ/abstract/0957-4484/18/43/435504

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) размером 5 × 2 мм 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.

Синхронизирующие наносхемы для нанокомпьютеров и других наноэлектронных систем

Границы предполагаемых характеристик определяются имитационным моделированием класса всех наноэлектронных синхронизирующих схем. Такие схемы могут быть использованы в качестве главных генераторов синхроимпульсов на кристалле для автономных наносистем, локальных генераторов синхроимпульсов в составе наноэлектронных компьютеров или локальных генераторов наноэлектронных устройств для обработки смешанного сигнала. Представлены результаты конструирования и моделирования указанных наносхем. 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 наноэлектронных систем.

D. Shamik 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. В данной статье представляется вводный материал по зарождающейся парадигме наносхем, графеновой наноэлектронике. 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. Для демонстрации уникальных электронных свойств описываются последние конструкции: переключатель, полевой транзистор и ОЗУ. Также представлена общая платформа для моделирования схемы и платформа, которая может использоваться для конструирования вычислительных систем будущего на базе графена.

Y. W. Chang et al. Electrically refreshable carbon-nano-tube-based gas sensors.

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.

Z. F. Wang et al. Emerging nanocircuit paradigm: Graphenebased 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 $60^\circ\,{\rm go}\,71^\circ$ посредством настройки давления смеси газов в рабочей камере системы РИТ. Распределение толщины поглотителя рентгеновских лучей зависит от угла 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.

2nd IEEE International Conference on Nano/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/нанодатчиков 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. В данной статье 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 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. В заключение приведены направления будущих исследований.

Lin, Liwei. Integration of Nanostructures with Microsystems. 2nd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. Jan. 2007. P. nil30-nil30.

Конструирование и моделирование маломощного СNT-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 ввиду высокой стоимости и габаритов 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 MWCNT и интеграции считывающих элементов MWCNTs, которые оказывают большое влияние на конструкцию элементов КМОПсхемы. В демонстрационных целях была использована КМОП-технология 0,35 мкм. Приведены результаты имитационного моделирования и данные реализации.

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

Датчик качества воздуха на базе MEMS

В статье представлено описание новой сенсорной матрицы на базе MEMS-технологии для измерения качества воздуха и новой стратегии измерений на основе новой модели. Сенсорная матрица состоит из газовых (SnO₂) датчиков, датчика влаги на базе пористого кремния и датчика температуры (Pt), интегрированных на одном кристалле. Были использованы КНИ-технология, Pt-металлизация и объемная микромеханическая обработка. Были получены хорошие значения характеристик, касающиеся термических свойств, чувствительности, селективности и времени. Значения содержания газа и атмосферной влажности, оцениваемые на базе разработанных моделей датчика, находятся в хорошем соответствии с действительными значениями.

Составил В. А. Юдинцев

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

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

U. Mesheder et al. MEMS-Based Air Quality Sensor. International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2007. Transducers 2007. P. 1417–1420.

CONTENTS

Keywords: nanoelectronics, semiconductor materials, computer-aided design, processor system solvers.

Kovalevsky A. A., Strogova A. S., Plyakin D. V., Borisevich V. M. Study of Highly Ordered Germanium Nanocluster's Self-Organization in the Process of Polycrystalline Silicon Doped by Germanium Films Deposition. . . 14 Using methods of atomic-forced microscopy and combination scattering of light by optical phonons in germanium clusters the characteristic features of formation of self-organized germanium (Ge) clusters and solid solution SiGe first formed in the regime of deposition of subfine polycrystalline films of silicon doped by Ge on nanosized dielectrics' films are studied. Interrelation of form, size and density of nanoclusters' (NC) of Ge with conditions of their self-organization is investigated. The influence on the process of self-organization of clusters of interdiffusive processes significant at high temperatures of deposition and doping of polycrystalline silicon (PCS) is determined. The principal possibility to manage the geometric parameters of self-organizing NS (nanoislets) by choosing conditions of their self-organization is shown.

Keywords: nanoclusters, dislocation, monosilan, monogerman.

The acoustic emission at a blow of solid microprobe (corundum) on metal surface (Pb, Al, Cu, Ta) is experimentally investigated. Measurements have shown that acoustic emission intensity increases in proportion to microprobe oscillations amplitude that agrees with theoretical representations. Acoustic emission at probe-surface interaction can be used for diagnostics of viscoelastic properties of materials and images formation in atomic force microscope.

Keywords: blow of probe on solid state surface, acoustic emission, acoustic velocity, metals, atomic force microscope.

Keywords: magnetoelectric effect, film structure, piezoelectric, ferrite, magnetic field sensors.

Egorov V. V. Surface Microroughnesses Influence on the Characteristics of the Images in Optic Precise Device	ces. The
Scalar Approach. Part 2	26

There are statistical fitches of field scattered by rough plane absolute soft surface is calculated in that article. It is indicated that field calculated by the integral equation method is differs of Kirhgoff's approach field. **Keywords:** boundary problem, integral equation method, radius of correlation of irregularities, boundary field, scattering field.

Keywords: autonomous microvehicle, movability, scale factor method.

Keywords: micromechanical accelerometer, correction of dynamic properties, a dynamic error.

Yashin K. D., Osipovich V. S., Medenko P. V., Login V. M. *Microsystem Technics for Cosmic Satellites* . . 38 This review considers questions of designing of microcosmic satellites due to application of microsystem technics.

Keywords: microsatellite, nanosatellite, picosatellite, construction of microcosmic satellites, cosmic group.

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(499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru; http://www.microsystems.ru

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@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 Е. В. Комиссарова

Сдано в набор 25.02.2009. Подписано в печать 26.03.2009. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,86 Уч.-изд. л. 8,12. Заказ 279. Цена договорная

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15

- НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 4, 2009 -