

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 5 (106) ✧ 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 базу данных Российского индекса научного цитирования

Издается с 1999 г.

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.

Андреевский Р. А.

Антонов Б. И.

Арсентьева И. С.

Астахов М. В.

Быков В. А.

Волчихин В. И.

Горнев Е. С.

Градецкий В. Г.

Гурович Б. А.

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.

Тимошенко С. П.

Тоду П. А.

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Безменова М. Ю.

Григорин-Рябова Е. В.

Чугунова А. В.

Учредитель:

Издательство

"Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Панфилов Ю. В. Состояние исследований и разработок в области нанотехнологий в Северной Европе (аналитический обзор) 2

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ

Лисов О. И., Махалов А. А. Влияние геометрии кэша на его производительность 5

Огородникова О. М., Панин О. А. Компьютерное исследование компонентов микросистемной техники. 12

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Штенников В. Н. Оценка времени и температуры пайки электронных приборов. 15

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Горнев Е. С. Датчики становятся меньше, функциональнее и умнее 18

Просьянюк В. В., Сигейкин Г. И., Суворов И. С., Колединский Г. М. Миниатюрные резервные средства автоматики на основе высокотемпературных гальванических элементов. 29

Агафонов В. М., Бугаев А. С., Орел А. А. Нелинейные явления в молекулярно-электронной ячейке планарного типа. 32

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

Раткин Л. С. Проблемы применения микро- и наносистемной техники в бионаоскопии 38

НОВОСТИ НАНО- И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ 42

ИНФОРМАЦИЯ 51

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)

Адрес для переписки:
e-mail: nmst@novtex.ru

УДК 621.98

Ю. В. Панфилов, д-р техн. наук, проф.,
МГТУ им. Н. Э. Баумана

СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СЕВЕРНОЙ ЕВРОПЕ (аналитический обзор)

Представлен аналитический обзор материалов конгресса "Нанотех—Северная Европа 2008", основными темами которого были энергетика, электроника, строительство, биология и здоровье, вода, пища, безопасность и инвестиции. Показаны наиболее интересные результаты современных исследований в области нанотехнологии, представленные на выставке и научно-технической конференции. Сделаны выводы о состоянии коммерциализации результатов разработок и исследований в области нанотехнологии.

Ключевые слова: нанотехнология, электроника, энергетика, наноматериалы, нанокompозиты.

В конце сентября 2008 г. в Дании состоялся конгресс под названием "Нанотех—Северная Европа 2008", в рамках которого прошли выставка и научно-техническая конференция. Оба эти мероприятия проводились в Конгресс-центре в Копенгагене (рис. 1, см. вторую сторону обложки). В выставке и конференции кроме европейских стран принимали участие Япония, Китай, Южная Корея и США. Российская делегация была представлена четырнадцатью компаниями и одним вузом — МГТУ им. Н. Э. Баумана (рис. 2, см. вторую сторону обложки).

Тематика выставки и конференции была посвящена энергетике, электронике, строительству, биологии и здоровью, воде, пище, безопасности и инвестициям. Особенностью выставки было подавляющее большинство экспонатов так называемых товаров народного потребления. То есть можно считать, что коммерциализация нанотехнологии в настоящее время идет главным образом именно в области товаров народного потребления. Экспонаты, относящиеся к нанoeлектронике, практически отсутствовали.

Другое дело — доклады конференции, которая одновременно проходила в пяти залах. Устные сообщения и постеры затрагивали следующие направления нанотехнологии: аналитическое оборудование (рис. 3 и 4, см. вторую сторону обложки), нанолитографию, модификацию поверхности, антифрикционные и износостойкие покрытия, нанотрубки, нанопроволоку, нанопористые материалы для сенсоров, альтернативные источники энергии и нанокompозиты.

На основании докладов можно было сделать вывод — революции в нанoeлектронике не получилось, идет постепенное накопление знаний и опыта. И это естественно, если проанализировать развитие микроэлектроники после открытия в 1948 г. транзистора. Тогда прошло 20—25 лет, пока изделия твердотельной электроники не стали вытеснять электровакуумные приборы (ЭВП). И произошло это благодаря появлению планарной технологии, так как ни отдельные полупроводниковые приборы, ни гибридные интегральные схемы и экономически, и психологически не смогли конкурировать с ЭВП.

Парадокс настоящего времени заключается в том, что для нанoeлектроники планарная технология стала тормозом, поскольку архитектура в виде нанотрубки между контактными площадками или токопроводящими дорожками микрометровых размеров перспективы не имеет. Нужна, как и в случае с транзистором, принципиально другая архитектура и ... время, но желательно меньше, чем 20—25 лет.

Наиболее интересные результаты современных исследований в области нанотехнологии, представленные на конгрессе, по нашему мнению, получены в следующих областях.

- Наноматериалы для солнечной энергетике; термоэлектрические материалы, конвертирующие тепловую энергию в электрическую без шума и потерь на трение при малых габаритных размерах и массе (неорганические материалы для высоких температур, антимонид цинка для средних температур и антимонид железа для низких температур); материалы для хранения газов; фотокаталитическое получение водорода; биотопливо.

- Углеродные нанотрубки (УНТ), служащие базовым элементом водородного топливного элемента, основанного на действии сил Ван-дер-Ваальса, в двустенных УНТ. УНТ с диаметром 10—50 нм и длиной в несколько микрометров синтезированы на Si-подложке со слоями SiO₂ или Si₃N₄ методом CVD при 1023—1053 К. УНТ используются также для непрерывного измерения газового потока благодаря уникальным сорбционным характеристикам для органических молекул.
- Материалы для хранения водорода в историческом аспекте применялись так: в конце 70-х годов удавалось удерживать до 6,5 объемных % водорода, в 1981 — 2006 гг. под индексом "А" обозначались гидриды Al, Li и других элементов (AlH₃ — 10 %H, LiAlH₄ — 10,54 %H, NaAlH₄ — 7,46 %H, Ca[AlH₄]₂ — 7,89 %H, Mg[AlH₄]₂ — 9,34 %H), под индексом "М" — гидриды магния (7,6 %H), под индексом "С" — углерод и углеродный наноккомпозит, сорбирующие водород, под индексом "МН" — другие гидриды (Mg, Ca, Na, Ti, Zr, V, Ni, Fe, Mn и др.). Анализ публикаций свидетельствует о следующих приоритетах: по иностранным публикациям — С (60,3 %), МН (14,1 %), А (13,3 %), М (8,5 %); по российским — МН (45,4 %), А (35,1 %), С (11,8 %), М (7,7 %).
- Солнечные элементы на полупроводниковых наночастицах и полимерных мембранных материалах обладают увеличенной площадью поверхности и, как следствие, увеличением взаимодействия поверхностных наночастиц с полимерным или органическим компонентом солнечного элемента, от которого зависит рекомбинация пары экситонов, уровень рассеяния и инжекции электронов на электродах. Альтернативой наночастицам может служить нанопроволока, имеющая большую поверхность и облегчающая перемещение электронов к электродам. Изготавливаются методами электрохимии, лазерной абляции и CVD.
- Органические полупроводники — тонкие (200—800 нм) поликристаллические пленки из C₂₀H₁₂, полученные осаждением из паровой фазы, предназначены для изготовления органических солнечных элементов и полевых транзисторов. Солнечный элемент с электродами из TiO₂ и квантовыми точками из CdSe, в котором фотон-электронный переход может иметь очень высокую эффективность, а энергия передается между множеством квантовых точек.
- В разделе электроники можно выделить такие области, как фотоника, магнетизм, хра-

нение информации, полупроводниковые компоненты.

Описывается фотолюминисценция квантовых точек из InAs в квантовых проводах из InP, полученных методом "пар—жидкость—твердое тело". В этом методе частицы Au, являющиеся катализатором для роста нанопроволки из InAs, осаждались в MOCVD-реакторе при низкой температуре. Нанопроволка из AlN с большим аспектным отношением рассматривается как широкозонный полупроводник (6,2 эВ) для применения в источниках УФ излучения, полевых эмиттерах (автокатодах) для плоских дисплеев, высокоэнергетичных ЭВП, устройствах генерации СВЧ излучения.

Получены наноразмерные кольцеобразные проводящие и полупроводниковые структуры, обладающие уникальными магнитооптическими свойствами, такими как перпендикулярная структура хранения информации. Метод изготовления такой структуры заключается в локализованном распылении уже осажденного материала на маску из коллоидных наночастиц. Изготовлены магнитные наноккомпозиты для антенн и ВЧ техники. На основе полимеров — наночастицы Co диаметром 10—14 нм в полиэтилене, и других полимеров получают испарением соответствующего раствора или методом Ленгмюр—Блонжет.

Наноэлектроника и молекулярная электроника представлены нанотранзистором с электрон-фотонным взаимодействием на квантовых точках и нанотранзистором в виде нанопроволки из InP, полученной методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

"Философия" нанолитографии заключается в использовании с середины 80-х годов растровой электронной литографии (РЭЛ) и сфокусированного ионного луча (FIB — *focused ion beam*); в 1993 г. разработан лазерный интерферометр для РЭЛ; в настоящее время создан РЭЛ/FIB с лазерным интерферометром повышенной точности, обеспечивающий размеры элементов менее 100 нм, точность позиционирования для репродуцирования 50 нм, разрешающая способность интерферометра 2 нм.

- Из других интересных публикаций можно отметить промышленное производство фуллеренов методом дугового разряда в вакууме. Оптимизация процесса ведется путем варьирования давлением, током и расстоянием между графитовыми электродами. Фуллерены извлекаются из рабочей зоны с помощью потока гелия. В 2,5 кг сажи находятся 250 г фуллеренов.

Органические нановолокна выращены на тонкой пленке золота методом PVD на нагретой слюдяной подложке в высоком вакууме. Микроструктура формировалась в кремнии по стандартной технологии фотолитографии с реактивным ионным травлением. Пленка золота наносилась электронно-лучевым испарением. Геометрические размеры и форму частиц измеряли методом сфокусированного ионного луча — FIB.

Из многочисленных выводов и рекомендаций в материалах конференции целесообразно выделить следующее: нанотехнология находится в начальной стадии своего развития и коммерциализация ее результатов только началась; наночастица не нова, но до сих пор не коммерциализирована; существуют шесть "столпов" нанотехнологии.

1. Наноструктурированные материалы:

- биоконпозиты, в том числе биodeградирующие для решения проблемы одноразовых изделий, а также биочувствительные материалы — биосенсоры;
- нанокомпозиты, в том числе на основе нанопроволоки и нанотрубок;
- термоэлектрические материалы для охлаждения, производства энергии непосредственно в строениях;
- монолитные кремниевые аэрогели для изоляторов, стекол, фильтров, мембран;
- полимеры — биodeградирующие, проводящие, антистатические, электрохромные, фотовольтажные.

2. Наноструктурированные поверхности на основе физической модификации:

- наноструктурированными аморфными сплавами для сенсоров, в том числе климатических;
- сверхтвердыми нанокристаллическими оксидными и металлическими покрытиями;
- импульсным лазерным осаждением сверхтвердых оксидных и металлических материалов для оптики, сенсоров и SOFC (*solid oxide fuel cells*);
- композитами "полимер — ЖК" для ЖК дисплеев и "умных" стекол (фотохромных);
- электрохромными покрытиями;
- нанопористыми мембранами и наночастицами для краски (гомогенные 3D-структуры), полученными с помощью лазерной обработ-

ки, повторения наноструктур в металле и полимере (репликация).

3. Нанооптика:

- планарные оптические микросхемы на кремнии;
- оптоволокно с низким коэффициентом преломления в базовом материале с высоким коэффициентом преломления;
- низкоэнергетические светодиоды на основе органических и неорганических наноструктур, включая УНТ и неорганические нанопроводы;
- оптические сенсоры — детекторы оптического сигнала, в том числе интенсивности света и для управления климатом.

4. Наносенсоры и наноэлектроника:

- мониторинг на основе биосенсоров;
- электроактивные полимеры;
- беспроводная передача данных.

5. Наноэнергетика:

- топливные элементы — хранение водорода в нанопористых материалах;
- наноструктурированные материалы для электродов;
- солнечные элементы на основе бинарных смесей полимеров — очень дешевых тонких пластиковых пленок; гидридные на основе неорганических наночастиц, непористых структур и нанопрутков; краска на гибкой титановой фольге или пленка на стекле, нанесенная золь-гель методом (в том числе на оконные стекла); сверхпроводниковые материалы толщиной 5—50 нм с внедренными наночастицами;
- тонкопленочные солнечные элементы — нанокристаллические CuInS_2 , CuGaS_2 и твердые растворы.

6. Наноэкология.

Подводя итог проведенному анализу, можно заключить, что основные достижения в коммерциализации нанотехнологии относятся к производству потребительских товаров. Устойчивое развитие имеет аналитическое оборудование. Нанотехнология в энергетике, строительстве, биологии и медицине развивается эволюционно, идет накопление знаний и опыта. Для достижения коммерческих успехов в наноэлектронике необходимо время, в течение которого должны появиться принципиально новые технические решения.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 004.942:004.254

О. И. Лисов, д-р техн. наук, проф., доц.,
А. А. Махалов, аспирант,
МИЭТ,
e-mail: makhaloff@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ КЭША НА ЕГО ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

Описаны исследование эффективности работы кэш-памяти при различных его конфигурациях и поиск оптимальной геометрии кэш-памяти процессора архитектуры Орхидея для определенного набора задач.

Ключевые слова: кэш, кэш-линия, производительности кэш, геометрия кэша, тег, симулятор, микропроцессор, архитектура Орхидея, моделирование, эффективность, прямое отображение, множество ассоциативности.

При разработке аппаратурных или программных модулей встает вопрос выбора оптимальной структуры, алгоритма работы данного блока, для того чтобы добиться наибольшей его производительности. Выбор оптимального решения осуществляется на основе моделирования и дальнейшего исследования полученных результатов при различных наборах входных данных. При модификации кэш-памяти процессора архитектуры Орхидея встал вопрос: какой выбрать размер и характеристики кэша (*cache*), чтобы добиться его наиболее эффективной работы. Под эффективной работой кэша понимается наименьшее среднее время доступа к памяти на единицу данных.

Цель исследования — определить оптимальную геометрию кэша архитектуры Орхидея. Под оптимальной геометрией понимается такой размер кэш-линии, чтобы среднее время доступа к памяти на различных задачах была наименьшей, без изменения объема кэш-памяти.

Кэш хранит копии данных из различных адресных областей основной памяти. Так как в кэше невозможно одновременно хранить копию всей памяти, используется метод определения адресов, данные которых находятся в кэше. Для это-

го применяется механизм тегов — дополнительная область памяти кэша, в которой содержатся индексы адресов, скопированных в кэш. Как правило, тег представляет собой старшую часть адреса. Каждая строка памяти кэша (*cache line*, кэш-линия) имеет соответствующий адресный тег. Для получения данных с конкретного адреса основной памяти кэш-контроллер просматривает теги, чтобы найти кэш-линию, принадлежащую данному адресу и содержащуюся в кэше (*hit*, совпадение), или ее отсутствие (*miss*, промах). Чтение из кэша осуществляется гораздо быстрее, чем чтение из оперативной памяти [1].

Когда кэш находится на виртуальных адресах, необходимо наличие признака принадлежности кэш-линии к определенному процессу. Для решения этой проблемы в кэш-линии присутствует дополнительное поле, содержащее идентификационный номер (*pid*) процесса.

Работа кэша зависит от методов упорядочивания или отображения кэш-линий. К таковым относятся методы полностью ассоциативного (*full associative*), прямого (*direct map*) и множественно-ассоциативного отображения (*N way associative*) [1]. Метод полностью ассоциативного отображения заключается в следующем: когда запрашиваются данные с определенного адреса основной памяти, проводится сравнение (по тегу, идентификационному номеру, если есть) со всеми линиями в кэше.

При прямом отображении конкретные адреса основной памяти назначаются определенным адресам строк в кэше, где будут храниться в дальнейшем данные из основной памяти. Этот метод также отличается высокой эффективностью, поскольку для получения данных по конкретному адресу основной памяти необходимо проверить лишь один адресный тег [1].

Метод множественно-ассоциативного отображения основан на методе прямого отображения. Кэш прямого отображения имеет единственный ассоциативный набор адресов, т. е. один адрес основной памяти может быть ассоциирован (или отображен) только с определен-

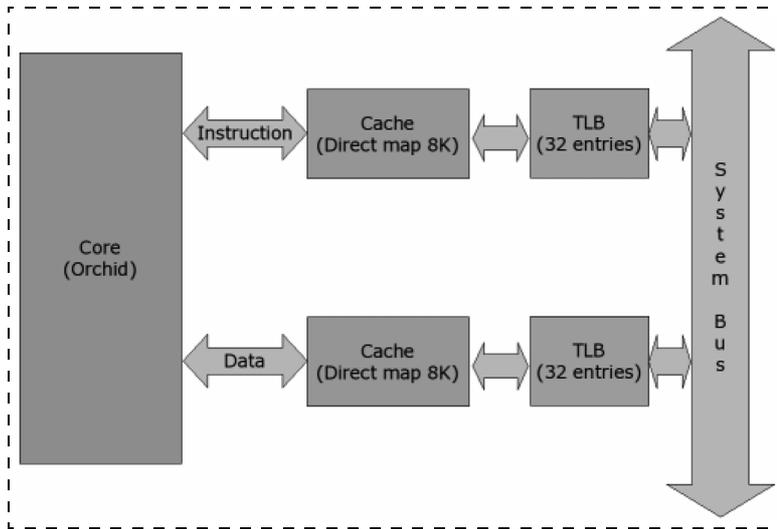


Рис. 1. Блок MMU в первой версии процессора архитектуры Орхидея

ным адресом строки кэша. Двухстраничный множественно-ассоциативный кэш содержит два набора адресов, поэтому адрес памяти может содержаться в одной из двух строк кэша. В свою очередь, четырехстраничный множественно-ассоциативный кэш хранит адрес памяти в одной из четырех различных строк кэша (наборах). Увеличение ассоциативных наборов повышает шанс обнаружить необходимое значение; тем не менее, это занимает несколько больше времени, так как, чтобы найти определенное местоположение в кэше, понадобится просмотреть больше адресных тегов. В сущности, каждый набор в n -страничном множественно-ассоциативном кэше является субкэшем (*set*), ассоциированным с определенным адресом основной памяти. По мере увеличения субкэшей или наборов кэш становится полностью ассоциативным, т. е. каждый адрес памяти может храниться в любой строке кэша. В подобном случае n -страничный ассоциативный кэш (*n-way associative cache*) будет представлять собой разумный компромисс между полностью ассоциативным кэшем и кэшем прямого отображения [1].

Первая версия процессора архитектуры Орхидея (рис. 1) имеет два кэша: инструкций и данных. Размер каждого — 8 Кбайт. Тип кэшей — прямое отображение на память. Кэши находятся на виртуальных адресах, т. е. располагаются до блока преобразования адресов. Запросы в память от ядра процессора (*core Orchid*) по шинам инструкций и данных (*Instruction, Data*), имея виртуальные адреса, поступают в соответствующие кэши. В случае попадания (*hit*) данные передаются в ядро. В случае промаха (*miss*) запросы поступают в таблицу преобразования адресов (TLB), где пре-

образовываются адреса из виртуальных в физические, по правилам преобразования. Всего в TLB процессора Орхидея содержатся 32 правила преобразования, или записей (*entries*). После преобразования запросы поступают на системную шину (*system bus*).

Память кэша (*cache memory*) состоит из 512 линий (*line*) по 16 байт. В каждой линии присутствует поле тег (*tag*) и поле идентификатора процесса (*pid*), так как кэш работает на виртуальных адресах. Виртуальный адрес (*virtual address*) как инструкций, так и данных в архитектуре Орхидея 32-разрядный. Старшая часть адреса (с 13 до 31 бит) выделяется под тег. Тег кэш-линии совпадает с номером виртуальной страницы (VFN) из виртуальной

составляющей таблицы преобразования адресов (TLB). Таким образом, кэш может полностью содержать в себе одну страницу (в случае, если тег во всех линиях одинаковый). Младшая часть виртуального адреса (с 0 по 3 бит) содержит смещение по данным (*offset*) в кэш-линии. Оставшаяся часть виртуального адреса (с 4 по 12 бит) содержит номер кэш-линии, за которой закреплен этот виртуальный адрес. Устройство кэша представлено на рис. 2. На рисунке изображен пример обращения в виртуальную память (*virtual memory*) по адресу `0xC004A72D`.

Политика записи в память — сквозная (*write through*). То есть при записи в память данные попадают как в память, так и в кэш, но с некоторыми особенностями. Когда процессор пишет в память, происходит анализ тега и *pid* в конкретной линии кэша данных, если есть совпадение, то данные в кэш-линии обновляются, если промах — не обновляются. Параллельно с этим про-

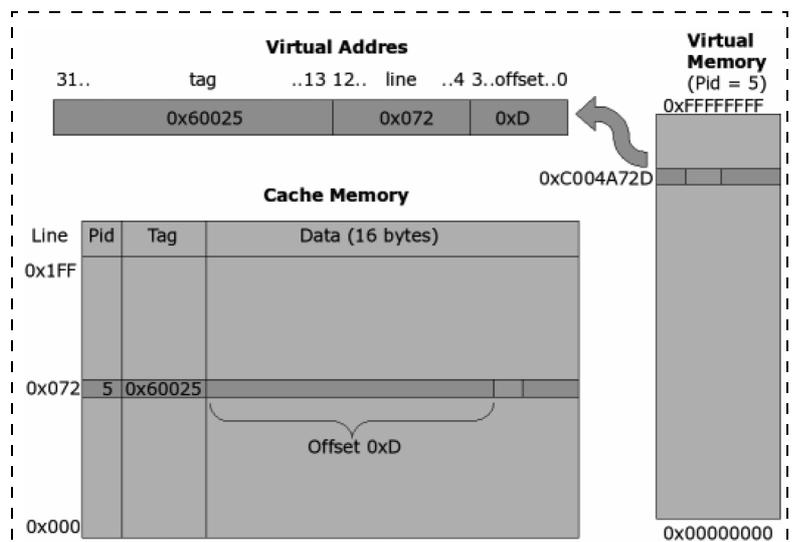


Рис. 2. Устройство кэша в первой версии процессора архитектуры Орхидея

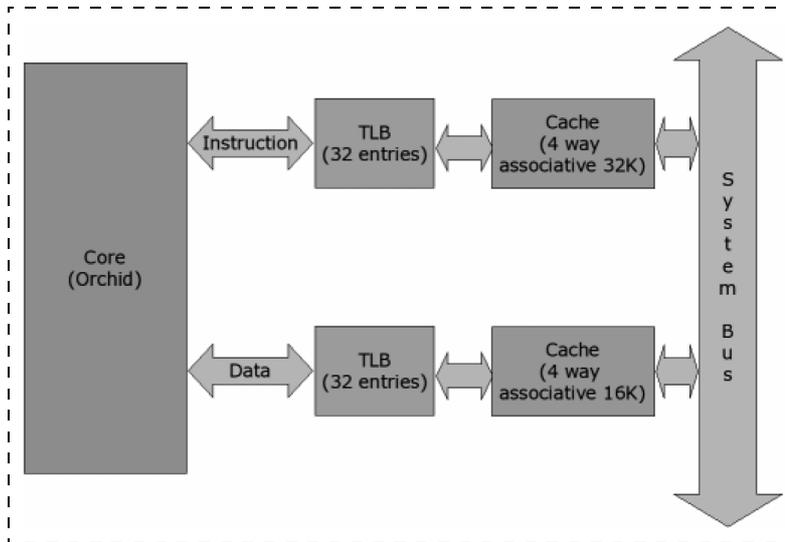


Рис. 3. Блок MMU во второй версии процессора архитектуры Орхидея

исходит аналогичный анализ в кэше инструкций, если совпадение, то линия удаляется (помечается как недействительная), если промах, то оставляется как есть.

Данный кэш не оптимален по двум причинам. Во-первых, когда проводится работа с основной памятью с двумя и более страницами в пределах одного смещения (*page offset*), то в кэше происходит постоянное замещение одной и той же кэш-линии, что приводит к большим накладным расходам. Во-вторых, дополнительные накладные расходы возникают, когда различные процессы выполняются с одной и той же физической памятью, несмотря на то, что у них различные *pid* и *tag*. В данном случае появляется необходимость постоянно сбрасывать кэш.

Вторая версия процессора архитектуры Орхидея также имеет два кэша (рис. 3): кэш инструкций и кэш данных. Размер кэша данных 16 Кбайт, размер кэша инструкций 32 Кбайт. Тип кэшей — множественно-ассоциативный с рандомным (*randomize*) алгоритмом замещения. Кэши перешли на физические адреса, т. е. после блока преобразования адресов.

В данном кэше пропадает необходимость использовать поле *pid*, так как физическое пространство едино для всех процессов. В каждой линии присутствуют поле тег и сами данные. Кэш разбит на 2^M групп ассоциативности (*set*). Каждая группа содержит четыре линии, это число жестко фиксировано. Дальнейшее увеличение группы значительно усложняет аппаратуру и увеличивает временные интервалы работы кэша. Рассмотрим, что собой представляет физиче-

ский адрес (*physical Address*) инструкций или данных, приходящий на вход кэша. Старшая часть адреса выделяется под тег. Тег кэш-линии по числу бит может совпадать или быть больше числа бит, выделенных под номер физической страницы (PPN) из физической составляющей таблицы преобразования адресов (TLB). Младшая часть физического адреса содержит смещение по данным в кэш-линии. Оставшаяся часть физического адреса содержит номер группы, за которой закреплен этот адрес. При чтении из кэша в пределах каждой группы проводится поиск нужной линии по тегу. Запись же происходит в одну из недействительных линий в пределах группы или по политике замещения выбирается линия,

в которую будет осуществляться запись. Устройство кэша представлено на рис. 4. Политика записи в память осталась такая же — сквозная.

Данный кэш решил две проблемы предыдущего варианта кэша. Первая проблема была решена за счет появления групп ассоциативности, вторая проблема — переходом на физические адреса. Но данный переход повлек за собой некоторые аппаратные сложности, такие как необходимость в мини-TLB, но это уже тема другого разговора.

При разработке нового кэша встал вопрос выбора оптимальной геометрии. В связи с ограничениями по объему кэшей и размеру ассоциативной группы было решено делать размер кэшей по 16 Кбайт на данные и 32 Кбайт на инструкции, максимальный размер ассоциативной группы — 4. Под номер физической страницы выделяется 19 бит (размер страницы в архитектуре Орхидея — 8 Кбайт). А это означает следующее. Число бит, выделяемое под номер

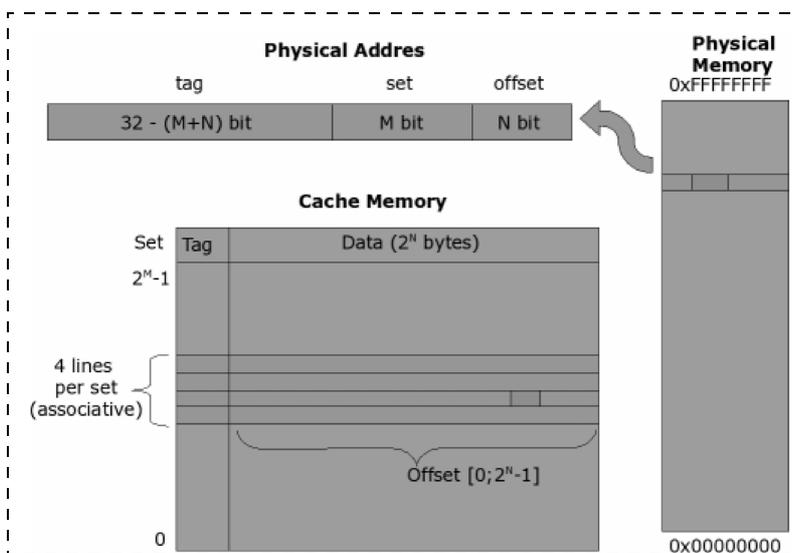


Рис. 4. Устройство кэша во второй версии процессора архитектуры Орхидея

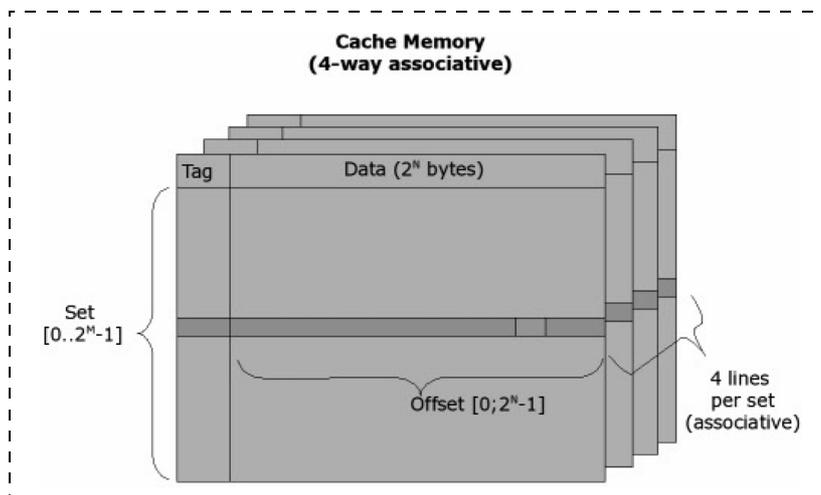


Рис. 5. Кэш в 3-мерном представлении

ассоциативной группы, плюс смещение не должно превышать 13 бит. Из всего этого вытекают вопросы: какой оптимальный размер кэш-линии, сколько для этого сделать линий и какой размер ассоциативной группы, одинаковая ли будет геометрия для кэша инструкций и кэша данных?

Геометрию множественно-ассоциативного кэша можно представить графически в виде трехмерной фигуры (рис. 5). По высоте отложено число групп, в ширину — размер кэш-линии, в глубину — число ассоциативных множеств. Множество групп в N линий образуют N ассоциативных множеств (*associative way*). Подбор оптимальной геометрии кэша заключается в варьировании этих трех измерений при одинаковом объеме в целом.

В качестве решаемых процессором задач использовались два набора тестов: одновременная загрузка нескольких графических GTK-приложений и работа медиаплеера (*mplayer*). Оба теста работали под операционной системой *Linux* версии 2.4.36.

Задача исследования — получить графики зависимостей среднего времени доступа к памяти при различных конфигурациях кэша на различных приложениях под операционной системой *Linux*. Из полученных графиков определить экстремумы и найти оптимальную геометрию кэша второй версии процессора Орхидея.

Запускается определенное приложение на время *Time*. На протяжении этого времени снимается статистика по работе кэша инструкций и кэша данных при определенной геометрии. После запуска по каждому кэшу доступны такие данные: *Count* — общее число обращений в память (чтение из памяти) при включенном кэше; *Hit* — попадание в кэш, число обращений в память, данные которых находились в кэше. *Miss* —

промах, число обращений в память, данные которых не находились в кэше, что привело к подкачке кэш-линии:

$$\text{Count} = \text{Hit} + \text{Miss}. \quad (1)$$

Проценты промахов и попаданий (вероятности) вычисляются по следующим формулам [2]:

$$H_p = \text{Hit}/\text{Count}; \quad (2)$$

$$M_p = \text{Miss}/\text{Count}. \quad (3)$$

Повторяя данные измерения при различных конфигурациях кэша, можно получить графики зависимостей процентов промахов от конфигурации кэша (размера и количества кэш-линии). Из этих графиков можно найти экстремумы и определить геометрию кэша, при которой процент промахов будет наименьший.

Но данные цифры не показывают реальное быстроедействие кэша. Ведь для того чтобы в случае промаха закачать из памяти кэш-линию размером 512 байт, потребуется гораздо больше времени, чем линию размером 256 байт. Таким образом, экстремумы должны сдвинуться в сторону уменьшения размера кэш-линии. Если принять за T_1 время, за которое данные возьмутся из кэша (в случае попадания), и T_2 — время, за которое закачается кэш-линия из памяти (в случае промаха), то среднее время (в тактах системной шины) доступа в память через кэш (T_a) будет вычисляться по следующей формуле [2]:

$$T_a = T_1 H_p + T_2 M_p, \quad (4)$$

где H_p — процент попаданий; M_p — процент промахов среди общего числа обращений.

Эта формула верна как для кэша инструкций, так и для кэша данных.

В табл. 1 представлено время (число тактов), которое требуется для закачки кэш-линии оп-

Таблица 1

Время загрузки кэш-линии из памяти

Размер кэш-линии, байт	Число тактов
4	8
8	9
16	11
32	15
64	23
128	39
256	71
512	135
1024	264

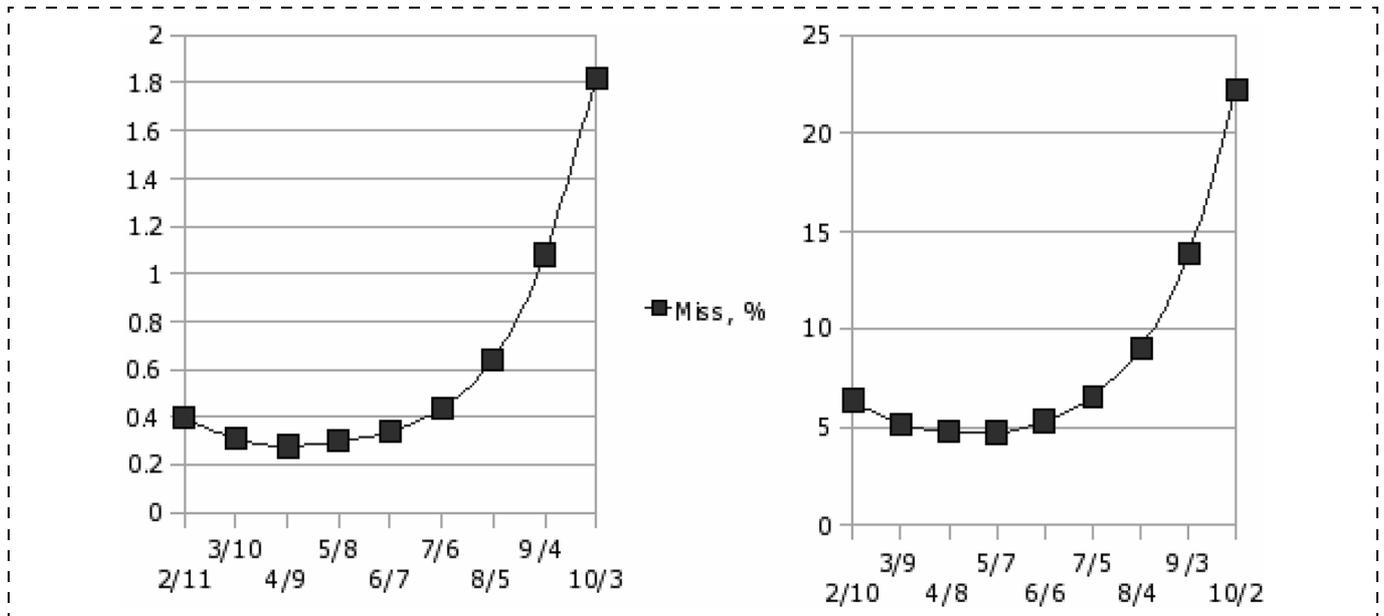


Рис. 6. Процент промахов при различных конфигурациях кэша. Слева — кэш инструкций, справа — кэш данных. Исполняемая задача — запуск GTK-приложений

ределенного размера, т. е. параметр T_2 в формуле (1). Данные представлены для архитектуры Орхидея, с учетом того, что частота тактирования системной шины 100 МГц.

Учитывая, что время T_1 составляет 1 такт, и пользуясь приведенной выше таблицей, можно получить графики зависимостей среднего времени доступа в память от конфигурации кэша. А экстремум будет показывать наилучшую производительность кэша, а именно, среднее время доступа в память на единицу данных, измеренное в тактах системной шины.

Анализируя наилучшую производительность кэшей на различных исполняемых процессах, можно определить оптимальную геометрию кэша.

Для количественных оценок попаданий (*hit*) и промахов (*miss*) кэша при различных его конфигурациях использовался симулятор. Симулятор представляет собой поведенческую модель ядра архитектуры Орхидея с точностью до выполнения инструкции (*instruction set simulator*). Он совместим с отладчиком *gdb* (*GNU debugger*) и включает в себя большое число разнообразных периферийных устройств. Симулятор содержит модуль для сбора статистических данных работы различных блоков ядра Орхидея, в том числе и кэша. Производительность кэша рассчитывается как процент числа попаданий от общего числа обращений в кэш. Меняя от запуска к запуску конфигурацию кэша в симуляторе, можно получить соответствующие данные производительности кэша для решаемой задачи.

Рассмотрим график производительности кэша при запуске GTK-приложений (рис. 6). На нем представлена зависимость процента промахов (M_p) от конфигурации кэша. Слева показан график производительности кэша инструкций, справа — кэша данных. По оси абсцисс отложены различные конфигурации кэша M/N , где M — число бит физического адреса, отведенных под номер группы; N — число бит, отведенных под смещение внутри кэш-линии (см. рис. 5). Размер кэша инструкций — 32 Кбайт, кэша данных — 16 Кбайт, по четыре ассоциативных множества в каждом.

Как видно из данного графика, существуют экстремумы и по инструкциям, и по данным. Минимальный процент промахов у кэша инструкций 0,28 % при конфигурации 4/9, т. е. при размере кэш-линии 512 байт, числе групп 16 (64 кэш-линии). По кэшу данных минимальный процент промахов составляет 4,71 % при конфигурации 5/7, т. е. размере кэш-линии в 128 байт. Низкий процент промахов кэша инструкций по сравнению с кэшем данных в основном обуславливается хорошей пространственной и временной локализацией инструкций. В 2 раза больший размер кэша при таких объемах (32 Кбайт или 16 Кбайт) влияет уже не так существенно.

При малом размере кэш-линии появляется необходимость постоянно докачивать в кэш данные, что вызывает соответствующее число промахов. Это представлено на правых частях графиков, где видна большая потеря производительности. Рост числа промахов с увеличением кэш-линии (левые части графиков) объясняется

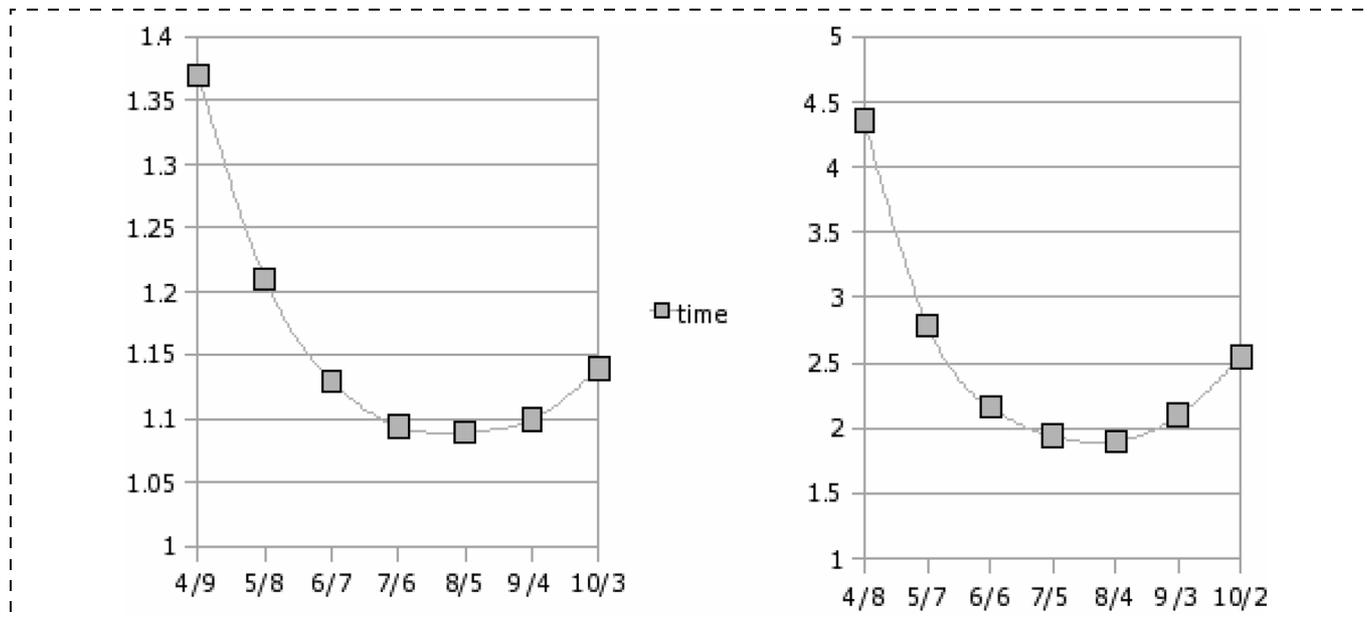


Рис. 7. Среднее время доступа в память (в тактах системной шины) при различных конфигурациях кэша. Слева — кэш инструкций, справа — кэш данных. Исполняемая задача — запуск GTK-приложений

тем, что не вся кэш-линия используется процессором. А так как увеличение размера кэш-линии в 2 раза влечет за собой уменьшение числа линий при одинаковом объеме, получается, что и весь кэш используется неэффективно, как бы уменьшаясь при этом в размере.

Преобразовав полученные данные по формуле (4), получим графики зависимости среднего времени доступа (time) от конфигурации кэша. Данные графики представлены на рис. 7.

Как и было сказано, экстремумы сместились вправо, в сторону уменьшения размера кэш-линии. Для кэша инструкций размером 32 Кбайт оптимальная конфигурация стала составлять 8/5, т. е. 256 групп (1024 линий) по 32 байта в линии. При этом среднее время, потраченное на доступ к одной инструкции, составило 1,09 такта. Для кэша данных размером 16 Кбайт оптимальное соотношение 8/4, т. е. размер линии — 16 байт. И среднее время доступа к данным составило 1,90 такта системной шины.

Но данная конфигурация кэша показывает наибольшую производительность для текущей исполняемой задачи, в данном случае это одновременная загрузка нескольких графических GTK-приложений. На других задачах наибольшая производительность может быть достигнута при иных конфигурациях.

Рассмотрим производительность кэша при работе медиаплеера. Эффективности кэшей на данной задаче представлены на рис. 8.

Если сравнивать с предыдущей задачей, код медиаплеера хорошо локализован как пространственно, так и во времени. Поэтому кэш инст-

рукций работает эффективней. Среднее время доступа по инструкциям составляет 1,01 такта. Экстремум находится в этой же точке. Это означает, что кэш инструкций наиболее эффективен при той же конфигурации.

С кэшем данных ситуация немного изменилась. Наилучшая его конфигурация для медиаплеера стала при размере кэш-линии в 32 байта, это объясняется пространственной локализацией обрабатываемых данных. Средний доступ по данным стал равен 1,24 такта (конфигурация 7/5). Надо заметить, что при конфигурации 8/4 эта цифра равна 1,27 такта. Если учитывать, что в основном спектре задач данные не так локализованы, то разумнее оставить конфигурацию 8/4, т. е. размер кэш-линии в 16 байт.

При уменьшении числа ассоциативных множеств, т. е. уменьшении размера группы до двух линий, при том же самом объеме 16 Кбайт, производительность кэша немного упала, но экстремумы остались при таких же размерах кэш-линии в 16 байт (табл. 2).

Рассматривался только кэш данных, так как при двух ассоциативных множествах максималь-

Таблица 2

Производительность кэша при двух и четырех множествах ассоциативности

Приложение	Кэш данных, размером 16 Кбайт при двух множествах ассоциативности	Кэш данных, размером 16 Кбайт при четырех множествах ассоциативности
GTK	1,98	1,90
mplayer	1,31	1,27

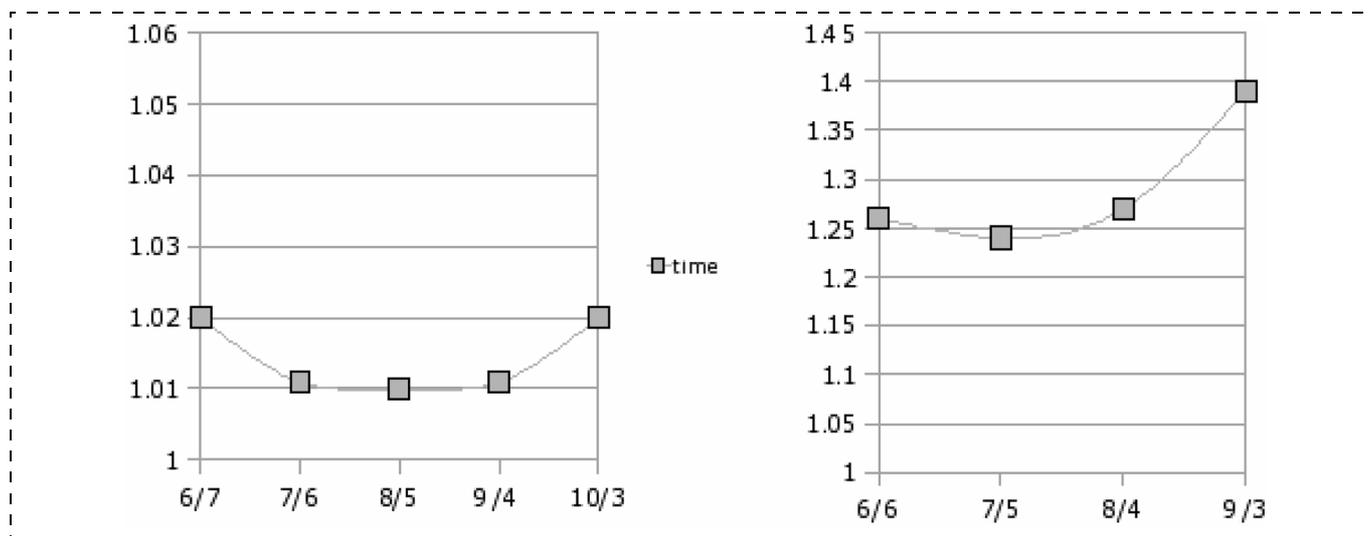


Рис. 8. Среднее время доступа в память (в тактах системной шины) при различных конфигурациях кэша. Слева — кэш инструкций, справа — данных. Исполняемая задача — mplayer

Таблица 3
Производительность кэша при объеме 16 и 32 Кбайт

Приложение	Кэш инструкций, размером 16 Кбайт	Кэш инструкций, размером 32 Кбайт
GTK	1,12	1,09
mplayer	1,02	1,01

Таблица 4
Сравнительные характеристики нового и старого кэша

Приложение	MMU первой версии	MMU второй версии
GTK (кэш инструкций)	1,39	1,09
GTK (кэш данных)	2,52	1,90
Mplayer (кэш инструкций)	1,11	1,01
Mplayer (кэш данных)	1,39	1,27

ный размер кэша может составлять 16 Кбайт (размер двух страниц).

При уменьшении размера кэша инструкций до 16 Кбайт его производительность падает ненамного. Подробные цифры представлены в табл. 3. В обоих случаях число ассоциативных множеств в кэше равно 4.

В заключение рассмотрим сводные данные эффективности работы кэша второй версии процессора Орхидея и кэша первой версии. Данные представлены в табл. 4.

Данные по работе кэша первой версии процессора были получены на симуляторе архитектуры Орхидея соответствующей версии.

В ходе проведенной работы выяснилось, что при постоянном объеме эффективнее работает тот кэш, который содержит больше ассоциативных множеств. То есть полностью ассоциативный кэш наиболее эффективен, но, с точки зрения аппаратуры, он дороже. Для процессора архитектуры Орхидея оптимально сделать кэш, состоящий из четырех множеств ассоциативности. По размеру наиболее выгоден кэш в 16 Кбайт. Увеличение размера вдвое увеличивает производительность кэша всего лишь на пару процентов, но при этом значительно увеличивает площадь кристалла процессора. Дальнейшего увеличения эффективности кэша можно достигнуть не столько увеличением его размера, сколько усовершенствованием политики записи в память и замещением кэш-линии. С учетом АВИ-компилятора, особенностей операционной системы *Linux*, исполняемых задач оптимальный размер кэш-линии составил 32 байт для инструкций и 16 байт для данных.

Список литературы

1. Scott Mueller // Upgrading and repairing PCs, 18th edition. Que, 2007. — P. 1584.
2. Баркалов А. А., Зеленева И. Я., Бабаков Р. М. Структуры логических схем управляющих автоматов на программируемых БИС // 36. научных праць ДДТУ. Серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка". Вип. 6. — Донецьк: ДонДТУ, 1999. С. 208—211.

О. М. Огородникова, канд. физ.-мат. наук, доц.,
руководитель лаборатории,

О. А. Панин, студент,
Уральский государственный технический
университет, г. Екатеринбург,
e-mail: o.m.ogorodnikova@bk.ru

КОМПЬЮТЕРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Компьютерному моделированию подвергнут термоэлектрический микропривод, управляющий положением микрозеркала в микрооптоэлектромеханической системе (МОЭМС). Инструментом компьютерного исследования послужил программный комплекс ANSYS в междисциплинарной конфигурации. Верифицированы расчеты угла поворота микрозеркала в зависимости от напряжения, приложенного к пластинам актюатора. Расчетные результаты расходятся с экспериментальными значениями на 10 %.

Ключевые слова: микрооптоэлектромеханическая система, ANSYS, компьютерное моделирование, верификация, микрозеркало, термический актюатор.

Проблемы проектирования МЭМС

Динамичное развитие высокоточных технологий позволяет не только проектировать и производить технические системы все меньших размеров, но и объединять в пределах одного компактного устройства все большее число функциональных возможностей. Интеграция на одном кристалле достижений в области электроники и механики привела к созданию микроэлектромеханических систем (МЭМС), в которых кремний работает одновременно как полупроводниковый и конструкционный материал, а гальванические связи находятся в тесном взаимодействии с механическими перемещениями. Современные МЭМС представляют собой сформированные на одной подложке датчики, микромеханизмы, устройства управления с размерами элементов около нескольких микрометров и менее. Такие системы изготавливаются с применением технологий микроэлектроники, но отличаются от собственно микроэлектронных устройств наличием пространственной размерности. Если изделия микроэлектроники планарны и механически статичны, то управляемые микромеханические объекты — это реальные трехмерные конструкции, отдельные элементы которых должны иметь свободу относительных механических перемещений в пространстве [1].

Специфика проектирования и расчета микроэлектромеханических устройств обусловлена прежде

всего масштабным фактором, который проявляется в возрастающей роли поверхностных сил трения и адгезии по сравнению с объемными инерционными силами, а также в ухудшении теплоотвода из рабочей зоны. При моделировании микроэлектромеханических систем принципиально важными становятся условия сопряжения деталей, в то время как в обычных машинах соотношение поверхностных и объемных сил не является столь актуальным и не учитывается в традиционной практике расчета и конструирования их деталей. Поверхностные эффекты могут увеличить трение до такой степени, что вся выходная мощность устройства будет сводиться к преодолению сил трения. Моделирование микроэлектромеханических систем требует тщательной формулировки контактных условий и становится эффективным, когда для анализа физических процессов используются компьютерные методы, базирующиеся на конечно-элементном решении дифференциальных уравнений, описывающих эти процессы [2].

Конструкционные задачи микромеханики отличаются также сложными механическими и контактными характеристиками материалов. Поскольку микроэлектронные технологии основаны на использовании кремния и его оксидов, механические и трибологические характеристики которых достаточно низки, для повышения эксплуатационных свойств различных элементов микросистем применяются специальные сверхтонкие покрытия или проводится особая модификация поверхностного слоя методами ионной имплантации или лазерной обработки.

Проектирование МЭМС, таким образом, требует не только совместных усилий специалистов в области механики и электроники, но и дополнительных исследований, позволяющих корректировать модельные представления о проектируемых изделиях.

Важность компьютерного проектирования обусловлена высокой ценовой ответственностью этого этапа за каждый следующий шаг в жизненном цикле изделия. Обычно издержки на проектирование МЭМС составляют 10 % общей стоимости изделия, но оно несет ответственность за 70—80 % его общей стоимости в связи с высокой стоимостью и трудоемкостью изготовления опытных образцов для микросистем.

Междисциплинарный анализ МОЭМС

Большой интерес представляют оптические приборы на базе микрозеркал с управляемым изменением ориентации в пространстве [3]. Микрооптоэлектромеханические устройства (МОЭМС)

обеспечивают выполнение различных функций за счет управления оптическим сигналом или преобразования оптического воздействия с помощью электромеханического микроустройства [4]. Для получения надежных, функциональных и относительно дешевых МОЭМС принципиально важным становится этап проектирования и компьютерного моделирования. Специфика компьютерного моделирования МОЭМС заключается в необходимости решать для одной микромеханической системы несколько задач, различных по физической природе. Такие комплексные задачи носят название междисциплинарных и требуют особой организации вычислительных алгоритмов по совместному решению, например, в случае МОЭМС — уравнений механики, теплопередачи и электростатики.

Цель работы

Основная цель данной работы — развитие компьютерных методов проектирования МОЭМС, разработка методов междисциплинарного расчета механических микроустройств и верификация разработанных методов сравнением расчетных углов поворота микрозеркала с экспериментальной кривой, отражающей зависимость угла поворота микрозеркала от напряжения, приложенного к пластинам актюатора.

Объект исследования

В данной работе компьютерному моделированию был подвергнут термоэлектрический микропривод, управляющий положением зеркала в микросистеме (рис. 1) с габаритными размерами менее 1 мм. Микропривод осуществляет возвратно-поступательное движение и перемещается шестью электротермическими актюаторами. Согласно существующей классификации [5],

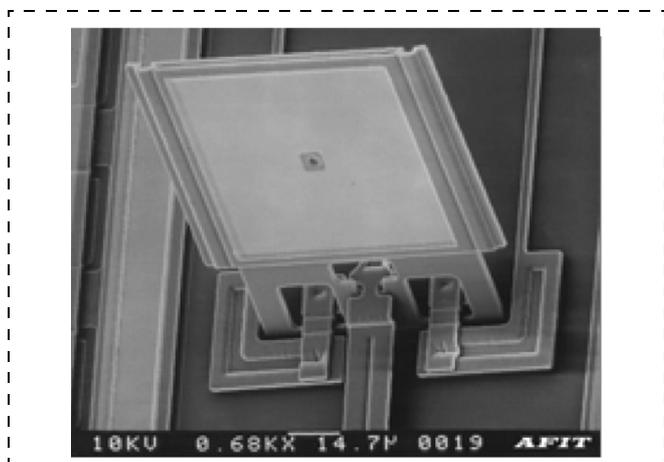


Рис. 1. Микрозеркало [5]

актюатор — это преобразователь энергии, активно воздействующий на систему в соответствии с выходным сигналом, поступившим от процессора. Электротермические актюаторы имеют ряд преимуществ: они просты по конструкции и в изготовлении, а также вырабатывают достаточно большое усилие на единицу объема при невысоком уровне сигнала. Применение таких актюаторов ограничивается низкочастотной областью. Устройство, использованное авторами для верификации расчетных методов, может использоваться в системах обработки информации, а также в системах машинного зрения. Многоканальные микрозеркальные устройства могут быть использованы также для кодирования и декодирования информации.

Инструмент компьютерного исследования

Инструментом компьютерного исследования послужил программный комплекс ANSYS в междисциплинарной конфигурации. Наличие всех необходимых модулей и развитых решателей позволяет достаточно точно прогнозировать поведение МОЭМС средствами ANSYS, что широко используется исследователями при проверке сложных моделей поведения микромеханических конструкций с учетом эффектов трения и остаточных деформаций [2, 6].

Объемная геометрическая модель микросистемы построена в CAD КОМПАС (рис. 2) по фотоматериалам AFIT (*Air Force Institute of Technology*) [5, 7] исходя из известных технологий и принципов изготовления компонентов подобных микросистем.

Принцип действия микропривода

Поворот зеркала вокруг горизонтальной оси происходит за счет движения связанного с ним термоэлектрического микропривода. Движение

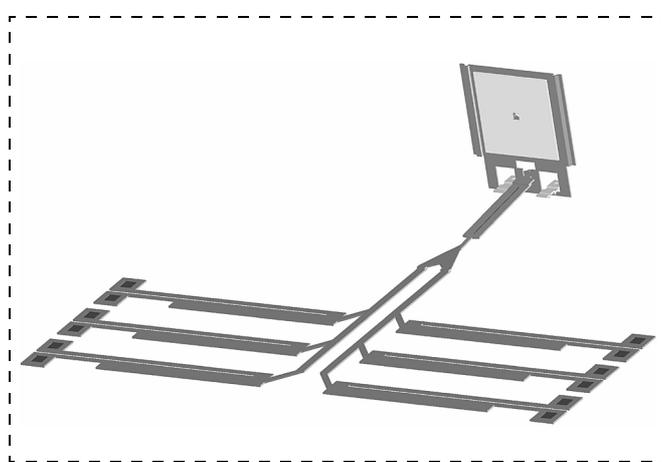


Рис. 2. Геометрическая модель микросистемы, построенная в CAD КОМПАС

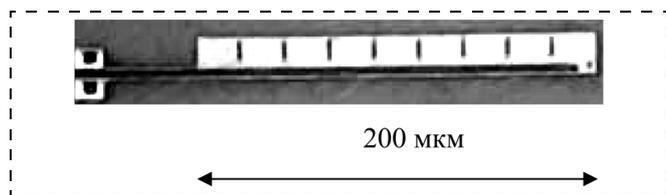


Рис. 3. Внешний вид актюатора [7]

привода обусловлено термическими деформациями, возникающими при срабатывании шести актюаторов массива. Каждый актюатор состоит из двух пластин различной ширины, которые соединены между собой, установлены параллельно и закреплены на подкладке анкерами (рис. 3). Нагрев пластин актюатора происходит за счет выделения теплоты при протекании через них электрического тока.

За счет разности потенциалов между анкерами в пластинах протекает электрический ток. Сопротивление узкой пластины больше, чем сопротивление широкой пластины; соответственно, на узкой пластине создается большее напряжение, выделяется больше теплоты, в итоге узкая пластина нагревается до более высокой температуры и в большей степени деформируется. В результате каждый актюатор изгибается в сторону широкой пластины, микропривод приходит в движение и поворачивает зеркало.

Последовательность расчетов

Моделирование описанной микросистемы требует решения на конечно-элементной сетке трех задач: электрической, тепловой и механической. Решение проведено в два этапа. На первом этапе решена связанная задача электрическая—тепловая и вычислено распределение температуры в системе, обусловленное разностью потенциалов 6 В на пластинах актюатора.

Расчетные результаты первого этапа транслированы на второй этап в качестве нагружения. На втором этапе решена связанная задача тепловая—механическая и найдены смещения, обусловленные термической деформацией. Пластины на втором этапе закреплены, в качестве нагрузки приложены температурные поля, вычисленные на первом этапе.

Исходными данными к расчету являются свойства материала [7]:

- коэффициент теплопроводности 32 Вт/м · К;
- температурный коэффициент линейного расширения $2,9 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$;
- модуль нормальной упругости 169 ГПа;

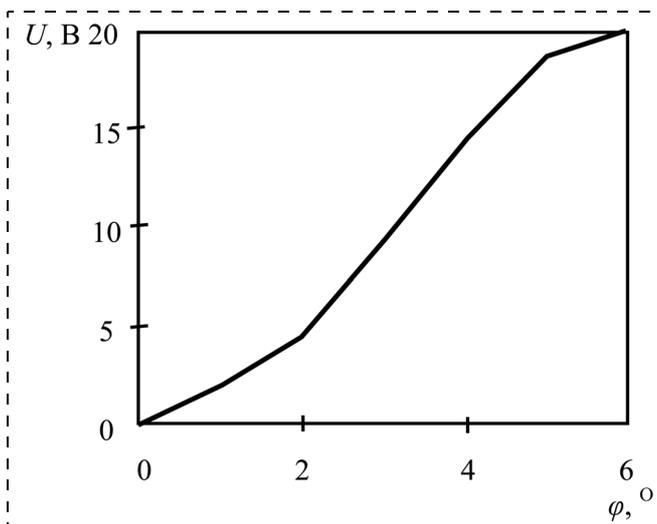


Рис. 5. Экспериментальная зависимость для микросистемы: по горизонтали отложена разность потенциалов в вольтах (U), по вертикали — угол поворота зеркала в градусах (φ) [5]

- коэффициент поперечного сжатия 0,22;
- удельное электрическое сопротивление $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Результаты расчета и их обсуждение

Максимальное осевое смещение актюатора получилось в расчете равным 50 мкм. Соответствующий расчетным перемещениям угол наклона зеркала при этом составляет 22° (рис. 4, см. четвертую сторону обложки), что на 10 % отличается от экспериментального значения на градуировочной кривой (рис. 5) для данного устройства. Небольшое расхождение расчетных и экспериментальных данных можно объяснить, в частности, несовпадением площади контакта конструктивных элементов привода в геометрической модели с реальным их перекрытием в МОЭМС, что влияет на условия теплопередачи и трение. В целом, результаты расчета являются достаточно точными и свидетельствуют о том, что применяемые методы и условия расчета можно распространить на аналогичные МОЭМС другой конфигурации.

Выводы

Главным результатом работы является верифицированная методика компьютерного междисциплинарного анализа микроэлектромеханической системы. Разработан и проверен метод расчета МОЭМС с электротермическими актюаторами в программной среде ANSYS. Данный метод может быть использован при проектировании аналогичных МОЭМС.

Список литературы

1. Шалобаев Е. В., Старжинский В. Е., Шилько С. В. Технология изготовления зубчатых колес и передач для микроэлектромеханических систем. Зубчатые микромеханизмы МЭМС: опыт производства и постановка задач на перспективу // Микросистемная техника. 2003. № 10. С. 2—5.
2. Гридчин А. В., Колчужин В. А., Герлах У. Г. Исследование четырехконтактных тензочувствительных структур методом конечно-элементного моделирования // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 5. С. 38—42.
3. Яшин К. Д., Осипович В. С., Божко Т. Г. Разработка МЭМС // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 1. С. 28—34.
4. Вернер В. Д., Иванов А. А., Коломенская Н. Г. и др. Изделия микросистемной техники — основные понятия и

термины // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 12. С. 2—5.

5. Starman L. Micro-Electro-Mechanical Systems // Wright State University. 2006. <http://www.es.wright.edu/people/faculty/kxue/mems/>
6. Огородникова О. М., Юрченко А. С. Возможности программного комплекса ANSYS для моделирования микросистемной техники // Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании: Сб. материалов II международной научно-технической конференции. Тюмень: ТюмГНГУ, 2006. С. 142—143.
7. Hongbin Yu., Peng Wu., Yan Liu, Jun Li, Haiqing Chen. Characterization of a novel segmented micro mirror // Microsystem Technology. 2008. Vol. 14. P. 173—177.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

УДК 621.791.3

В. Н. Штенников, канд. техн. наук, зам. нач. управления ФГУП УЭМЗ, г. Екатеринбург, e-mail: shtennikov@uemz.ru

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПАЙКИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Дана оценка продолжительности пайки электронных компонентов в зависимости от заданной температуры пайки.

Ключевые слова: прибор, качество, пайка, температура, время.

По данным работы [1] и ряда других источников, определяющее значение для качества паяных соединений, наряду с такими параметрами, как материал соединяемых деталей, зазор между ними, применяемый флюс, паяемость соединяемых поверхностей, состав припоя, имеют температура и время пайки, которые, в свою очередь, определяют значение взаимной диффузии соприкасающихся материалов.

Известно, что для обеспечения высокого качества электромонтажных соединений низко-температурную пайку необходимо выполнять при температуре, которая выше температуры начала кристаллизации используемого припоя на

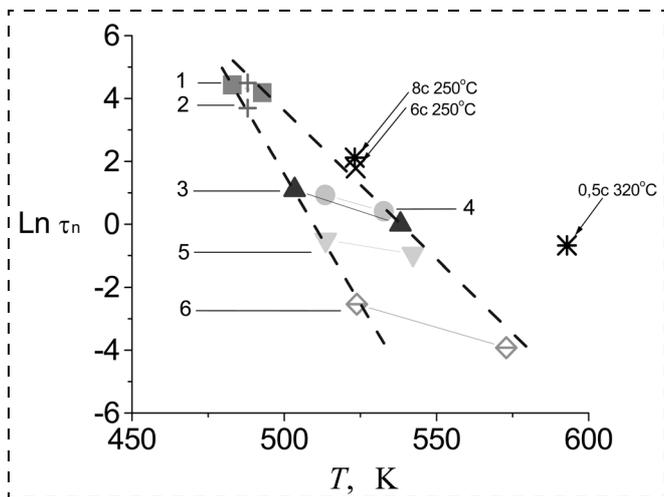
35...90 °С (по данным работы [2]). Другими словами, температура расплавленного припоя во время пайки должна быть достаточно высокой, чтобы он мог заполнить зазоры между соединяемыми деталями.

Таким образом, температура пайки электронных компонентов припоем ПОС61 (ПОС63) должна находиться в интервале 230...270 °С. При этом необходимо отметить, что рекомендации источника [2] и упомянутого стандарта были сформулированы без учета последующего освоения технологии поверхностного монтажа.

Вместе с тем, по данным источника [3], температуру ручного паяльного инструмента необходимо держать в диапазоне 295...315 °С, а время пайки каждого соединения должно быть около 1 с. Тот же источник сообщает, что в конвекционных печах пиковая температура должна составлять 225...235 °С, в инфракрасных — 225...250 °С, в установках пайки волной 240...250 °С без указания времени пайки.

Согласно данным словенской фирмы "ИскраТел" температура расплавленного припоя в волне при пайке электронных компонентов в отверстия печатных плат должна составлять 255 ± 5 °С. Время пайки 0,7...2 с [4].

При смешанном монтаже печатных плат (одновременно в отверстия и на поверхность печатной платы) нами использовался режим пайки с температурой припоя в волне 245...255 °С



Зависимость времени пайки от температуры пайки:

1 — конвекционная пайка по данным автора; 2 — пайка в паровой фазе по данным [5]; 3 — ручная контактная пайка по данным автора; 4 — пайка волной припоя по данным автора; 5 — пайка лазером непрерывного излучения по данным автора; 6 — пайка импульсным лазером по результатам исследований [5]

и временем пайки $0,5 \pm 0,2$ с в первой волне, $2,5 \pm 0,2$ с во второй волне.

На предприятии используется технологический процесс ручной контактной пайки с температурой пайки $230...265$ °С и временем пайки $1...3$ с, а также технологический процесс конвекционной пайки электронных компонентов, установленных на поверхность печатной платы, с температурой пайки $210...220$ °С и временем пайки $66...86$ с. Температура пайки выводов микросхем к контактным площадкам печатных плат лазером непрерывного излучения, по нашим данным, должна составлять $240...270$ °С при времени пайки $0,4...0,6$ с.

Приведенные выше данные подтверждены описанием методики измерения температуры и времени пайки, содержат информацию об анализе качества паяных соединений по внешнему виду и механической прочности.

На рисунке изображена зависимость времени пайки от температуры пайки электронных компонентов на печатные платы припоем ПОС61 (ПОС63) по данным автора и источника [5].

В предположении, что все компоненты и печатные проводники имеют одинаковый материал покрытия, была получена формула для оценки времени пайки в зависимости от температуры пайки припоем ПОС61 (ПОС63).

Штриховые линии на рисунке соответствуют крайним параметрам монтажа (по два параметра температуры и времени для одной линии) и получены следующим образом.

Коэффициент диффузии для различных значений температуры можно определить по формуле [1]

$$D = D_0 \exp(-Q/RT), \quad (1)$$

где D_0 — постоянная коэффициента диффузии; Q — энергия активации диффузии; R — газовая постоянная; T — абсолютная температура.

Вместе с тем, для расчета диффузии одного металла в другом используют следующее уравнение [1]:

$$R_x, \tau = \frac{R_0}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D\tau}} \right) \right], \quad (2)$$

где R_0 — постоянная коэффициента концентрации; x — расстояние от границы контакта металлов; τ — время пайки.

Используя перечисленные уравнения для различных значений времени и температуры пайки при условии одинаковой глубины диффузии припоя в металл, можно получить следующее выражение:

$$\ln \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right), \quad (3)$$

откуда

$$\frac{Q}{R} = \ln \frac{\tau_1}{\tau_2} / \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right). \quad (4)$$

Несмотря на то, что выводы компонентов изготавливают из различных материалов, в первом приближении можно считать температуру и время пайки электронных компонентов связанными соотношением вида (3) с учетом выражения (4). Действительно, если на приведенном рисунке провести линии, соответствующие всем покрытиям, используемым для компонентов электронной техники, которые устанавливаются на печатной плате, учитывая время лужения и другие обстоятельства, то все они должны быть усреднены, так как в производственных условиях покрытия используются одновременно.

Детальный анализ кривых, характерных для тех или иных покрытий, по нашему мнению, имеет значение для определения соответствия нового покрытия типовым режимам монтажа и обоснования введения оригинальных параметров пайки.

Учет времени лужения с одновременным, как правило частичным, уменьшением времени пайки увеличит разброс исходных данных, но не изменит характер полученной зависимости.

Полученная по уравнению (3) правая кривая для крайних значений применяемых режимов монтажа не противоречит источнику [1] в части гарантированного исключения образования интерметаллида типа Cu_6Sn_5 толщиной менее 0,5 мкм (см. соответствующие пометки на правой стороне рисунка):

- около 8 с припоем ПОСб1 при температуре пайки 250 °С;
- около 0,5 с припоем ПОСб1 при температуре пайки 320 °С.

Кроме того, эта зависимость хорошо согласуется и с данными из работы [5] по образованию диффузной зоны оптимальной толщины при пайке в течение 6 с припоем ПОСб1 при температуре пайки 250 °С.

На основании полученной оценочной зависимости (3) можно объяснить рекомендации зарубежных производителей электронной техники работать при температуре паяльного инструмента 350 °С и более, что с учетом снижения температуры паяльного стержня по его длине на холстом ходу и снижения температуры паяющего конца стержня при контакте с паяным соединением может обеспечивать достаточную взаимную диффузию припоя и покрытия соединяемых деталей при времени рекомендованной продолжительности пайки 0,5...1 с, вместо времени пайки 2...3 с при температуре пайки 230...270 °С, обеспечивая при этом более высокую производительность [6, 7].

Однако при более высокой температуре пайки предъявляются более высокие требования к теплостойкости используемых электронных компонентов и материалов, более жесткие требования по обеспечению необходимой температуры и времени пайки, и поэтому она не всегда приемлема для изготовления электронных приборов специального назначения.

Вместе с тем, полученная оценочная зависимость (3) позволяет усомниться в корректности данных по температуре пайки (до 400 °С) при времени пайки 2...5 с припоем ПОСб1 печатных узлов струей пара, заимствованных автором [5]. Кроме того, трудно согласиться с объективностью данных по пайке жидким теплоносителем при температуре 250...260 °С и времени пайки 15...20 с; групповым паяльником при 320...340 °С и времени пайки 0,8...1,0 с; нагретым газом при температуре пайки до 300 °С,

на которые ссылается автор источника [5]. Все перечисленные данные в той или иной мере выходят за пределы правой пограничной кривой и на рисунке не показаны. По мнению автора статьи, во всех перечисленных случаях речь идет не о температуре пайки, а о температуре теплоносителя, паяльного инструмента, газа до пайки, соответственно.

При оценке времени пайки в зависимости от ее температуры необходимо также помнить о том, что требуемая температура пайки должна быть обеспечена по всей глубине паяного соединения. Высказанное замечание имеет тем большее значение, чем меньше время пайки, больше глубина паяного соединения. Кроме того, упомянутый перепад зависит от тепловых характеристик соединяемых деталей и способа нагрева. По этой причине продолжительность пайки, например в отверстия печатной платы толщиной 1,5 мм, по нашим данным, должна быть не менее 2 с, чтобы обеспечить достаточную температуру пайки со стороны установки компонентов. По этой же причине время пайки планарных выводов компонентов может быть на порядок меньше [8].

Вывод. Получена оценочная зависимость времени пайки от температуры пайки электронных компонентов на печатные платы припоем ПОСб1, которая позволяет критически сопоставлять рекомендации литературных источников по режимам пайки печатных узлов и способствует обоснованию применения новых материалов выводов монтируемых элементов.

Список литературы

1. **Лашко Н. Ф., Лашко С. В.** Контактные металлургические процессы при пайке. М.: Металлургия, 1977. 192 с.
2. **Манко Г.** Пайка и припой. М.: Машиностроение, 1968. 322 с.
3. **Обзор** ремонтных станций компаний США: Пер. с англ. The Lowdown on rework, Circuits Manufacturing, 1988. 18 с.
4. **Отчет** УЭМЗ № 14/514. Сборка печатных узлов на "ИскраТел". Исп. В. Н. Штенников. 1996. 9 с.
5. **Аллас А. А.** Лазерная пайка в производстве радиоэлектронной аппаратуры / Под ред. В. П. Вейко и В. С. Новосадова. СПб.: Изд. СПбГУ ИТМО, 2007. 134 с.
6. **Штенников В. Н.** Поправка к показаниям термодатчика паяльной станции // Компоненты и технологии. 2004. № 9. С. 206—207.
7. **Штенников В. Н.** Опыт предприятия по изучению охлаждения паяльных стержней при пайке // Компоненты и технологии. 2005. № 4. С. 196—199.
8. **Штенников В. Н.** Особенности некоторых видов пайки // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 7. С. 14—15.

УДК 621.3.084.2

Е. С. Горнев, д-р техн. наук, зам. генерального директора, проф.,
ОАО "НИИ "ЭЛПА", e-mail: gornev@elpapiez.ru

ДАТЧИКИ СТАНОВЯТСЯ МЕНЬШЕ, ФУНКЦИОНАЛЬНЕЕ И УМНЕЕ...

Высокий уровень автоматизации производства требует большого числа различных датчиков, фиксирующих состояние процесса, его отклонения и дающие сигнал на его удержание в заданных рамках. На основании анализа информации ведущих зарубежных консалтинговых компаний рассматриваются тенденции развития исследований, разработок, производства и сбыта датчиков. МЭМС и, соответственно, датчики имеют 25-летний цикл от начала работ до полной коммерциализации. Благодаря датчикам создана определенная инфраструктура, поддерживающая их применение и эффективное использование. Эволюция датчиков проходит этапы монофункциональных, многофункциональных, беспроводных и энергонезависимых датчиков. Параллельно ведутся работы по встраиванию датчиков в системы принятия решений. Первоначально датчики использовались в системах контроля, измерений, в транспортных средствах, сегодня датчики широко применяются в бытовой технике, системах обеспечения жизнедеятельности человека. Это в свою очередь потребовало разработки датчиков для интеллектуальных систем. Изложены принципы создания современных датчиков. В датчиках на основе МЭМС необходимо учитывать не только физику твердого тела, но также механику, сопротивление материалов, гидравлику, аэродинамику и т. д. Представлены предложения по созданию отечественной программы развития микросистемной техники и датчиков. Для развития МЭМС и ее составной и определяющей части — датчиков — требуются значительные улучшения организации и координации работ, маркетинга, стандартов, а также создания жизнеспособной системы привлечения капитала, прибыльности и применяемости продуктов.

Ключевые слова: датчики, МЭМС, микросистемная техника, технология, программа развития.

В 1954 г. в Bell Laboratories ее сотрудник Чарльз Смит (Charles Smith) продемонстрировал пьезорезистивные свойства кремния — изменение удельного сопротивления материала при приложении механического воздействия. Это свойство стало основной движущей силой создания МЭМС-датчиков, особенно датчиков давления. Разработка микродатчиков, как МЭМС,

были начаты в середине 50-х годов с датчиков давления (табл. 1), и они первыми стали доступными, т. е. были полностью коммерциализированы в 1990 г.

Нужно отметить, что полупроводниковая промышленность начала развиваться на 10 лет ранее (компания Bell Laboratories). Но сегодня, несмотря на то, что МЭМС и, в частности, датчиками занимаются несколько тысяч компаний и фирм, объем их производства в 20 раз меньше, чем объем производства всех полупроводниковых приборов, включая интегральные микросхемы. Из табл. 1 видно, что все МЭМС и, соответственно, датчики имеют цикл около 25 лет от начала работ до полной коммерциализации. Можно, конечно, проанализировать, почему это происходит, но это не является темой данной публикации. Хотя нужно отметить, что микроэлектроника развивается по закону Мура. А обязательным условием выполнения этого закона являются инвестиции, соответствующие решаемым научно-техническим и производственным задачам. Но таких вложений, которые имеет микроэлектроника, я думаю, все МЭМС и датчики не будут иметь никогда. А если сопоставить

Таблица 1
Период коммерциализации МЭМС (годы)

Изделие	Обнаружение	Эволюция изделия	Уменьшение стоимости	Полная коммерциализация
Датчики давления	1954—1960	1960—1975	1975—1990	1990
Акселерометры	1974—1985	1985—1990	1990—1998	1998
Датчики газа	1986—1994	1994—1998	1998—2005	2005
Клапаны	1980—1988	1988—1996	1996—2002	2002
Форсунки	1972—1984	1984—1990	1990—2002	2002
Фотоника/дисплеи	1980—1986	1986—1998	1998—2005	2005
Био/химические датчики	1980—1994	1994—2000	2000—2010	2010
Радиочастотные (RF) датчики	1994—1998	1998—2001	2001—2009	2009
Датчики скорости	1982—1990	1990—1996	1996—2006	2006
Микрореле	1977—1993	1993—1998	1998—2010	2010
Вибраторы	1965—1980	1980—1995	1995—2010	2010

Источник: Roger Grace Associates

размеры инвестиций на одну компанию, то, думаю, станет понятным, почему имеется соотношение 20 : 1 в пользу полупроводников. Сегодня технология микроэлектроники далеко оторвалась от датчиков и актюаторов по функциональности, размерам и стоимости. Этот разрыв в основном определен отсутствием методологии создания современных изделий МСТ — системой и уровнем контроля (в широком смысле слова), производственно-технологическими ограничениями, практическим отсутствием специализированных средств САПР и недостаточным функциональным уровнем средств проектирования (за исключением очень ограниченных применений), отсутствием единого стандарта характеристики процесса создания технологий и изделий и т. д.

На сегодня известно более сотни видов различных датчиков от относительно простых, таких как датчики давления и температуры, до современных биометрических датчиков, биочипов и лабораторий на кристалле и т. д. В табл. 2 представлены данные из базы данных Global Express по основным видам датчиков различных конструкций, изготавливаемых по различным

Таблица 2
Основные виды датчиков, входящих в сферу интересов не менее 100 фирм

Вид датчиков	Число компаний
Датчики расхода и расходомеры	1072
Датчики давления	763
Датчики уровня	746
Датчики дистанции/приближения	631
Датчики линейного положения/перемещения	553
Датчики уровня жидкости	523
Датчики вращения	452
Датчики силы и нагрузки	367
Датчики газа	327
Датчики охраны	324
Бесконтактные ИК датчики температуры	312
Фотоэлектрические датчики	277
Тензодатчики и преобразователи	243
Датчики ускорений (акселерометры)	184
Датчики электрического тока	184
Датчики температуры	182
Датчики скорости потока воздуха	177
Индикатор дыма	173
Сенсорные чипы	170
Датчики излучения	155
Датчик момента	146
Датчик течи жидкости	143
Линейные датчики/Linear Encoders	142
Круговые датчики положения	140
Датчики вибрации	133
Датчики скорости магнитные	123
Датчики наклона/качения, уклонометры	118
Видеодатчики	116
Датчики параметров окружающей среды	113
Датчики электрического напряжения	106
Датчики растворенного кислорода	100

Источник: Global Express

технологиям и входящих в сферу интересов не менее 100 фирм, занимающихся их исследованиями, разработкой, производством и сбытом. Но, как уже говорилось, с 60-х годов конструкции датчиков и технологии диктуются МЭМС. И при всех прочих равных условиях другие конструкции и технологии часто не выдерживают конкуренции.

Необходимо отметить, что данная таблица не отражает всех разновидностей датчиков. Но автор имеет доступ к базе данных Global Express и может обеспечить заинтересованных читателей необходимой информацией.

По мнению фирмы **VDC Research Group, Inc.** (www.vdcresearch.com), занимающейся изучением рынка технологических исследований и стратегическим анализом, наибольший спрос прогнозируется для датчиков линейных перемещений (табл. 3). Анализировались датчики, указанные в табл. 4. Продажи растут по всем датчикам

Таблица 3
Североамериканский рынок датчиков положения (млн долл. США)

Тип датчика	2007 г.	2011 г.	Темп роста, %
Зазора/приближения	788,9	930,2	4,2
Вращения	428,3	514,3	4,7
Линейного перемещения	358,0	450,1	5,9
Итого:	1575,2	1894,6	4,7

Источник: Jim Taylor, Venture Development Corp., <http://www.sensormag.com>

Таблица 4
Типы датчиков положения

Типы датчиков	Линейное перемещение	Датчики зазора	Круговое положение
Емкостные	•	•	
Контактные			•
Индуктивные		•	
Индуктивные кодовые	•		
Индуктосины			•
Лазерные системы	•		
Измерительный преобразователь линейных перемещений	•		
Магнитные		•	
Магнитоактивные		•	
Магнитные кодовые	•		•
Магнитострикционные	•		
Оптические кодовые	•		•
Фотоэлектрические		•	
Фотопрерыватели		•	
Потенциометрические	•		•
Резольверы			•
Измерительный преобразователь круговых перемещений			•
Синхронные			•
Ультразвуковые	•	•	

Источник: Jim Taylor, Venture Development Corp., <http://www.sensormag.com>

положения — датчикам линейных перемещений, датчикам зазора/приближения, датчикам вращения — и прогнозируется рост продаж в дальнейшем для датчиков, изготавливаемых по различным технологиям.

На примере североамериканского рынка, имеющего подавляющую долю мирового производства и потребления датчиков, датчики перемещений имеют наибольшую тенденцию роста среди датчиков положения. До конца 2011 г. ожидаемый рост производства и потребления конкретных типов датчиков меняется в значительной степени. По различным типам датчиков ожидаются различные темпы роста, а по некоторым предполагается падение.

Так, для бесконтактных датчиков зазора/приближения наибольший рост производства и потребления прогнозируется для фотоэлектрических и ультразвуковых датчиков (5,3 и 4,8 % соответственно). Наименьший рост ожидается для емкостных приборов — около 2 %. Наиболее быстрое освоение фотоэлектрических датчиков ожидается в обработке материалов (6,9 % роста). Рост применения емкостных датчиков прогнозируется в роботизированной сборке и в лесобрабатывающей промышленности.

Основным стимулом роста потребления датчиков будет расширение их применения в системах автоматизации производства. Привлекательным для расширения применения датчиков будет дополнение их функций диагностическими возможностями. Например, число датчиков на единицу роботизированного сборочного оборудования в автомобильной промышленности увеличивается, так как оборудование становится более сложным. Также увеличивается число датчиков позиционирования в автомобилях.

С учетом совершенствования микропроцессоров, функциональных возможностей других интегральных схем (ИС) и электронных компонентов цена на датчики будет снижаться. Правда, за счет повышения надежности и расширения функциональности датчиков, а также развития услуг по их применению ожидается рост цен. Но с учетом всех факторов, влияющих на цены датчиков, можно говорить о стабильности их стоимости с небольшим колебанием в пределах $-2,5...+1,5$ %.

Обзор "NEXUS Market Analysis III, 2005—2009" ("NEXUS анализ рынка МЭМС и микросистем III, 2005—2009") показывает, что датчики и актюаторы МСТ/МЭМС укрепляют свои позиции в установившемся рынке периферийных устройств информационных технологий (ИТ) — головок считывания/записи, струйных головок. В этом обзоре анализируются 26 продуктов, 14 из кото-

рых будут иметь рынок свыше 100 млн долл., и совершенно новые продукты, такие как микротопливные элементы, датчики отпечатков пальцев и жидкие линзы, которые через пять лет вместе будут иметь объем более 250 млн долл. В то же время дополнительно открываются новые возможности в таких областях, как микрофоны, память, микроисточники питания и кристаллы-холодильники. Исследователи рынка enablingMNT полагают, что основной областью применения сенсоров и актюаторов остается автомобильный сектор с различными массовыми продуктами, включая подушки безопасности и системы мониторинга давления в шинах.

Основной подъем растущего рынка обеспечивается сегментом бытовой электроники (рис. 1, см. четвертую сторону обложки). Прогнозируется четырехкратный рост его доли на рынке МСТ/МЭМС с 6 % в 2004 г. до 22 % в 2009 г. со среднегодовым темпом роста 50 %. Эксперты видят его подъем в проекционных ТВ для домашних театров, а также в жестких дисках цифрового оборудования с повышенными требованиями по памяти — такого как DVD записывающие/воспроизводящие устройства, цифровые камеры и камкодеры, портативные MP3 плееры. Большим стимулом являются мобильные телефоны, которые уже различаются датчиками перемещений и "примериваются" к различным дополнительным датчикам и функциям, таким как жидкие линзы для фотоаппаратов с переменным фокусным расстоянием, датчики отпечатков пальцев, микротопливные элементы источников энергии, газовые датчики, барометры ("погодники").

Ассоциация NEXUS (The Network of Excellence in Multifunctional Microsystems) была инициирована Европейской комиссией для содействия микросистемной технике (МСТ) и преследования цели усиления и защиты европейской конкурентоспособности на мировом рынке.

Задача влияния на "Рыночный анализ МСТ" (Task Force on "Market Analysis for MST") была поставлена в 1996 г. и сориентирована на производство и применение МСТ с глубоким изучением рынка. Первый отчет (обзор) анализа рынка, опубликованный в 1998 г., рассматривал период 1996—2002 гг. и быстро приобрел репутацию понимания рынка. Второй отчет по анализу рынка, продливший прогноз с 2002 г. до 2005 г., был опубликован в 2002 г. Первые два издания обозначались при ссылках на них как "NEXUS-1" и "NEXUS-2". Ассоциация NEXUS неизменно растет в течение последних девяти лет, становясь независимой некоммерческой ассоциацией. Более подробная информация находится на www.nexus-mems.com.

Обзоры NEXUS и соответствующие документы готовятся группой независимых экспертов *enablingMNT* с большим промышленным опытом, которые консультируют организации микро- и нанотехнологий в части коммерциализации продуктов и развития бизнеса. Группа *enablingMNT* является по-настоящему международной консультативной организацией с партнерами в Великобритании, Германии, Нидерландах. Команда хорошо сведуща во всех решениях по коммерциализации продукта, относящегося к микро- и нанотехнологиям: от концепции до продукта. Совместные исследования группы *enablingMNT* достигают высшей точки в обзорах по всей структуре микро- и нанотехнологий (МНТ): *enablingMNT Industry Reviews*.

На *Semicon West'08* летом 2008 г. консалтинговая фирма по МЭМС и микронанотехнологиям **Yole Développement** (<http://www.yole.fr>) представила свой прогноз рынка потребления МЭМС, изготавливаемых по полупроводниковым технологиям, в частности по датчикам, до 2012 г. (<http://semiconwest.org>). Весь рынок к этому году прогнозируется в 15,6 млрд долл. США. Наиболее быстро будет расти применение МЭМС и, соответственно, датчиков на их основе в следующих секторах рынка:

- бытовая техника — с 3,1 млрд долл. в 2007 г. до 7,3 млрд долл. в 2012 г.;
- медицина и наука о человеке — с 0,9 млрд долл. в 2007 г. до 2,2 млрд долл. в 2012 г.;
- телекоммуникации — с 0,6 млрд долл. в 2007 г. до 1,83 млрд долл. в 2012 г.;
- промышленность — с 0,8 млрд долл. в 2007 г. до 1,76 млрд долл. в 2012 г.;
- автомобили — с 1,4 млрд долл. в 2007 г. до 1,6 млрд долл. в 2012 г.;
- оборона — с 0,3 млрд долл. в 2007 г. до 0,8 млрд долл. в 2012 г.;
- авионавигация — с 0,04 млрд долл. в 2007 г. до 0,08 млрд долл. в 2012 г.

Согласно этому прогнозу, датчики давления до 2012 г. занимают стабильный рынок объемом примерно до 1 млрд долл. в год с небольшим ростом. Рынок датчиков ускорений (акселерометры) вырастет к 2012 г. в 2,1 раза до уровня 1,8...1,9 млрд долл. в год. За этот же период прогнозируется рост рынка гироскопов в 1,5 раза до уровня примерно 1,5 млрд долл. в год.

Компания по исследованию рынка **iSuppli Corp.** ожидает рост производства автомобильных МЭМС-датчиков с 474,2 млн шт. в 2006 г. до 935,7 млн шт. в 2012 г. со среднегодовым темпом роста 12 %. На сегодня имеется 26 областей применения автомобильных датчиков в шасси, трансмиссии и встроенном электронном оборудовании

автомобиля. Основными являются инерциальные датчики, датчики давления, датчики расхода, ИК датчики и новые виды датчиков. Эти приборы выполняют различные функции безопасности, контроля и управления, охраны окружающей среды — от запуска подушек безопасности к отслеживанию давления в шинах и управлению работой двигателя. Продажи датчиков давления для систем отслеживания давления шин с 43,1 млн шт. в 2006 г. увеличатся до 179 млн шт. в 2012 г. (http://mae.pennnet.com/display_article/338902/32/ARTCL/none/EXECW/1/Automotive-MEMS-sensor-market-to-nearly-double-by-2012/).

Высокий уровень автоматизации производства требует большого числа различных датчиков, фиксирующих состояние процесса, его отклонения и дающих сигнал на его удержание в заданных рамках. Чем выше требуется стабильность и воспроизводимость процесса, тем больше должны быть число датчиков, их чувствительность и точность. В этом, кстати говоря, и принципиальная отличительная особенность технологических процессов микроэлектроники, в которых оборудование адекватно и с большей точностью (благодаря различным датчикам) воспроизводит заданные физические модели процессов, подтвержденные соответствующими библиотеками.

От датчиков требуется более полное и согласованное взаимодействие с окружающей средой, что приводит к увеличению потребности в датчиках. Конечно, нужны беспроводные датчики низкой потребляемой мощности, с низкой стоимостью ввода в эксплуатацию и дешевым обслуживанием. Это требует их реализацию на основе МЭМС. Датчики, современное большинство которых базируется на МЭМС, продвигаются в сторону высоко технологичных продуктов бытового применения, подобно сотовым телефонам, персональным компьютерам, бытовой электронной технике, цифровым фотоаппаратам и видеорекамерам и т. д.

Слабый, как правило, выходной сигнал датчика должен быть преобразован в сигнал более высокого уровня, удобный для передачи в место его последующей обработки. Обработка выходного сигнала датчика включает в себя усиление, фильтрацию, преобразование и другие процессы для его последующей компьютерной обработки.

Для эффективного использования датчиков создаются измерители, калибры, считыватели и другой инструментарий для измерений, мониторинга, принятия решений.

Приборами для контактного или бесконтактного определения температуры занимается 2056 фирм. Эти приборы включают в себя шкальные, цифровые, промышленные и лабораторные термо-

метры, температурные зонды, индикаторы, датчики, преобразователи, термовыключатели, термисторы, термопары, термоэлементы и т. д.

Аппаратурой калибровки датчиков и измерителей на их основе занимается 468 фирм. Более 1500 тысяч фирм занимаются оцифровыванием и обработкой данных датчиков для наблюдения, анализа и/или управляющих процессов или систем.

В мировой промышленности сформировались специализированные системы и устройства сбора данных, включая входные модули сбора данных, модули вход/выход. Этим занимается около 500 фирм.

Этот перечень можно продолжить, т. е. благодаря датчикам создана определенная инфраструктура, поддерживающая их применение и эффективное использование.

Эволюция датчиков проходит этапы монофункциональных, многофункциональных, беспроводных и энергонезависимых датчиков. Параллельно ведутся работы по встраиванию датчиков в системы принятия решений. Пока применение датчиков, встраиваемых в аппаратуру и системы, улучшают измерительную технику. Сейчас начинают использоваться возможности в сложных системах принятия решений. Алгоритм действия этих систем сходен с принятием решения человеком — сбор данных, коррекция данных, обработка информации и принятие решения.

Сбор данных включает в себя преобразование воздействия на вход датчика в электрический сигнал. Далее необходимы согласование уровней сигнала, сглаживание и усиление сигнала, аналого-цифровое преобразование. Цель этого этапа заключается в оцифровывании показателей датчика или преобразователя. Для этого обычно используются низкочастотные фильтры для "сглаживания" переменного сигнала и предотвращения его ступенчатости при последующей обработке. Если на выход датчика поступает слабый сигнал, для его усиления используется операционный усилитель или программируемая матрица усилителей при необходимости. Если сигнал однополярный, несимметричный аналого-цифровой (АЦП) оцифровывает выходной сигнал датчика. Дополнительно может потребоваться сдвиг уровня для согласования динамического диапазона выходного сигнала датчика с динамическим диапазоном, поддерживаемым АЦП. И, наконец, АЦП (отдельный или интегрированный в микроконтроллер) оцифровывает выходной сигнал датчика.

Требуется коррекция датчиков, включающая их линеаризацию, самокалибровку, компенса-

цию/учет сдвига уровня и усиления сигнала, компенсацию/учет внешних условий, диагностику. Коррекция может решать различные задачи:

- линеаризацию сигналов датчиков, реализуя функции нелинейного преобразования;
- автоматическую калибровку датчика;
- компенсацию погрешностей выделения сигнала и смещения;
- компенсацию температурных изменений;
- применение функций диагностики и др.

Матрица программируемых усилителей и последние операционные усилители автоматической установки на нуль могут реализовывать на этапе коррекции датчиков линеаризацию и компенсацию сдвига. Встроенное в микроконтроллер программное обеспечение может также вычислять многочленные выражения, представляющие линеаризацию сигнала датчика. Пока такие расчеты не являются типичной задачей, но некоторые применения требуют высокой точности таких расчетов.

Обработка информации включает в себя расчеты, в том числе тригонометрических функций, цифровую фильтрацию, автокорреляцию, спектральный анализ рядов Фурье. В зависимости от окружающей среды и некоторых применений датчика этап обработки информации может иметь различные функции. Например, угол может быть вычислен с помощью тригонометрических функций, таких как \arctg для датчиков позиционирования, подобно датчикам угла поворота руля. Перемещение и скорость могут быть легко вычислены арифметическими действиями для датчиков скорости. Быстрое преобразование Фурье (БПФ) выделяет сигнатуру выходного сигнала датчика вибрации или датчиков, определяющих наличие и концентрацию опасных газов и химикатов. Для таких датчиков сигнатурой является частотный спектр выходного сигнала.

Цифровая фильтрация помогает устранить шум или выделить частоты, важные для многих датчиков. Когда трудно спрогнозировать характеристики шума или помех в предстоящий период, используется адаптивно-фильтрующая техника. В этом случае исходные данные датчика преобразуются в первоначально разыскиваемую информацию о системе или физических свойствах.

Принятие решения включает:

- распознавание образов;
- прогноз;
- корреляцию и коррекцию;
- интеграцию данных датчика;
- отображение входных данных на выходные с самоорганизацией;
- решение на основе использования моделей.

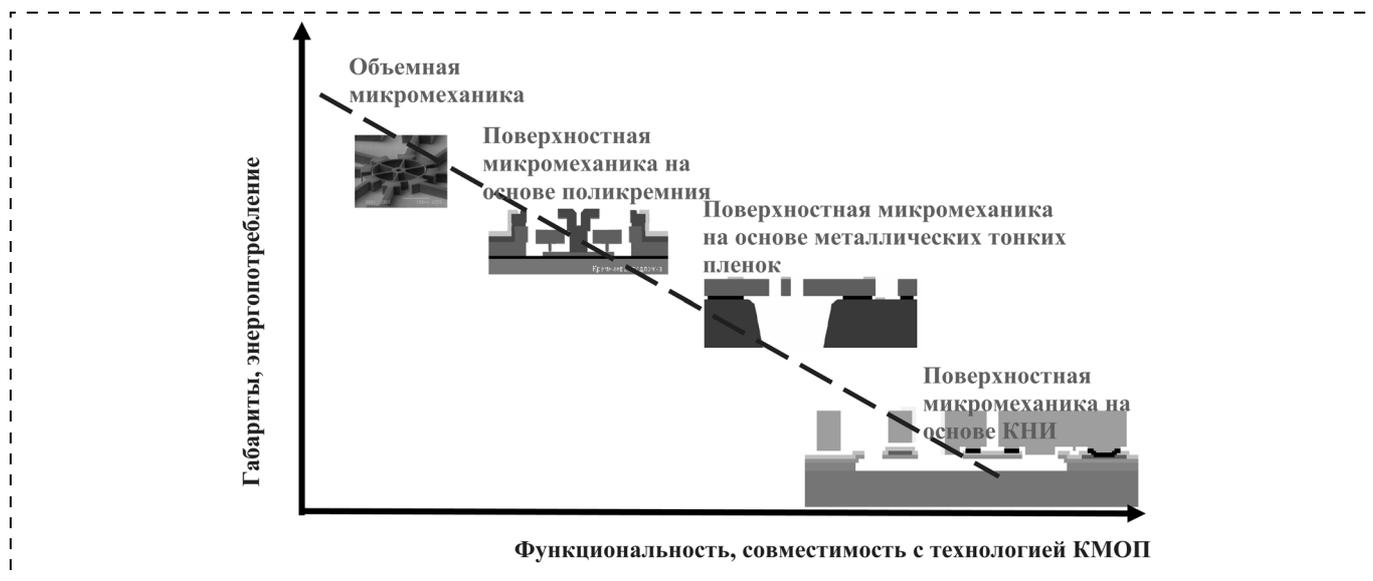


Рис. 2. Развитие технологий МЭМС-датчиков

Типичным объектом этапа принятия решения являются действия, исключаящие, минимизирующие или предваряющие затруднения человека или его вмешательство. Для того чтобы можно было прийти к человекоподобному решению, этап принятия решения должен быть осведомлен о различиях во всей системе и внешнем окружении. Обычно на этом этапе система будет обеспечена информацией с различных датчиков системы. В дальнейшем этот этап может учитывать в памяти историю выходных данных датчика, регистрацию и реагирования системы.

Корреляционная информация от сочетания датчиков помогает определить влияние одного на другое и, при необходимости, обеспечивать корректирующие действия. В случае, когда они сомнительны или имеется неопределенность из-за выходных сигналов датчика, при принятии решения также могут применяться подходы на основе использования моделей. Для некоторых применений при принятии решений используются передовые алгоритмы и технологии, такие как распознавание образов, отображение входных данных на выходные с самоорганизацией, упреждающий анализ. Распознавание образов, в частности, привлекается в разнообразных формах от простой таблицы преобразования или корреляционных алгоритмов для определения спектральной сигнатуры до обучаемых нейронных сетей.

Области применения датчиков по мере повышения их функциональности расширяются. Первоначально датчики использовались в системах контроля, измерений, в транспортных средствах; сегодня датчики широко применяются в бытовой технике, системах обеспечения

жизнедеятельности человека. Это, в свою очередь, потребовало разработки датчиков для интеллектуальных систем. На подходе искусственная кожа, разумная пыль и т. д.

Для изготовления датчиков используются как специфические технологии (такие как, например, пленочные пьезокерамические), так и бурно развивающиеся технологии микросистемной техники — объемной микромеханики (ОММ) и поверхностной микромеханики (ПММ). Традиционные технологии поверхностной микромеханики, базирующиеся на слоях поликремния, развиваются в технологии на основе тонких пленок металлов. В то же время в микросистемной технике сегодня находят место технология "кремний-на-изоляторе" — КНИ (рис. 2). Это, с одной стороны, является выходом из положения для элементов, работающих на различных физических принципах, а с другой — технология максимально совмещается с КМОП-технологией, что дает возможность создавать комплексированные функционально законченные устройства. Пример — соединение тонкопленочного пьезокерамического датчика с микроэлектронным управлением, контроллером или микропроцессором. На сегодня каждый вид датчика, а зачастую и тип, изготавливаются по собственной оригинальной технологии.

Фирма **enablingMNT** (www.enablingMNT.com) совсем недавно проанализировала более 110 промышленных технологий МЭМС. Оказалось, что 13 % приходится на мембранные технологии ОММ, а 87 % — на другие технологии, к которым относятся технологии на слоях поликремния или альтернативных низкотемпературных слоях ПММ, КНИ ПММ, комбинация ПММ

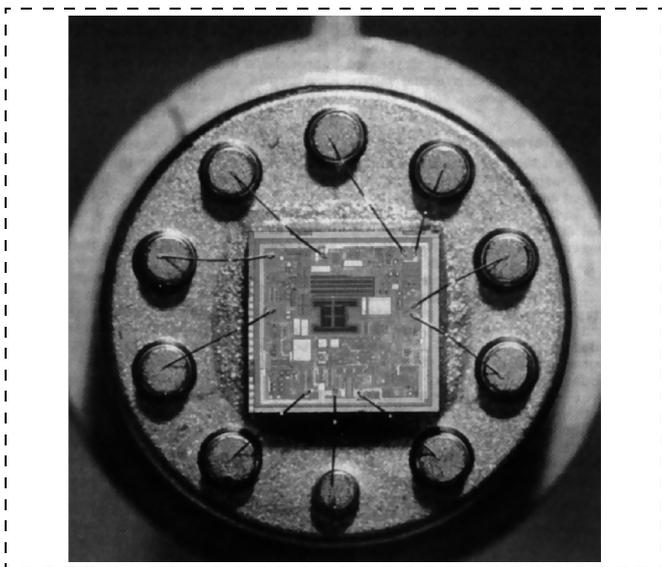


Рис. 3. Акселерометр с микромеханическим емкостным датчиком, с внутрисхемным возбуждением, самотестированием и схемой преобразования сигнала. Выполнен в корпусе TO5

с КМОП-слоями, ПММ на основе металлических слоев, ПММ на основе диэлектрических слоев. Также используются технологии многопластинчатых блоков и специальные технологии.

МЭМС и датчики, в частности, предъявляют к корпусам очень большие требования. Вначале датчики изготавливались в тех же простейших корпусах, которые использовались и в микроэлектронике — металлостеклянных и металлокерамических (рис. 3). Но методы и оборудование сборки интегральных микросхем часто не применимы к микросистемной технике, содержащей чувствительные поверхностные структуры. Также предъявляют свои специфические требования и био- и химические датчики. Для датчиков нашли применение полые пластмассовые корпуса. Тем более, что датчики не всегда долж-

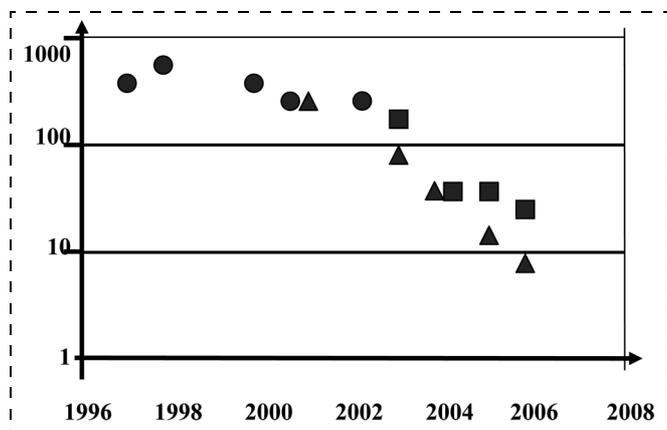


Рис. 4. Изменение объема корпуса датчика (мм^3) по годам:
 ● — однокоординатные, ■ — двухкоординатные, ▲ — трехкоординатные

ны быть герметичны. В связи с этим имеют право на жизнь негерметичные и почти герметичные корпуса, смысл которых виден из их названия. Но проблема усугубляется также размерами МЭМС. На рис. 4 показано изменение объема корпуса датчика (мм^3) по годам.

Изложенные выше принципы создания современных датчиков требуют дальнейшего слияния и взаимопроникновения технологий объемной и поверхностной микромеханики, развития монтажа и корпусирования пластин, "flip chip" монтажа, тонкопленочного встраивания в "системы в корпусе", трехмерного монтажа и упаковки. Такие технологии дают отличные результаты по сборке незащищенного кристалла, согласованного по коэффициенту термического расширения (КТР) с кремнием, при низкой стоимости сборки. На подходе самосборки и интегрированные системы. Выход видится в соединении в один микроблок пластины с матрицей тонкопленочных пьезоэлементов с пластиной, на которой выполнена по КМОП-технологии система управления, обработки и передачи информации. В связи с этим появляется технология частичной или полной сборки пластин (*Wafer-level partial packaging* и *Full Wafer-level packaging*). Основным в этих процессах является формирование совмещающихся ключей, травление с обратной стороны пластины полости и использование замков из легкоплавкого стекла. Желаящие могут найти описание этого процесса в Semiconductor International, 8/1/2008. При этом возможно создание конструктивно законченного микромодуля, не требующего дополнительного корпусирования. Применение двумерной и трехмерной интеграции (2D и 3D) при создании МЭМС-датчиков дает возможность встраивания пассивных и активных компонентов, интеграцию МЭМС, антенн, радиочастотных фильтров, переключателей и резонаторов под одной "крышкой". Дальнейшие работы по исследованию и созданию функциональных слоев дадут возможность реализовать оптические межсоединения в подложке или в других материалах и оптические соединения chip-to-chip с технологией корпусирования "кристалл на пластине" (рис. 5).

Данные системы реализуются и сейчас, но в виде отдельных подсистем или, если есть такая возможность, в гибридном исполнении. Но здесь начинает проявляться то, что в микросистемной технике и, конечно, в датчиках на ее основе имеется многообразие материалов. Датчики на основе МЭМС имеют много механических частей, и сами датчики представляют собой, если можно так выразиться, мультифизические приборы. В датчиках на основе МЭМС необхо-



Рис. 5. Эволюция сборки МЭМС

Источник: *mstnews_105*

димо учитывать не только физику твердого тела, но также механику, сопротивление материалов, гидравлику, аэродинамику и т. д. А если это все создавать на одном кристалле, что схемотехнически возможно?! Пленочный пьезоэлектрический датчик с большой изменяющейся емкостью рядом с полевым транзистором?!

Проявляются новые виды отказов — залипание, усталость, растрескивание и т. д. Обеспечение надежности требует объединения различ-

ных областей физики (механика, электричество, оптика, гидравлика, барометрия и т. д.). А в знаменатель к этим проблемам подставим изменение масштаба, что в свою очередь создает трудности для исследований и характеристики. И давайте под лозунгом "Даешь нанотехнологии!" будем приближаться к атомной шкале. А здесь нас ждут силы Ван-дер-Ваальса, залипание из-за влажности и ряд еще не изученных эффектов.

Следует отметить, что МЭМС мало создать. Ими нужно научить пользоваться, применять их. И даже в их применении есть know-how. И все это нужно умножить на многодисциплинарность элементов.

Но не все так грустно. **Analog Devices** уже относительно давно выпускает гироскопы по МЭМС-технологии (рис. 6). Фирма **Freescale** разработала в одном кристалле систему контроля давления в автомобильных колесах, дающую возможность своевременно предупреждать водителя в случае изменения давления в колесах автомобиля, даже когда он движется. Беспроводной датчик МРХУ8300 в корпусе размером $12,8 \times 10,3 \times 2,5$ мм (рис. 7), созданный по технологии емкостных датчиков, интегрирует в одном кристалле датчик давления (рис. 8), датчик температуры, двухмерный XY-датчик ускорений, 8-битовый микроконтроллер и RF-передатчик. Микроконтроллер имеет в своем составе флеш 16 Кбайт, 512 В RAM, SPI Master, 2-канальный 16-битовый таймер/широтно-импульсный модулятор, 8-канальный 10-битовый АЦП, таймер запуска и периодического беспокойства водителя низкочастотными колебаниями.

Уже разработаны и выпускаются однокристалльные беспроводные датчики, представляющие собой комбинацию измерений температуры, влажности и освещенности с или без микроконтроллера с радиочастотным RF-интерфейсом. Университетской командой ИМЕС разработан этажерочный модуль для сетевых применений. Он объединяет беспроводные датчики с возможностью проводить вычисления и с извлечением энергии (рис. 9, см. четвертую сторону обложки). Недавно проведены испытания так называемой системы определения враждебных намерений (проект Hostile Intent), разработанной под руководством Министерства национальной безопас-

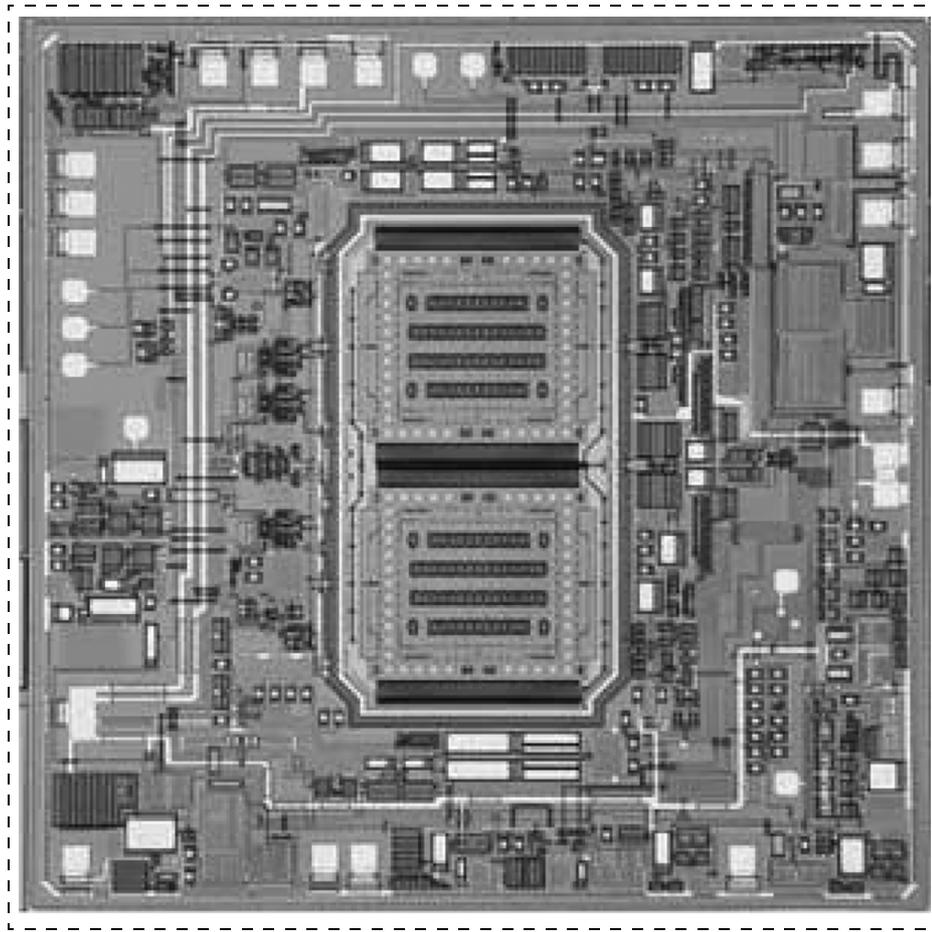


Рис. 6. Кристалл гироскопа Analog Devices, выполненного по МЭМС-технологии
 Источник: www.enablingmnt.com

ности США. Эта система показала безусловную жизнеспособность данной разработки. Датчики системы определяют намерения людей на основе анализа их пульса, дыхания, температуры кожи, а также выражений лица.

В нашей стране производство МЭМС, в том числе датчиков, сегодня обычно замыкается в рамках одного предприятия. Оно не интегрировано горизонтально, как микроэлектроника. Технологии многообразны. В результате имеем многокристальное ("мультичипное") проектирование-дизайн. Но отличие от микросхем в том, что в такой многокристальной системе комбинируются кристаллы, работающие на различных физических принципах. За рубежом используется термин "multiphysics". Требуют решения проблемы интерфейса между кристаллами. А проблемы сборки?... Измерения и испытания? Над решением этих проблем в микроэлектронике работало много компаний, но все они действовали в одном направлении. Не говоря о разработчиках и изготовителях микросхем. Число таких кампаний относительно немного, они у всех на слуху.

В былые времена в стране, в частности в электронной промышленности, разрабатывали так называемые "Рубежи развития". В этом документе анализировалось состояние развития конкретных направлений электроники по сравнению с лучшим зарубежным уровнем и формировались задачи по достижению и превышению этого уровня. Финансирование, как правило, осуществлялось в рамках этих рубежей, а за выполнение указанных задач отвечали по полной программе конкретные предприятия. Работы по "Рубежам..." контролировались постоянно, ежегодно подводились итоги работы за истекший период и в случае необходимости корректировались в сторону ужесточения.

За рубежом и сейчас имеется практика в виде "Road Map". Имеются технологическая Road Map для полупроводников, Road Map для технологий сборки и корпусирования материалов. Имеется европейская Road Map для микро- и наносистемной техники и т. д.

В нашей стране датчиками и, соответственно, микросистемной техникой сейчас, похоже,



Рис. 7. Система контроля давления в автомобильных колесах MRXY8300 на основе беспроводного датчика давления (ф. Freescale)

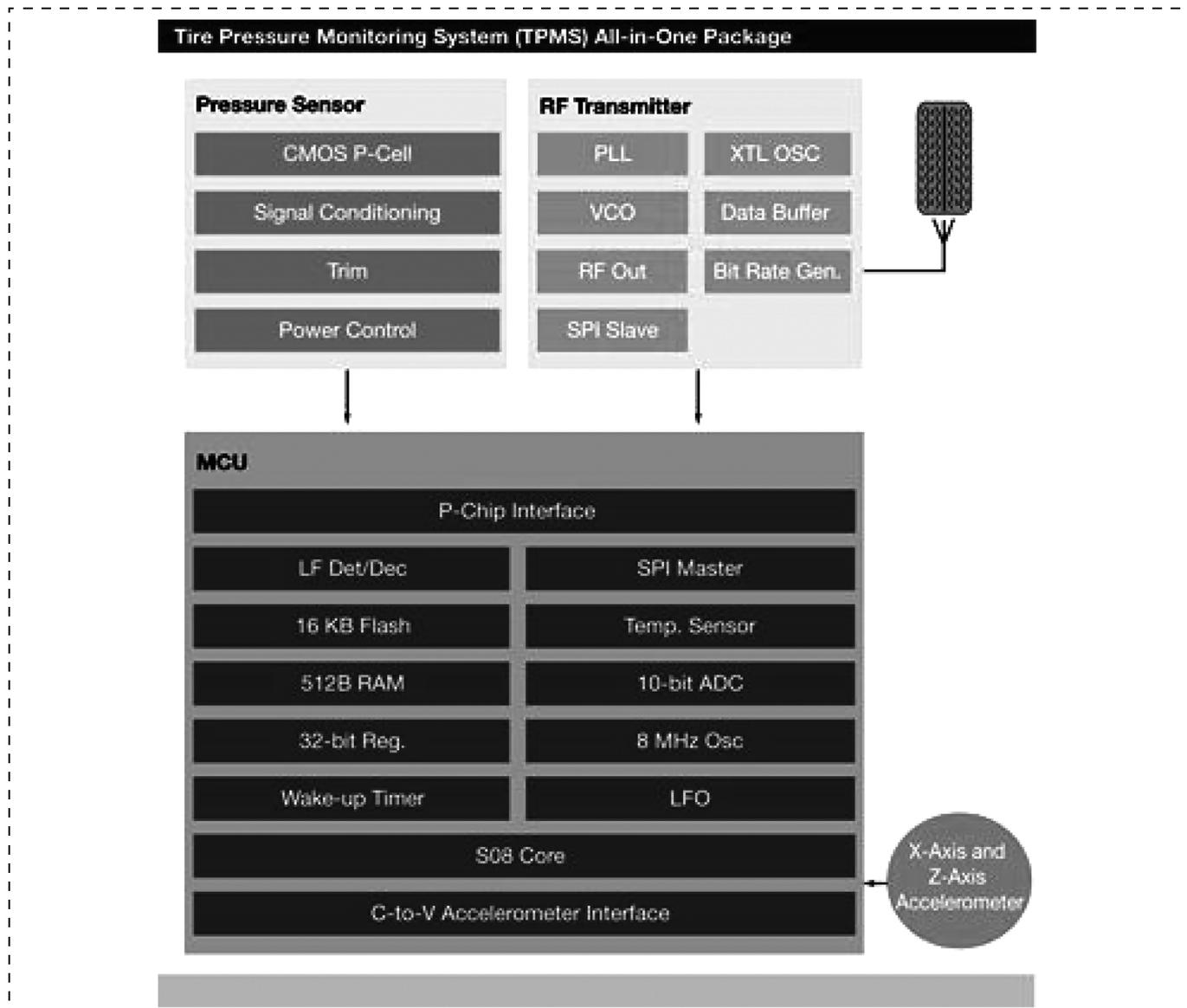


Рис. 8. Блок-схема системы контроля давления в автомобильных колесах MPXY8300 (ф. Freescale)

не занимается только ленивый. Может, имеет смысл создать план развития датчиков (маршрутную карту), положив в основу ее создания следующие этапы.

1. Определить области применения в России, в которых использование датчиков могут дать ощутимый эффект. К таким можно, например, отнести пищевую промышленность; автомобильную промышленность; ЖКХ; энергетику и нефтегазовый комплекс; системы промышленного контроля; медицину и фармацевтику; телекоммуникации и системы связи; авиацию, космонавтику и оборону; системы обеспечения безопасности; охрану окружающей среды.

2. Инвентаризовать технические данные всех отечественных датчиков, сравнив их с зарубежным уровнем.

3. Определить перспективные функциональные требования.

4. Спрогнозировать направления развития сенсоров.

5. Определить основные технические требования к сенсорам, обеспечивающие их функциональность с учетом перспективы.

6. Определить методы реализации основных технических требований. При этом следует обратить внимание на обеспечивающие развитие направления — технологии проектирования, моделирование, сборку и корпусирование (включая корпуса), изготовление и т. д.

7. Определить технологии реализации датчиков с требуемыми основными техническими требованиями.

8. На основании пп. 1—7 написать и принять к исполнению Российский план развития

датчиков, с указанием конкретных головных исполнителей по направлениям или группам датчиков, ответственных за реализацию данного плана. Головным исполнителям сформировать команды для реализации данного плана.

9. Организовать жесткий контроль за исполнением данного плана с полной ответственностью, вплоть до возврата затраченных средств при невыполнении работ.

Говорить о создании такого плана/программы/Road Map в наших условиях силами одного предприятия бесполезно и бессмысленно. Получим очередной документ, в котором почти все одеяло будет натянуто на себя разработчиком этой программы с пояснительной запиской, что другого не может быть по определению. Программа будет объективна только при создании ее независимой группой различных специалистов.

Датчики будут становиться меньше, беспроводными и сами будут обеспечивать себя энергией, активно занимая свое достойное место в наносистемной технике. Так как и при разработке МЭМС использовался большой опыт из полупроводниковой промышленности, я думаю, что наносистемная техника и нанотехнологии должны воспринять многое от МЭМС. При этом хотелось бы обратить внимание на следующее — не нужно лишних восторгов по поводу нанотехнологий и, особенно, переоценки их возможностей как единственно возможных для решения проблем, поскольку:

- в параметрах нанотехнологии и ожидаемых результатах еще много романтики — это все получить не так просто;
- ожидаемые сверхвысокое быстродействие, удивительные свойства материалов и систем, возможно, будут не так уж и реальными;
- недопустима недооценка проблем с материалами, включая новые взаимодействия, межсоединения и интерметаллиды, — необходимо понимание этих проблем;
- большинство материалов и приборов, не исключая нано-, "текут" при высоких температурах и жестких внешних воздействующих факторов (ВВФ);
- РС-постоянные при высоких температурах и жестких ВВФ;
- фононы в наномире имеют свою линию поведения — лучше работать с ними, чем против них.

Сейчас многие эрудированные компании и предприятия кинулись создавать нанотехнологии только ради того, что появилась еще одна возможность финансирования. Но эти технологии никому

не нужны, разве только их разработчикам для получения средств и PR-кампании. Нужно понимать потребности в этих технологиях, хорошо изучая все секторы их применения на основе тщательно спланированного исследования. Проблемы с паразитными предложениями и действиями существуют, и нельзя их недооценивать, требуется понимание конкурентных предложений и создание действительно нового продукта, отличного от конкурентного, которые нужно продвигать.

Ключевой момент дальнейшего продвижения — ресурсы для выполнения работ (естественно, не только финансовые). Государство в лице Роснотех обещает спонсировать нанотехнологичное производство. Разработчикам МЭМС в нашей стране никогда не улыбалось счастье, и, соответственно, недостаток поддержки сказывался в процессе создания и коммерциализации продукта. С этой точки зрения, кажется, что нанотехнология может проанализировать и усвоить многие критические факторы развития МЭМС. Основным здесь будут инвестирование исследований и поддержка инфраструктуры, включая осовременивание производства и решение метрологических проблем МЭМС. Нанотехнологии и датчики нуждаются в капитале, который может оказаться особо значимым для улучшения сегодняшнего финансового рынка.

Что касается промышленности, то ей понадобится создавать стандарты и разрабатывать направления развития для участников. Для развития МЭМС и ее составной и определяющей части — датчиков — требуются значительные улучшения организации и координации работ, маркетинга, стандартов, а также создание жизнеспособной системы привлечения капитала, прибыльности и применимости продуктов.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность д-ру физ.-мат. наук, профессору Мордковичу В. Н. за высказанные замечания и рекомендации при подготовке данной статьи.

Источники

1. NEXUS Market Analysis III, 2005—2009.
2. <http://www.vdcresearch.com>
3. www.enablingmnt.com
4. <http://www.yole.fr>
5. <http://www.semiconwest.org>
6. http://mae.pennet.com/display_article/338902/32/ARTCL/none/EXECW/1/Automotive-MEMS-sensor-market-to-nearly-double-by-2012/
7. <http://www.enablingMNT.com>
8. mstnews_105
9. <http://www.GlobalExpress>
10. <http://www.sensormag.com>

В. В. Просянюк, канд. техн. наук,
ФГУП "ФНПЦ "НИИ прикладной химии",
Г. И. Сигейкин, д-р хим. наук, МЦАИ РАН,
И. С. Суворов, канд. техн. наук,
Г. М. Колединский, канд. физ.-мат. наук,
ФГУП "ФНПЦ "НИИ прикладной химии"

МИНИАТЮРНЫЕ РЕЗЕРВНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИКИ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Представлены необходимые для перспективной спецтехники миниатюрные резервные средства автоматики на основе высокотемпературных гальванических элементов с высокими удельными плотностями энергии, электроды которых выполнены из разнородных малогазовых энергетических конденсированных систем. На их основе проектируют автономные высокоточные замедлители, программируемые электронные переключатели и т. д. Они обеспечивают качественно новый уровень микроэлектромеханических систем, предназначенных для измерения параметров движения подвижных объектов, отклонения от вертикали, стабилизации, измерения ускорений, вибрации и т. д. (микроакселерометры, микрогирометры и другие инерциальные микромеханические датчики).

Ключевые слова: высокотемпературные гальванические элементы, датчики, средства автоматики, удельная плотность.

Развитие микросистемной техники обуславливает необходимость создания миниатюрных резервных источников питания. Во ФГУП "ФНПЦ "НИИ прикладной химии" разработаны миниатюрные резервные источники электрического тока, обеспечивающие прямое преобразование химической энергии в электрическую при протекании высокотемпературных экзотермических процессов. Были изготовлены электроды высокотемпературных гальванических элементов (ВГЭ) из специальных малогазовых энергетических конденсированных систем (ЭКС), которые контактируют между собой через сепаратор (электролит), как во всех химических источниках тока, или непосредственно. Благодаря уникальной способности названных многослойных композиций сгорать в тонком слое (до 0,5 мм) при интенсивном отводе теплоты в металлические пластины — токоотводы при температуре ± 60 °С, созданы батареи элементов с необходимыми характеристиками, которые нашли широкое практическое применение. Для электродов и сепаратора разработаны специальные рецептуры с избытком горючего в аноде и с избытком окис-

лителя в катоде. Электрические характеристики ВГЭ определяются, в первую очередь, активностью горючего и окислителя, а также электропроводностью электролитного материала [1–3]. Сведения о таких источниках тока в доступных зарубежных источниках отсутствуют.

В работах [3, 4] показана актуальность применения наноструктурированных материалов в источниках электрического тока и подтверждена возможность существенного улучшения их габаритно-массовых характеристик за счет миниатюризации и быстрогодействия. Необходимо учитывать, что увеличение дисперсности электродных материалов до нанометровых размеров приводит к значительному росту их химической активности. Представляет интерес использование в ВГЭ солей в виде наноразмерных частиц в качестве электролитного материала, что позволяет осуществить его плавление в волне экзотермических реакций, увеличить полноту использования компонентов, уменьшить количество добавки, увеличить быстродействие ВГЭ. Выявлены химические источники тока с наноструктурированной электродной поверхностью, обеспечивающей улучшение характеристик.

Батареи ВГЭ имеют высокую надежность, они универсальны по способам приведения в действие (электрическим, механическим, тепловым), являются наиболее мощными резервными источниками тока. Это позволяет использовать их для электрического питания приборов и оборудования во время работы экспедиций, передвижных лабораторий, при ликвидации последствий катастроф и стихийных бедствий, для энергообеспечения бортовых систем и устройств, средств оповещения о пожарах и других чрезвычайных ситуациях и т. д. Системы сигнализации, блокировки и защиты на основе батарей ВГЭ способны преобразовывать механические, тепловые и другие несанкционированные воздействия в сигналы, воспринимаемые человеком: свечение сигнальных ламп, цифровых панелей, звуковые сигналы (гудок, звонок, сирена) с фиксацией события на бумаге, магнитной ленте и т. д. Они могут включать или отключать соответствующее оборудование и механизмы, приводить в действие огнетушители и другие устройства. Тепловые, механические и иные датчики на их основе устанавливаются в пожарно-охранные средства в качестве источников и усилителей тока. Например, автономный электрический тепловой датчик может применяться на объектах, предрасположенных к самовозгоранию при перегреве, в качестве самосрабатывающего энергонезависимого сигнально-пускового прибора для включения различного рода ис-

полнительных устройств. Автономный кнопочный пускатель используют в качестве самостоятельного или дублирующего устройства для дистанционного командного приведения в действие стационарных порошковых или аэрозольных огнетушителей и т. п. При превышении в защищаемом помещении порогового значения температуры окружающего воздуха автоматически срабатывает ближайший к очагу пожара тепловой датчик, а батарея генерирует электрический ток, необходимый для включения пульта оповещения и передачи сигнала в пожарную охрану.

Расширение области применения рассматриваемых источников тока может обеспечить миниатюрный электронный блок параметрического регулирования мощности источника тока, который осуществляет импульсный отбор энергии. Время работы источника растет при увеличении скважности и снижении значения импульса, а также при увеличении сопротивления нагрузки за счет уменьшения поляризации электродов. Благодаря этому длительность разряда батареи может быть увеличена в 3...8 раз (при токах потребления 2...10 мА). Такая схема предпочтительна во временных, программно-коммутирующих и тому подобных устройствах, потребляющих токи в единицы миллиампер.

ВГЭ с накопителями энергии образуют новый обширный класс миниатюрных автономных блоков питания с широким спектром функциональных возможностей. В зависимости от конкретной задачи выбирают соответствующий накопитель энергии. Его зарядку в нужный момент времени обеспечивает батарея ВГЭ, необходимое напряжение которой гарантируется числом элементарных ячеек. Это позволяет создать *резервные* блоки питания с универсальным способом задействования. Они могут представлять собой соединенные в обычную электрическую цепь источники тока и накопители электрической энергии, конструктивно объединенные в одном корпусе. В данной конструктивной схеме улучшены габаритно-массовые характеристики, уменьшено время активации и т. д. Представляет интерес электрическая схема без диодной развязки. Это условие обеспечивает возможность *саморазрушения* ВГЭ (разрыва его электрической цепи) после зарядки накопителя.

В сочетании с ионисторами (электрохимическими конденсаторами, суперконденсаторами) [5, 6] ВГЭ перспективны для питания слаботочных приборов и систем в экстремальных ситуациях при выходе из строя штатных источников питания. Теплота, выделяющаяся в значительном

количестве на первом этапе работы источника тока, обеспечивает работоспособность ионисторов при температуре окружающей среды до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, так как их нижний температурный предел составляет $-(10...25)\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В сочетании с конденсаторами они обеспечивают необходимое количество энергии на завершающем этапе работы для приведения в действие мощных потребителей. Внутреннее сопротивление батарей ВГЭ составляет десятые доли ом. При времени работы около 1 с они обеспечивают зарядку низковольтных конденсаторов большой емкости без преобразователей энергии. Экспериментально подтверждено, что накопитель получает при зарядке не менее 70 % удельной энергии источника тока, это свидетельствует о высокой эффективности разрабатываемых устройств и возможности их миниатюризации.

Для зарядки высоковольтных конденсаторов и ионисторов необходимы батареи ВГЭ с длительностью работы порядка 10...100 с (с подключением преобразователя напряжения). За счет применения технических средств и оптимизации параметров работы преобразователя в активном режиме (путем подбора частоты генератора) достигается более эффективное и экономичное использование энергии ВГЭ.

Высокая мощность резервных блоков питания на основе ВГЭ и накопителей энергии (конденсаторов) может обеспечить, например, электрический взрыв проводников. Это явление привлекает большое внимание в связи с недостаточной изученностью явления и все более широким применением его в научных исследованиях и технике. В этом случае энергия, запасенная в конденсаторе, в очень короткий промежуток времени может быть подведена к металлическому проводнику и превращена в теплоту. Поскольку включенная в цепь масса металла мала, происходит быстрый разогрев материала прежде, чем теплота успеет рассеяться. При таком изменении температуры металл из нормального состояния проходит через жидкую и парообразную фазы за доли миллисекунды.

Электрический взрыв проводника — это резкое изменение физического состояния металла в результате интенсивного выделения в нем энергии при пропускании импульса тока большой плотности ($\geq 10^6\text{ А/см}^2$), приводящее к разрушению металлической электропроводности и сопровождающееся электромагнитным излучением и ударными волнами. Он является одним из наиболее эффективных способов создания интенсивных потоков энергии, воздействующих на вещество [7].

Возможность эффективного преобразования первичной электрической энергии накопителей в энергию излучения образующейся плазмы, ударных волн, теплоту и т. д. находит широкое применение (в зависимости от емкости конденсаторов). Необходимые значения максимального тока можно обеспечить применением конденсаторов и ключей с соответствующими характеристиками. Экспериментально подтверждена возможность взрыва тонкой проволоочки (проводника на печатной плате).

Электрический взрыв проводников является одним из немногих практически используемых методов создания кратковременных (с длительностью порядка микросекунды) интенсивных импульсов давления. Применение данного метода позволяет реализовать импульсные силовые нагрузки двумя способами. Взрываемый проводник может находиться в непосредственном контакте с материалом или передавать воздействие на материал через тонкий ударник. Результаты исследований, выполненных в работе [8], показывают, что осуществление электрического взрыва тонкого проводника в контакте с преградой позволяет сообщать ей удельный механический импульс со значением $0,001...0,02 \text{ кг} \cdot \text{с}/\text{см}^2$. При этом максимальные давления в преграде могут достигать нескольких мегапаскалей. Характерное время выделения большей части энергии в проводниках составляет $\sim 0,2$ мкс. Это представляет практический интерес при проектировании автономных быстродействующих средств автоматики для спецтехники.

С помощью проволоочки в виде спирали, свернутой в тор, можно сформировать сильное тороидальное магнитное поле. Этот процесс подобен передаче электромагнитной энергии в трансформаторе в обратногоходовой импульсной схеме [9].

Актуальной задачей в средствах автоматики является получение времени задержки большой точности при минимальном объеме устройства. Она может быть решена с помощью миниатюрных блоков временной задержки, состоящих из электронного модуля с электронной схемой на плате, и батареи ВГЭ.

Миниатюрные резервные средства автоматики на основе ВГЭ обеспечивают автономное питание объектов различного назначения, выдают в нужный момент поток плазмы, ударные волны, микросекундные воздействия на преграды, что позволяет проектировать *автоном-*

ные миниатюрные быстродействующие средства, высокоточные замедлители, программируемые электронные переключатели и т. д. Применение ВГЭ обеспечивает качественно новый уровень микроэлектромеханических систем на основе микроакселерометров, микрогироскопов и других инерциальных микромеханических датчиков, предназначенных для измерения параметров движения подвижных объектов, отклонения от вертикали, стабилизации, измерения ускорений, вибрации и т. д. [10].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант офи_ц № 07-03-13532).

Список литературы

1. Михайлов П. Г., Петрунин К. В. Микромеханика — новое направление в приборных устройствах // Актуальные проблемы развития автономных информационных и управляющих систем на основе высокоэнергетических конденсированных материалов в XXI веке. Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции. — С-Пб.: Книга, 2002. 284 с.
2. Просянюк В. В., Сигейкин Г. И., Колединский Г. М., Суворов И. С. Миниатюрные резервные источники тока на основе энергонасыщенных конденсированных систем // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 7. С. 37—40.
3. Просянюк В. В., Суворов И. С., Сигейкин Г. И., Куликов А. В. Пиротехнические источники тока — новый класс устройств резервной электроэнергетики // Российский химический журнал (РЖХО им. Д. И. Менделеева). 2006. № 5. С. 113—119.
4. Просянюк В. В., Колединский Г. М., Суворов И. С., Полицук В. А. Резервные источники электрического тока на основе малогазовых энергонасыщенных конденсированных систем // Вестник Казанского технологического университета. 2008. Специальный выпуск. С. 180—184.
5. Груздев А. И. Состояние и перспективы развития производства высокотехнологичных автономных источников электрической энергии в России // Электрохимическая энергетика. 2006. Т. 6. № 1. С. 3—29.
6. Беляков А. И. Электрохимические суперконденсаторы: текущее состояние и проблемы развития // Электрохимическая энергетика. 2006. Т. 6. № 3. С. 146—149.
7. Бурцев В. А., Калинин Н. В., Лучинский А. В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990. 288 с.
8. Павловский А. И., Кашинов В. И., Глушак Б. Л., Новиков С. А. Генерирование механического импульса электрическим взрывом проводника // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19. № 3. С. 124—126.
9. Власов А. Н., Колесников С. А., Манюшкин А. Б. Об особенностях электрического взрыва проволоочной спирали, свернутой в тор. Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество // Тезисы XXII Международной конференции "Эльбрус—2007". 2007. 265 с.
10. Тимошенко С. П., Зоков С. А., Калугин В. В. Разработка сложно-функционального микроэлектромеханического привода // Датчики и системы. 2006. № 10. С. 33—35.

В. М. Агафонов, канд. физ.-мат. наук, доц.,
e-mail: agafonov@cmeffke.mipt.ru,
А. С. Бугаев, д-р физ.-мат. наук, акад. РАН,
зав. каф., e-mail: bugaev@cos.ru,
А. А. Орел, аспирант,
e-mail: aleksei.orel@gmail.com,
Московский физико-технический институт

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МОЛЕКУЛЯРНО-ЭЛЕКТРОННОЙ ЯЧЕЙКЕ ПЛАНАРНОГО ТИПА

Численными методами исследуются нелинейные явления в молекулярно-электронной ячейке планарного типа. Приводятся общая математическая постановка задачи, графические результаты расчета распределения концентрации, численные результаты расчета высших гармоник выходного тока в зависимости от геометрии ячейки и частоты.

Ключевые слова: нелинейные явления, конвективная диффузия, молекулярно-электронная ячейка.

Введение

Одной из основных характеристик любого устройства, предназначенного для измерения параметров движения, является его динамический диапазон. С одной стороны, он ограничивается собственными шумами прибора, а с другой — максимальным сигналом, при котором нелинейные искажения все еще не превышают допустимого уровня (обычно 0,1 %). Таким образом, одним из путей расширения динамического диапазона и, в конечном итоге, области применения приборов является снижение уровня нелинейных эффектов в преобразующем элементе.

В приборах, основанных на принципах молекулярной электроники и использующих в качестве преобразующего элемента молекулярно-электронные ячейки (МЭЯ), давно известным подходом к достижению этой цели является применение двух последовательно соединенных анод-катодных пар электродов, направленных навстречу друг другу. Выходным сигналом при этом служит разностный катодный ток. В такой системе нечетные гармоники, создаваемые каждой парой, складываются, а четные — вычитаются, что, в частности, позволяет избавиться от фоновой составляющей тока. Но это, к сожалению, не является универсальным методом, так как невозможно в принципе создать абсолютно симметричную МЭЯ и, следовательно, полностью убрать вторую гармонику не удастся. Кроме того, так как нечетные гармоники складываются, то остается еще третья гармоника, которая

также существенна при больших амплитудах сигнала.

Отчасти проблемы, связанные с нелинейными эффектами в МЭЯ, можно снять, используя приборы с обратной связью, например, разработанные на основе магнитогидродинамического эффекта [1]. Однако данный метод имеет свои ограничения, поскольку для его эффективной реализации требуется большая глубина обратной связи в широкой частотной области, что технически трудно совместимо с задачей обеспечения запаса устойчивости контура обратной связи, особенно в переходных режимах и при изменениях температуры. В связи с этим принципиально важной является разработка методов снижения уровня нелинейных эффектов в первичной преобразующей ячейке.

В настоящее время нелинейные искажения, возникающие в молекулярно-электронной преобразующей ячейке, теоретически исследованы явно недостаточно. Среди известных работ отметим, прежде всего, одномерную модель Ларкама [2], результаты которой свидетельствуют о том, что молекулярно-электронный преобразователь (МЭП) должен быть абсолютно линейным, по крайней мере, в низкочастотной области. К сожалению, этот вывод в реальных условиях неверен ввиду отличия реальной геометрии ячейки от рассмотренной в модели. В работах [3, 4] исследовалось влияние импеданса входного каскада вторичной электроники на нелинейные явления. Впоследствии на основании результатов, полученных в данных работах, были созданы новые схемы входных каскадов, что позволило, с одной стороны, почти на порядок снизить нелинейные искажения для серийно выпускаемых приборов, а с другой стороны, практически исключить влияние рассматриваемого в указанной работе механизма генерации нелинейных искажений. Среди других исследований в этой области отметим работы [4, 5], в которых были получены теоретические зависимости для значений высших гармоник от амплитуды входного сигнала и геометрических параметров преобразующей ячейки. Но поскольку в этих работах исследовались практически мало используемые геометрии ячейки, то полученные результаты представляют в основном теоретический интерес.

Дальнейшее улучшение выходных характеристик МЭЯ может быть достигнуто путем оптимизации геометрии электродного узла. Наиболее перспективным с этой точки зрения выглядит создание преобразующей ячейки на основе планарных технологий, т. е. путем напыления электродов на поверхности диэлектрического

канала. С помощью численных методов моделировались процессы [6], происходящие в такой ячейке, были получены ее амплитудно-частотные характеристики в зависимости от геометрических параметров. В целом, было установлено, что уменьшение характерных размеров элементов преобразующего узла способно обеспечить качественно более высокие выходные характеристики преобразователя. Настоящая статья является логическим продолжением [6] и посвящена исследованию нелинейных эффектов в преобразующей ячейке планарного типа и возможности снижения их влияния путем подбора оптимальных геометрических параметров.

Результаты данной работы свидетельствуют о сильной зависимости амплитуд высших гармоник от ширины диэлектрического канала: уменьшение вдвое ширины канала снижает уровень нелинейных эффектов на порядок, что указывает путь к радикальному улучшению характеристик датчиков движения, основанных на принципах молекулярной электроники. Проведенные в настоящей работе исследования имеют практическое значение, и их результаты уже учитываются при проектировании МЭЯ нового типа.

Постановка задачи

Принципиальная схема МЭЯ, созданной на основе планарных технологий, изображена на рис. 1. Четыре электрода — два анода и два катода — расположены на нижней поверхности диэлектрического канала. Вся система заполнена рабочей жидкостью, представляющей собой раствор, содержащий высокую концентрацию фонового (не участвующего в электродных реакциях) электролита с небольшой добавкой активного компонента, ответственного за перенос заряда через границу раздела жидкость—металл электрода. Как показано, например в [7], для

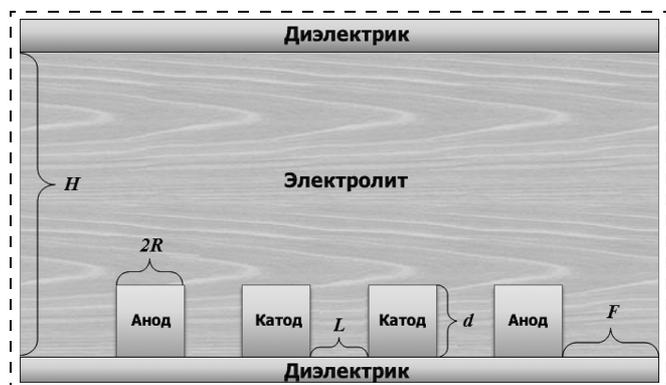


Рис. 1. Принципиальная схема молекулярно-электронной ячейки на основе планарных технологий

расчета тока, протекающего в системе, в этом случае достаточно рассматривать потоки активного компонента, учитывая диффузионный и конвективный перенос. Роль фонового электролита сводится при этом к экранированию электрического поля в жидкости и, тем самым, к подавлению миграционного переноса зарядов. В такой системе основным уравнением, описывающим перенос активного компонента, является уравнение нестационарной конвективной диффузии, имеющее в общем случае вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\Delta C - V\nabla C, \quad (1)$$

где C — концентрация активных ионов; V — гидродинамическая скорость течения электролита относительно корпуса преобразователя; D — коэффициент диффузии; t — время.

Граничные условия к уравнению (1) подробно описаны в [6] и с физической точки зрения представляют собой равенство концентрации нулю на катодах, а на анодах — фиксированному значению, получаемому из соотношения Нернста, а также отсутствие потоков заряда через диэлектрические поверхности.

Распределение скоростей в ячейке может быть найдено из решения линейаризованного уравнения Навье—Стокса

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \nu\Delta V - \frac{\nabla P}{\rho}, \quad (2)$$

где ν — коэффициент вязкости электролита; P — давление; ρ — плотность, и уравнения непрерывности жидкости

$$\operatorname{div} V = 0 \quad (3)$$

при условии равенства нулю скорости жидкости на твердых поверхностях.

Входным сигналом при этом является перепад давлений между левой и правой границами области:

$$P|_{\text{лев.граница}} = P_0 \sin(\omega t), \quad P|_{\text{прав.граница}} = 0. \quad (4)$$

В работе [6] исследовался линейный отклик системы. Задача решалась методом последовательных приближений. Для этого полное распределение концентраций раскладывалось на две составляющие — стационарную C_0 и линейную по скорости поправку к ней C_1 :

$$\Delta C_0 = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = D\Delta C_1 - V\nabla C_0, \quad (6)$$

после чего рассчитывались амплитуды первой гармоники разностного катодного тока:

$$I_1(t) = I_{\text{катод}2}(t) - I_{\text{катод}1}(t) = Dq \left(\oint_{\text{катод} 2} n \nabla C_1(t) dS - \oint_{\text{катод} 1} n \nabla C_1(t) dS \right), \quad (7)$$

где n — единичный вектор нормали к поверхности электрода, q — заряд, переносимый через поверхность в единичной электрохимической реакции с участием электроактивного иона. Интегрирование ведется по всей поверхности электрода S .

Для исследования нелинейных эффектов разложение концентрации в ряд, где каждое последующее слагаемое пропорционально скорости в более высокой степени, может быть продолжено и на случай членов более высоких порядков:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D \Delta C_i - V \nabla C_{i-1}, \quad C_i \sim V^i, \quad i = 2, 3, \dots \quad (8)$$

В качестве граничных условий к этим уравнениям служат равенство нулю C_i на электродах и отсутствие потоков заряда через диэлектрик и границы области. Соответствующая поправка к полной амплитуде тока в этом случае определяется формулой

$$I_i(t) = I_{i, \text{катод}2}(t) - I_{i, \text{катод}1}(t) = Dq \left(\oint_{\text{катод} 2} n \nabla C_i(t) dS - \oint_{\text{катод} 1} n \nabla C_i(t) dS \right). \quad (9)$$

Амплитуда нужной гармоники при этом выделяется путем разложения (9) в ряд Фурье.

Использование метода последовательных приближений законно в случае малых гидродинамических скоростей, когда выполняется условие $C_1 \ll C_0$. При более высоких скоростях необходимо решать неявное уравнение (1), полученное полное распределение C подставлять в (7) вместо C_1 и извлекать амплитуду нужной гармоники путем разложения выходного сигнала в ряд Фурье. Граничные условия для C при этом аналогичны использовавшимся в [6] для C_0 .

В настоящей работе в зависимости от ситуации задача решалась как методом последовательных приближений, так и в неявном виде. Как и в [6], использовалась последняя версия (5.0.19) компьютерного пакета программ FlexPDE — специализированной системы для получения численных решений систем дифференциальных уравнений, встречающихся при решении задач во многих областях фундаментальной и прикладной науки. В результате были построены распределения концентраций C_1 , C_2 ,

C_3 и приближений более высоких порядков, исследована зависимость уровня нелинейности отклика системы от геометрии ячейки и от частоты.

Результаты расчета распределений концентраций

На рис. 2, 3 и 4 (см. третью сторону обложки) приведены результаты моделирования C_1 , C_2 и C_3 для схемы, изображенной на рис. 1, со следующими геометрическими параметрами: $F = 50$ мкм, $L = 10$ мкм, $R = 10$ мкм, $H = 100$ мкм, $d = 10$ мкм. Распределение значений переменных величин в двумерной области показано в виде изолиний с равномерным шагом. Каждая изолиния изображена соответствующим цветом. При изменении от максимального значения к минимальному цвет изолиний смещается из красной области спектра в фиолетовую. Все длины представлены в миллиметрах. Графики соответствуют положению, при котором жидкость движется слева направо.

Поскольку распределение C_2 — квадратичная по скорости поправка к концентрации, значит, $C_2 \sim V^2 = V_0^2 \sin^2 \omega t = V_0^2 (1 - \cos(2\omega t))/2$. Поэтому катодный ток, определяемый поправкой C_2 , является суммой двух слагаемых — постоянного и осциллирующего с частотой 2ω . Вместе с тем, ввиду симметрии геометрии ячейки, если в левой паре анод—катод жидкость движется от анода к катоду, то в правой — от катода к аноду. А так как $C_2(V) = C_2(-V)$, то распределение C_2 оказывается симметричным относительно поворота вокруг вертикальной оси, разностный катодный ток I_2 , определяемый формулой (9) при подстановке поправки C_2 , равен нулю, следовательно, вторая гармоника из выходного сигнала устраняется. Аналогичным образом убираются и все другие четные гармоники.

Для третьего приближения имеем $C_3 \sim V^3 = V_0^3 \sin^3(\omega t) = V_0^3 (3\sin(\omega t) - \sin(3\omega t))/4$. Следовательно, катодные токи, определяемые третьим слагаемым, являются суммой двух членов — осциллирующих с частотами ω и 3ω , противоположны по знаку и при использовании в качестве выходного сигнала разностного катодного тока складываются. Поэтому для вычисления амплитуды третьей гармоники необходимо выходной сигнал раскладывать в ряд Фурье.

На рис. 5 (см. третью сторону обложки) приведен пример распределения концентрации, найденного путем решения неявного уравнения (1), в случае сильных искажений стационарного распределения сильным гидродинамическим потоком. На рис. 6 приведена временная зависимость выходного сигнала, соответствующая таким входным параметрам. Видно, что сиг-

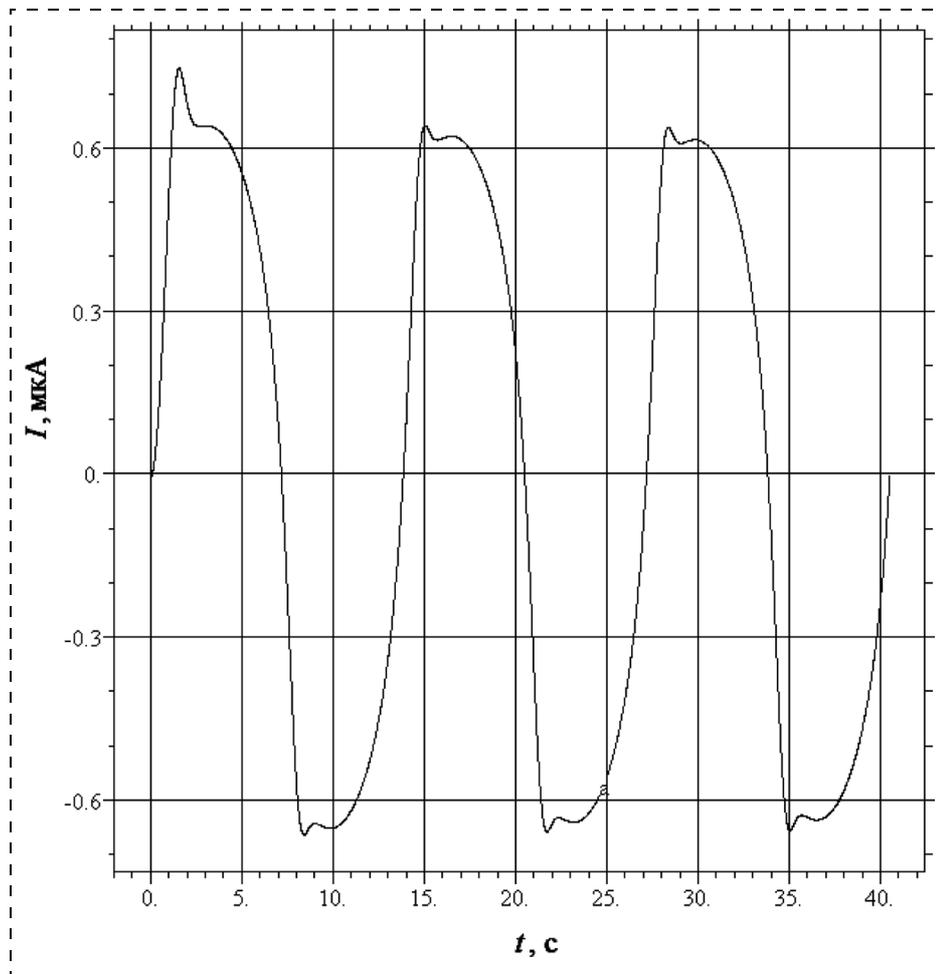


Рис. 6. Выходной сигнал, соответствующий распределению концентрации, изображенному на рис. 5

нал оказывается существенно нелинейным, и работа датчика становится невозможной, поэтому нелинейные явления являются ограничивающим фактором в использовании МЭП.

Результаты расчета высших гармоник выходного сигнала

В рамках работы была исследована зависимость амплитуд первой и третьей гармоник от толщины канала. Более высокие гармоники (5-я, 7-я и т. д.) не рассматривались ввиду их малости на практике. В первой серии численных экспериментов перепад давлений между левой и

правой границами области равнялся $0,017$ Па, длина электродов 20 мкм, расстояние между ними 10 мкм, толщина 2 мкм, частота колебания давления 10^{-4} Гц. Варьировалась толщина канала H . Результаты сведены в табл. 1. Как видно из таблицы, увеличение ширины канала с $12,5$ мкм до 25 мкм приводит к росту первой гармоники в $5,4$ раза, с 25 мкм до 50 мкм — в $3,53$ раза, с 50 мкм до 100 мкм — в $2,27$ раза, с 100 мкм до 200 мкм — в $1,57$ раза. Качественно понять причину этого явления можно путем следующих рассуждений. Каждое двукратное увеличение ширины канала приводит к росту объемного потока жидкости в 8 раз. Растет число ионов, смещаемых из положения равновесия, увеличивается градиент концентраций и, как следствие, — амплитуда тока. Замедление роста первой гармоники вызвано тем, что основная часть гидродинамического потока всегда сконцентрирована в средней части

канала, а с ростом его ширины эта область все сильнее отдалается от электродов. Основной рост гидродинамического потока приходится на область низких концентраций, поэтому число смещаемых ионов растет медленнее. В итоге, поскольку рост объемного потока опережает рост амплитуды тока, то при увеличении ширины канала передаточная функция ячейки по потоку (графа J_1/Q) падает, а при уменьшении — растет.

Аналогичным образом, изменение ширины канала с $12,5$ мкм до 25 мкм приводит к росту третьей гармоники в 911 раз, с 25 мкм до 50 мкм —

Таблица 1

Результаты расчета 1-й и 3-й гармоник тока и объемного потока жидкости в МЭЯ в зависимости от ширины канала при перепаде давлений между границами области $0,017$ Па, длине электродов 20 мкм, толщине 2 мкм, расстоянии между ними 10 мкм, частоте внешнего воздействия 10^{-4} Гц

H , мкм	12,5	20	25	30	50	100	200
1-я гармоника J_1	$2,62 \cdot 10^{-3}$	$8,65 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{-2}$	$2,03 \cdot 10^{-2}$	$5,02 \cdot 10^{-2}$	$1,14 \cdot 10^{-1}$	$1,79 \cdot 10^{-1}$
3-я гармоника J_3	$8,13 \cdot 10^{-10}$	$1,03 \cdot 10^{-7}$	$7,41 \cdot 10^{-7}$	$3,28 \cdot 10^{-6}$	$1,54 \cdot 10^{-4}$	$4,82 \cdot 10^{-3}$	$1,69 \cdot 10^{-2}$
Поток Q	$6,20 \cdot 10^{-4}$	$2,74 \cdot 10^{-3}$	$5,47 \cdot 10^{-3}$	$9,66 \cdot 10^{-3}$	$4,67 \cdot 10^{-2}$	$3,85 \cdot 10^{-1}$	$3,12$
J_3/J_1	$3,10 \cdot 10^{-7}$	$1,19 \cdot 10^{-5}$	$5,23 \cdot 10^{-5}$	$1,62 \cdot 10^{-4}$	$3,07 \cdot 10^{-3}$	$4,24 \cdot 10^{-2}$	$9,45 \cdot 10^{-2}$
J_1/Q	4,23	3,16	2,59	2,10	1,07	$2,95 \cdot 10^{-1}$	$5,73 \cdot 10^{-2}$

в 208 раз, с 50 мкм до 100 мкм — в 31 раз, с 100 мкм до 200 мкм — в 3,5 раза. Причина этого состоит в том, что третья гармоника гораздо более чувствительна к росту скоростей в ячейке, поскольку является следствием наличия кубической по скорости поправки к стационарному распределению концентраций. Поэтому ее амплитуда растет сильнее, чем амплитуда первой гармоники, следовательно, ослабление поля скоростей в ячейке является путем к снижению уровня нелинейных эффектов в системе. Так, последовательное сокращение H вдвое, начиная с 200 мкм и заканчивая 12,5 мкм, приводит к последовательному падению отношения J_3/J_1 в 2,2 раза, затем в 13,8 раз, в 58 раз и в 169 раз.

В целом, хотя приведенные рассуждения позволяют получить адекватную качественную картину явления, количественные оценки проследить достаточно трудно, поскольку они определяются в сложных взаимозависимостях распределений полей концентраций и скорости в ячейке и точно могут быть рассчитаны лишь с помощью вычислительной техники.

Помимо нелинейных эффектов другим фактором, ограничивающим динамический диапазон МЭЯ, является уровень собственных шумов устройства. Как показано в [8], квадрат спектральной плотности наиболее существенного из шумов МЭЯ прямо пропорциональным образом зависит от гидродинамического сопротивления ячейки, определяемого как отношение $R_h = \Delta P/Q$. Для планарной геометрии с каждым двукратным уменьшением толщины канала при прочих равных параметрах амплитуда объемного потока жидкости уменьшается в 8 раз, что приводит к 8-кратному росту гидродинамического сопротивления и, следовательно, к увеличению уровня шумов. Поэтому весь эффект от расширения динамического диапазона устройства за счет сокращения нелинейных эффектов может быть нивелирован резким ростом собственных шумов. Чтобы этого избежать, можно использовать вместо одной ячейки с широким каналом систему из восьми параллельно соединенных ячеек

с вдвое более узким каналом. В результате такой замены гидродинамическое сопротивление останется таким же, что позволит сохранить уровень шумов МЭЯ на прежнем уровне. При этом, как показывают проведенные расчеты, резко уменьшатся нелинейные искажения, в результате чего динамический диапазон устройства расширится. Кроме того, полный ток в системе будет равен сумме токов от каждой из ячеек, и итоговая передаточная функция системы узких ячеек по давлению также окажется выше, чем у одной широкой. Таким образом, становится ясно, что хотя реализовать такой подход на практике технологически сложнее, тем не менее, он позволит существенно повысить выходные характеристики выпускаемых приборов.

В табл. 2 приведены аналогичные результаты для той же ячейки, но на частоте $f = 10$ Гц. Основное отличие данных результатов от предыдущих заключается в более медленном уменьшении амплитуд гармоник. Так, первая и третья гармоники при уменьшении H с 200 мкм до 12,5 мкм сократились в 26 и 44 200 раз соответственно, в то время как на частоте 10^{-4} Гц — в 68 и $2 \cdot 10^7$ раз. Причина этого явления заключается в уменьшении с ростом частоты диффузионных длин задачи — $\delta_{1,D} \approx \sqrt{D/\omega}$ для первой гармоники и $\delta_{3,D} \approx \sqrt{D/3\omega}$ для третьей. Так, за время, равное половине периода колебания потока, катодов успеют достигнуть уже не все ионы, как было в случае низкочастотных колебаний электролита, а только те, которые находятся от катодов на расстоянии, не превышающем диффузионную длину. Поэтому наиболее сильно амплитуды гармоник уменьшаются тогда, когда ширина канала становится ниже диффузионной длины данной гармоники для данной частоты. До этого амплитуды гармоник уменьшаются в основном за счет перераспределения полей концентраций и скорости. Тем не менее, тенденция ослабления нелинейных эффектов при уменьшении толщины канала остается достаточно

Таблица 2

Результаты расчета 1-й и 3-й гармоник тока и объемного потока жидкости в МЭЯ в зависимости от ширины канала при перепаде давлений между границами области 0,017 Па, длине электродов 20 мкм, толщине 2 мкм, расстоянии между ними 10 мкм, частоте внешнего воздействия 10 Гц

H , мкм	12,5	20	25	30	50	100	200
1-я гармоника J_1	$9,13 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^{-3}$	$2,69 \cdot 10^{-3}$	$3,13 \cdot 10^{-3}$	$4,55 \cdot 10^{-3}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	$2,37 \cdot 10^{-2}$
3-я гармоника J_3	$2,01 \cdot 10^{-11}$	$2,27 \cdot 10^{-10}$	$6,89 \cdot 10^{-10}$	$1,53 \cdot 10^{-9}$	$9,83 \cdot 10^{-9}$	$1,09 \cdot 10^{-7}$	$8,90 \cdot 10^{-7}$
Поток Q	$6,20 \cdot 10^{-4}$	$2,74 \cdot 10^{-3}$	$5,47 \cdot 10^{-3}$	$9,66 \cdot 10^{-3}$	$4,67 \cdot 10^{-2}$	$3,85 \cdot 10^{-1}$	3,12
J_3/J_1	$2,20 \cdot 10^{-8}$	$1,22 \cdot 10^{-7}$	$2,56 \cdot 10^{-7}$	$4,89 \cdot 10^{-7}$	$2,16 \cdot 10^{-6}$	$9,06 \cdot 10^{-6}$	$3,75 \cdot 10^{-5}$
J_1/Q	1,47	$6,79 \cdot 10^{-1}$	$4,94 \cdot 10^{-1}$	$3,25 \cdot 10^{-1}$	$9,78 \cdot 10^{-2}$	$3,13 \cdot 10^{-2}$	$7,83 \cdot 10^{-3}$

Результаты расчета 1-й и 3-й гармоник тока и объемного потока жидкости в МЭЯ в зависимости от ширины канала при перепаде давлений между границами области 0,17 Па, длине электродов 20 мкм, толщине 2 мкм, расстоянии между ними 10 мкм, частоте внешнего воздействия 10 Гц

H , мкм	12,5	25	50	100	200
1-я гармоника J_1	$9,20 \cdot 10^{-3}$	$2,48 \cdot 10^{-2}$	$5,75 \cdot 10^{-2}$	$1,07 \cdot 10^{-1}$	$2,42 \cdot 10^{-1}$
3-я гармоника J_3	$2,05 \cdot 10^{-8}$	$5,20 \cdot 10^{-7}$	$1,09 \cdot 10^{-5}$	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$
Поток Q	$6,20 \cdot 10^{-3}$	$5,44 \cdot 10^{-2}$	$4,65 \cdot 10^{-2}$	3,84	30,3
J_3/J_1	$2,23 \cdot 10^{-6}$	$2,10 \cdot 10^{-5}$	$1,89 \cdot 10^{-4}$	$9,57 \cdot 10^{-4}$	$4,42 \cdot 10^{-3}$
J_1/Q	1,48	$4,56 \cdot 10^{-1}$	$1,24 \cdot 10^{-1}$	$2,78 \cdot 10^{-2}$	$7,79 \cdot 10^{-3}$

сильной: двукратное сокращение H снижает отношение J_3/J_1 примерно на порядок.

В табл. 3 приведены аналогичные результаты для той же ячейки на частоте 10 Гц, но при перепаде давлений между границами области, равном $\Delta P = 0,17$ Па. Десятикратный рост градиента давлений привел к росту потока жидкости и амплитуды первой гармоники в 10 раз, а амплитуды третьей — в 1000 раз. Этот результат является закономерным и служит подтверждением правильности проведенных вычислений. Кроме того, наглядно видно, что именно нелинейные эффекты являются существенным фактором, ограничивающим динамический диапазон МЭЯ: с ростом потока жидкости высшие гармоники растут значительно быстрее первой и потому при определенных условиях становятся весьма существенными. Максимальный уровень погрешности при расчете высших гармоник составил 25 %, что является допустимым в сравнении с масштабом изменения величин (до семи порядков).

В рамках работы исследовались и другие возможные способы уменьшения уровня нелинейности системы. Было выяснено, в частности, что увеличение длины электродов в 2 раза при прочих равных параметрах способно понизить отношение J_3/J_1 в 2—3 раза. Связано это с тем, что увеличивается длина выбранной области, в то время как перепад давлений остается прежним. Таким образом, растет масса рабочего вещества, и сила такой же амплитуды уже не способна разогнать ее до прежней скорости. Поэтому данным обстоятельством подтверждается делавшееся ранее утверждение о том, что снижение уровня нелинейности системы может быть достигнуто путем уменьшения гидродинамических скоростей в ячейке.

Увеличение толщины электродов в 4—5 раз также способно понизить отношение J_3/J_1 в 1,5—2 раза: более толстые электроды препятствуют протеканию рабочего вещества, вследствие чего уменьшается эффективная ширина канала. В то же время увеличение расстояния ме-

жду катодами никакого заметного эффекта не дало.

Были исследованы зависимости от частоты амплитуд первой, третьей, пятой и седьмой гармоник тока в ячейке планарного типа при постоянной амплитуде перепада давлений. На рис. 7 (см. третью сторону обложки) в двойном логарифмическом масштабе приведен соответствующий график для ячейки с такими геометрическими параметрами: $F = 10$ мкм, $L = 5$ мкм, $2R = 5$ мкм, $H = 13$ мкм, $d = 1$ мкм. Отметим, что коэффициент спада характеристики для первой гармоники $\alpha \sim 1,0$ — $1,1$, что значительно меньше коэффициента 1,5, наблюдаемого экспериментально в существующих МЭЯ с сеточными электродами. Спад гармоник высших порядков, судя по графику, начинается раньше, чем спад первой, а крутизна спада выше. Так, третья гармоника на частотах выше диффузионной падает по закону $1/\omega^2$, пятая — по закону $1/\omega^3$, что позволяет предположить, что n -я гармоника уменьшается по закону $1/\omega^{(n+1)/2}$. В целом, полученный результат означает, что коэффициент нелинейных искажений будет снижаться с ростом частоты.

Выводы

- ◆ Уменьшение ширины канала в молекулярно-электронной ячейке приводит к резкому ослаблению нелинейных явлений в системе.
- ◆ Использование системы параллельно соединенных молекулярно-электронных ячеек с узким каналом вместо одной с широким позволяет сохранить на прежнем уровне гидродинамическое сопротивление, а вместе с ним — и уровень собственных шумов МЭЯ. С учетом одновременного радикального снижения нелинейных эффектов это приводит к расширению динамического диапазона.
- ◆ Увеличение ширины и, в меньшей степени, толщины планарных электродов приводит к уменьшению нелинейных эффектов.
- ◆ Спад гармоник высших порядков в зависимости от частоты начинается раньше и проис-

ходит по более высокому порядку по сравнению с первой гармоникой.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 07-07-12055 и 08-07-00475.

Список литературы

1. Харламов А. В. Физические принципы организации МГД обратной связи и переноса спектра в молекулярно-электронных системах. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Долгопрудный, 2000. 19 с.

2. Lagsam C. W. Theoretical analysis of the solution solion polarised cathode acoustic linear transducer // J. Acous. Soc. Amer. 1965. Vol. 37. N 4. P. 664—678.

3. Козлов В. А., Тугаев П. А. Нелинейные эффекты при протекании тока в электрохимической ячейке // Электрохимия. 1996. Т. 32. № 12. С. 1431—1435.

4. Козлов В. А., Терентьев Д. А. Передаточная функция диффузионного преобразователя при частотах выше гидродинамической // Электрохимия. 2003. Т. 39. С. 443—449.

5. Козлов В. А., Коршак А. Н., Петькин Н. В. Теория диффузионного преобразователя сверхмалых расходов электролита // Электрохимия. 1991. Т. 27. Вып. 1. С. 20—24.

6. Агафонов В. М., Орел А. А. Моделирование физических процессов в молекулярно-электронном преобразователе, созданном на основе планарных технологий // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 5. С. 50—57.

7. Ньюман Дж. Электрохимическая кинетика. М.: Мир, 1977.

8. Зайцев Д. Л., Дудкин П. В., Агафонов В. М. Вихревые флуктуирующие потоки и их вклад в шумы молекулярно-электронных преобразователей // Изв. вузов. Сер. Электроника. 2006. № 5. С. 61—68.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

Л. С. Раткин, канд. техн. наук, ООО "Аргм"

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ В БИОНАНОСКОПИИ

В середине июня 2008 года на физическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова была проведена Вторая международная конференция "Современные достижения бионаноскопии", посвященная новым достижениям в сфере сканирующей зондовой микроскопии, инновационным технологиям высокоразрешающей микроскопии и сопутствующим физико-химическим методам исследования биообъектов.

Представленные канд. физ.-мат. наук Г. Б. Мешковым (МГУ им. М. В. Ломоносова) методические аспекты практического обучения зондовой микроскопии основываются на анализе базовых принципов проведения микро- и наноскопических исследований. В отличие от проводимых в сфере зондовой микроскопии измерений, изготавливаемые молекулярными биологами образцы должны иметь равномерно нанесенный на поверхность слой исследуемого материала. Применение инновационных нанобиоскопических методов обусловлено высоким качеством результатов исследований, напрямую зависящим от базы знаний и опыта экспериментатора.

Выступление проф., д-ра физ.-мат. наук И. В. Яминского (НПП "Центр перспективных

технологий", МГУ им. М. В. Ломоносова) по бионаноскопической проблематике содержало аналитический материал о современных достижениях в изучении нуклеиновых кислот, белковых кристаллов и комплексов и исследовании вирусных частиц и бактериальных клеток [1, 2]. Анализ результатов парного взаимодействия отдельных молекул заранее определенного состава и структуры вместе с прецизионными экспериментами с применением аппаратуры зондовой микроскопии являются базисом современного изучения физики взаимодействия биомолекул для совершенствования существующих и разработки новых технологий бионаноскопии молекулярного узнавания, развивающихся параллельно с инструментарием 3D-визуализации нанообъектов живой природы — бислойных мембран и их комплексов, ДНК и РНК, белков и липополисахаридов [2, 3]. Конструирование на базе принципов молекулярного узнавания реальных сенсорных систем и выявление взаимосвязей между регистрируемыми силовыми воздействиями и конформационными состояниями макромолекул признано одним из наиболее перспективных направлений исследований невозмущающего закрепления исследуемых молекул на твердой подложке.

В докладе А. С. Филонова (НПП "Центр перспективных технологий") по проведению на базе микроскопа "Фемтоскан" лабораторных Интернет-практикумов особое внимание уделялось клиент-серверной архитектуре (КСА) программного

обеспечения, равно пригодной как для обмена информацией по протоколу *TCP/IP* между сервером и клиентом, так и при непосредственной работе с микроскопом. При реализации модели "учитель—ученики" доступ к результатам сканирования имеют все пользователи, и только один из них управляет работой микроскопа, что препятствует конфликту устройств при одновременном подключении к серверу нескольких клиентов по схеме КСА. В этом случае для просмотра результатов через браузер на сайте лаборатории интегрируются отсканированные изображения образцов или обзорные изображения приборов — видеоданные, размещаемые на встроенном веб-сервере. Диалог с мгновенным обменом сообщениями на базе *ICQ* или аналогичных программ вместе со статусом состояния всех подключенных пользователей можно наблюдать во встроенном чате.

Изучение упругих свойств биообъектов с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) было продемонстрировано Д. В. Лебедевым в разработке Казанского института биохимии и биофизики, Казанского государственного университета и Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского. Так как в близких к естественным (*in vitro*) условиях, ввиду малого радиуса закругления зонда (от 30 до 100 нм), его надавливание может легко разрушить мягкие биообъекты (клетки и бактерии) [4], а также по причине усложнения расчета силы адгезии и модуля Юнга при неполной информации о точной форме зонда, коллективом ученых созданы и испытаны новые зонды для измерения упругих свойств биообъектов. Кварцевый шарик диаметром от нескольких сотен нанометров до десятков микрометров вместо обычного острого конического зонда крепится на специальную кремниевую балку, обеспечивая проведение экспериментов на мягких биологических объектах при низком удельном давлении на поверхность за счет большой контактной площади. Для подбора эффективных лекарственных препаратов и диагностики широкого круга заболеваний необходимо изучение упругих свойств клеточных мембран на основании данных о форме и размерах зондов и высокоточных расчетов модуля Юнга [5].

Исследования формирования трехкомпонентных липидных бислоев (ТЛБ) на слюде АСМ-методом [6—9] на примере двухкомпонентных липосом, состоящих в соотношении 4 : 1 из цвитер-ионного фосфатидил холина и отрицательно заряженного кардиолипина, были представлены в докладе Д. А. Давыдова с Кафедры высокомолекулярных соединений Химического фа-

культета МГУ им. М. В. Ломоносова. При формировании методом "спин-коутинга" на поверхности слюды отрицательно заряженного липидного бислоя [6] при соблюдении условий его получения возможно создание мембраны с минимальным количеством дефектов с течением процесса латеральной сегрегации в ТЛБ. Представленная методика может быть использована для моделирования механизмов доставки в поврежденные клетки лекарственных препаратов при изучении модификаций наноконтейнеров.

О проблеме фильтрации помех, примесей и загрязнений при идентификации изучаемого объекта на изображении, а также о методах атомно-силовой микроскопии для исследования биоспецифичных взаимодействий на поверхностях повествовалось в выступлении канд. физ.-мат. наук Е. В. Дубровина, представившего совместную работу Института теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова, ГНЦ прикладной микробиологии и биотехнологии и Физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. Результаты исследования специфичных к бактериальным клеткам и их фрагментам специально приготовленных поверхностей свидетельствовали о различной степени взаимодействия биообъектов, что может быть использовано для селекции изучаемых "паразитных" объектов.

Доклад о создании микромеханических биосенсоров на базе атомно-силовой микроскопии канд. физ.-мат. наук Г. А. Киселева затрагивал различные аспекты научного сотрудничества МГУ им. М. В. Ломоносова, Института физической химии и электрохимии РАН им. А. Н. Фрумкина и ООО "Академия биосенсоров". Построение гистограмм откликов отдельных датчиков позволяет однозначно идентифицировать вид внешнего химического воздействия, что используется при моделировании массива кантилеверов с модификацией различных веществ. На основании данных анализа частот собственных колебаний кантилевера проводится измерение масс микрометрических объектов и тонких пленок, что позволяет его использовать в качестве микровесов.

Сообщение О. В. Синициной (Институт элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова РАН) о реальности угроз здоровью населения от применения углеродных нанотрубок включало новые данные об использовании в медицинской практике нанотрубок [10, 11], например, для регенерации костных тканей [12] с изучением механизмов их проникновения посредством эндоцитоза и через клеточные мембраны внутрь клеток [10, 13]. В частности, был зафиксирован факт повышения частоты мута-

ций в экспериментах с воздействием многостенных нанотрубок на стволовые клетки эмбрионов мышей [14]. Также на опытах с мышами была выявлена токсичность нанотрубок для кожных покровов и влияние на образование гранулем нанотрубок при их попадании в легкие [15–16].

Работу научного коллектива сотрудников Казанского государственного университета и Казанского института биохимии и биофизики РАН по изучению ДНК вегетативных форм и наноформ *M. Gallisepticum* S6 АСМ-методом представил М. В. Трушин. В ходе исследований был установлен факт превращения в наноформы вегетативных клеток микоплазм с изменением физиологических и биохимических особенностей клеток микробов [17]. Определение различий патогенности наноформ микоплазм и вегетативных клеток [18], наряду с выявлением изменений в процессе трансформации в наноформы вегетативных клеток микоплазм, свидетельствует о наличии взаимосвязей между линейными молекулами ДНК и экспрессией генов наноформ [19].

Ярославский госуниверситет им. П. Г. Демидова совместно с Ярославской государственной медицинской академией провели изучение особенностей морфологического строения желез с помощью различных микроскопических методов. По сравнению с оптической [20, 21] и конфокальной микроскопией и иммуногистохимическими исследованиями трансмембранного транспорта ионов [22, 23] сканирующая электронная микроскопия, в частности, выявляет более тонкую структуру клеток ациниусов и позволяет без процедуры окрашивания видеть увеличенное в несколько тысяч раз рельефное объемное контрастное изображение [24]. Исследование физиологических и биохимических процессов с высоким разрешением в реальном времени с детальным отображением 3D-структуры биообъектов используется для механизмов клеточной секреции, цитоскелета, мембран и ионных каналов, плазмидов и хроматина, что подтверждается опытами на препаратах и лабораторных животных [25, 26].

Под научным руководством академика РАН М. П. Кирпичникова, проф. К. В. Шайтана и проф. И. В. Яминского в МГУ им. М. В. Ломоносова проводятся работы по исследованию особенностей применения АСМ для изучения микроструктуры волос. В докладе аспиранта физфака МГУ Д. В. Багрова приведены оценки количественного анализа полученных с помощью АСМ изображений волоса с расчетом ряда параметров, в частности, характерных высот кутикулы — наслаиваемых одна на другую волосяных чешуек, их средней шероховатости и расстояния между их

краями [27]. Оценка адгезионных свойств и жесткости волос [28, 29] позволит создать новое поколение косметических средств и шампуней для безопасного и полезного ухода за волосами с учетом влияния различных неблагоприятных факторов, например, воздействия химикатов и нагрева.

Использование атомно-силовой микроскопии для визуализации поверхностей бактерий на примере двух штаммов подвижных грамотрицательных бактерий *Pseudomonas aeruginosa* PAO1 и их спонтанного адсорбционного мутанта *Pseudomonas aeruginosa* PAO1 *phi77R2*, устойчивого к вирулентному бактериофагу *phi77* [30], рассмотрены в исследовании научного коллектива МГУ им. М. В. Ломоносова и ГосНИИгенетика. В ходе экспериментов с поверхности агаризованной среды бактерии переносили в дистиллированную воду, помещая на короткое время каплю полученной суспензии на свежесколотую слюду. Анализ изображений штаммов бактерий свидетельствует, что бактерии PAO1 располагаются на слюде в виде колоний с гладкой поверхностью нанесения (ПН), в то время как мутантные бактерии с шероховатой ПН с выступами диаметром от 60 до 90 нм распределены поодиночке.

В исследовании В. В. Баукова, В. В. Жижимонтова, А. В. Беляева и И. В. Быкова (МИФИ) по снижению поперечных блужданий оптического пучка диафрагмированием для повышения чувствительности атомно-силовой микроскопии, помимо тепловых колебаний кантилевера, шума интенсивности полупроводникового лазерного диода, теплового шума нагрузочного резистора и дробового шума 4-секционного позиционно-чувствительного фотодиода (ФД), подробно рассмотренных в работах [31, 32], также существуют другие типы шумов, в частности, связанные с внешним окружением и с паразитными блужданиями лазерного пятна на ФД. Предложенный метод используется для сокращения шумов в регистрирующей системе АСМ, что позволило в полосе 1 кГц снизить шумы с 0,15 до 0,06 Å, обеспечивая качественные АСМ-изображения с полным рельефом и атомарным разрешением 0,1 нм [33].

Сотрудники Института прикладной оптики НАН Украины О. П. Будник и Института физики НАН Украины А. П. Будник представили на конференции доклад по проблеме применения АСМ для анализа сил адгезии модифицированной атомарным кислородом или водородом поверхности алмаза. Методики использования АСМ для исследования ультратонких наноструктур и биообъектов [34] также применимы для изучения и оценки свойств нано- и монокристаллического алмаза, имеющего высокую степень био-

совместимости и химической инертности [35]. Учет относительной гидрофильности кремниевой иглы кантилевера и гидрофобности золотой иглы обуславливает разную степень взаимодействия с покрытыми атомарным водородом и оксидированными участками поверхности [36].

Также были представлены другие доклады, в том числе по модификации поверхности полиметилметакрилата вакуумным ультрафиолетом и кислородной плазмой, по морфологии биосовместимых полимерных антибактериальных покрытий и по применению наномеханических кантилеверных сенсоров со встроенным оптическим считыванием данных.

Выводы

1. Применение атомно-силовой микроскопии для визуализации поверхностей бактерий способствует, в частности, установлению связей между устойчивостью к бактериофагам определенных видов и структурой поверхности бактерий. Для расширения сфер применения микро- и наносистемной техники в современной бионаноскопии целесообразна разработка ряда новых методик, в том числе по получению на плоскости многокомпонентных липидных мембран, частным случаем которых является трехкомпонентный липидный бислой.

2. Для анализа влияния на здоровье людей наноматериалов необходимо проведение комплексных системных исследований для оценки степени риска научных сотрудников, работающих с нанотрубками. Также одним из перспективных направлений развития микро- и наносистемных технологий в бионаноскопии является исследование патогена *Mycoplasma gallisepticum*, инфицирование которым приводит к значительным экономическим потерям в аграрно-промышленном комплексе, например в птицеводстве.

3. Необходимость обеспечения контроля влажности поверхности форсирует создание на основе алмаза биосенсорных устройств с конструированием приборов с полной иммобилизацией биомолекул. Различие химических и электрических свойств покрытых атомарным кислородом и водородом участков поверхности способствует комбинированию современных био- и нанотехнологических методов для генерации нового поколения биосенсорных систем.

Список литературы

1. Drygin Yu. F., Bordunova O. A., Gallyamov M. O., Yaminsky I. V. Atomic Force Microscopy Examination of TMV and Virion RNA // FEBS Letters. 1998. N 425. P. 217–221.
2. Gallyamov M. O., Drygin Yu. F., Yaminsky I. V. Atomic force microscopy visualization of RNA and ribonucleotides of the tobacco mosaic virus // Surface investigation. 2000. N 15. P. 1127–1134.

3. Filonov A. S., Yaminsky I. V. FemtoScan Scanning Probe Microscopy Image Processing Software User's Manual. M.: Advanced Technologies Centre, 2008. 86 p.
4. Kurihara K. Adv. in Colloid and Interface Sci. 1997. N 71–72. P. 243–258.
5. Dulinska O., Yargosz M. et al. // J. Biochemical and Biophysical Methods. 2006. N 66. P. 1–11.
6. Richter R. P., Brisson A. R. // Biophys J. 2005. N 88 (5). P. 3422–3433.
7. Richter R. P., Re'mi Be'rat, Brisson A. R. // Langmuir. 2006. N 22. P. 3497–3505.
8. Reviakine, Brisson A. // Langmuir. 2002. N 16. P. 1806–1815.
9. Ganchev D. N., Hasper H. E., Breukonk E. B. de Kruijff // Biochemistry. 2006. N 45. P. 6195–6202.
10. Bianco A., Kostarelos K., Prato M. // Current Opinion in Chemical Biology. 2005. N 9. P. 674–679.
11. Bianco A., Kostarelos K., Partidos Ch. D., Prato M. // Chemical Communications. 2005. N 4. P. 571–577.
12. Usui Y., Aoki K., Narita N. et al. // Small. 2008. N 4. P. 240–246.
13. Porter A. E., Gass M., Muller K., Skepper J. N., Midgley P. A., Welland M. // Nature nanotechnology. 2007. N 2. P. 713–717.
14. Zhu L., Chang D. W., Dai L., Hong Y. // Nanoletters. 2007. N 7 (12). P. 3592–3597.
15. Lam Ch.-W., James J. T., McCluskey R., Hunter R. L. // Toxicological Sciences. 2004. N 77. P. 126–134.
16. Monteiro-Riviere N. A., Inman A. O. // Carbon. 2006. N 44. P. 1070–1078.
17. Чернов В. М., Мухаметшина Н. Е., Гоголев Ю. В., Абдрахимов Ф. А., Чернова О. А. // Микробиология. 2005. № 74 (4). P. 498–504.
18. Chernov V. M., Moukhametshina N. E., Gogolev Y. V., Nesterova T. N., Trushin M. V., Chernova O. A. // The Scientific Journal. 2007. N 10, 7. P. 1–6.
19. Chernov V. M., Moukhametshina N. E., Gogolev Y. V., Nesterova T. N., Trushin M. V., Chernova O. A. // Journal of Rapid Methods and Automation in Microbiology. 2006. N 14 (4). P. 369–376.
20. Бабаева Ф. Г. Структура, функции и адаптивный рост слонных желез. М., 1979.
21. Estecondo I. // Int. J. Morphol. 2005. N 23. P. 19–24.
22. Segawa A. // J. Cell Science. 2002. N 115. P. 1869–1876.
23. Park K. // J. Biol. Chem. 2001. N 276. P. 27042–27059.
24. Riva A. // It. J. Anat. Embriol. 1995. N 100. P. 367–374.
25. Jena B. P. // Domestic Animal Endocrinology. 2005. N 29. P. 145–165.
26. Lal R. // Am. J. Physiol. Soc. 1994. C1–C21.
27. Gurden S. P., Monteiro V. F., Longo E., Ferreira M. M. C. Quantitative analysis and classification of AFM images of human hair // Journal of Microscopy. 2004. N 215. P. 13–23.
28. Luengo G., Serry F. M. Application of AFM in Cosmetics Research and Product Development // Veeco Instruments Inc. 2005. AN88. Rev A0.
29. Monteiro V. F., Natal A. M. D., Solodade L. E. B., Longo E. Morphological Analysis of Polymers on Hair Fibers by SEM and AFM // Materials Research. 2003. 6. № 4. P. 501–506.
30. Плетнева Е. А., Шабурова О. В., Сыкилинда Н. Н., Мирошников К. А., Кадыков В. А., Крылов С. В., Месяжинов В. В., Крылов В. Н. // Генетика. 2008. Т. 44. № 2. P. 185–194.
31. Blushan B. Springer Handbook of Nanotechnology. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004.
32. Sarid D. Scanning Force Microscopy With Application to Electric // Magnetic and Atomic Forces. Oxford: Oxford Univ. Press, 1994.
33. Бауков В. В., Жижимонтов В. В., Беляев А. В. // ПЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 13. P. 40.
34. Боровик А. С., Тарасова О. Е., Большакова А. В., Яминский И. В. // Успехи современной биологии. 2000. Т. 120. № 2. P. 217–224.
35. Collins A. F., Caruso F. // Rep. Prog. Phys. 1997. N 60. P. 1397–1445.
36. E. W. van der Vegte, Hadziioannou G. // Langmuir. 1997. N 13. P. 4357–4368.

Использование комбинированной технологии для создания датчиков газа

Рассмотрен новый тип твердотельного датчика газа, изготовленного с использованием КМОП КНИ-технологии, сквозного травления пластины и выращивания углеродных нанотрубок, чувствительных к газу. Было разработано новое КМОП микронагревательное устройство на базе вольфрама со сверхмалой потребляемой мощностью (менее, чем 10 мВт при 250 °С). Нагревательные устройства на базе вольфрама обладают большей стабильностью, чем другие КМОП-материалы, например поликремний. Многостенные CNT резистивные датчики газа показали хорошую чувствительность к NO₂ на уровне РРВ в воздухе, но требуется дополнительный нагрев для обеспечения приемлемых базовых значений времен восстановления. Утверждается, что метод годится для массового производства недорогих, маломощных датчиков газа на кремниевых заводах (foundries).

F. Udrea et al. Three technologies for a smart miniaturized gas-sensor: SOI CMOS, micromachining, and CNTs — challenges and performance.

IEEE International Electron Device Meeting. 10—12 Dec. 2007. P. 831—834.

Наноструктуры для наноэлектроники

Предлагается новый тип памяти, основанный на самоорганизующихся квантовых точках (*quantum dots* (QD)). Будущее QD-флэш-памяти связано с преимуществами произвольной выборки классических ДОЗУ и энергонезависимостью, свойственной флэш-памяти, и с надеждами получения времени 10 нс и хорошей долговечности (более 10¹⁵ циклов записи/стирания). На первом этапе создания QD-флэш-памяти было продемонстрировано время хранения дырок 1,6 с при комнатной температуре,

на QD из InAs/GaAs с дополнительным барьером из Al_{0.9}Ga_{0.1}As.

M. Geller et al. Nanostructures for nanoelectronics: No potential for room temperature applications? // *Microelectronics Journal*. March—April 2008. Vol. 39, Is. 3—4. P. 302—306.

Радиоприемник на основе нанотрубки

Сконструирован полностью функционирующий, полностью интегрированный радиоприемник на основе одной нанотрубки. Нанотрубка одновременно выполняет функции всех основных компонентов радиоприемника: антенны, регулируемого полосового фильтра, усилителя и демодулятора. Реализовано батарейное питание радиоприемника. Был осуществлен успешный прием музыки и голоса с использованием несущей волны промышленного частотного диапазона 40...400 МГц и техники частотной и амплитудной модуляции.

K. Jensen, J. Weldon, H. Garcia, A. Zettl.

Отдел физики, Центр интегральных наномеханических систем, Калифорнийский университет;

Отделение материаловедения, Берклийская национальная лаборатория Лоуренса.

Nanotube Radio. *Nano Letters*, November 2007.

Интегральная схема с использованием межсоединений из углеродных нанотрубок и кремниевых транзисторов

Ввиду своих превосходных электрических свойств металлические углеродные нанотрубки представляются перспективным материалом для реализации межсоединений будущих интегральных схем. Результаты моделирования показали, что использование межсоединений из металлических углеродных нанотрубок позволит создавать более эффективные по потребляемой мощности и более быстродействующие ИС. Следующим этапом является создание экспериментального образца с указанной структурой, работающего с высоким быстродействием. Сообщается о создании одиночного образца ИС, в которой совмещаются крем-

ниевые транзисторы и отдельные межсоединения на основе углеродных нанотрубок на одном кристалле. Эта ИС работает на частоте, превышающей 1 ГГц. Данный образец будет также использован, как инструмент для исследования углеродных нанотрубок на кремниевых платформах для работы на высоких частотах, прокладывая путь к будущей многогигерцевой нанoeлектронике.

G. F. Close et al. A 1 GHz Integrated Circuit with Carbon Nanotube Interconnect and Silicon Transistors // *Nano Letters*. 2008. 8(2). 706—709.

Конструирование и изготовление логических MEMS-клапанов

Представлено описание новой конструкции логического MEMS-клапана, который может выполнять операции Булевой алгебры, как и логические приборы, построенные из твердотельных транзисторов. Эта конструкция логического MEMS-клапана унаследовала все преимущества MEMS-переключателей и, таким образом, ожидается, что они будут иметь больше применений, чем MEMS-переключатели. Уникальной особенностью данного прибора является то, что он может выполнять функцию клапана NAND и функцию клапана NOR в одной и той же механической структуре, но с различными электрическими межсоединениями. В опытной конструкции длина прибора составила 250 мкм, ширина 100 мкм и зазор 1 мкм. Экспериментальные результаты показали, что прибор может работать при 10 В и обеспечивает выполнение заданных логических функций. Резонансная частота прибора составила примерно 30 кГц. Ввиду отсутствия контакта металл—металл данного прибора логические функции прибора проверялись посредством наблюдения и видеозаписи.

Chun Yin Tsai et al. Design and fabrication of MEMS logic gates // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. April 2008. Is. 4. P. 10.

Микроэлектромеханические переключатель и инвертор для применений с цифровыми ИС

Изготовлены микроэлектромеханические переключатель и инвертор на базе такого переключателя с использованием микроэлектромеханического процесса на поликремниевой поверхности, совместимого с КМОП-технологией. Основная концепция разработки заключалась в том, что инвертор на базе MEMS-переключателя, аналогичный по реализации КМОП-инвертору, имеет высокую помехоустойчивость и малую потребляемую мощность, поскольку в MEMS-переключателе от-

сутствует ток утечки при отключении. Для изготовленного MEMS-переключателя характерны идеальные характеристики включения/выключения с допороговым перепадом в 4 мВ/декада, нулевым током при отключении и очень высоким значением тока on/off. Также инвертор на базе MEMS-переключателя имеет идеальные характеристики передачи по напряжению.

W. W. Jang et al. Micromechanical (MEM) switch and inverter for digital IC application // *IEEE Asian Solid-State Conference. ASSCC'07*. 12—14 Nov. 2007. P. 256—259.

КМОП-MEMS для реконфигурируемых ИС

Достигнут прогресс в разработке КМОП-MEMS электротермических проводящих зондов для самоконфигурируемых схем памяти (Memory-Intensive-Self Configuring Integrated Circuits (MISCIC)). Цель состоит в том, чтобы использовать MEMS проводящие зонды для реконфигурирования схем посредством механической адресации и прохождения тока, вызывая изменение сопротивления в схеме, встроенной на кристалле. Были сконструированы кантилеверные зонды, покрытые никелем, площадью 1, 4, 9, 16 и 25 мм². Вертикальный диапазон электротермического актюатора равен 23,9 мкм при мощности нагрева 3,7 МВт, но диапазон уменьшается, если в качестве контакта используется стеклянная пластинка, покрытая золотом.

L. J. Noman et al. CMOS-MEMS probes for reconfigurable IC's // *IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*. P. 515—518.

Использование магнитных ОЗУ в космосе

В Японском исследовательском спутнике SpriteSat будет использован магнетометр на основе MEMS с магнитным ОЗУ (МОЗУ) фирмы Angstrom Aerospace Corp. (Швеция). МОЗУ заменит как СОЗУ, так и флэш-память. МОЗУ появилось в 1990-е годы для замены различных типов памяти — от ОЗУ до жестких дисков. Поскольку МОЗУ является твердотельным, оно имеет преимущество перед вращающимся механизмом жесткого диска. Также отдельные биты МОЗУ можно стирать и повторно записывать неограниченно, тогда как флэш-память можно стирать и перезаписывать большими блоками менее миллиона раз, после чего биты начинают выходить из строя. Кроме того, МОЗУ является энергонезависимым. Однако вопреки указанным преимуществам МОЗУ еще предстоит их реализация. Дело в том, что при сохраняющихся проблемах разработки стоимость МОЗУ наивысшей емкости, например, MR2A16A фирмы Frees-

sale, емкостью 4 Мбит составляет около 20 долл., тогда как, флэш-память емкостью 4 Гбит стоит 5 долл. Angstrom Aerospace использует МОЗУ исключительно в своей спутниковой подсистеме. МОЗУ будет хранить данные программ, а также биты конфигурирования для вентиляционных матриц, программируемых пользователем (ВМПП). МОЗУ может быть сравнительно легко перепрограммировано посредством программного кода, а ВМПП может быть реконфигурирована с Земли посредством загрузки новых данных памяти в МОЗУ.

Подсистема фирмы Angstrom Aerospace, которая запущена на орбиту в составе спутника SpriteSat во второй половине 2008 года, представляет собой сложный магнетометр, который будет контролировать магнитное поле Земли со спутниковой орбиты. Общее назначение спутника: изучение видимых световых явлений в верхних слоях атмосферы.

Отдельно фирма e2v Technologies PLC объявила о тестировании МОЗУ MR2A16A на соответствие военным спецификациям в температурном диапазоне от -55 до $+125$ °С. Пока же МОЗУ фирмы Freescale работают в диапазоне от -40 до $+105$ °С.

R. C. Johnson. MRAM headed for orbit.

www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=206900226

A. N. Mutschler. Japanese satellite blasting off with Freescale's MRAM on board // Electronic News. 2/26/2008.

Нанoeлектронные и нанооптические межсоединения

Металлические межсоединения становятся значительным ограничением характеристик интегральных схем, связанным с влиянием на пропускную способность данных на кристалле и увеличением потребляемой мощности. Эти проблемы возрастают по мере уменьшения диаметра проводников, а произведение значения сопротивления на емкость увеличивается гиперболически, что ставит под угрозу получение ожидаемого быстродействия. Были выполнены некоторые количественные выводы указанных тенденций исходя из анализа известного плана — графика (roadmap). Были сравнены перспективы замены электронных межсоединений будущих схем на кристалле оптическими межсоединениями и установлено, что это даст преимущество на четыре порядка применительно к отношению пропускная способность/мощность. Это означает, что имеется возможность резко увеличить быстродействие схемы на кристалле без масштабирования транзисторов и использовать возможности существующих транзисторов более эффективно. Однако в настоящее время неясно, как эти преимущества могут быть реализованы. Обсужда-

ются различные проблемы, связанные с архитектурой и компонентами, необходимыми для реализации оптических межсоединений. В частности, должны быть разработаны эффективные волноводы для транспорта фотонов и малогабаритные приемопередатчики для обмена информацией на уровне фотонов-электронов.

R. G. Beausoleil et al. Nanoelectronic and Nanophotonic Interconnect // Proc. of the IEEE. February 2008. Vol. 96. No 2. P. 230—247.

Интеграция углеродных нанотрубок с полупроводниковой технологией

Рассмотрены проблемы, касающиеся интеграции углеродных нанотрубок с полупроводниковыми приборами для создания электронных устройств: совместимость материалов, электрические контакты, функциональные возможности, архитектура схем и надежность. Представлены последние результаты о включении одностенных нанотрубок в III—IV полупроводниковые гетероструктуры, выращенные с использованием молекулярно-лучевой эпитаксии. Было продемонстрировано, что одностенные углеродные нанотрубки могут быть выращены сверху также с использованием молекулярно-лучевой эпитаксии. Электрические контакты к нанотрубкам были получены из GaMnAs, выращенного при 250 °С. Полученные приборы выявили полевой эффект при комнатной температуре.

S. Stobbe et al. Integration of carbon nanotubes with semiconductor technology: fabrication of hybrid devices by III—IV molecular beam epitaxy // Semicond. Sci. Technol. 2006. No 21. P. 10—16.

Использование подхода "снизу—вверх" для создания кремниевых наноэлектронных устройств

Поддержание тенденции миниатюризации по принципу "сверху—вниз" становится чрезвычайно затруднительным по причине фундаментальных физических и технологических, а также экономических ограничений. Достаточно сказать, что длина затвора МОП-транзистора в 2016 г. может составить 10 нм. Вместе с тем, проводятся исследования по использованию органических молекул в качестве базовых блоков для создания наноразмерных приборов. Особенно привлекает точно контролируемая возможность самосборки молекул. Однако проводимость органических молекулярных структур получается значительно ниже, чем у кремния, поскольку транспорт электрона по одной молекуле определяется в основном прыжковой проводимостью. В последнее

время внимание специалистов привлекли кремниевые наноточки (SiNDs) и кремниевые нанопроволоки (SiNWs), как соответствующие требованиям организации "снизу—вверх" и высокой скорости переноса носителей заряда. Они могут реализованы не только на кремниевой, но и на стеклянной и пластмассовой подложках. Кроме того, нулевая и одномерная природа электронных состояний отдельных SiNDs и SiNWs позволяет реализовать новые электронные и оптические свойства, не достижимые в объемном кремнии. Совмещение подхода "снизу—вверх" с обычной кремниевой технологией "сверху—вниз" позволяет провести исследование кремниевой нано-, микро- и макроэлектроники на общей технической основе. В статье сделан акцент на последних исследованиях в области SiNDs: технология, электронные свойства и приборные применения.

H. Mizuta, Sh. Oda. Bottom-up approach to silicon nanoelectronics // *Microelectronics Journal*. 2008. No. 39. P. 171—176.

Разработка терабайтной памяти

Фирма Nanochip Inc. объявила, что осуществляет разработку терабайтной памяти, в которой используются запоминающая среда с изменением фазы, кантилеверные головки для записи и считывания с управлением от микроэлектромеханической системы. В схемах памяти будет использован обычный интерфейс типа ДОЗУ, но внутреннее функционирование будет подобно накопителю на жестком диске с большим количеством головок, где управляемые кантилеверы будут перемещаться по матрице разрядных ячеек для считывания и записи данных в среду с изменением фазы.

Размеры разрядной ячейки составят 2×3 нм для достижения терабайтной емкости на кристалле. В первых опытных образцах размеры ячейки составят 15×15 нм и обеспечат емкость 100 Гбайт на кристалле в 2010 г.

Фирма Nanochip Inc. была основана в 1998 г. В 2006 г. финансирование составило 10 млн долл. Недавно был обозначен новый объем финансирования, включая 14 млн долл. от фондов Intel Capital и JK & B Capital. Среди поддерживающих компаний находится Microsoft Corp. Nanochip, которая владеет семью патентами США. Среда с изменением фазы была лицензирована у фирмы Ovonyx.

R. C. Johnson. Nanochip on-track for terabyte chips. www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=205918634

S. Deffree. Intel continues to invest in MEMS-based memory maker // *Electronic News*. 1/25/2008.

Создание консорциума по возможному использованию нанотехники для исследования энергетических ресурсов

Техасский университет руководит новым исследовательским консорциумом, перед которым стоит задача найти пути использования нанотехники для дополнительного извлечения нефти и газа из существующих нефтяных месторождений. Консорциум будет поддержан семью главными нефтяными компаниями, каждая из которых согласилась инвестировать 1 млн. долл. в год на первые три года выполнения программы. Поддерживающие компании: BP America Inc., Baker Hughes Inc., ConocoPhillips Co., Halliburton Energy Services Inc., Marathon Oil Corp., Occidental Oil and Gas, Schlumberger Ltd должны получить разрешение от Министерства на проведение совместных работ. Бюро экономической геологии университета будет координировать ожидаемые международные исследовательские усилия по разработке методов, которые позволят использовать наноматериалы и миниатюрные датчики для извлечения большего объема нефти из существующих месторождений и контроля запасов нефти в глубоких скважинах. Современные методы извлечения обычно оставляют около 60 % нефти под землей. Ведущим партнером по исследованиям в области нанотехники будет университет Раиса. Много необнаруженной нефти находится внутри узких трещин в пористых горных образованиях. Как ожидается, использование новых материалов будет применяться в сочетании с существующими методами обнаружения нефти, которые включают инъекцию пара, газов или жидкостей в месторождения. Из новых материалов намечается использование фуллеренов. Намечается также разработка миниатюрных, стойких микро- и нанодатчиков, которые могут быть помещены в нефтяные месторождения для активного контроля запасов. В течение этого года намечается проведение нескольких технических форумов.

K. Ladendorf. Consortium to examine nanotechnology for energy exploration // *Austin American-Statesman, Cox News Service*, January 17, 2008.

Разработка конструкции комплементарных наноэлектромеханических вентиляей

Исследованы работа и характеристики комплементарных наноэлектромеханических (CNEM) логических вентиляей. Рассмотрены NEMS-структуры, имеющие размеры на 2—3 порядка меньшие, чем современные MEMS-реле. Выполнено сравнение различных металлов для использова-

ния в сочетании с кремнием в качестве кантилевера. Было установлено, что CNEM-инверторы с горизонтально действующими балками, размером 10 нм и низкой плотностью материалов (Si и Al) могут иметь наносекундную задержку и энергию переключения менее 0,1 фДж при напряжении питания 1,5 В и площади 0,03 мм².

K. Akarvardar et al. Design Considerations for Complementary Nanoelectromechanical Logic Gates // IEEE International Electron Device Meeting. 2007. 10–12 Dec. P. 299–302.

Использование медной металлизации на кристалле в качестве взрывателя

Группа ученых из *Georgia Tech Research Institute u Naval Surface Warfare Center* (США) ввели в структуру ИС высоко однородные медные структуры, которые затем химическим образом преобразуются во взрывчатку миллиметрового диаметра. Поскольку они могут быть интегрированы в стандартную микроэлектронную технологию, может быть организовано массовое производство компьютерных чипов с MEMS-детонаторами на базе медных материалов.

Было использовано большое число шаблонов, включая микросферы и текстильную ткань, для создания регулярных рисунков в пасте из оксида меди, чья вязкость регулировалась добавлением полимеров. Затем термохимическим способом шаблон удалялся и осуществлялось преобразование структур оксида меди в чистый металл в форме рисунка от шаблона. Размер пор варьировался посредством использования различных шаблонов и регулирования условий обработки. В итоге были изготовлены медные структуры с размерами в несколько микрометров со структурными компонентами, имеющими наноразмерные поры. Опираясь на контакты с учеными ВМС (*Naval Surface Warfare Center*), делается попытка оптимизировать общую конструкцию прибора для выполнения функций взрывателя. Долгосрочной целью программы по созданию MEMS-взрывателя является изготовление недорогого, высоконадежного взрывателя, встроенного в миниатюрный корпус. Кроме того, это изделие будет "smart" (с цифровым контролем), т. е. оно будет срабатывать точно в нужном месте, в заданное время. Один из специалистов ВМС считает, что использование этих изделий в видах вооружения позволит уменьшить количество взрывчатки на два порядка. Следующим этапом работ является интеграция всех компонентов взрывателя в самый малый по возможности корпус и затем массовое его производство.

Explosives on a chip: Copper Used as Fuse // Semiconductor International. 12/27/2007.

Успешная разработка транзистора на базе углеродных нанотрубок

Фирма NEC Corporation объявила об успешной разработке транзистора на углеродных нанотрубках (CNT) с использованием процесса нанесения пленок. Основные особенности создания новых CNT транзисторов.

1. Основные принципы конструирования касались проверки соотношения между характеристиками транзистора и длиной и плотностью CNT при создании канала CNT и для увеличения быстродействия CNT-транзистора.

2. Разработана технология нанесения слоев, позволяющая точно контролировать плотность CNT. CNT-транзисторы были изготовлены на новых принципах конструирования и технологии. Материал канала обеспечивает в 100 раз большую подвижность, чем у обычных транзисторов на органических материалах. Результаты исследований подтверждают перспективы CNT как основы создания транзисторов для использования в области печатной электроники. С печатной электроникой связываются надежды значительного упрощения технологии, значительного уменьшения расхода материалов и уменьшения эмиссии CO₂ на 90 %.

NEC Succeeds in Fabrication of CNT Transistor Using Coating Process.

[www.semiconductor.net/index.asp?layout=articleXML-Print & xmlID=743851089](http://www.semiconductor.net/index.asp?layout=articleXML-Print&xmlID=743851089)

Первая схема с межсоединениями с использованием нанотрубок

Первая в мире КМОП-схема с использованием нанотрубок в качестве межсоединений была недавно сконструирована в Стэнфордском университете в сотрудничестве с фирмой Toshiba Corp. Производство было осуществлено на фирме Taiwan Semiconductor Manufacturing Co. Ltd (TSMC). Схема, состоящая из 256 кольцевых генераторов (11 тыс. транзисторов), работает на частоте 1 ГГц. Таким образом, была продемонстрирована возможность замены меди на нанотрубки. Были использованы нанотрубки многостенного типа длиной 5 мкм и диаметром 50...100 нм (почти как у медных проводников). В будущих версиях могут быть использованы проводники из одностенных нанотрубок диаметром 1 нм. Размер кристалла составил 0,01 от квадратного дюйма. Для упрощения изготовления и тестирования матрицы кольцевых генераторов мультиплексорная схема располагалась на кристалле с тем, чтобы к индивидуальному кольцевым генераторам была обеспечена отдельная адресация. Нанотрубки были помещены в канавку для завершения формирования схемы

кольцевого генератора с использованием нового метода, заключающегося в нанесении раствора на кристалл, на тысячи свободно подвешенных нанотрубок. Затем переменный ток прикладывается к кольцевым генераторам, притягивая плавающие нанотрубки точно к правильным канавкам в схеме. Как только нанотрубка встает на место с образованием моста в конкретной канавке, переменный ток отключается от данного кольцевого генератора. Затем раствор удаляется и кристалл высушивается.

R. C. Johnson. First GHz chip to be interconnected with nanotubes.
[www.eetimes.com/showArticle.jhtml & articleID=206504064](http://www.eetimes.com/showArticle.jhtml&articleID=206504064)

Использование пленки на базе многостенных углеродных нанотрубок для считывания напряжения

Пленки на базе многостенных углеродных нанотрубок (MWCNT) были подготовлены по методу раствора/фильтрации и прикреплены непосредственно на образцы посредством непроводящего клея. Образцы затем подвергались циклам загрузки—разгрузки неосевых усилий для оценки их, как датчиков напряжения. Для обеспечения хорошего электрического контакта между пленкой из углеродных нанотрубок и проводниками тонкий слой меди термически осаждался на оба конца пленки, как электроды, а проводники подсоединялись к электродам посредством серебряной пасты. Мосты Ветстоуна использовались для преобразования изменений сопротивления MWCNT в выходное напряжение. Результаты показали, что значения выходных напряжений пропорциональны значениям считываемых напряжений с индикатора напряжений. Было измерено влияние температуры на сопротивление и было установлено, что сопротивление пленки MWCNT не зависит от температуры в диапазоне 273...363 К. Был также рассчитан оптимальный размер пленки для считывания напряжения. Динамические испытания показывают, что MWCNT способны выделять структурные особенности. Результаты эксперимента показывают, что MWCNT-пленка в перспективе может быть полезной для структурного мониторинга здоровья и для выполнения вибрационного контроля.

X. Li et al. Multiwalled carbon nanotube film for strain sensing // *Nanotechnology*. 2008. No. 19. 7 p.

Вторая жизнь кремния?

Представлен краткий обзор работы по созданию перспективных гибридных схем (CMOL—КМОП/нанопроволока/наноприбор), включаю-

щих цифровую память, реконфигурируемые логические ИС, нейроморфные сети для обработки смешанного сигнала. Главная идея CMOL-схем заключается в совмещении преимуществ КМОП-технологии (включая гибкость, высокий выход годных) с чрезвычайно плотными двухвыводными наноприборами молекулярного уровня. Относительно большие критические размеры КМОП-элементов и подход "bottom-up" (снизу—вверх) позволяет выдерживать стоимость изготовления CMOL на приемлемом уровне. При этом плотность CMOL-схем может составить $10^{12}/\text{см}^2$, а скорость непараллельной обработки информации 10^{20} операций/с при контролируемой потребляемой мощности. Предполагается, что с использованием указанной технологии закон Мура может быть продлен лет на 10—15 далеко за 10-нанометровую границу.

K. K. Likharev. CMOL: Second life for silicon? // *Microelectronic Journal*. 2008. No. 39. P. 177—183.

D. B. Strukov, K. K. Likharev. Prospects for the development of digital CMOL circuits // *IEEE International Symposium on Nanoscale Architectures*. 2007. 21—22 Oct. P. 109—116.

K. Kim et al. Design automation for hybrid CMOS-nanoelectronics crossbars // *IEEE International Symposium on Nanoscale Architectures*. 21—22 Oct. 2007. P. 27—32.

КМОП-MEMS горизонтальные электротермические актюаторы

Приводится описание горизонтального электротермического актюатора, изготовленного с использованием постКМОП микромеханической обработки. Актюатор представляет собой балку с мультиморфной структурой, состоящей из КМОП-диэлектрика и металлических межсоединений. При последующей операции структурного травления актюаторы демонстрируют возможность самосборки под влиянием моментов, возникающих от остаточных напряжений. Приведение в действие достигается через несбалансированное тепловое расширение внутренних элементов межсоединений, чье относительное положение и ширина определяют значение и направление воздействия. Джоулева теплота в дискретных поликремниевых резисторах используется для преобразования электрической энергии в тепловой домен. Для актюатора с размерами: 1,3 мкм — ширина, 100 мкм — длина, 4,2 мкм — толщина, состоящего из двух формирующих слоев, тепловая чувствительность до 18 нм/К была продемонстрирована при изменении температуры в 112 К. Результаты аналитической модели термической чувствительности и моделирования на основе анализа конечных элементов согласуются с экспериментальными данными в пределах 6 %. Показано, что увеличение тепловой

изоляции приводит к уменьшению термической чувствительности и уменьшению термической частоты отсечки с 800 до 150 Гц. Приведено сравнение данных по фактору качества других актюаторов, взятых из литературы. Представленные актюаторы имеют преимущество в применениях, где площадь ограничена, а нагрузка мала.

P. J. Gilgunn et al. CMOS-MEMS Lateral Electrothermal Actuators // *Journal of Microelectromechanical Systems*. Feb. 2008. Vol. 17. Is. 1. P. 103–114.

КМОП-MEMS-зонды для создания реконфигурируемых ИС

Сообщается о разработке КМОП-MEMS электротермических проводящих зондов для создания реконфигурируемых ИС (Memory-Intensive Self-Configuring Integrated Circuits (MISCICs)). В новом типе схем MEMS проводящие зонды используются для реконфигурирования схем посредством механической адресации и тока, проходящего через встроенную схему. Кантилеверные зонды, покрытые никелем, имеют площади 1, 4, 9, 16 и 25 мкм². Вертикальный диапазон электротермического актюатора составляет 23,9 мкм при мощности нагрева 3,7 мВт, но диапазон уменьшается при использовании контакта из стекла, покрытого золотом.

J. Liu et al. CMOS-MEMS probes for reconfigurable ICs // *IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 13–17 Jan. 2008. P. 515–518.

Однокристалльные MEMS двухполюсные коммутационные матрицы для телекоммуникационных сетей

Сообщается об однокристалльных MEMS коммутационных матрицах (5 × 5 или 20 × 20 двухполюсных переключателей), предназначенных для автоматизации главного коммутационного щита в телекоммуникационных сетях. Приборы обеспечивают межсоединения любых из 5 или 20 входных линий на любые 5 или 20 выходных линий. Работа переключателей базируется на электростатическом S-образном актюаторе с контактом на гибкой мембране и перемещением между верхним и нижним электродами. Цепь маршрутизации на кристалле состоит из толстых металлических линий и встраивается в ВСВ полимерные слои. Корпусированные коммутационные матрицы 5 × 5 имеют размеры 6,7 × 6,4 мм², а коммутационные матрицы 20 × 20 имеют размеры 14 × 10 мм². Напряжения срабатывания (закрытия/открытия) составляют в среднем 21,2 В/15,3 В для матрицы 5 × 5 и 93,2 В/37,3 В для матрицы

20 × 20, соответственно. Общие значения сопротивления сигнальной шины меняются в зависимости от положения коммутатора в пределах матрицы и составляют 0,13...0,56 Ом для матрицы 5 × 5 и 0,08...2,33 Ом для матрицы 20 × 20, соответственно. Среднее сопротивление коммутационных контактов составляет 0,22 Ом со стандартным отклонением 0,05 Ом.

S. Braun et al. Single-chip MEMS 5 × 5 and 20 × 20 double-pole single-throw switch arrays for automating telecommunication networks // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2008. No 18. 11 p.

MEMS-датчик массы

Приводится описание процесса изготовления, снятия характеристик и тестирования резонансного датчика массы на базе использования круглой MEMS-диафрагмы из монокристаллического кремния. Прибор изготавливается в приборном слое на КНИ-пластине, которая анодным способом приваривается к подложке из боросиликатного стекла. Приведена оценка технологического процесса. Снятие характеристик диафрагмы осуществляется посредством электростатического воздействия на диафрагму и измерения ее реакции с использованием оптической поверхностной профилометрии и лазерной виброметрии на эффекте Доплера. Исследована температурная стабильность вырожденного режима вибраций и показано, что исходная частота, разделенная на резонансные частоты указанных режимов, не меняется значительно в зависимости от температуры. Для структур, представляющих собой симметричный поверхностный профиль после обработки, характерна температурная стабильность. Характеристика прибора, как датчика массы, оценивалась посредством функционирования специфичных секторов диафрагмы для обеспечения посадочных мест для протеина S100bb. Были обнаружены дополнительные массы до уровня 9 нг.

A. K. Ismail et al. The fabrication, characterization and testing of a MEMS circular diaphragm mass sensor // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2008. No 18. 10 p.

Изготовление микроэлектромеханического акселерометра с использованием технологии печатных схем

Представлено описание процесса изготовления микроэлектромеханического (MEMS) акселерометра емкостного типа с использованием технологии печатных схем. В качестве структурного слоя для изготовления MEMS-акселерометра была использована каптоновая полиимидная пленка. Расчетная масса акселерометра была сформирована из четырех подвешенных балок

в полиимидной пленке. Расчетная масса была подвешена над тефлоновой подложкой с использованием разделителя. Отклонение расчетной массы обнаруживалось с помощью пары емкостных считывающих электродов. Верхний электрод акселерометра был сформирован на верхней поверхности каптоновой пленки. Нижний электрод был сформирован в металлизации на тефлоновой подложке. Исходная высота зазора определяется расстоянием между нижним электродом и каптоновой пленкой. При приложении внешнего ускорения (перпендикулярно расчетной массе) расчетная масса отклоняется в том или ином направлении от неподвижного нижнего электрода, вследствие инерционной силы. Это отклонение вызывает уменьшение или увеличение воздушного зазора, тем самым увеличивая или уменьшая емкость между верхним и нижним электродами. Сообщается о примере РСВ MEMS-акселерометра с квадратной расчетной массой мембраны площадью $6,4 \times 6,4 \text{ мм}^2$. Измеренная резонансная частота составляет 375 Гц, а Q-фактор в воздухе — 0,52.

J. E. Rigers et al. A microelectromechanical accelerometer fabricated using printed circuit processing techniques // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2008. No. 18. 7 p.

Прогресс и перспективы использования углеродных нанотрубок для создания быстродействующих электронных устройств

Приборы на углеродных нанотрубках имеют существенные преимущества в плане реализации быстродействующей логики. Сверхмалые размеры нанотрубки (диаметр трубки) является ключевой особенностью, которая позволяет значительное масштабирование длины канала, в то время как внутренние транспортные свойства нанотрубки обеспечивают высокие значения токов. Следует отметить, что узость трубки является критичной для реализации новых приборных концепций, например туннельного транзистора. При понимании уникальных возможностей углеродных нанотрубок и использовании их в необычных конструкциях становятся возможными новые наноэлектронные применения. Однако должен быть получен гораздо лучший контроль материалов и должны быть разработаны новые технологические процессы до реализации указанных применений.

J. Appenzeller. Carbon Nanotubes for High-Performance Electronics — Progress and Prospect. Proc. of the IEEE, Feb. 2008. Vol. 96. Is. 2. P. 201—211.

Технологии для совместного изготовления MEMS и электронных устройств

Микротехнологии, исходно разработанные для интегральной электроники, успешно применяются для массового производства большого ассортимента микромеханических структур для выполнения функций считывания, исполнительных операций, обработки сигнала, в частности фильтров. Посредством соответствующего совмещения осаждения, травления и литографических операций для микроэлектромеханических приборов с подобными операциями, используемыми для изготовления микроэлектронных приборов, возможно изготовление интегральной микросистемы в единой технологической последовательности. В статье рассматривается стратегия совместного изготовления с акцентом на модульный подход. Обсуждаются интегральные процессы с использованием примеров на физических датчиках (ИК устройства отображения, инерционные датчики), химические и биохимические датчики, электростатические и термические исполнительные устройства и устройства оптической коммутации. Посредством добавления новых функциональных возможностей в интегральную электронику открываются новые возможности MEMS в выполнении считывания и исполнительных операций, а также в улучшении характеристик аналоговых и цифровых ИС.

G. K. Fedder et al. Technologies for Cofabricating MEMS and Electronics // Proc. of the IEEE. Feb. 2008. Vol. 96. Is. 2. P. 306—322.

Нанофотоника и наноэлектроника на базе квантовых точек

Создание неразрушающей технологии производства полупроводниковых квантовых точек оставалось мечтой многих поколений инженеров, специализирующихся в области полупроводниковых приборов. Автор статьи, Д. Бимберг из Берлинского технического университета, утверждает, что теперь такая технология есть. Ведется разработка множества совершенно новых приборов с чрезвычайно высоким уровнем характеристик, основанных на использовании одной/нескольких или множества квантовых точек. Приводится краткое описание излучателей на одиночных q -битах, нанофлэш-памяти, сверхбыстродействующих лазеров и усилителей.

D. Bimberg. Quantum dot based nanophotonics and nanoelectronics // IEEE Electronic Letters. 31st January 2008. Vol. 44, No. 3. P. 168—171.

Использование нанокристаллического кремния в качестве светоизлучающего материала для устройства отображения с полевой эмиссией

Нанокристаллическая паста на основе кремния была успешно протестирована в качестве светоизлучающего материала, в котором пленка из углеродных нановолокон использовалась в качестве источника электронов. Устойчивая эмиссия в диапазоне 550...850 нм была получена при поле $16 \text{ В} \cdot \text{мкм}^{-1}$. Такое относительно низкое поле, требуемое для катодолюминесценции из пасты, может привести к долгосрочной надежности материалов, для эмиссии как электронов, так и света при пониженной потребляемой мощности. Приводится описание синтеза, характеристик и анализа наноструктурированной кремниевой пасты, излучающей свет, углеродных нановолокон, излучающих электроны, используемые для создания прибора. Были использованы рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS), сканирующая электронная микроскопия (SEM), просвечивающая электронная микроскопия (TEM) и Рамановская микроскопия. Представлены и обсуждаются соответствующие спектры и кривые полевой эмиссии.

A. Biaggi-Labiosa et al. Nanocrystalline silicon as light emitting material of a field emission display device // Nanotechnology. 4 June 2008. Is. 22. P. 6.

Архитектура демultipлексора на основе резистора/полевого транзистора для выполнения межсоединений между КМОП-схемой и наноприбором

Гибридная наноэлектроника начинает развиваться как один из перспективных вариантов поддержания закона Мура после того, как будет достигнут предел масштабирования КМОП-схем. Одной из главных проблем в такой гибридной наноэлектронике является интерфейс между высокоплотными нанопроволоками в перемычке наноприбора и сравнительно крупными микросоединениями в КМОП-области. Такой интерфейс может быть реализован через использование логической схемы — демultipлексора. Ранее для реализации функций демultipлексора использовались приборы одного типа, такие как резистор, диод или полевой транзистор. Однако различные типы приборов имеют свои преимущества и недостатки в плане функциональных возможностей, производства, быстродействия и потребляемой мощности. Это не позволяет осуществить удовлетворительное решение задачи. В работе предлагается для реализации демultipлексора со-

вместить резистор с полевым транзистором. Такая гибридная схема позволяет изготовить два типа приборов, дополняющих друг друга для повышения общей эффективности конструкции демultipлексора. Кроме того, ввиду неизбежных изменений технологического процесса на наноразмерном уровне был проведен анализ проводимости резистора и изменения порогового напряжения полевого транзистора и выполнена оценка с использованием компьютерного имитационного моделирования. Результаты моделирования позволяют сформулировать требования к технологическому процессу для обеспечения высокой надежности демultipлексора и обещают улучшенную адресуемость гибридного демultipлексора резистор/полевой транзистор и допуск на изменение процесса.

Shu Li. et al. Architecture design of resistor/FET-logic demultiplexer for hybrid CMOS/nanodevice circuit interconnect // Nanotechnology. 7 May 2008. Is. 18. 9 p.

Проект Observatory NANO

Руководители европейских стран из правительственных организаций, промышленных и финансовых кругов обнаружили, что для принятия решений в быстро изменяющихся областях нанонауки и нанотехники не хватает объективной информации. Для решения проблемы создается проект Observatory NANO. В рамках проекта будет собираться и анализироваться информация, касающаяся научно-технических тенденций (с использованием публикаций в Интернете, патентов, планов-графиков (roadmaps), публикуемой фирменной информации), конкретных данных экономического состояния и перспектив развития (анализ рынка, экономические показатели, стратегия государственного и частного финансирования). Анализ научно-технического и экономического развития будет поддержан оценкой духовных и социальных проблем, влияния на здравоохранение, окружающую среду и безопасность, а также на проблемы принятия директивных документов, стандартизации и законодательства. Хотя большинство из указанных работ должны выполняться силами создаваемого консорциума, будут установлены связи с международными организациями, включая ЕРО (Европейское патентное ведомство), OECD (Организация экономического сотрудничества и развития), ISO (Международная организация по стандартизации) и также с соответствующими Европейскими техническими платформами и другими проектами, финансируемыми Евросоюзом для исключения дублирования и распределения ресурсов и обеспечения максимальных результатов. Целью такого интегрального подхода является разработка утвержденной методологии, которая обеспечит

выдачу точных показателей социально-экономического вклада нанонауки и нанотехники.

Окончательной целью проекта Observatory NANO является учреждение постоянно действующего консорциума (European Observatory) по нанотехнологиям для обеспечения постоянной независимой поддержки лиц, принимающих решение.

Observatory NANO. www.observatorynano.org

Возможности использования графена для создания самого малого транзистора

Четыре года назад ученые Манчестерского университета обнаружили графен — материал толщиной в один атомный слой, вытянутый из графита. Графен быстро стал предметом самого активного изучения в физике и материаловедении. Теперь ученые показали, что из одного графенового кристалла можно вырезать наноразмерные транзисторы. В отличие от других известных материалов графен остается стабильным и проводящим, даже если разрезан на части нанометровой ширины. Графеновые транзисторы начинают показывать преимущества и хорошие характеристики при размерах менее 10 нм — предполагаемого предела кремниевой технологии. К сожалению, пока нет техники, которая позволяет резать материалы с нанометровой точностью. Но это та самая проблема, с которой столкнется посткремниевая электроника. По крайней мере, уже есть материал, который столкнулся с этой проблемой.

Graphene used to create world's smallest transistor. www.manchester.ac/uk/aboutus/news/display/? = 3529

Нанопроволочная литография на кремнии

В нанопроволочной литографии используются нанопроволоки, выращенные и собранные химическими методами, как и в случае масок травления для передачи одномерной морфологии на нижележащую подложку. Показано, что нанопроволка из SiO₂ является простой и совместимой системой для выполнения нанолитографии на монокристаллическом кремнии и реализации широкого диапазона архитектур и приборов. Планарные полевые транзисторы, изготовленные из одиночного канала КНИ— нанопроволока, имеют контактное сопротивление 20 кОм и могут масштабироваться по длине канала. Кроме того, была выполнена оценка технических характеристик нанопроволочных сетей, полученных из маски нанопроволок SiO₂, изготовленных струйной операцией из раствора. Окончательная конформная сеть, вытравленная в нижележащей пластине, является монокристаллическими объемными переходами, так что нет разности в проводимости между нанопроволочным мостом и перколяционной сетью. Был также расширен потенциал на третье измерение посредством периодического подтравливания, что позволяет получить матрицу вертикально расположенных нанопроволок из одной нанопроволочной маски.

A. Colli et al. Nanowire Lithography on Silicon // Nano Letters. 2008. 8(5). P. 1358—1362.

Составил В. А. Юдинцев

ИНФОРМАЦИЯ

Первый Международный форум по нанотехнологиям

С 3 по 5 декабря 2008 г. проходил первый Международный форум по нанотехнологиям. Организатором Форума выступила Корпорация РОСНАНО.

В Форуме приняли участие заместитель председателя Правительства РФ Сергей Иванов, министр экономического развития РФ Эльвира Набиуллина, генеральный директор РОСНАНО Анатолий Чубайс, директор ФГУ РНЦ "Курчатовский инсти-

тут" Михаил Ковальчук, лауреат Нобелевской премии, вице-президент РАН, академик Жорес Алфиров.

Форум также посетили посол США в России Джон Байерли, посол Республики Корея Ли Гю Хен, посол Италии Клаудио Сурдо, посол Финляндии Матти Анттонен, руководитель отдела по нанонаукам и технологиям Европейской Комиссии Кростос Токаманис, руководитель по науке

Дирекции международного европейского сотрудничества Министерства высшего образования и научных исследований Франции Жан Люк Клеман, заместитель министра Израиля по экономическим вопросам Ирит Бен Абба Виталь, советник бюро Кабинета министров Японии по вопросам нанотехнологий Юдзиро Нарусэ, заместитель министра экономики Тайваня Янь Сян Ши.

Корпорация РОСНАНО в рамках Форума собрала более 9 тыс. представителей мировой наноиндустрии, государственных деятелей, предпринимателей и ученых из 90 городов Российской Федерации и 32 зарубежных стран. С докладами и презентациями в рамках Форума выступили более 1100 представителей государственной власти, мировой наноиндустрии, предпринимателей и ученых.

Основными темами дискуссий на Форуме стали перспективы развития нанотехнологий в России и мире, зарубежный опыт по формированию национальных инновационных систем, роль государства и бизнеса в создании механизмов коммерциализации научных разработок в области нанотехнологий. Участники Форума также обсудили развитие венчурного инвестирования в России. Отдельное внимание было уделено перспективам применения нанотехнологий в различных отраслях экономики: от электроники, медицины и биотехнологий до машиностроения, нефтегазовой и химической промышленности, а также региональным программам их развития в России.

В рамках научной программы Форума состоялось 29 заседаний научно-технологических секций, на которых прозвучало 263 секционных доклада и презентации по 18 основным направлениям развития нанотехнологий и создания наноматериалов. Среди докладчиков — свыше 160 ведущих мировых ученых.

Одновременно на территории Экспоцентра прошла выставка передовых нанотехнологических разработок, в которой приняла участие 251 организация, в том числе 214 российских участников из 35 городов России и 37 компаний из Австрии, Великобритании, Германии, Ирана, Латвии, Литвы, Нидерландов, США, Финляндии, Франции, Швеции и Японии. За три дня выставку посетили свыше 3300 человек. В день закрытия с экспозицией ознакомился спикер Государственной Думы РФ Борис Грызлов.

В ходе Форума был подписан крупный инвестиционный контракт между РОСНАНО, Группой ОНЭКСИМ и Уральским оптико-механическим заводом о создании предприятия по производству светотехники нового поколения. РОСНАНО также заключила соглашения о сотрудничестве с Россий-

ской Академией наук, Московским государственным университетом имени М. В. Ломоносова и Министерством занятости и экономики Финляндии.

Центральным событием последнего дня Форума стало подведение итогов Первого международного конкурса научных работ молодых ученых в области нанотехнологий. На конкурс было представлено 328 научных работ российских и зарубежных участников. В церемонии награждения победителей принял участие заместитель председателя Правительства РФ Сергей Иванов.

Основной задачей Форума, по словам Анатолия Чубайса, стало "возведение моста между наукой и бизнесом" и содействие формированию российского нанотехнологического сообщества. Ученые и разработчики получили представление о наиболее востребованных бизнесом направлениях исследований, а представители деловых кругов — возможность ознакомиться с передовыми научно-техническими разработками и оценить перспективы их коммерциализации.

Материалы деловой и научно-технической части Форума, в том числе установочные доклады на сессиях, презентации, работы молодых ученых, размещены на сайтах РОСНАНО и Международного форума по нанотехнологиям.

Государственная корпорация "Российская корпорация нанотехнологий" (РОСНАНО) учреждена федеральным законом № 139-ФЗ 19 июля 2007 года для "реализации государственной политики в сфере нанотехнологий, развития инновационной инфраструктуры в сфере нанотехнологий, реализации проектов создания перспективных нанотехнологий и наноиндустрии". Корпорация решает эту задачу, выступая соинвестором в нанотехнологических проектах со значительным экономическим или социальным потенциалом. Финансовое участие корпорации на ранних стадиях проектов снижает риски ее партнеров — частных инвесторов. Корпорация участвует в создании объектов нанотехнологической инфраструктуры, таких как центры коллективного пользования, бизнес-инкубаторы и фонды раннего инвестирования. РОСНАНО выбирает приоритетные направления инвестирования на основе долгосрочных прогнозов развития (форсайт), к разработке которых привлекаются ведущие российские и мировые эксперты. В 2007 году на деятельность корпорации Правительством Российской Федерации выделено 130 млрд рублей. Органами управления являются наблюдательный совет, правление и гендиректор. Генеральный директор РОСНАНО — Чубайс Анатолий Борисович.

РБК — генеральный информационный партнер Первого международного форума.

**Государственная корпорация "Российская корпорация нанотехнологий"
приглашает принять участие во Втором международном форуме
по нанотехнологиям, который состоится в конце 2009 года в Москве,
в Центральном выставочном комплексе "Экспоцентр"**

На Форуме пройдут пленарные и секционные заседания, панельные дискуссии и презентации по всем направлениям развития nanoиндустрии и нанотехнологий, а также состоится Вторая международная выставка, посвященная прикладным аспектам использования наноматериалов и нанотехнологий.

В рамках Форума предусмотрено проведение Второго международного конкурса научных работ молодых ученых и церемонии награждения лауреатов Международной премии в области нанотехнологий.

С подробным отчетом о проведении Первого международного форума по нанотехнологиям Rusnanotech'08, в котором приняли участие более 9000 представителей мировой nanoиндустрии, предпринимателей, государственных деятелей и ученых, можно ознакомиться на сайте Rusnanoforum.ru.

Условия участия размещены на сайте. О дате начала Международного форума по нанотехнологиям Rusnanotech'09 будет сообщено дополнительно.

Advanced Research Workshop

**Advanced Materials and Technologies for Micro/Nano-Devices,
Sensors and Actuators 2009**

Россия, С.-Петербург, 29 июня—2 июля, 2009 г.

Основной задачей международного семинара НАТО "Передовые материалы и технологии для микро/наноустройств, датчиков и приводов" является рассмотрение научных и технологических проблем, относящихся к созданию и применению микро- и наноэлектромеханических систем (MEMS и NEMS), устройств и технологий нового поколения в научных и промышленных областях. Основное внимание будет уделено фундаментальным аспектам таких систем, а также передовым материалам и технологиям, которые будут определять прогресс в данной области в ближайшем будущем.

**Тематика семинара
охватывает следующие направления:**

Физика и химия поверхности (формирование поверхностей, границ раздела в MEMS/NEMS, роль поверхностей материалов в формировании, функционировании и в долговременной стабильности устройств).

Физические основы надежности устройств (физика рабочих и аварийных режимов, а также прогнозирование долговечности).

Исследование усталости материалов и границ раздела в микро- и наномасштабах).

Моделирование (разработка новых методов моделирования MEMS/NEMS устройств).

Фундаментальные основы детектирования веществ и излучений и разработка датчиков новых типов.

Применения радиочастотных, оптических MEMS, коммутаторов, датчиков и других MEMS устройств, в том числе в коммерческих целях.

Микро-/нанопроизводство, технологии обработки материалов, материалы и технологии, используемые для объемного и поверхностного формирования микромеханизмов.

Характеризация MEMS/NEMS.

Организаторы семинара:

Сопредседатели:

Dr. Evgeni Gusev — Qualcomm MEMS Technologies, Калифорния, США

Dr. Artur Dideikin — Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Россия

Prof. Eric Garfunkel — Rutgers University, Нью-Джерси, США

Международный программный комитет:

Prof. Reza Ghodssi — University of Maryland, Мэриленд, США

Dr. Fred Roozeboom — NXP Research, Нидерланды

Dr. Vladimir Vaganov — Siantis, Калифорния, США

Prof. Alexander Vul — ФТИ им. А. Ф. Иоффе, С.-Петербург, Россия

Dr. Sergey Kidalov — ФТИ им. А. Ф. Иоффе, С.-Петербург, Россия и Агентство по науке и технологиям "Интеллект"

Для дополнительной информации:

Website: <http://www.ioffe.ru/natoarw/2009>

E-mail: NATOARW@mail.ioffe.ru

Тел.: +7 (812) 292-73-77

Факс: +7 (812) 297-00-73



МОСКВА, 9—11 сентября 2009 г.

Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана

и

ОАО ЦНИТИ "Техномаш"

проводят

XV Международную научно-техническую конференцию

**ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ
(материалы и устройства функциональной электроники
и микрофотоники)**

и

**XXII Международный симпозиум
ТОНКИЕ ПЛЕНКИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ**



Посвящается 70-летию специальности "Электронное машиностроение"

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

- Нанотехнология — инженерные проблемы и подготовка кадров
- Материалы, оборудование и технологии нанoeлектроники и микрофотоники
- Новые технологии производства, обработки и исследования наноструктурированных материалов
- Системы и устройства радиотехники и средств связи
- Наноструктурированные материалы на основе углерода и фотонные кристаллы в оптоэлектронике и оптическом приборостроении
- Технологии и оборудование для производства приборов электронной техники и радиоэлектронных устройств
- Микроэлектромеханические системы в медицине и промышленности
- Получение, свойства и применение тонких пленок в электронике
- Слоистые структуры на основе тонких пленок
- Методы контроля функциональных свойств материалов электронной техники, измерительная аппаратура и аналитические методы
- Моделирование и информационное обеспечение исследований

Адреса для переписки:

✉ 105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, МТ-11

E-mail: panfilov@bmstu.ru; k.bulygina@mail.ru

☎ (916)621-57-24, Тел./факс (499)267-1739

✉ 121108, Россия, г. Москва, ул. Ивана Франко, 4

E-mail: samoylovich@technomash.ru; (499)146-1095,

☎ Тел./факс (499)146-1942

CONTENTS

Panfilov Yu. V. *Nanotechnology Research and Development in Northern Europe State of the Art. Analytical Review* 2

The analytical review of theses of "Nanotech — Northern Europe 2008" congress with themes about energy, electronics, construction, biology and health, water, food, safety and investments is represented. More interesting results of the nanotechnology modern research represented in the exhibition and conference are shown. The conclusions about commercial using of the nanotechnology research and development results are represented.

Keywords: nanotechnology, electronics, power engineering, nanomaterials, nanocomposites.

Lisov O. I., Makhalov A. A. *Influence of Cache Geometry on its Performance* 5

The research into efficiency of cache memory with different its properties. The search for optimal cache geometry of Orchid architecture processor for certain set of tasks.

Keywords: cache, cache line, cache performance, cache geometry, tag, simulator, microprocessor, Orchid, modelling, research, efficiency, direct map, associative way.

Ogorodnikova O. M., Panin O. A. *Computer Simulation of Microsystems Elements* 12

The thermoelectric microdrive setting the mirror in micro-opto-electromechanical system (MOEMS) is simulated with aid of ANSYS multiphysics tool. The calculations of rotation angle for mirror depending on voltage difference across the pads of thermal actuators are verified. The difference of calculated results and experimental data does not exceed 10 %.

Keywords: MOEMS, micro-opto-electromechanical system, ANSYS, simulation, verification, mirror, thermal actuator.

Shtennikov V. N. *Estimation of Time and Temperature of the Soldering of Electronic Devices* 15

In article the estimation of duration of the soldering of electronic components depending on the set temperature of the soldering is given.

Keywords: the device, quality, the soldering, temperature, time.

Gornev E. S. *Sensors are Getting Smaller, More Functional and Smart* 18

High level of industrial automation needs great number of different sensors to control the process, to state deviations and to manage it. The trends of research development, manufacture and market of sensors are given on the basis of leading international consulting companies analysis. MEMSs and sensors also need twenty five year cycle of work from the very beginning till commercialization. The definite infrastructure is created due to sensors, which supports their effective use. Their evolution passed the following stages: monofunctional, multifunctional, wireless and nonvolatile sensors. At the same time the work for to build-in sensors to management systems is carried out. At first sensors were developed for control systems, for measurement, for transport; today they are widely used in consumer goods, in life-support systems. In its turn this process demanded sensors for

smart systems. The principles of modern sensors development are listed. In sensors on the base of MEMS it is important to take into consideration solid-state physics, resistance of material, hydraulics, aerodynamics and so on. The proposals on creation of domestic programme of MEMS and sensors development are presented. For development of MEMS and their main part-sensors it is necessary to make significant improvements: in organization and coordination work, marketing, standards, foundation of life-support system to get investments, profits.

Keywords: sensors, MEMS, microsystem technique, technology, domestic road map.

Prosyanyuk V. V., Sigeikin G. I., Suvorov I. S., Koledinskiy G. M. Miniature Reserve Automatic Means Based on High-Temperature Galvanic Elements 29

Perspective special techniques are needed in miniature reserve automatic means based on high-temperature galvanic elements with high specific energy density, which electrodes are made of heterogeneous low-gas energy condensed systems. On their base automatic high precision decelerating apparatus are projected as well as programming electronic switchers. They provide qualitatively new level of microelectromechanical systems intended for measuring movement parameters of mobile objects, declination from the vertical, stabilization, acceleration and vibration measuring, etc. (microaccelerometers, microgiroscopes and other inertial micromechanical sensing elements).

Keywords: high-temperature galvanic elements, sensing elements, automatic means, specific density.

Agafonov V. M., Bugaev A. S., Oryol A. A. Nonlinear Effects in Molecular-Electronic Cell of a Planar Type . . . 32

Nonlinear effects occurred in molecular-electronic cell of a planar type are being investigated by using numerical methods. Mathematical problem definition, graphical computation results of concentration approximations and numerical results of harmonic components of a differential cathodic current as a function of a frequency and cell's geometry are given and discussed.

Keywords: nonlinear effects, convective diffusion, molecular-electronic cell.

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, Стромьинский 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 *Т. В. Арбузова*

Сдано в набор 18.03.2009. Подписано в печать 22.04.2009. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,31. Заказ 315. Цена договорная

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