

# НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 1 ✧ 2005

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Издаётся с 1999 г.

## Главный редактор

Мальцев П. П.

## Зам. гл. редактора

Лучинин В. В.

## Редакционный совет:

Аристов В. В.  
Васильев В. В.  
Гапонов С. В.  
Каляев И. А.  
Климов Д. М.  
Лифшиц В. Г.  
Мокеров В. Г.  
Никитов С. А.  
Чаплыгин Ю. А.

## Редакционная коллегия:

Антонов Б. И.  
Астахов М. В.  
Белоус А. И.  
Быков В. А.  
Васильев А. А.  
Волчихин В. И.  
Горнев Е. С.  
Градецкий В. Г.  
Журавлев П. В.  
Захаревич В. Г.  
Кальнов В. А.  
Карякин А. А.  
Кузин А. Ю.  
Мокров Е. А.  
Норенков И. П.  
Панич А. Е.  
Панфилов Ю. В.  
Петросянц К. О.  
Петрунин В. Ф.  
Путилов А. В.  
Пятышев Е. Н.  
Сауров А. Н.  
Сигов А. С.  
Станкевич В. Г.  
Старостин А. К.  
Степанов Ю. И.  
Сухопаров А. И.  
Телец В. А.

## Отв. секретарь

Лысенко А. В.

## Редакция:

Безменова М. Ю.  
Григорин-Рябова Е. В.

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

От редакции . . . . . 2

### НАНОТЕХНОЛОГИИ

Вернер В. Д., Мальцев П. П., Сауров А. Н., Чаплыгин Ю. А. Технологии миниатюризации "сверху — вниз" или "снизу — вверх" . . . . . 5

### ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Мальцев П. П. О классификации в области микросистемной техники . . . . . 9

Федорин В. Н. Микрооптоэлектромеханические системы для приемников инфракрасного диапазона волн . . . . . 11

Татмышевский К. В. Механолюминесцентные датчики давления: классификация и информативность . . . . . 13

### МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Соборовер Э. И., Ткаченко С. В. Химические сенсоры на поверхностно-акустических волнах для мультисенсорной системы атмосферного мониторинга. . . . . 18

### МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Бескровный И. М. Технологические поколения современной электроники . . . . . 22

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Фомин Л. Ф. Моделирование пульсирующих колебаний гибких микрообъектов для целей нанотехнологий . . . . . 31

### СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

Ерохин В. В. Элементная база систем на кристалле: процессоры . . . . . 35

### ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

Трошин Е. В. О проблеме классификации космических аппаратов, порожденной миниатюризацией . . . . . 45

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ . . . . . 48

Contents . . . . . 56

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

Аннотации статей журнала на русском и английском языках и требования к оформлению статей доступны на сайте журнала: <http://www.microsystems.ru>.

### ПОДПИСКА:

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

## Уважаемые читатели!

Ежемесячный междисциплинарный теоретический и прикладной научно-технический журнал "Нано- и микросистемная техника" (ранее выходил под названием "Микросистемная техника") освещает современное состояние, перспективы и тенденции развития микро- и наносистемной техники (МНСТ), рассматривает вопросы разработки и их внедрения в различные области науки и техники, технологии и производства.

Наступивший XXI век ознаменовал новое направление в развитии кремниевой технологии, основанное не только на использовании планарных свойств, но и объемных конструкционных свойств

вах кремниевых элементов при создании нового поколения устройств, приборов и механизмов повышенной сложности, применяемых в радиотехнике, оптике, машиностроении, приборостроении, химии и биомедицине. Это научно-техническое направление дало основу для развития "микросистемной техники" ("microsystems engineering" — MSE) на базе "технологии микросистем" ("microsystems technology" — MST) и микроэлектромеханических систем (microelectromechanical systems — MEMS).

В России термин "микросистемная техника" стал использоваться в официальных документах после принятия в 1996 г. Перечня критических тех-

### Основные даты развития микро- и наносистемной техники

| Годы | Российская академия наук (РАН).<br>Российский Фонд фундаментальных<br>исследований (РФФИ)                                                                                     | Министерство промышленности<br>и энергетики Российской Федерации.<br>Министерство обороны Российской Федерации                                                                                |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1996 | —                                                                                                                                                                             | В Перечне критических технологий Федерального уровня появилось направление "Микросистемная техника"                                                                                           |
| 1997 | Проекты в рамках РФФИ                                                                                                                                                         | Разработан проект Комплексной программы МСТ                                                                                                                                                   |
| 1998 | Проекты в рамках РФФИ                                                                                                                                                         | —                                                                                                                                                                                             |
| 1999 | Международный симпозиум "Микророботы, микромашины и микросистемы", ИПМ РАН, г. Москва                                                                                         | Утверждена Комплексная программа МСТ                                                                                                                                                          |
| 2000 | —                                                                                                                                                                             | Открыто финансирование работ в рамках ГОЗ-2000                                                                                                                                                |
| 2001 | Международная конференция "Микро- и нанoeлектроника", ФТИАН, г. Москва                                                                                                        | Российским Фондом технологического развития проведен конкурс в августе-декабре (3 проекта)                                                                                                    |
| 2002 | Международный семинар "Atomic force microscope", ИФМ РАН, г. Нижний Новгород                                                                                                  | В Перечень критических технологий Российской Федерации до 2010 года включено направление "Микросистемная техника". РАСУ в феврале—марте проведен конкурс на 2002—2004 гг. (около 30 проектов) |
| 2003 | Международный семинар "Atomic force microscope", ИФМ РАН, г. Нижний Новгород. Международный симпозиум "Микророботы, микромашины и микросистемы", ИПМ РАН, г. Москва           | —                                                                                                                                                                                             |
| 2004 | Научная сессия "Микроэлектромеханические системы: технология, применение", ОИТВС РАН, г. Москва. Международный семинар "Atomic force microscope", ИФМ РАН, г. Нижний Новгород | Утверждена Комплексная целевая программа МСТ                                                                                                                                                  |

нологий Федерального уровня. В приоритетные направления развития науки и техники Российской Федерации на 2001...2010 годы (раздел производственных технологий) в состав критических технологий Федерального уровня включена микросистемная техника.

Постановлением Президиума Российской академии наук от 1 июля 2003 № 233 утверждены "Основные направления фундаментальных исследований", включающие в разделе "Информатика" пункт 3.7 "Элементная база микроэлектроники, нанoeлектроники и квантовых компьютеров. Материалы для микро- и нанoeлектроники. Микросистемная техника". С мая 2003 года наш журнал выпускается под научно-методическим руководством Отделения информационных технологий и вычислительных систем РАН.

В настоящее время можно использовать существующую российскую микроэлектронную технологию с небольшой модернизацией для разработки

микросистемной техники, отнесенной в странах с высоким научно-техническим уровнем к "критическим" и характеризующую высоким динамичным развитием с начала 1990-х годов. Дальнейшее развитие работ связано с переходом от технологических приемов микроэлектроники к нанотехнологии.

В настоящее время стартовые позиции в области нанотехнологий и наноматериалов развитых стран, включая Россию, приблизительно равны. В развитых странах осознание ключевой роли, которую уже в недалеком будущем будут играть нанотехнологии, привело к разработке широкомасштабных программ по их развитию на основе государственной поддержки. В настоящее время в России разрабатывается аналогичная Концепция в области нанотехнологии.

Наносистемная техника — это созданные полностью или частично на основе наноматериалов и нанотехнологий функционально законченные сис-

## в Российской Федерации

| Министерство образования и науки Российской Федерации                                                                                                                                                                                                                    | Общественная поддержка — журнал "Микросистемная техника" (МСТ)                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| —                                                                                                                                                                                                                                                                        | —                                                                                                                                                                                                                   |
| —                                                                                                                                                                                                                                                                        | —                                                                                                                                                                                                                   |
| —                                                                                                                                                                                                                                                                        | —                                                                                                                                                                                                                   |
| —                                                                                                                                                                                                                                                                        | Вышел первый номер журнала "МСТ" (индекс 79493 по каталогу "Роспечать")                                                                                                                                             |
| Международная конференция "Сенсоры и микросистемы", СПб.-ПГЭТУ, г. Санкт-Петербург. Открыта специальность "Микросистемная техника" — 201900                                                                                                                              | Открыт сайт журнала "МСТ" в Интернет <a href="http://www.microsystems.ru">http://www.microsystems.ru</a>                                                                                                            |
| —                                                                                                                                                                                                                                                                        | Создан электронный архив журнала "МСТ" за 1999—2000 г. на лазерном диске                                                                                                                                            |
| Минобразования России в марте—апреле проведен конкурс (около 130 проектов). Международная конференция "Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники" ТРТУ, г. Таганрог. Международная конференция "Электроника и информатика" МГИЭТ (ТУ), Зеленоград | Открыта версия сайта журнала "МСТ" на английском языке в Интернет <a href="http://www.microsystems.ru">http://www.microsystems.ru</a> . Размещен электронный архив журнала "МСТ" за 1999—2002 г. на сайт в Интернет |
| Минобразования России проведен конкурс на 2003—2004 гг. (около 100 проектов). Журнал включен в Перечень научных и научно-технических изданий ВАК России с апреля 2003 г.                                                                                                 | Создан электронный архив журнала "МСТ" за 1999—2003 г. на лазерном диске. С мая 2003 г. журнал выпускается под научно-методическим руководством Отделения информационных технологий и вычислительных систем РАН     |
| Открыта подготовка по направлению 658300 "Нанотехнология". Международная конференция "Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники", ТРТУ, г. Таганрог                                                                                               | Международная научная молодежная школа "Микросистемная техника — 2004", ЦНИИРТК, НИИМВС ТРТУ и журнал МСТ                                                                                                           |

темы и устройства, характеристики которых кардинальным образом отличаются от показателей систем и устройств аналогичного назначения, созданных по традиционным технологиям.

Учитывая расширившийся круг разработок и возросший интерес к микро- и наносистемной технике в журнале на 2005 год запланировано увеличение объема страниц и направлений, входящих в основные рубрики:

- элементы микро- и наносистемной техники — микроэлектромеханические системы (МЭМС, МОЭМС, БиоМЭМС), сенсоры, микромашины, фотонные кристаллы; Microelectromechanical Systems (MEMS), MOEMS, BioMEMS, Sensors, RF Components, MicroMachines, Micro & NanoSystems;
- материаловедческие и технологические основы МНСТ — поверхностная микромеханика, объемная микромеханика; Materials & Nanostructures, MST/MEMS, MicroTechnologies;
- конструирование и моделирование МНСТ — микроэлектромеханические системы, сенсоры, микромашины, СТМ, АСМ;
- нанотехнологии и зондовая микроскопия — сканирующая зондовая микроскопия, атомно-силовая микроскопия, нанокристаллиты, гетероструктуры, приборы с квантовыми точками; зондовая микроскопия, наномашины, наносистемы, нанотехнологии, наноматериалы, рентгеновская оптика, нанофотоника;
- молекулярная электроника и биоэлектроника — биочипы, биореакторы; "лаборатория на кристалле", ДНК-чипы, ДНК-процессоры; органи-

ческие полупроводники, молекулярные соединения для вычислительных устройств, молекулярная электроника;

- применение МНСТ — микроэлектромеханические системы, сенсоры, микромашины;
- системы на кристалле;
- страничка Российского фонда фундаментальных исследований;
- информация.

Значительный вклад в развитие микросистемной техники внесло Министерство образования Российской Федерации, открывшее в 2000 г. подготовку инженеров по новой специальности — 201900 "Микросистемная техника" в рамках Направления подготовки дипломированных специалистов 654100 — Электроника и микроэлектроника (приказ от 02 марта 2000 г. № 686), а с 2003 г. — подготовку по направлению 658300 "Нанотехнология". В настоящее время несколько институтов России начали подготовку инженеров по этим специальностям.

За последние 2—3 года в России значительно увеличился интерес к развитию микросистемной техники. На это указывает как резко возросшее число конкурсов на постановку новых разработок изделий микросистемной техники, так и возросшее (на один-два порядка величины) посещение сайта нашего журнала в Интернет (<http://www.microsystems.ru>). Расширится распространение электронной версии журнала на лазерном диске, охватывающей период 1999—2003 годы (тел. 269-55-10).

Журнал включен в Перечень научных и научно-технических изданий ВАК России с апреля 2003 года.

*Уважаемые читатели и авторы журнала, приглашаем вас  
к активному сотрудничеству!*

*Главный редактор  
Петр Мальцев*

УДК 621.3.049.77

**В. Д. Вернер**, д-р техн. наук, проф.,  
НПК ТЦ МИЭТ,  
**П. П. Мальцев**, д-р техн. наук, проф.,  
МИРЭА,  
**А. Н. Сауров**, д-р техн. наук,  
НПК ТЦ МИЭТ,  
**Ю. А. Чаплыгин**, чл.-корр. РАН,  
МИЭТ

## ТЕХНОЛОГИИ МИНИАТЮРИЗАЦИИ "СВЕРХУ — ВНИЗ" ИЛИ "СНИЗУ — ВВЕРХ"

*Рассмотрены возможные пути дальнейшей миниатюризации изделий массового производства микроэлектроники и микросистемной техники.*

Миниатюризация технических изделий стала одной из движущих сил развития технических систем в конце XX и начале XXI века. Помимо соображений экономии материальных и энергетических затрат, при переходе к объектам следующего этапа миниатюризации огромное значение приобретает массовое производство миниатюрных изделий, которые становятся всепроникающими элементами профессиональной и личной жизни человека (компьютинг, телекоммуникация, идентификация, адресация, мониторинг физиологического состояния и социального положения и т. д.).

В течение длительного времени технология миниатюризации была связана с процессами фрагментации исходной заготовки. Это можно проиллюстрировать на примере микроэлектроники. Сначала слиток, потом пластина, затем кристалл и далее транзистор, сток-исток, затвор и т. д. Все это напоминает работу скульптора, высекающего фигуру из куска мрамора. Технология подобного рода на западе получила наименование технологии "сверху — вниз" (*top — down*).

Однако в той же области — скульптуре есть другой подход, когда скульптор лепит фигуру из кусочков глины. В приложении к производственной технологии миниатюризации это направление обозначается как технология "снизу — вверх" (*bottom — up*). Наиболее впечатляющей технологией этого рода является нанотехнология (НТ). Нанотехнология должна создавать объект, группируя отдельные атомы или молекулы в микро- или макроблок. По этому принципу построена живая (биологическая)

природа Земли. Сравнивая материалы и принципы их объединения в объект живой природы и современной техники, можно четко определить их различия.

В фундаментальном труде Д. Мэдоу "Основы микрофабрикации" [1] отмечено, что для живой природы характерно:

- использование композитов, а не чисто природных материалов;
- наличие последовательных уровней организации (иерархия);
- мягкие, гибкие материалы;
- самосборка, самоорганизация, самоумножение (репликация) на основе слабых связей;
- использование шаблона — матрицы (например, "записи" информации в ДНК) для построения нового объекта;
- деление.

Наиболее полно эти принципы реализуются в технологии биологии (биотехнология, генная инженерия и т. д.), но и в технике при использовании МСТ и НТ все чаще применяются отдельные методы построения объектов на основе природных способов проектирования и производства. С учетом приоритета массового производства миниатюрных объектов, прежде всего ищутся методы самосборки и самоорганизации. Дело в том, что элементные блоки природы, атомы и молекулы — малы. Если собирать их последовательно, то процесс сборки будет очень длительным. Природа использует массовый параллелизм и самосборку для массового производства и принципы эволюции для отбора хорошего решения. В технике деление технологий по принципу "сверху — вниз" и "снизу — вверх" — условно. Только для живой природы можно говорить о единственности принципа "снизу — вверх". В производственной технологии хотя и преобладает принцип "сверху — вниз", но есть множество примеров использования и принципа "снизу — вверх". В частности, это процессы синтеза и сборки. Чем чаще инженерная технология имеет дело с миниатюрными изделиями, тем больше в ней технологических процессов "снизу — вверх". Например, в микроэлектронике процессы удаления материала, резку, шлифование, травление можно отнести к процессам "сверху — вниз". Однако не менее значимы процессы осаждения, имплантации, легирования, которые можно отнести к процессам "снизу — вверх". Промежуточное положение занимают технологические процессы модификации, хотя они, наверное, ближе к процессам "снизу — вверх". Чем глубже продвигается

процесс миниатюризации, тем больше места в технологии занимают процессы "снизу — вверх". С этой точки зрения нанотехнология — это полный переход к принципу "снизу — вверх".

В микроэлектронике и микросистемной технике в настоящее время ищут пути сочетания традиционных для них технологий с нанотехнологией. Поэтому постоянно должна увеличиваться доля процессов "снизу — вверх". Реально это означает, что все большее значение должны иметь процессы биохимического синтеза материалов и биопроцессы наносборки структур, деталей, блоков и изделий. Био- и иммуночипы и сенсоры можно рассматривать как примеры таких сборок. Те же принципы поиска комплементарного биообъекта могут быть использованы и для сборки небιологических деталей, к которым они прикреплены [2].

Переход в нанообласть миниатюризации связан с двумя факторами. Один из них переход к размерам менее 100 нм (хотя бы в одном измерении). Второй — это переход в явном виде от законов классической физики к квантовым. Эти факторы могут сочетаться, но могут действовать и раздельно в определенных диапазонах размеров. Фактор размеров проявился, прежде всего, в слоевых структурах. Минимизация одного из размеров (толщины) часто приводит и к новым качествам изделий. В качестве примеров приведем модификацию поверхности технических изделий и технологию "кремний на изоляторе" (КНИ). Технические параметры изделий на КНИ-структурах (интегральных схем и сенсоров) оказываются часто на порядок лучше, чем на объемном кремнии [3].

Революционным для электроники стало использование структур с гетеропереходами для активных компонентов и многослойных наноструктур, для магниточувствительных структур запоминающих устройств вычислительной техники на базе эффекта гигантского магнитосопротивления [4].

Особое значение для продвижения в область нанотехнологии на базе принципа "снизу — вверх" имело открытие фуллеренов и углеродных нанотрубок (УНТ). Они оказались удобными "кирпичиками" для этой технологии, так как их размер существенно больше отдельных атомов. Вместе с тем они сами обладают уникальными свойствами, связанными с их структурой и наноразмерами. Высокое отношение площади поверхности к объему, характерное для миниатюрных объектов, химические свойства поверхности, возможность существенно менять электрофизические свойства УНТ — от характеристик металла до диэлектрика (в зависимости от хиральности поверхности трубок) — сразу вызвали большой поток предложений по воз-

можным способам использования УНТ. Перечислим некоторые из них: зонды, включая зонды для туннельных и атомно-силовых микроскопов; острийные катоды и элементы транзистора в электронике; эффективные катализаторы и хранилища для газов; шаблоны для изготовления нанотрубок из других материалов и т. д. В настоящее время именно УНТ и фуллерены служат основой практического промышленного использования нанотехнологии. Как и в случае использования человечеством металлов, практическое значение приобретают прежде всего их высокие механические свойства (например, для применения в композитах).

Использование других физических свойств УНТ связано с результатами широкомасштабных исследований в области НТ. В работе [5] мы отмечали, что мировой фонд финансирования исследований в области НТ — порядка нескольких миллиардов долларов, а ожидаемый вклад в мировой рынок — несколько триллионов долларов. Однако следует иметь ввиду чрезвычайную широту потенциального рынка изделий НТ: от мази для лыж до искусственных органов человека. Реальная значимость приложений НТ связана со степенью технологического обеспечения массового производства. Уже отмечалось, что наибольший прогресс применения НТ достигнут в создании новых композитных материалов [4, 5]. Интересно заметить, что хотя интерес военного ведомства США к НТ значителен, первые реальные шаги направлены на создание не нового оружия, а нового конструкционного материала для военной техники и обмундирования для солдат. "Динамическое" обмундирование может менять свою прочность, жесткость, проницаемость путем воздействия на свойства волокон, заполненных, например, магнитными наночастицами [6]. Другим примером практического применения НТ может быть технология корпорации *Pikington* по нанесению 40 нм специального слоя на поверхность оконного стекла, в результате чего она становится гидрофильной и сплошная пленка воды смывает грязь [7]. Противоположное действие оказывает пленка с "лотос-эффектом". В этом случае поверхность становится гидрофобной и самоочищается от загрязнений [8]. Во всех этих примерах решен основной вопрос — НТ включена в массовое производство. В микроэлектронике, классическом примере массового производства высокотехнологичных изделий, НТ станет эффективной, если будут найдены способы параллельной (групповой) обработки на базе принципа "снизу — вверх", например, за счет самоорганизации. Наиболее вероятен процесс освоения области размеров < 10 нм в электронике и МСТ за счет различных форм комбинирования традиционных технологий и мате-

риалов (т. е. "сверху — вниз") с новыми процессами "снизу — вверх" и привлечением новых материалов, в природе которых заложена возможность осуществления подобных процессов (полимеры, биомолекулы). Существенное значение имеет выбор основных "кирпичиков", из которых будут строиться новые приборы наноэлектроники и наноэлектромеханические системы. Уникальные параметры, которые были получены на наноразмерных объектах, известны сравнительно давно [1]. Главным препятствием их практического применения всегда является отсутствие надежной технологии массового производства. Именно с таких позиций была сделана оценка роли нанотехнологии для наноэлектроники (НЭ) в статье К. А. Валиева и А. А. Орликовского в информационном бюллетене "Перспективные технологии" — "ПерсТ.". Они отмечают, что единственным прибором микроэлектроники, сохраняющим свои переключательные свойства до 6—10 нм является кремниевый полевой нанотранзистор со структурой МДП. Анализ положения в разработке других приборов наноэлектроники привел авторов к заключению, что для области около 1 нм к 2001 г. не было предложено нанотехнологии для массового производства приборов и интегральных схем [9]. Наш анализ ситуации в последние годы, с помощью того же бюллетеня "ПерсТ.", свидетельствует о прогрессе в решении проблемы наноэлектроники при освоении области 10—1 нм и в других ее направлениях. Например, появились технологии повышения однородности квантовых точек для одноэлектронных транзисторов [10]. Следует отметить, что прогнозные оценки достижения определенных рубежей в области НТ и НЭ, как правило, корректируются всегда в сторону сокращения сроков на 1—3 года.

Обычно прогнозы базируются на анализе временной зависимости явления в предшествующий период и ее пролонгации на прогнозируемый период. Классическим примером служит закон Мура для развития изделий микроэлектроники. На его базе были предложены другие временные закономерности, например, для надежности ИС [11].

Реперные точки истории (и прогноза) нанотехнологии могут быть определены из разных предположений. Специалисты *Nonmix Inc* — фирмы, созданной в 2000 г. при университете Беркли, представили линейную шкалу: 1980 г. — наночастицы ( $\text{TiO}_2$  в солнечных экранах); 1990 г. — нанокompозиты; 2010 г. — наноэлектроника; 2020 г. — спинтроника, квантовый компьютер, далее системы памяти на одном электроде или атоме.

На самом деле темп миниатюризации определяется не законом Мура или подобном ему, а реаль-

ной потребностью включения изделий, изготовленных с помощью НТ, в товарный продукт. Например, анализируя влияния НТ на развитие датчиков, автор работы [12] на XVI конференции "Евросенсор — 2003" считает, что в настоящее время сверхминиатюрные датчики нужны только для эксклюзивных применений, например, в микророботах, перемещающихся в кровеносных сосудах. Когда потребность в массовом производстве таких изделий станет реальностью, тогда и нужно будет решать проблему наносенсоров для них.

В работе "Международная технологическая маршрутная карта для полупроводников" (ITRS) — 2001 г. — одним из важнейших прогнозных документов развития мировой полупроводниковой промышленности, частично связывают ее прогресс с использованием постлитографических процессов и переходом от чисто планарных технологий к непланарным и пост-КМОП-приборам. Примером такой постлитографической технологии может служить метод импринт-литографии наноструктур в кремнии, разработанной в лаборатории наноструктур Принстонского университета [13].

Разработка фирмой *Infineon* методов точного позиционирования углеродных нанотрубок на кремниевых пластинах (вариант технологии "снизу — вверх") [14] существенно продвигает их использование как элементов в субмикрометровом массовом производстве интегральных схем. Вместе с тем, идея создания наноприборов на базе самих углеродных нанотрубок ставится под сомнение, так как невозможно изменять их физические свойства по длине [15]. Авторы считают, что большие возможности имеют монокристаллические полупроводниковые нанопроволоки, так как уже разработаны низкотемпературные каталитические технологии варьирования их размеров и состава. Этот тезис оспаривается специалистами в области УНТ, потому что для создания  $p-n$ -переходов можно использовать частично заполненные УНТ. Нанокomпоненты важны для создания не только активных элементов на чипе, но и дополнительных элементов, обеспечивающих их функционирование. Уже сейчас технология МСТ используется для создания матрицы микрофлюидных каналов на обратной стороне интегрального чипа в целях отвода теплоты [16]. Сотрудники университета Пэрдью запатентовали метод охлаждения с помощью "коронного ветра", который создается разрядом на матрице углеродных нанотрубок в кварцевой подложке, или на поликристаллических алмазных пленках [17]. С помощью фуллеренов улучшают качество резистов [18]. Число предложений по применению НТ в электронике постоянно растет, но доля тех из них, которые позволяют перейти к технологиям

массового производства, пока не велика. Широкий фронт исследований вступает в противоречие с задачей доведения результатов научных исследований до практического результата. Это особенно четко понимают в странах, которые не могут себе позволить финансирование исследований НТ на сумму 2 млрд долл., как США. В Англии первая программа по нанотехнологии началась в середине 80-х годов прошлого столетия. В июле 2003 г. принята новая государственная шестилетняя программа на 160 млн долл. (*Micro and Nanotechnology Manufacturing Initiative*). Ожидается, что она будет поддержана частными фирмами в 3 раза большей суммой для проведения прикладных работ в области нано- и микротехнологии. На парламентских слушаниях по докладу Комитета по науке и технологиям была отмечена слабая коммерциализация результатов исследований. Причину этого видят в распылении средств по многочисленным группам и, по мнению комитета, лучше сконцентрировать эти средства для создания одного или двух центров НТ мирового уровня [19]. Эффективность практики создания таких центров общепризнанна (см. например, [20]). В терминологии данной статьи можно сказать, что такие центры создают условия продвижения НТ и МСТ "снизу — вверх" более оптимально, чем действующий пока принцип "каждой сестре по серьге", т. е. принцип деления финансовых средств "сверху — вниз".

Несомненно, что широкое распространение наноустройств и наноприборов (включая нанoeлектронику) могут получать только после того, как конкретные типы НТ станут основой массового производства. Для этого они должны включать в себя такие процессы как самоорганизация, самосборка и самовосстановление.

В неорганических материалах известны примеры проявления таких процессов. В частности, наблюдалось образование упорядоченных структур частиц и дефектов в металлической или полупроводниковой кристаллической матрице, включая квантовые точки и квантовые проволоки [21]. По одной из теорий образование структуры пористого кремния [22] связано с явлением самоорганизации. Упомянутый в работе [10] успех при работе с наночастицами тоже связан с самоорганизацией.

Гораздо чаще эти процессы наблюдаются при химических или биологических изменениях структур и состава материалов объектов. По этой причине роль таких процессов должна возрастать не только в промышленной химии и биологии, но и в таких "твердотельных" отраслях как электроника и микросистемная техника. Как следствие, можно ожидать частичного вытеснения традиционных

материалов "новыми" для этих отраслей материалами (полимерами и другими органическими и биологическими материалами).

Это не значит, что процессы "сверху — вниз" будут полностью заменены процессами "снизу — вверх". Создание, например, композитов можно рассматривать с обеих точек зрения. Импринт-технология может быть частью НТ, хотя она скорее относится к процессам "сверху — вниз", чем к противоположным.

В связи с этим следует еще раз подчеркнуть, что реальный прогресс в освоении массового производства изделий с элементами размером порядка нескольких нанометров будет основан на найденных эффективных сочетаниях технологий миниатюризации "сверху — вниз" и "снизу — вверх". На основании анализа развития микроэлектроники и микросистемной техники такое слияние технологий будет происходить в ближайшие 5—10 лет. Именно в этом временном интервале находятся, например, сроки освоения производителями интегральных схем области структур с размерами менее 90 нм. Формальное определение нанообъектов нанотехнологий лежит именно в этом интервале (100...1 нм).

В 2006 г. *Toshiba Corp.* и *NEC Corp* планируют начать выпуск ИС с нормами 65 нм, в 2007 г. *Texas Instruments* собирается освоить изготовление структур в 45 нм. Основная трудность заключается в поисках новых материалов, способных заменить традиционные структуры на кремнии, диоксиде кремния и поликремнии. В издании ITRS 2003 г. это обстоятельство обозначено как наступление эры "ограниченного материалами масштабирования". Например, если масштабировать классическую КМОП-структуру, то толщина подзатворного диоксида кремния вместе с переходным слоем должна быть 2...5 Å (0,2...0,5 нм). Нужно найти материал, более толстая пленка которого была бы эквивалентна по свойствам такой пленке (*equivalent oxide thickness-EOT*). Возможно это будут силикаты гафния или другие материалы с высоким значением диэлектрического  $k$ -коэффициента. В любом случае подтверждается прогноз [9] о дальнейшем развитии массового производства в полупроводниковой электронике. В настоящее время активно ищутся пути улучшения традиционных структур, а не новая структура, работающая на новых принципах. Можно сказать, что на данном этапе используется размерная составляющая нанотехнологии, а ее физические — квантовые аспекты вероятно будут востребованы в массовом производстве в следующем десятилетии.

# Список литературы

1. Madou M. I. Fundamentals of microfabrication. CR c PRESS, 2002.
2. Yeh A. Fluidic Self-Assembly of Microstructures and Its Application // IEEE. Workshop of MEMS. Japan. 1994. P. 221—228.
3. Тимошенко С. П. Элементы электромеханических систем, реализуемых на составных структурах // Микросистемная техника. 2002. № 4. С. 3—6.
4. Алферов Ж. И. и др. Наноматериалы и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2003. № 8. С. 3—13.
5. Вернер В. Д., Мальцев П. П., Сауров А. Н., Чаплыгин Ю. А. Синергетика миниатюризации: микроэлектроника, микросистемная техника, наноэлектроника // Микросистемная техника. 2004. № 7. С. 23—29.
6. Журавлева Л. Армия держит под прицелом нанотехнологии // ПерсТ. 2003. № 3.
7. <http://nanotechweb.org/articles/1/9/13/1>.
8. Dickert F. L., Binders R. Parallel-Processing of Chemical Sensitive layers by Self-Assembling // Sensor 2003. Processing. P. 135—140.
9. Валиев К. А., Орликовский А. А. Позиция // ПерсТ. 1—12, <http://perst.issph.ru/inform/perst/2001/112/n.asp?file=perst.html&label=H12>.
10. Brinker J. Self-assembled nanoparticles are insulated Electronic Manufacturing 2004-05-04. Global-electronics.net.
11. Pecht J. Solution to Rediability Prediction // Proc. SPIE. V. 4755. P. 5—20.

12. Schütz A. Nanotechnology and Future Sensors // Sensor 2003. Proceeding. P. 351—355.
13. Chon S. Y., Kranss R. P. Sub-10 nm Imprint Litografy and applications // Vac. Sei. Technol. 1997. B. 15. P. 2897—2904.
14. Nanotechnic fur ubernorgen // Technik. November 2003. N 45.
15. Huber C. Researchers seek bricks to build nanoscale structures // EE-Times. 2004-04-01 <http://www.global-electronics.net>.
16. Jiang L., Wong Man. Forced Convection Boiling in a Micro-channel Heat Sink // J. 2001. V. 10. N 1. P. 80—88.
17. Garimella S. Nano Work chases self-cooled ships. Purdue University. [http://global-electronics.net/index.php&view-print@id=23265@cmeenties\\_id=4392](http://global-electronics.net/index.php&view-print@id=23265@cmeenties_id=4392).
18. Фуллеровские маски для электронной литографии // ПерсТ. 1999. Т. 6. С. 2—3.
19. Inquiry calls UK government support of nanotechnology "lacking in foresight" // Electronic Manufacturing. 2004-04-05. <http://www.global-electronics.net>.
20. Вернер В. Д., Мальцев П. П., Пурцхванидзе И. А. Организация формирования и реализации национальных и региональных программ по микросистемам и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2002. № 12. С. 9—11.
21. Verner I. V., Gerasimenko N. N., Corbett J. W. Chaos and Stability in Defect Processes in Semiconductors. Trens Tech Publication, 1993.
22. Пористый кремний врывается в прикладную оптоэлектронику. Разгадка механизма формирования // ПерсТ. 1999. Т. 6. Р. 5. С. 3—5.
23. Jeng G.-H. и др. Phys. Rev. B2003, 68.075 410.

## ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

УДК 621.38

П. П. Мальцев, д-р техн. наук,  
МИРЭА  
[microsystems@caravan.ru](mailto:microsystems@caravan.ru)

## О КЛАССИФИКАЦИИ В ОБЛАСТИ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

*Рассматривается классификация изделий микросистемной техники с учетом сложности и массогабаритных характеристик.*

Характерной чертой мирового технологического развития конца XX в. и начала XXI в. является зарождение интегрально образующихся (комплексных) технологий. К ним относятся технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) и на их основе технологии микросистемной техники (МСТ). Интеграция достижений в области электроники,

механики, информатики и измерительной техники определила зарождение микросистемных технологий в конце 80-х и начале 90-х гг. прошлого века. Огромное число университетов и коммерческих компаний США и Японии (более 250 — в 1994 г. и более 400 — в 1997 г.) открыли широчайший спектр возможного применения МЭМС и микромашин. Общее число зарегистрированных в мире патентов в области технологий МЭМС резко возросло и к 1998 г. достигло 1000, из них более 300 принадлежат США. В настоящее время в этой области ежегодно регистрируется более 200 патентов. Анализ мировой динамики развития МЭМС, выполненный организацией NEXUS, являющейся органом Европейской Комиссии, показал, что в период 1996—2003 гг. рынок изделий микросистемной техники рос в среднем на 18 % в год.

В настоящее время разрабатываются различные программы в области МСТ. В приведенной здесь таблице дана классификация изделий микроэлектроники (кристаллов) с учетом их сложности и массогабаритных характеристик.

**Классификация микросистемной техники с учетом сложности и массогабаритных характеристик**

| Название                                         | Характеристика                                                                                                                  | Масса, г   | Размеры, см | Примеры реализации                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Компоненты микросистемной техники                | Изделия, изготовленные на одном кристалле методами микроэлектронной технологии и содержащие от 1 до 1000 механических элементов | 3...30     | 0,3...3     | Микромеханика.<br>Микроэлектромеханические системы.<br>Микроакселерометры. Акселерометр на кристалле: в авиации США для инерциального измерительного блока (SiIMU01), инерциального измерительного блока (DQI), инерциальной навигационной системы (DQI-NP).<br>Микрогирометры. Трехосевые микроакселерометры для противотанкового боеприпаса калибра 120 мм (тип M830A1HEAT, США).<br>Микроредуктор.<br>Микродвигатели (электростатический, электромагнитный, реактивный на газообразном и на твердом топливе).<br>Микровентили. Тип 4425-15 с площадью 4 мм <sup>2</sup> для микрореактивных двигателей (ф. EG&GIC Sensors Corp., США).<br>Датчики давления.<br>Химические сенсоры (чувствительные элементы).<br>Магниторезистивные чувствительные элементы.<br>Катушки индуктивности на кристалле.<br>Микрореле.<br>Впрыскивающие сопла.<br>Микрооптоэлектромеханические системы. Оптический переключатель-мультиплексор с набором из 250 микрозеркал (по технологии Summeit-Vsurface MEMS, США).<br>Биомикроэлектромеханические системы. Прототип "лаборатории на кристалле" (ЛНК) на 34 микрорезервуара по 24 нанолитра каждый (Массачусетский технологический институт, США). |
| Узлы микросистемной техники                      | Изделия, состоящие на 100 % из компонентов микросистемной техники                                                               | 3...30     | 3...30      | Микродвигатель (электростатический, электромагнитный, реактивный на газообразном и на твердом топливе). Образец двигателя малой тяги 1 мН с двухсторонними соплами для микроспутника (Aerospace Corporation, США).<br>"Умная пыль" на кристалле для создания распределенных систем.<br>Головки для накопителей на жестких дисках.<br>Головки для струйных принтеров.<br>Кардиопейсмейкеры.<br>Слуховые аппараты.<br>Формирователи ИК-видеосигналов.<br>Микроспектрометры. Микроэлектромеханический спектрограф с объемом 6 см <sup>3</sup> (Окридская лаборатория, США).<br>Системы подачи лекарственных сред.<br>Магнитооптические головки.<br>Проекционные световые затворы.<br>Инклинометры (угломеры).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Изделия микросистемной техники                   | Изделия, состоящие на 70 % и более из компонентов микросистемной техники                                                        | 30...300   | 3...30      | Миниатюрный летательный аппарат (Micro Air Vehicle — MAV, получивший название Black Widow, США) массой 80 г и размахом крыльев 15 см.<br>Микровертолет.<br>Микроробот (для движения по трубам).<br>Микроракета. Недорогостоящая высокоточная управляемая ракета (Low Cost Precision Kill — LCPK, проект WE.28.02A США) длиной 7 см.<br>Электронные носы.<br>Сенсоры для предупреждения столкновения.<br>Робот "Минога" (грант DARPA №00014-98-1-0381, США).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Комплексированные изделия микросистемной техники | Изделия, состоящие на 50 % и более из компонентов микросистемной техники                                                        | 300...3000 | 3...30      | Космические микроаппараты.<br>Микроспутник, состоящий из компонентов и узлов микросистемной техники и микроэлектроники, массой 2...3 кг.<br>Миниатюрный беспилотный летательный аппарат (проект AP.20.00, США) с неподвижным крылом и размахом до 15 см.<br>Малоразмерный двигатель с тягой 1...10 кг для демонстрации возможности технологий и летных испытаний малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (Sall Scale Propulsion System, США).<br>Робот "Щука" ("Pike", Нью-Гемпширский университет, США).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

УДК 621.384.3

**В. Н. Федорин**, канд. техн. наук,  
Конструкторско-технологический институт  
прикладной микроэлектроники СО РАН

## МИКРООПТОЭЛЕКТРО- МЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРИЕМНИКОВ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН

*Рассматриваются варианты построения микрооптоэлектромеханических систем (МОЭМС) для инфракрасного диапазона длин волн.*

В последнее десятилетие мирового развития в области технологии микросистемной техники (МСТ) появилась новая ветвь интеграции механики и оптики, относящаяся к микрооптоэлектромеханическим системам (МОЭМС) в инфракрасном диапазоне длин волн.

Развитие тепловизионных приборов и систем как гражданского, так и военного назначения напрямую зависят от достижений в сфере технологии матричных фотоприемных устройств (ФПУ). В настоящее время требования, предъявляемые к современной тепловизионной аппаратуре, выдвигают в сфере матричных технологий следующие основные задачи:

- увеличение формата ФПУ;
- повышение чувствительности;
- снижение массогабаритных и энергетических характеристик.

В таблице представлены результаты, достигнутые в современных матричных технологиях.

Из таблицы видно, что наиболее высокие результаты получены на кремниевых матрицах на приборах с зарядовой связью (ПЗС), работающих в видимом диапазоне спектра. Число элементов в таких матрицах превышает 5 млн. Сегодня такие матрицы широко используются в системах цифровой фотографии. В то же время число элементов в

современных матричных ФПУ, работающих в инфракрасной области 8—12 мкм, более чем в 50 раз меньше.

Основные проблемы создания высокоформатных ИК матричных ФПУ связаны с ограничениями, возникающими в системе считывания. Главным из этих ограничений является то, что даже при охлаждении до низких температур значения темновых токов инфракрасных матриц остаются высокими, выше, чем значения темновых токов кремниевой матрицы видимого диапазона спектра. Данное обстоятельство является определяющим при формировании времени интегрирования токов фотогенерации на элементах матрицы.

Сегодня существуют уникальные разработки высокоформатных ИК матричных ФПУ, но они строятся на основе отдельных блочных структур.

Один из путей решения данной задачи, на наш взгляд, может состоять в создании гибридных матричных ФПУ на основе микромеханических детекторов ИК излучения и оптической системы считывания, построенной на базе кремниевых ПЗС матриц.

Микромеханические детекторы ИК излучения — это детекторы, в которых происходит преобразование энергии ИК излучения в механическую работу, сопровождаемое изменениями формы и геометрии чувствительного элемента. Известны два типа детекторов, в которых осуществляется данные преобразования:

- детекторы на биматериальных слоях, которые имеют высокую разницу коэффициентов температурного расширения;
- термопневматические детекторы, работающие на оптоакустическом эффекте Белла [1—3].

Первое сообщение о создании матричных неохлаждаемых приемников, работающих на микромеханических элементах, появились в 1998 г. На рис. 1 (см. третью сторону обложки) представлена схема сенсорного устройства на биматериальном элементе [4, 5].

Необходимо отметить, что представленные результаты в некоторой степени можно отнести к разряду "ошеломляющих". Температурное разрешение данных ФПУ сопоставима с предельными характеристиками глубоко охлаждаемых фотонных приемников. По сравнению с болометрическими матричными приемниками (где наилучшие полученные результаты по температурному разрешению считаются 50 мК) чувствительность матрицы, построенной на биматериальном сенсоре, в 10 раз лучше. Однако применение данных матричных конструкций в составе тепловизионной аппаратуры до настоящего времени неизвестно.

Практически наиболее значимые результаты получены корпорацией Nikon, которая проводила

**Основные параметры матричных фотоприемных устройств**

| Наименование параметров      | Спектральный диапазон, мкм |                    |                    |
|------------------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|
|                              | 0,6—0,9                    | 8—12<br>(фотонные) | 8—12<br>(тепловые) |
| Число элементов              | $5 \cdot 10^6$             | $> 10^5$           | $> 8 \cdot 10^4$   |
| Масса, г                     | 5—20                       | $< 500$            | $< 50$             |
| Потребление, Вт              | 0,05—0,1                   | 2—10               | 0,5—1              |
| Температурное разрешение, мК |                            | 10—40              | 80—100             |

исследования в области создания гибридного матричного ФПУ, где применяются матричные микро-механические детекторы и оптическая система считывания, построенная на кремневой ПЗС матрице.

Конструкция сенсорного устройства, представленная на рис. 2 (см. третью сторону обложки), в отличие от первого устройства имеет рефлекторный элемент. Под действием ИК излучения происходит разогрев биматериального элемента, который меняет угол наклона рефлектора.

На рис. 3, а (см. третью сторону обложки) приведена система оптического считывания. Собственно матричный детектор размещается в термостатированном контейнере для поддержания определенного уровня температуры. Система считывания представляет собой пространственный фильтр, который пропускает излучение определенного направления и проецирует изображение структуры рефлекторов на телевизионную камеру. На рис. 3, б (см. третью сторону обложки) представлено тепловизионное изображение, полученное данной системой.

Гибридное матричное ФПУ (рис. 4, см. четвертую сторону обложки), которое было разработано в Конструкторско-технологическом институте прикладной микроэлектроники СО РАН, построено на термопневматических детекторах (микроакустических ячейках).

Основу структуры матрицы составляют замкнутые газовые ячейки цилиндрической формы, на

торцах которых находятся мембраны. Внутри объема расположен поглощающий слой, выполненный на основе полупрозрачной металлической пленки. Несущая конструкция матрицы изготовлена из полимерного материала. Сама матричная конструкция размещена в замкнутом газовом объеме, что обеспечивает баланс внутреннего и внешнего давлений при изменениях температуры окружающей среды. Матричный детектор сформирован на входном окне, выполненном из материала, прозрачного в инфракрасной области.

Общий вид матричного микроакустического детектора представлен на рис. 4, б (см. четвертую сторону обложки). В формировании структуры матричного детектора (см. рис. 4, а) участвуют два технологических слоя: слой с мембранами и слой с поглощающими элементами. В процессе окончательной сборки они совмещаются и диффузно сшиваются.

Оптическая система считывания построена по дифференциально-поляризационной схеме, которая регистрирует прогибы мембран на уровне 1–2 нм, и является, по предварительной оценке, наиболее устойчивой схемой к воздействиям температуры и механических колебаний.

На рис. 5, а (см. четвертую сторону обложки) представлен общий вид макета. Схема оптического считывания показана на рис. 5, б.

Увеличенное изображение фрагмента структуры с прогнутыми мембранами, спроецированных на телевизионную камеру, приведены на рис. 6, а. Ин-

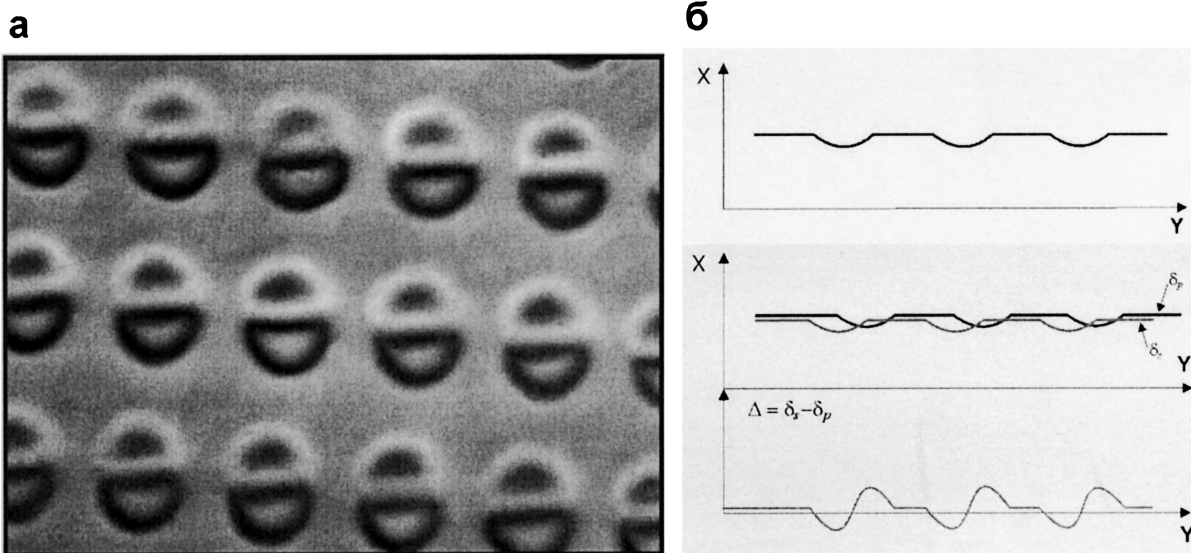


Рис. 6. Изображение фрагмента матричного микроакустического детектора с прогнутыми мембранами (а); б — схема сложения волновых фронтов отраженных от поверхности матрицы для двух взаимноортогональных поляризаций ( $\Delta$  — разность фаз между двумя волновыми фронтами)

терференционная картинка рельефа мембраны асимметрична. Прогиб мембраны вызывает изменения интенсивности. При этом в одной части интенсивность будет расти, в другой — падать. Разностный сигнал, который снимается с элементов ПЗС матрицы, характеризует прогиб мембран. На рис. 6, б показана схема сложения волновых фронтов. Асимметричность интерференционной картины вызвана тем, что в оптической схеме происходит пространственное смещение изображения мембраны для двух взаимоортогональных поляризаций.

На рис. 7 (см. четвертую сторону обложки) представлены результаты сравнительных измерений чувствительности болометрической матрицы и матрицы микроакустического детектора при воздействии одного и того же источника излучения. Результаты измерений показывают, что чувствительность компонента (ячейки) микроакустического детектора в настоящее время в 3—4 раза уступает по чувствительности болометрическим элементам.

\* \* \*

В заключение следует отметить, что представленные результаты являются промежуточными. Мы продемонстрировали возможности применения микрооптоэлектромеханических элементов для регистрации ИК излучения. В настоящее время проводятся работы по повышению чувствительности и увеличению формата ФПУ. Ожидается: повышение чувствительности более чем в 5 раз за счет уменьшения толщины мембран со 150 до 100 нм, увеличение эффективности поглощающего слоя путем применения высокопоглощающих материалов и увеличение коэффициента поглощения ИК излучения с 10 до 60 %.

Разрабатываются алгоритмы построения тепловизионного изображения на основе матричной структуры микроакустических детекторов.

#### Список литературы

1. Bell F. F. *Phyl. Mag.* 1981. Vol. 11. P. 510—528.
2. Панкратов Н. А. Неселективный оптико-акустический приемник с оптическим микрофоном // *Оптико-механическая промышленность*. 1960. № 1. С. 37—48.
3. Марков М. Н. Приемники инфракрасного излучения. М.: Наука, 1968. 167 с.
4. Au Uncooled IR With 5mK NEDT // *SPIE*. Vol. 3061. P. 210—220.
5. Manalis S. R. et al. Two-dimensional micromechanical bimorph arrays for detection of thermal radiation // *Appl. Phys. Lett.* 1997. 70, 24. P. 3311—3313.
6. Optically Readable Bi-material Infrared Detector // *SPIE*. Vol. 4369. P. 342—349.

УДК 531.787

К. В. Татмышевский, канд. техн. наук,  
Владимирский государственный университет

## МЕХАНОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ: КЛАССИФИКАЦИЯ И ИНФОРМАТИВНОСТЬ

*Рассмотрена возможная классификация механолюминесцентных датчиков давления и особенности обработки их выходных оптических сигналов в целях повышения информативности.*

### Классификация

Измерительная цепь механолюминесцентного датчика (МЛД) давления состоит из чувствительного элемента (ЧЭ), оптического канала связи и фотоприемника. Чувствительный элемент изготавливается из порошкового люминофора, обладающего механолюминесцентными свойствами, и представляет собой тонкую пластину из затвердевшей суспензии люминесцентного порошка и прозрачного связующего материала. Давление прикладывается перпендикулярно плоскости пластины. Классификацию датчиков и сенсорных устройств, построенных по схеме, показанной на рис. 1, можно провести с учетом общей классификации оптоэлектронных датчиков [1]. В качестве классификационных признаков могут использоваться: вид входного воздействия, пространственно-геометрические параметры ЧЭ, вид оптического канала и тип фотоприемника. Возможная классификация МЛД по этим признакам приведена на рис. 2.

По виду входного механического воздействия, с точки зрения практики применения, целесообразно выделить датчики реакционного, инерционного, волнового и комбинированного (совместного) действия. Такие датчики будут отличаться конструкцией механической части, однако физическая природа входного воздействия у всех датчиков одинакова — это давление, вызывающее упруго-пластическую деформацию ЧЭ.

По типу чувствительного элемента возможны три варианта датчиков. Механолюминесцентный датчик сосредоточенного типа имеет площадь ЧЭ приблизительно равную площади фотоприемника. Пример конструкции такого МЛД показан на рис. 3. Здесь неравномерность распределения давления по площади ЧЭ не учитывается. В качестве подложки ЧЭ могут использоваться полимерная плен-

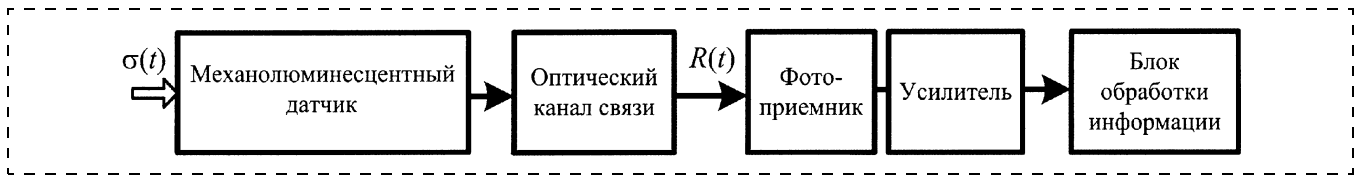


Рис. 1. Обобщенная структурная схема информационной цепи МЛД:

$\sigma(t)$  — входное давление;  $R(t)$  — энергетическая светимость ЧЭ

ка, оптическая керамика, компоненты обычной или волоконной оптики. Механолюминесцентный ЧЭ (МЛЧЭ) может быть нанесен непосредственно на торец волоконного световода или жгута (см. рис. 3). Информативными признаками сигнала сосредоточенного МЛД являются его временные и амплитудные параметры.

Механолюминесцентный датчик распределенного типа имеет площадь ЧЭ, значительно превышающую площадь входного окна фотоприемника. Чувствительный элемент может быть распределен как по площади, так и по длине, например, волоконного световода. В этом случае либо при изготовлении в оптическое стекло добавляется люми-

несцентный порошок, либо на готовое волокно специальным образом наносится дополнительный слой порошка. Механолюминесцентный датчик с распределенным по площади ЧЭ реализует функцию визуализации поля давления и обладает свойством тактильной чувствительности. Выходной сигнал такого датчика имеет модуляцию не только во времени, но и в пространстве, а для его регистрации необходимо применять матричный фотоприемник. Это свойство позволяет воспроизводить в виде световых образов процесс контактного взаимодействия сложноконтурных объектов с распределенным ЧЭ. Возможно изготовление распределенных ЧЭ на основе полимерных пленок в виде

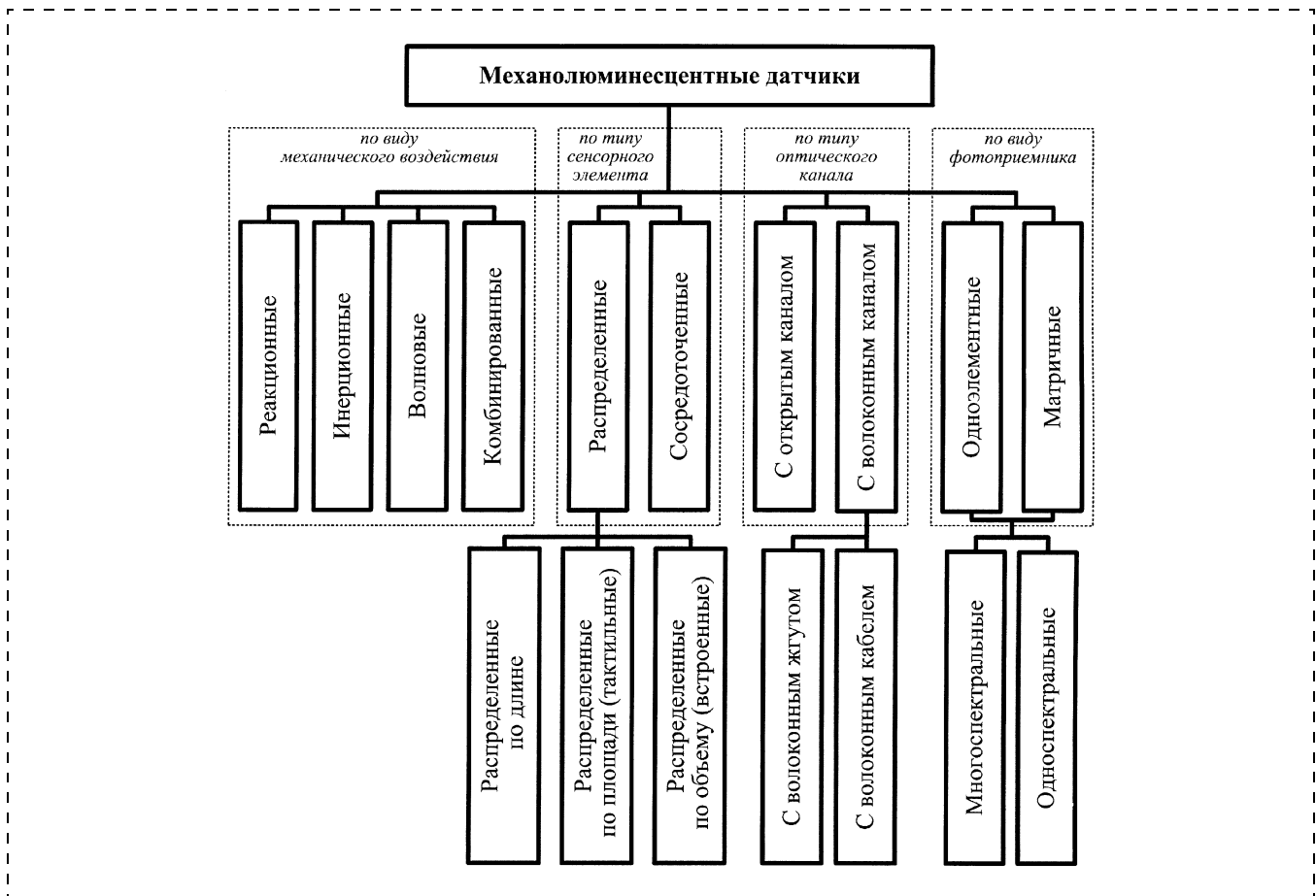
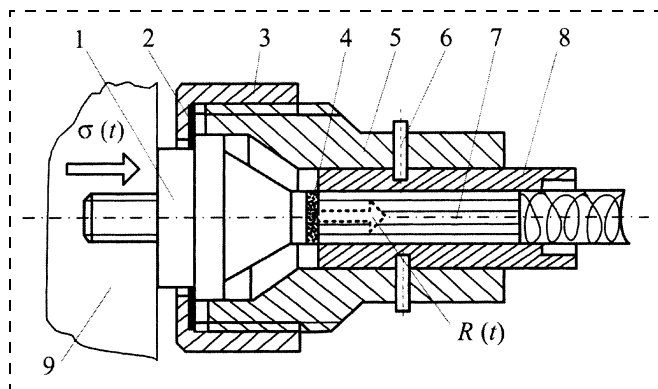


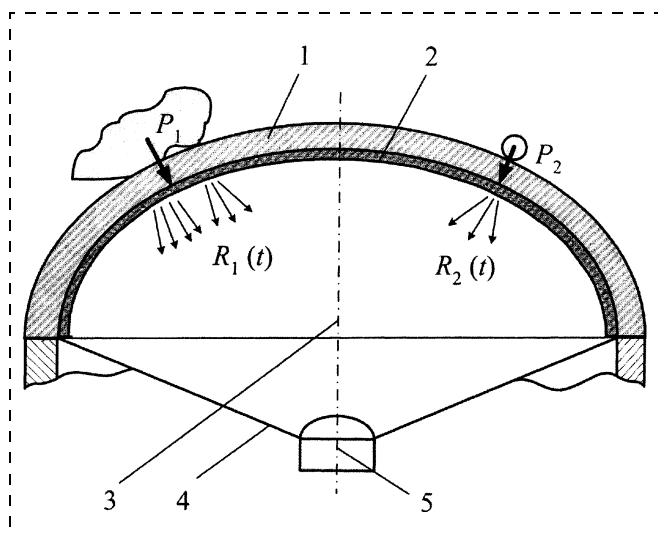
Рис. 2. Классификация механолюминесцентных датчиков давления



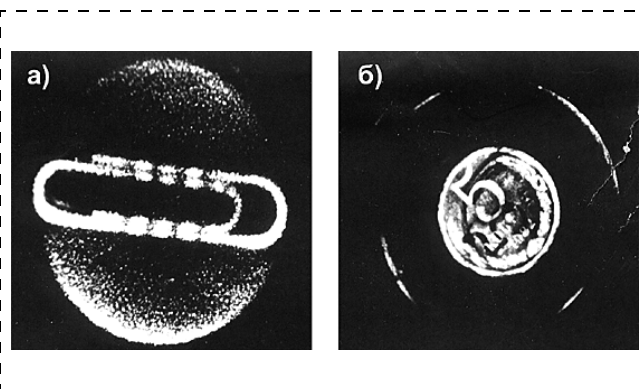
**Рис. 3. Пример конструкции МЛД сосредоточенного типа:**  
1 — сердечник-концентратор; 2 — шайба; 3 — накидная гайка; 4 — МЛЧЭ; 5 — корпус; 6 — штифт; 7 — волоконно-оптический жгут (ВОЖ); 8 — наконечник ВОЖ; 9 — объект. Фотоприемник не показан

жестких или гибких оболочек произвольной формы (рис. 4). Примеры фотографической регистрации визуализированного поля давления, возникающего при ударе предмета сложной формы о поверхность ЧЭ, распределенного по площади (плоская панель), показаны на рис. 5.

Третий тип МЛД можно назвать встроенным или интегрированным в конструкцию изделия. Здесь ЧЭ (механолюминесцентный материал) распределен в объеме несущих элементов конструкций, например, изготовленных из непрозрачных композиционных материалов. Особенности механических свойств композиционных и других материалов требуют проведения мониторинга напряженно-деформированного состояния конструк-



**Рис. 4. Пример конструкции МЛД распределенного типа:**  
1 — оболочка; 2 — МЛЧЭ; 3 — оптическое пространство; 4 — тубус; 5 — матричный ФП;  $P_1$ ,  $P_2$  — различные поля давления;  $R_1(t)$ ,  $R_2(t)$  — соответствующие световые поля



**Рис. 5. Пример фотографической регистрации визуализированных полей давления, полученных ударом:**  
а — канцелярской скрепки на поддоне; б — монеты на поддоне

ций, работающих в условиях интенсивных механических воздействий. Световой сигнал от ЧЭ может передаваться по армирующим кварцевым волокнам самого композита в центральное регистрирующее устройство. Для этого волокна располагают и объединяют внутри конструкции определенным образом. Использование в разных конструкциях люминофоров, имеющих разные оптические спектры свечения, позволяет определять по спектру область приложения давления (деформации). По амплитуде и длительности светового импульса можно судить о силе воздействия и степени разрушения композитной конструкции. Такие элементы конструкций приобретают свойство самодиагностики при воздействии на них механических нагрузок [2, 3].

По виду оптического канала связи выделяются две группы датчиков. В датчиках первой группы используется открытое оптическое пространство (см. рис. 4). В эту группу входят, в основном, МЛД с распределенной чувствительностью. Вторую группу составляют датчики с сосредоточенным ЧЭ, световой поток которого достаточно просто ввести в оптический жгут или кабель (см. рис. 3).

Для регистрации световых импульсов МЛД могут применяться два вида фотоприемников (ФП) — одноэлементные и многоэлементные (матричные). К одноэлементным ФП относятся дискретные фотодиоды, фоторезисторы и фототранзисторы. Одноэлементные ФП применяют совместно с МЛД как сосредоточенного, так и распределенного типа, в зависимости от того какие параметры оптического сигнала считаются информативными. Матричные ФП применяются для регистрации световых полей, генерируемых МЛД с чувствительными элементами, распределенными по площади. Осуществляя постоянное сканирование поверхности ЧЭ,

матричный ФП позволяет определить размеры и положение светящегося участка, а также яркость, цвет свечения и последовательность высвечивания отдельных участков ЧЭ.

Кроме указанных признаков МЛД можно также классифицировать по виду спектральных характеристик и кинетике затухания свечения.

### Информативность

Реальная функция преобразования МЛД в виде интегродифференциальных уравнений, основой которой является уравнение светимости ЧЭ  $R(t)$  как функции времени:

$$\left\{ \begin{aligned} R(t) &= \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \int_0^{t_\sigma} 2N_{\text{ЦС}} \frac{\eta}{\tau} r_{\text{вз}}(t) \tilde{N}_{mD}(t) \times \\ &\times \tilde{U}_D(t) dt; \\ \tilde{N}_{mD}(t) \tilde{U}_D(t) &= \frac{3}{4} \frac{\dot{\epsilon}_1^p}{|\vec{b}|}, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где  $N_{\text{ЦС}}$  — общее число центров свечения (ЦС) в люминесцентном материале ЧЭ единичной площади;  $\eta$  — энергия кванта света;  $\tau$  — время жизни возбужденного состояния (постоянная времени люминесценции);  $t_\sigma$  — длительность возбуждения ЦС импульсом давления  $\sigma(t)$ ;  $r_{\text{вз}}$  — радиус взаимодействия дислокации с ЦС;  $\tilde{N}_{mD}$  — средняя плотность подвижных дислокаций;  $\tilde{U}_D$  — скорость движения дислокаций, усредненная по дислокационному массиву;  $|\vec{b}|$  — модуль вектора Бюргерса, характеризующий область искажения кристаллической решетки;  $\dot{\epsilon}_1^p$  — скорость роста пластических деформаций. Здесь уравнение (2) описывает дислокационную кинетику пластического деформирования ЧЭ и фактически определяет подынтегральное выражение правой части уравнения светимости (1).

Сравнительный анализ входных импульсов давления и выходных оптических сигналов показывает [4], что форма выходных импульсов значительно отличается от формы входных, а генерация светового потока начинается только при превышении предела текучести материала ЧЭ. Это свидетельствует о том, что использовать МЛД в качестве измерительного преобразователя без сложной дополнительной обработки выходного сигнала весьма затруднительно.

Для повышения информативности МЛД необходимо найти такой алгоритм обработки, кото-

рый позволил бы линейной зависимостью связать параметры выходного оптического сигнала  $R(t)$  и входного давления выше предела текучести (порога чувствительности)  $\sigma_p(t)$ . Здесь рассматривается входное давление  $\sigma_p(t)$  выше предела текучести материала ЧЭ, так как в модели сделано допущение о том, что движение дислокаций начинается только при превышении предела текучести  $\sigma_s$ . В действительности отдельные дислокации и дислокационные ансамбли начинают движение еще в упругой области при приближении к пределу упругости. Это приводит к появлению так называемой "вспышечной" механолюминесценции [5], яркость которой на несколько порядков меньше, чем стационарной, рассматриваемой в данной статье.

Рассмотрим подробнее уравнение (1), которое можно записать в виде

$$\begin{aligned} R(t) &= \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \int_0^{t_\sigma} 2N_{\text{ЦС}} \frac{\eta}{\tau} r_{\text{вз}}(t) \tilde{N}_{mD}(t) \tilde{U}_D(t) dt = \\ &= \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \int_0^{t_\sigma} z(t) dt. \end{aligned}$$

Здесь функция  $z(t)$  описывает скорость изменения энергетической светимости без учета экспоненциальной составляющей, поэтому назовем ее эффективной скоростью. Очевидно, что именно функция эффективной скорости изменения светимости  $z(t)$  имеет импульсный характер, поэтому был проведен численный эксперимент по выявлению взаимосвязи между функцией  $z(t)$  и  $\sigma_p(t)$ . Расчеты проводились для ЧЭ, изготовленного на основе промышленного порошкового электролюминофора ЭЛС-580 (ZnS : Cu, Mn). Параметры ЧЭ, использованные при расчетах: предел текучести  $\sigma_s = 45$  МПа,  $\tau = 150$  мкс,  $\eta = 3,52 \cdot 10^{-19}$  Дж.

Входная функция давления  $\sigma(t)$  задавалась в виде импульсов синусоидальной, треугольной, трапециoidalной формы, ступенчатого импульса с различными амплитудно-временными параметрами в диапазоне давлений от 45 до 120 МПа. По результатам вычислений были построены зависимости  $z = f(\sigma_p)$ . Результаты вычислений показали следующее.

1. Зависимости  $z = f(\sigma_p)$  для воздействий различной формы отличаются друг от друга не более чем на  $\pm 1$  %.

2. В целом зависимость  $z = f(\sigma_p)$  имеет нелинейный характер, но может быть аппроксимирована усредненной прямой  $z = S_q \sigma_p$  для воздействий любой формы входного давления, где  $S_q$  — квази-

чувствительность ЧЭ. Приставка "квази-" указывает на то, что параметр определяется по отношению к преобразованной производной выходного сигнала, а не к самому выходному сигналу. Нелинейность для всех случаев не превышает  $\pm 4\%$ .

3. Наибольшие отклонения от линейности наблюдаются вблизи предела текучести.

4. Значение усредненной квазичувствительности составило  $S_q \approx 5,6 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{МПа}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  для всех кривых.

Таким образом, на основании проведенного численного моделирования можно сделать вывод о том, что МЛД можно использовать в качестве измерительных преобразователей давления в диапазоне давлений, превышающих предел текучести  $\sigma_s$  материала чувствительного элемента. В этом случае для выделения из выходного сигнала  $\Phi(t)$  информативной функции  $z(t)$  следует:

1) определить первообразную  $Z(t)$  подынтегральной функции  $z(t)$  путем умножения выходного сигнала на экспоненциальную функцию  $Z(t) = \Phi(t) \exp(t/\tau)$ ;

2) найти подынтегральную функцию  $z(t)$  путем дифференцирования по времени полученной функции  $Z(t)$ ;

3) найти значения входного давления  $\sigma_p(t)$  выше уровня предела текучести  $\sigma_s$  путем деления значений полученной функции  $z(t)$  на квазичувствительность  $S_q$ .

Ярко выраженный порог чувствительности МЛД ограничивает диапазон регистрируемых импульсов давления. Однако его можно повысить за счет применения концентраторов давления. Такие концентраторы представляют собой детали конструкции МЛД, служащие для передачи давления к чувствительному элементу и имеющие либо коническую часть (см. рис. 3, поз. 1), либо регулярную шероховатую поверхность. Концентраторы с конической частью в виде усеченного конуса обеспечивают усиление амплитуды волны давления в  $(D_{\text{цил}}/D_{\text{ус}})^n$  раз, где  $D_{\text{цил}}$ ,  $D_{\text{ус}}$  — соответственно диаметры цилиндрической части и усеченного конца конической части;  $n$  — показатель степени,

зависящий от угла раствора конуса. При углах раствора от  $20^\circ$  до  $60^\circ$  значение  $n = 1,9$  [6]. У концентраторов с шероховатой поверхностью размеры отдельных неровностей и расстояние между ними определяют эффективную площадь концентратора и степень увеличения давления, действующего на чувствительный элемент. Так, при фотографической регистрации поля давления, показанного на рис. 5, а, в качестве концентратора была применена крупнозернистая наждачная лента и световое поле имеет аналогичную крупнозернистую структуру. Соседнее изображение (см. рис. 5, б) получено без применения концентратора, и световое поле имеет более контрастную структуру. Однако в первом случае давление было в 5 раз меньше, чем во втором. Среднее расстояние между соседними неровностями рабочей поверхности концентратора определяет для ЧЭ распределенного типа пространственную разрешающую способность. Если концентратор не применяется, то разрешающая способность определяется размерами отдельной частицы люминесцентного порошка и может составить 10—30 мкм [7].

#### Список литературы

1. Бусурин В. И., Носов Ю. Р. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения. М.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
2. Sage I., Humberstone L., Oswald I. et al. Getting light through black composites: embedded triboluminescent structural damage sensors // Smart Mater. Struct. 2001. N 10. P. 332—337.
3. Sage I., Bourhill G. Triboluminescent materials for structural damage monitoring // J. Mater. Chem. 2001. N 11. P. 231—245.
4. Татмышевский К. В., Макарова Н. Ю. Механолюминесцентный сенсорный элемент: математическая модель и расчет выходных оптических сигналов // Проектирование и технология электронных средств. 2004. № 1. С. 2—8.
5. Электронные свойства дислокаций в полупроводниках / Под ред. Ю. А. Осипяна. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 320 с.
6. Сю Н. П. О коэффициенте усиления волн напряжения в сплошных усеченных конусах // Прикладная механика. 1968. № 4. С. 229—231.
7. Верещагин И. К., Ковалев Б. А., Косяченко Л. А. и др. Электролюминесцентные источники света. М.: Энергоатомиздат, 1990. 168 с.

УДК 681.586.773

Э. И. Соборовер, канд. хим. наук,  
С. В. Ткаченко,  
Научно-исследовательский институт химии  
Нижегородского государственного университета  
им. Н. И. Лобачевского

## ХИМИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ НА ПОВЕРХНОСТНО-АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ ДЛЯ МУЛЬТИСЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ АТМОСФЕРНОГО МОНИТОРИНГА

*Показаны возможности использования химических сенсоров на поверхностно-акустических волнах с чувствительными слоями — пленками сополимера бутилметакрилата с метилметакрилатом и функционального полидиметилсилоксана (ПДМС) с ионносвязанными катионами бриллиантового зеленого в качестве сенсорных элементов мультисенсорной системы мониторинга газов — основных приоритетных загрязнителей: оксида углерода (CO), аммиака (NH<sub>3</sub>), диоксида серы (SO<sub>2</sub>) и сероводорода (H<sub>2</sub>S) в атмосферном воздухе.*

В России существует проблема создания сети передвижных станций атмосферного мониторинга, которая не может быть решена ни с помощью традиционных химико-аналитических методов анализа, ни с помощью газоанализаторов, ориентированных на анализ отдельных газов — загрязнителей атмосферного воздуха [1]. Поскольку потребность нашей страны в таких станциях составляет несколько сотен, то эта проблема не может быть решена и с помощью дорогостоящих инструментальных методов, таких как хромато-масс-спектрометрия и лазерная спектрометрия. Ранее была высказана идея о возможности создания мобильной станции атмосферного мониторинга пяти основных приоритетных загрязнителей: диоксидов серы SO<sub>2</sub> и азота NO<sub>2</sub>, оксида углерода CO, аммиака NH<sub>3</sub> и сероводорода H<sub>2</sub>S на основе мультисенсорной системы, являющейся основой прибора типа "электронный нос" (ЕН) [2]. Наибольшее распространение в мультисенсорных системах ЕН получили три типа химических сенсоров: полупроводниковые, оптические и на поверхностно-акустических волнах (ПАВ-сенсоры) [3]. Это обусловлено их высокой чувствительностью к воздействию контролируемых газов, а также возможностями создания мультисенсора на единой сенсорной платфор-

ме с помощью технологий микроэлектроники; в частности, для ПАВ-мультисенсора в качестве сенсорной платформы выступает монокристалл кварца [4].

Наибольшее распространение в качестве материалов чувствительных слоев (сенсорных материалов) ПАВ-сенсоров получили полимерные материалы, что объясняется их высокой газопроницаемостью, близкими к комнатной рабочими температурами и широкими возможностями молекулярного дизайна, который позволяет синтезировать сенсорные материалы с заранее заданными свойствами [5]. Функциональные полимеры, в которых аналитические фрагменты связаны с базовой полимерной цепью прочными химическими ковалентными или ионными связями, в последние годы получили самое широкое распространение в качестве ПАВ-сенсорных материалов среди всех полимерных материалов [6, 7].

Ранее были получены ПАВ-сенсорные, газоадсорбционные и газодиффузионные характеристики тонких пленок нескольких функциональных полимеров на основе полидиметилсилоксана (ПДМС) и полиметилметакрилатов (ПММА) с ионно-связанными катионами бриллиантового зеленого (БЗ) в отношении четырех газов, входящих в список основных приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха (CO, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S); была получена диаграмма сенсорной чувствительности с соразмерными аналитическими откликами на все четыре газа, что показало перспективность дальнейших исследований этого класса полимеров в качестве ПАВ-сенсорных материалов для мобильной станции атмосферного мониторинга на основе мультисенсорной системы типа ЕН [8].

Целью данной работы стало исследование возможностей использования ПАВ-сенсоров с чувствительными слоями — функциональными полимерами на основе ПДМС и полибутилметакрилата (ПБМА) с ионносвязанными катионами бриллиантового зеленого (БЗ) в качестве базовых элементов ПАВ-мультисенсора мобильной станции мониторинга атмосферного воздуха в отношении газов — основных приоритетных загрязнителей.

### Экспериментальная часть

В качестве чувствительного элемента использовалась линия задержки на ПАВ с базовой частотой 170 МГц, выполненная на монокристалле кварца АТ-среза, разработанная и изготовленная в НИИПИ "КВАРЦ" (г. Нижний Новгород) [9]. Линия за-

держки на ПАВ характеризуется распространением волны между двумя отдельными системами встречно-штырьевых преобразователей (ВШП), первый из которых работает в качестве передающего преобразователя, а второй является принимающим преобразователем для акустической волны. При подаче на одну систему ВШП высокочастотного напряжения генерируется поверхностная механическая волна Рэлея, которая распространяется по поверхности кварца и при попадании на другой ВШП преобразуется в высокочастотное напряжение. Края на обоих концах кристалла кварца нагружены специальной абсорбиционной резиной, служащей для подавления отражения в направлении распространения первичной волны; кроме этого, кристалл кварца располагается на резиновой подушке в стандартном корпусе микросхемы (рис. 1). Чувствительное полимерное покрытие наносится на пространство между ВШП, что сразу снижает резонансную частоту кварца на несколько кГц в зависимости от массы наносимого покрытия и его вязкоэластичных констант [9].

Изменения массы и вязко-эластичных констант чувствительного полимерного слоя в результате сорбции (физической и/или хемосорбции) какого-либо газа приводит к изменению ПАВ-частоты; разница между начальной и конечной частотой процесса сорбции и является аналитическим сигналом или откликом ПАВ-сенсора. Таким образом, ПАВ-сенсор является единственной в своем роде (т. е. среди всех известных видов химических сенсоров) микромеханической системой с очень высокой чувствительностью резонансной ПАВ-частоты к изменению химического состава контролируемой сенсором среды, в которой он находится и с которой непосредственно контактирует чувствительное покрытие ПАВ-сенсора.

Синтез функциональных полимеров, являющихся сополимерами бутилметакрилата (БМА) с метилметакрилатом (ММА), а также функционального ПДМС с ионносвязанными катионами ВЗ осуществлен в МГАТХТ им. М. В. Ломоносова (г. Москва) по методикам, разработанным и описанным ранее [10, 11]. Определенная с помощью элементного анализа и УФ-, и ИК-спектров степень модификации полимеров составила в случае сополимера БМА—ММА 4 %, а в случае ПДМС — 2 %.

Пленки чувствительных покрытий нанесены микрошприцем методом полива их соответствующих растворов полимеров в пространство между ВШП ПАВ-элемента (рис. 1). Толщины пленок определены с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4 и составили около 0,2 мкм. Остаточный растворитель удален вакуумированием образцов при комнатной температуре.

Экспериментальная ячейка, в которой закреплен чувствительный ПАВ-элемент, позволяла проводить вакуумирование, напуск газов и газоздушных смесей с заданными электронными РРГ (регуляторами расхода газов) скоростями (рис. 1).

Следует отметить, что аналитические сигналы — отклики химических ПАВ-сенсоров — характеризуются, как правило, довольно низким значением соотношения сигнал/шум, поэтому для выделения ПАВ-сенсорного отклика всегда применяются методы математической статистики и соответствующее программное обеспечение [5].

По методике, разработанной и описанной ранее, исследовали сенсорный отклик в воздушном потоке, содержащем газы:  $\text{CO}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  (СДЯВ — сильнодействующие ядовитые вещества) [8]. Методика состояла из двух этапов:

- 1-й режим напуска (вспомогательный) — измерение ПАВ-частоты сенсора в газовых потоках, названных модельными, так как они содержали искусственный воздух в основном потоке очищенного лабораторного воздуха;

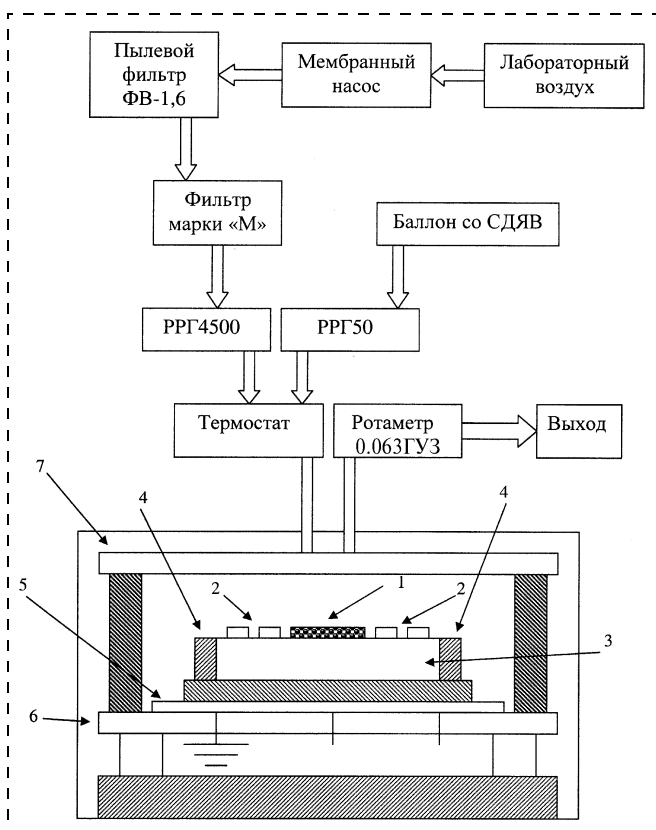


Рис. 1. Блок-схема системы напуска газов, измерительной ячейки и ПАВ-сенсорного элемента:

1 — чувствительный слой; 2 — ВШП; 3 — кристалл кварца; 4 — абсорбиционная резина; 5 — корпус микросхемы; 6 — основание измерительной ячейки; 7 — крышка измерительной ячейки с газовыми штуцерами

- 2-й режим напуска (основной) — измерение ПАВ-частоты сенсора в газовых потоках, содержащих искусственный воздух, в котором находится постоянное количество одного из газов **СДЯВ**, контролируемых сенсором, в потоке лабораторного воздуха. Исходные концентрации газов **СДЯВ** в баллонах с искусственным воздухом приготавливались в статическом режиме. Концентрации ниже исходных получались динамическим смешением двух потоков: микропотока искусственного воздуха, содержащего постоянное заданное количество одного из газов **СДЯВ**, и основного, постоянного во времени потока очищенного лабораторного воздуха (рис. 1). После напуска каждого из газов проводилась продувка образца чистым лабораторным воздухом. В качестве отклика ПАВ-сенсора использовалась разность начальной ПАВ-частоты сенсора ( $F_0$ ) и текущей частоты ( $F_i$ ):

$$\Delta F = F_0 - F_i.$$

Массив исходных данных для последующей математической обработки состоял из экспериментальных значений ПАВ-частоты, записанных с интервалом — одна экспериментальная точка в 20 с, т. е. любой 10-минутный интервал кинетической кривой изменения ПАВ-частоты содержит 30 экспериментальных значений частоты.

Для построения зависимостей изменения отклика ПАВ-сенсора от концентрации газа в воздушном потоке без вычитания модельной смеси каждый 10-минутный участок кинетической кривой аппроксимировался функцией  $Y = X/(A + BX)$  и для построения брались не экспериментальные значения частоты, а расчетные, полученные для конца 10-минутного интервала.

Для построения зависимостей  $\Delta F$  от концентрации газа в воздушном потоке ( $C$ , мг/м<sup>3</sup>) использовалось пять концентраций по каждому из газов.

Для получения зависимостей изменения отклика ПАВ-сенсора от концентрации газа **СДЯВ** в воздушном потоке с учетом влияния воздуха на аналитический сигнал из кинетической кривой, полученной во 2-м режиме напуска, вычиталась кинетическая кривая, полученная в атмосфере модельной смеси в 1-м режиме напуска. Процедура вычитания заключалась в следующем: из каждого участка кинетической кривой, полученной во 2-м режиме напуска, вычитался аналогичный участок кинетической кривой, полученной в 1-м режиме напуска (модельная смесь), экстраполированный на тот же момент времени.

Сложный ход зависимостей изменения отклика сенсора от концентраций газов **СДЯВ** объясняется эффектом тренировки сенсора, заключающимся в

постепенном вытеснении молекул газов **неСДЯВ** молекулами газов **СДЯВ** из центров физической сорбции, так как, по всей видимости, стадия физической сорбции предшествует стадии хемосорбции молекул газов **СДЯВ**. В общем случае аналитический отклик ПАВ-сенсора в воздушном потоке, содержащем один из газов **СДЯВ**, можно представить как

$$\Delta F = \Delta F_{\text{МС}} (\text{вызванное физической сорбцией молекул воздуха: азота, кислорода и др.}) + \Delta F_{\text{СДЯВ}} (\text{вызванное физической сорбцией и хемосорбцией молекул газа СДЯВ}). \quad (1)$$

При напуске модельной смеси, т. е. воздушного потока лабораторного воздуха, содержащего искусственный воздух, аналогичное выражение выглядит следующим образом:

$$\Delta F = \Delta F_{\text{МС}} (\text{вызванное физической сорбцией молекул воздуха: азота, кислорода и др.}). \quad (2)$$

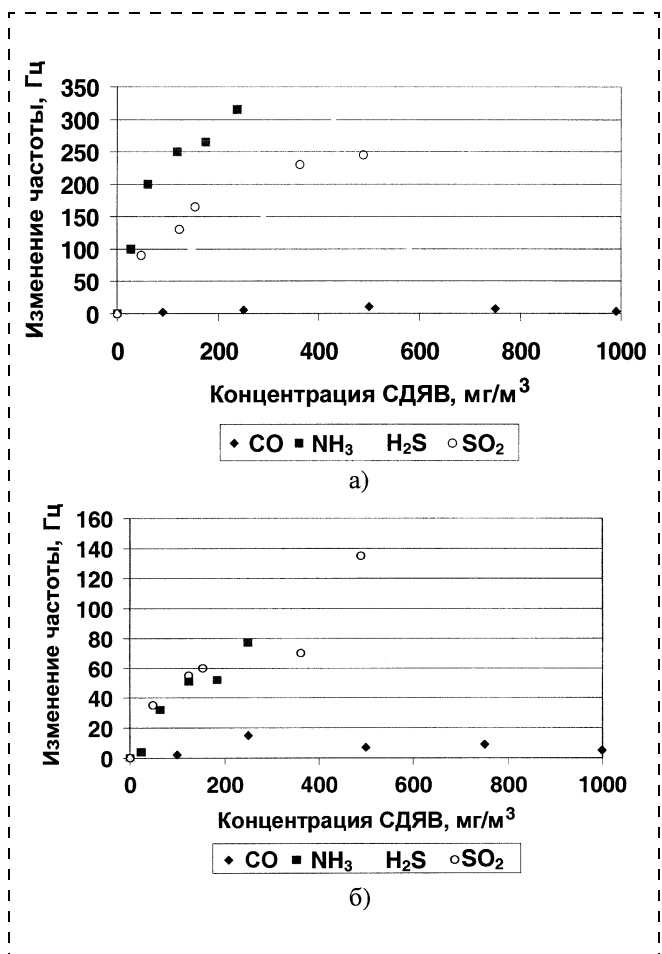


Рис. 2. Зависимости изменения ПАВ-частоты от концентрации СДЯВ в воздушном потоке после процедуры вычитания модельной смеси для образца:

а — ПДМС; б — ПБМА—ПММА

При вычитании выражения (2) из выражения (1), которое соответствует процедуре вычитания описанной выше, остается соотношение:

$$\Delta F_{(1)-(2)} = \Delta F_{\text{СДЯВ}} \text{ (вызванное физической сорбцией и хемосорбцией молекул газа СДЯВ)}, \quad (3)$$

которое показывает вклад физической и хемосорбции молекул газов **СДЯВ** в общее изменение отклика ПАВ-сенсора, вызванное сорбцией газов пленкой чувствительного слоя.

На рис. 2 видно, что после проведения процедуры вычитания вклада, который вносит физическая сорбция молекул газов, входящих в состав воздуха, в суммарный отклик сенсора, в случае оксида углерода (вплоть до его концентрации 1000 мг/м<sup>3</sup> в воздушном потоке) "чистый" после вычитания модельной смеси аналитический отклик ПАВ-сенсора практически не зависит от концентрации оксида углерода. Отсюда сделан вывод об отсутствии специфического взаимодействия молекул **СО** с катионами **БЗ** полимерного покрытия, которые являются центрами специфической сорбции (хемосорбции) в полимерном материале. Напротив, для газов **NH<sub>3</sub>**, **H<sub>2</sub>S** и **SO<sub>2</sub>** после процедуры вычитания вклада, вносимого модельной смесью в суммарный аналитический отклик, наблюдаются зависимости сенсорного отклика от концентрации газов в воздушном потоке, которые описываются изотермами Лэнгмюра.

Для выявления зависимости ПАВ-сенсорных откликов от природы газов использовали коэффициенты  $A_f$  и  $B_f$  уравнений, описывающих зависи-

Параметры уравнения, описывающего изотермы сорбции ПАВ-сенсора с чувствительным слоем на основе функционального полимера при вычитании модельной смеси

| Образец ПДМС      |       |        |                            |
|-------------------|-------|--------|----------------------------|
| Газ               | $A_f$ | $B_f$  | Коэффициент корреляции $R$ |
| NH <sub>3</sub>   | 0,173 | -4,94  | 0,993                      |
| SO <sub>2</sub>   | 0,183 | -7,55  | 0,926                      |
| H <sub>2</sub> S  | 0,195 | -7,12  | 0,824                      |
| Образец ПБМА-ПММА |       |        |                            |
| NH <sub>3</sub>   | 0,214 | -18,80 | 0,988                      |
| SO <sub>2</sub>   | 0,216 | -12,53 | 0,858                      |
| H <sub>2</sub> S  | 0,260 | -34,25 | 0,946                      |

мости значений откликов от концентрации газов в воздушном потоке и являющихся математическим выражением изотерм Лэнгмюра (см. таблицу)

$$\Delta F = A_f C / (C + B_f),$$

где  $\Delta F$  в Гц,  $C$  в мг/м<sup>3</sup>.

На рис. 3 для наглядности, как это принято сейчас в сенсорной микроэлектронике, зависимости коэффициентов  $A_f$  и  $B_f$  — параметров градуировочных графиков ПАВ-сенсоров от химической природы чувствительного покрытия сенсоров и газов **СДЯВ** — приведены в виде диаграмм сенсорной чувствительности.

Из данных таблицы и рис. 3 видно, что значения откликов ПАВ-сенсора зависят как от природы газа **СДЯВ**, так и от химического строения чувствительного слоя и, что особенно важно, эти отклики соразмерны [12]. Другими словами, исследованные ПАВ-сенсоры с чувствительными слоями — функциональными полимерами на основе **ПДМС** и **ПАМА** (полиалкилметакрилатов) — удовлетворяют требованиям, предъявляемым к сенсорам в мультисенсорной системе типа "электронный нос". Таким образом, данные ПАВ-сенсоры могут быть рассмотрены в качестве сенсорных элементов ПАВ-мультисенсора мобильной станции мониторинга основных приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха.

#### Список литературы

1. Попов А. А., Качин С. В. Компьютеризованные аналитические комплексы для экологического мониторинга // Приборы и системы управления. 1994. № 9. С. 15—17.
2. Соборовер Э. И. Органические материалы в чувствительных слоях химических сенсоров мультисенсорных систем анализа газов и паров // Электроника и информатика-2002. IV Ме-

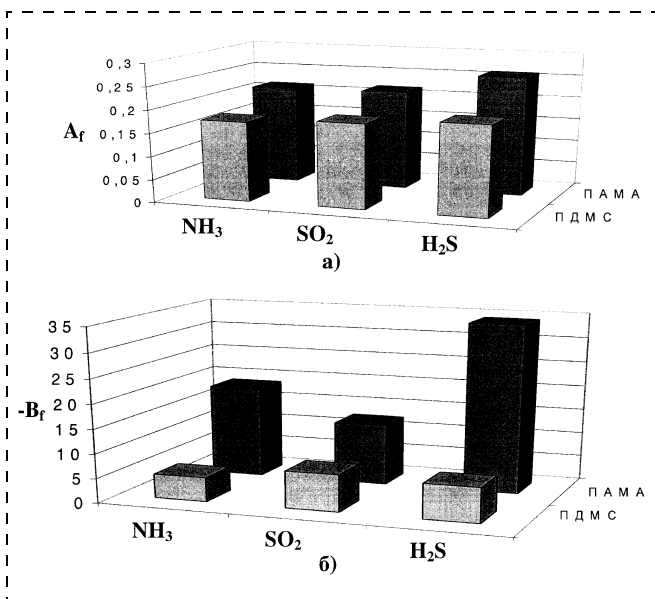


Рис. 3. Диаграмма ПАВ-сенсорной чувствительности: а — по коэффициенту  $A_f$ ; б — по коэффициенту  $B_f$

ждународная научно-техническая конференция. Тез. докл. Ч. 2. М.: МИЭТ, 2002. С. 346—347.

3. **Strike D. J., Meijerink M. J. H., Koudelka-Hep M.** Electronic noses — a minireview // Fresenius J. Anal. Chem. 1999. V. 364. P. 499—505.

4. **Hierlemann A., Ricco A. J., Bodenhofer K., Gopel W.** Effective use of molecular recognition in gas sensing: results from acoustic wave and in situ FT-IR measurement // Anal. Chem. 1999. V. 71. N 15. P. 3022—3035.

5. **Rapp M., Reibel J., Stier S., Voigt A., Bahlo J.** SAGAS: Gas analyzing sensor systems based on surface acoustic wave devices — an issue of commercialization of SAW sensor Technology // IEEE International Frequency Control Symposium. 1997. P. 129—132.

6. **Hierlemann A., Ricco A. J., Bodenhofer K., Dominik A., Gopel W.** Conferring selectivity to chemical sensors via polymer side-chain selection: thermodynamics of vapor sorption by a set of polysiloxanes on thickness-shear mode resonators // Anal. Chem. 2000. V. 72. N 16. P. 3696—3708.

7. **Hierlemann A., Zellers E. T., Ricco A. J.** Conferring selectivity to chemical sensors via polymer side-chain selection: thermodynamics of vapor sorption by a set of polysiloxanes on thickness-shear mode resonators // Anal. Chem. 2001. V. 73. N 14. P. 3458.

8. **Соборовер Э. И., Зубков И. Л., Поляков А. С., Токарев С. В.** Исследование пленок функциональных полимеров в качестве чувствительных слоев плосковолноводных оптических

и на поверхностно-акустических волнах сенсоров для мультисенсорной системы мониторинга атмосферного воздуха // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления. Сб. матер. XV научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов / Под ред. проф. В. Н. Азарова. М.: МГИЭМ, 2003. С. 72—74.

9. **Соборовер Э. И., Швандеров А. Ф.** Возможности сенсора на поверхностных акустических волнах для контроля параметров газовых сред // Сенсор. 2001. № 1. С. 42—45.

10. **Ткачев А. В., Киселев Д. Н., Тверской В. А., Соборовер Э. И.** Полиметакрилаты с иммобилизованным красителем. Оптические и сорбционные свойства // Высокомолек. соедин. Сер. А. 1994. Т. 36. № 8. С. 1326—1330.

11. **Соборовер Э. И., Тверской В. П., Швандеров А. Ф.** Синтез функциональных полисилоксанов и исследование их пленок в качестве реагентных фаз химических газовых сенсоров // Программа и тез. докл. Всеросс. конф. "Кремнийорганические соединения: синтез, свойства, применение" Москва, 1—4 февр. 2000. С. 81.

12. **Соборовер Э. И., Токарев С. В., Тверской В. А., Царапкин А. В.** Исследование пленок функциональных полимеров для мультисенсорной системы атмосферного мониторинга // Электроника и информатика-2002. IV Междунар. научно-техническая конф.: Тез. докл. Ч. 2. М.: МИЭТ, 2002. С. 348.

# МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

УДК 66.017+621.3.044.77

**И. М. Бескровный**, д-р техн. наук, проф.,  
ОАО "Ангстрем-М"

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКОЛЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

*Определены понятия технологической эпохи и технологического поколения электронных схем. Кратко рассмотрены поколения эпохи твердотельной электроники. Введено определение поколения твердотельной наноэлектроники, являющегося граничным на стыке двух технологических эпох: твердотельной и наноэлектроники. Показано, что закон Мура может служить основой для прогноза динамики развития технологии полупроводникового производства не только для поколения СБИС, базирующихся на МОП-структурах. Кратко рассмотрены основные факторы воздействия на производителей электронных схем, в том числе рыночный механизм, являющийся главным фактором, определяющим динамику развития технологии. Показана неизбежность смены технологических эпох — переход от твердотельной к наноэлектронике.*

В последнее десятилетие внимание исследователей все больше привлекает феномен постоянно продолжающегося роста числа транзисторов, раз-

мещаемых на одном чипе, что естественно связано с уменьшением их геометрических размеров [1—6]. В настоящее время размеры элементов уменьшились до долей микрон и, например, длина затвора МОП-транзисторов достигла уровня 0,06 мкм (60 нм). Таким образом, "микронная" область преодолена и технология достигла нанометровой области. В связи с этим закономерно возникает несколько вопросов:

- Будет ли прогресс в области технологии производства СБИС плавно продолжаться или мы имеем дело просто с зарождением еще одного поколения твердотельных приборов — наноэлектроники?
- Как долго будет продолжаться тенденция к уменьшению размеров транзисторов?
- Какие причины лежат в основе этой тенденции?
- Присуща ли эта тенденция только изделиям микроэлектроники или носит более общий характер?
- Существуют ли варианты преодоления технологических проблем, возникших при переходе к наноразмерам?

Цель настоящей статьи показать, что определенные трудности в дальнейшем развитии твердотельной электроники носят принципиальный системный характер. Они не могут быть устранены

только за счет совершенствования технологических процессов, поиска и использования новых материалов. В этот раз речь идет не просто об очередной смене поколений в рамках одной эпохи, а о том, что эпоха твердотельной электроники в своем развитии достигла определенного потолка и должна постепенно уступать свои позиции новой эпохе — эпохе нанoeлектроники. В статье также делается попытка дать в качестве ответов на поставленные выше вопросы некоторые концептуальные предположения.

### Технологические эпохи электроники

Развитие любой отрасли науки и техники в историческом плане похоже на развитие всех видов органической жизни (растительной, животной, человеческой) в том смысле, что осуществляется через смену поколений. Каждое новое поколение зарождается, проходит стадию младенчества, юности. Достигнув стадии расцвета, зрелости, поколение неизбежно доходит до предела своих функциональных возможностей и начинает угасать. На этом этапе и зарождается следующее поколение. Новое поколение, хотя и возникает в недрах угасающего поколения, однако похоже на него лишь в плане реализации сходных функций. По внешним же признакам (используемые материалы, технология изготовления, внешний вид, наконец) новое поколение, как правило, резко отличается от предшествующего. А по своим функциональным возможностям превосходит его многократно. Но это превосходство достигается не сразу.

На стадии младенчества новое поколение демонстрирует свои потенциальные возможности лишь по ограниченному числу функциональных направлений. При этом, как правило, "младенческое" поколение уступает "зрелому", все еще цветущему поколению по таким важнейшим показателям, как надежность, технологичность, широта диапазона реализуемых функций. И это продолжается до тех пор, пока не получит необходимое развитие соответствующая технологическая база.

Совокупность нескольких технологических поколений, базирующихся на использовании единого базового принципа функционирования, сходных материалов и технологических процессов, образует технологическую эпоху. Технологическая эпоха, как и технологическое поколение, также зарождается, достигает расцвета, достигает предела своих возможностей и неизбежно завершается.

В области электроники первой развитой технологической эпохой была эпоха электровакуумных приборов. В рамках этой эпохи первое поколение электронных ламп огромных (по современным представлениям) размеров сменилась поколением

более компактных металлических ламп, на смену которым пришло поколение "пальчиковых" ламп. На этом поколении эпоха электровакуумных приборов завершилась и началась эпоха твердотельной электроники, развитие и существование которой реализовались также через череду нескольких поколений.

В первом поколении использовались схемы с традиционными радиодетальными и лишь активные элементы — транзисторы и диоды — были полупроводниковыми. Затем появилось поколение гибридных электронных схем, в которых уже не было "навесных" элементов. На этой стадии появился и закрепился термин "твердотельная" электроника. Этим термином фиксировалась та принципиальная особенность электронных схем, что все рабочие области всех компонентов, как активных, так и пассивных, реализованы на базе локальных участков твердого тела. После того, как получило бурное развитие поколение "сверхбольших" интегральных схем (СБИС), термин "твердотельная" постепенно перестал использоваться, поскольку стал самоочевидным. И вместо него стали применять термин *микрoeлектроника*, в сути которого лежит тот простой факт, что геометрические размеры отдельных элементов современных СБИС измеряются единицами микрометра и менее.

### Граничное поколение эпохи твердотельной электроники

С самого зарождения поколения СБИС, базирующихся на МОП-структурах, основные усилия по совершенствованию технологической базы были направлены на дальнейшее уменьшение размеров МОП-элементов. Это обусловлено несколькими факторами. Основной выигрыш стремились получить за счет уменьшения длины канала, поскольку скорость переключения транзистора повышается пропорционально  $1/l^2$ , где  $l$  — длина канала. Стремление уменьшить длину канала стимулирует усилия по постоянному уменьшению всех геометрических размеров транзистора. Во-первых, установлено, что масштабное уменьшение размеров транзистора не может носить случайный характер. Между размерами основных рабочих областей должны существовать оптимальные пропорции. Это показано в пионерской работе Деннарда (Dennard R. H.) с коллегами еще в 1974 г. [1]. В настоящее время согласно документу ITRS [2] масштабирование (Scaling) осуществляется в пропорциях, представленных в табл. 1.

Во-вторых, уменьшение размеров приводит к дополнительным положительным эффектам. Так, с уменьшением длины канала линейно возрастает переключающая способность транзистора. Вход-

Таблица 1

Масштабирование МОП-транзисторов согласно ITRS

| Проектные нормы длины канала, нм | 250     | 180     | 130     | 100     | 70      |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Толщина оксида, нм               | 4—5     | 3—4     | 2—3     | 1,5—2   | < 1,5   |
| Глубина $p$ - $n$ -переходов, нм | 50—1000 | 36—72   | 26—52   | 20—40   | 15—30   |
| Напряжение питания, В            | 1,8—2,5 | 1,5—1,8 | 1,2—1,5 | 0,9—1,2 | 0,6—0,9 |
| Ток утечки, нА/мкм               | 1       | 1       | 3       | 3       | 10      |
| Нагрузочная способность, мА/мкм  | 600/280 | 600/280 | 600/280 | 600/280 | 600/280 |
| Мощность/кристалл, Вт            | 70      | 93      | 121     | 120     | 114     |

ной ток, требуемый для переключения устройства, снижается с уменьшением площади затвора, а последняя, естественно, уменьшается с уменьшением длины канала. При снижении площади уменьшаются паразитные емкости и общее энергопотребление СБИС. Одновременно существенно улучшаются и экономические показатели процесса производства СБИС. Чем больше устройств можно разместить на одном кристалле, тем выше потенциальная прибыль, получаемая от продаж. Более наглядно это можно представить в виде затрат (в долларах) на единичный транзистор, как это показано на рис. 1, где отображен характер тех изменений всех основных показателей, которые являются следствием постоянно действующей тенденцией уменьшения размеров МОП-структур [3].

Как видно на рис. 1, в результате тенденции к постоянному уменьшению размеров транзисторов непрерывно возрастает число транзисторов, размещаемых на одном квадратном сантиметре (линия  $B$ ) и общее число транзисторов, размещаемых на кристалле (линия  $A$ ). Как следствие, неуклонно снижаются функциональные затраты (долл./транзистор — линия  $F$ ) и, естественно, растут доходы производителей твердотельной электроники. На рисунке приведены кривые дохода (линия  $P$ ), капитальных вложений (линия  $C$ ) и стоимости изготовления (долл./см<sup>2</sup> — линия  $S$ ).

Таким образом, за последние 30 лет длина канала МОП-транзистора уменьшилась в 200 раз (с 10 мкм в начале 70-х годов до 60 нм в наши дни). В настоящее время коммерчески доступной является технология с минимальными горизонтальными размерами элементов 0,13 мкм, позволившая реализовать массовое производство микропроцессоров Intel Pentium 4 с тактовой частотой более 2,5 ГГц на МОП-транзисторах с длиной канала 60 нм и толщиной подзатворного оксида 1,5 нм [4].

Однако переход от микроразмеров к наноразмерам породил новые технологические проблемы,

которые приходится решать для обеспечения теоретически прогнозируемых характеристик транзисторов. По существу складывается ситуация "Тришкиного кафтана" — любое улучшение одних параметров приводит к ухудшению других, причем с уменьшением размеров взаимное влияние параметров становится все более сильным.

С ростом степени интеграции СБИС и систем на кристалле увеличивается доля чипов, содержащих аналоговые блоки, которые обеспечивают взаимодействие с окружающим миром, необходимое для крупных и функционально законченных систем. Между тем, к транзисторам для аналоговых и цифровых применений предъявляются противоречивые требования. Для цифровых СБИС пороговое напряжение нельзя снижать неограниченно, поскольку при этом увеличивается подпороговый ток, который определяет потребление энергии СБИС в неактивном состоянии. Верхний предел порогового напряжения ограничивается четвертью от напряжения питания [5], которое стараются снизить для уменьшения потребляемой

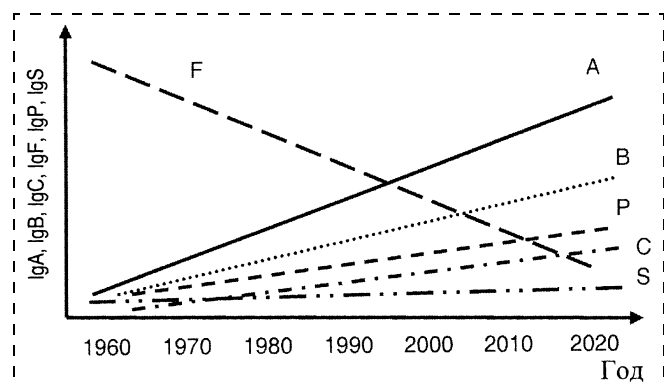


Рис. 1. Характер изменения основных показателей процесса производства СБИС:

$A$  — общее число транзисторов, размещаемых на кристалле;  $B$  — число транзисторов, размещаемых на 1 см<sup>2</sup>;  $C$  — капитальные вложения;  $F$  — функциональные затраты;  $P$  — доход;  $S$  — стоимость

мощности. Однако для аналоговых схем идеальным является нулевое пороговое напряжение  $U_t = 0$ , что увеличивает динамический диапазон аналоговой схемы, определяемый разностью между напряжением на затворе и  $U_t$ , т. е.  $(U_{gs} - U_t)$ .

Особыми требованиями к "аналоговым" транзисторам являются также повышенная нагрузочная способность (ток стока в режиме насыщения), линейность и малые нелинейные искажения на малом сигнале. Для дифференциальных каскадов и токового зеркала важна согласованность характеристик транзисторов.

Основными проблемами микроминиатюризации МОП-транзисторов являются туннелирование через затвор, инжекция горячих носителей в оксид, прокол между истоком и стоком, утечки в подпороговой области, уменьшение подвижности носителей в канале, увеличение последовательного сопротивления между истоком и стоком, обеспечение запаса между пороговым напряжением и напряжением питания. Транзистор должен иметь слабую зависимость порогового напряжения от напряжения на стоке, от длины и ширины канала, а также большую передаточную проводимость, большое выходное сопротивление, малое сопротивление областей истока и стока и большую нагрузочную способность. Емкости затвора и  $p-n$ -переходов должны быть минимальны. Разброс параметров техпроцесса, который растет с уменьшением размеров транзистора, не должен снижать процент выхода годных кристаллов.

### Границы действия закона Мура

Начнем, прежде всего, с характера основной тенденции, которая на рис. 1 представлена линией  $B$  и известна как закон Мура, сформулированный им в 1965 г. [6]. Гордон Мур (Gordon Moore) в 1965 г. в процессе подготовки выступления сделал весьма знаменательное наблюдение. Представив в виде графика рост производительности запоминающих микросхем, он обнаружил любопытную закономерность: новые модели микросхем разрабатывались спустя более-менее одинаковые периоды продолжительностью 18 месяцев после появления их предшественников, а емкость их при этом возрастала каждый раз примерно вдвое. Если такая тенденция продолжится, заключил Мур, то мощность вычислительных устройств экспоненциально возрастет на протяжении относительно короткого интервала времени.

Наблюдение Мура, еще не возведенное в то время в ранг закона, впоследствии блестяще подтвердилось, а обнаруженная им закономерность наблюдается и в наши дни, причем с поразительной точностью, являясь основой для многочисленных

прогнозов роста производительности. За 30 лет, истекшие с момента появления микропроцессора 4004 в 1971 г. и вплоть до выпуска процессора Pentium® 4, число транзисторов выросло более чем в 18 000 раз: с 2 300 до 42 млн. Подробнее эта тенденция представлена в табл. 2.

В настоящее время, когда резко обострились технологические проблемы, связанные с поисками путей дальнейшего уменьшения размеров транзистора, появилось много публикаций, в которых с той или иной мерой подробностей затрагивается закон Мура. Все авторы сходятся в одном: закономерность, подмеченная Муром, будет сохраняться, по крайней мере, еще 10—15 лет. Но поразительно, что практически никто не отметил некоторых особенностей, связанных с этим законом. Во-первых, это не закон, а всего лишь закономерность. Законом в любой области человеческой деятельности является утверждение, связывающее некую причину (исходное действие) и ее следствие (последствия). В общем случае закон имеет формулировку "если..., то..." Между тем, в утверждении Мура нет посылки "если..." а есть только декларативное заявление на некую закономерность, без указания условий и границ ее применимости.

И сформулировано это утверждение на основе анализа статистических данных по динамике развития лишь одного поколения электронных схем — твердотельных СБИС, базирующихся на МОП-структурах. Конечно, прогнозы, основанные на анализе наблюдаемых трендов, играют важную роль в науке и технике, однако произвольная экстраполяция этих трендов за определенные рамки, как правило, не имеет под собой научного обоснования. Любая закономерность, наблюдаемая на практике, имеет временные и системные границы достоверности. Применительно к закону Мура по-

Таблица 2

Рост числа транзисторов в процессоре

| Процессор             | Год выпуска | Число транзисторов |
|-----------------------|-------------|--------------------|
| 4004                  | 1971        | 2 250              |
| 8008                  | 1972        | 2 500              |
| 8080                  | 1974        | 5 000              |
| 8086                  | 1978        | 29 000             |
| 286                   | 1982        | 120 000            |
| Процессор 386™        | 1985        | 275 000            |
| Процессор 486™ DX     | 1989        | 1 180 000          |
| Процессор Pentium®    | 1993        | 3 100 000          |
| Процессор Pentium II  | 1997        | 7 500 000          |
| Процессор Pentium III | 1999        | 24 000 000         |
| Процессор Pentium 4   | 2000        | 42 000 000         |

ложение этих границ четко не определялось. Что касается временных границ, то в одной из интернетовских публикаций утверждение Мура цитируется в следующем виде: — *"Отныне и навсегда..."* [8]. Таким образом, временные границы были как бы определены. Однако определены неверно. Левая граница (начало действия закономерности) фиксировалась как *отныне*, т. е. с момента провозглашения утверждения, тогда как наблюдаемая закономерность начала проявляться за несколько лет до этого. Ну, а форма фиксации правой границы — *навсегда* — вообще не научна.

На самом деле, левую границу действия закона Мура следует определить так: *с того периода, когда в качестве базовых элементов микроэлектроники стали использоваться СБИС, базирующиеся на МОП-структурах...* и далее по тексту закона Мура.

А для того, чтобы утверждение Мура приобрело, хотя бы по форме, вид закона, его следовало бы сформулировать в следующем виде:

*До тех пор, пока в качестве активных элементов твердотельных СБИС будут использоваться МОП-структуры, число транзисторов на кристалле будет удваиваться каждые два года.*

Но, пожалуй, самым поразительным является тот факт, что замеченная Муром закономерность присуща не только динамике развития в микроэлектронике, а применима в гораздо более широких масштабах. Как показано в работах А. Г. Алексеенко, Р. Р. Бабаяна и И. В. Прангишвили, теоретически никем не доказанный этот закон (ежегодное удвоение реализуемой степени интеграции компонентов внутри чипов ИС) хорошо оправдался и в отношении роста достижимой производительности ЭВМ, и в ряде других областей, основанных на так называемых "критических" технологиях. В конце 90-х годов XX века "критическими" стали молекулярная биология, микромеханика и микросистемная техника. В наше время закону Мура для "критических" технологий стала удовлетворять такая "прорывная" сфера приложения усилий передовых стран, как наноиндустрия. Поэтому **есть основание считать закон Мура экономическим правилом, описывающим динамику развития революционных наукоемких сфер человеческой деятельности** [9, 10].

Какие же факторы лежат в основе действия этого экономического правила? Можно указать, по крайней мере, четыре из них. Первый фактор состоит в системной сущности самого человеческого сообщества. От всех других живых существ человеческое сообщество принципиально отличается тем, что любые его потребности как в материальной, так и в духовной сфере никогда не могут быть удовлетворены. Каждая удовлетворенная в опреде-

ленном объеме потребность неизбежно порождает новую потребность, примерно в удвоенном объеме. Естественно, что прирост этот измеряется не только в количественном, но и в качественном выражении. Так, рост производительности компьютеров порождает повышенную потребность во все более совершенном программном обеспечении, и наоборот и т. п.

Вторым фактором является системная сущность всех современных технологий. В любой области современной техники производство все более совершенных изделий стимулирует прогресс в развитии технологической базы. При этом сами же создаваемые изделия обеспечивают материально-техническую основу для этого развития.

Для таких "критических" технологий, как молекулярная биология, микромеханика и микросистемная техника, а в последние годы и наноиндустрия, третьим, весьма важным, фактором является национальная стратегическая инициатива. Как отмечалось в работах А. Г. Алексеенко, Р. Р. Бабаяна и И. В. Прангишвили, перечисленные выше области деятельности характеризуются ежегодным удвоением объема капиталовложений в развитых странах и в ряде случаев наличием приоритетных целевых национальных программ.

И, наконец, четвертым (last, but no least!), возможно главным, фактором является рыночный механизм воздействия на динамику развития технологий изделий микроэлектроники. Обычно в работах, посвященных анализу динамики развития технологий, этот механизм не рассматривается, поэтому целесообразно остановиться на нем подробнее.

#### **Рыночный механизм управления динамикой развития технологии производства электронных схем**

Тенденция к увеличению числа активных элементов, используемых в одном устройстве, присуща не только твердотельным СБИС, но и любым электронным системам, базирующимся на любой концептуальной основе. Достаточно вспомнить эпоху электровакуумной электроники. В ту пору интеллектуальную мощность устройств также стремились повышать за счет наращивания числа активных элементов. Ярким примером тому служит знаменитая серия вычислительных машин от БЭСМ-1 до БЭСМ-4. И прогнозы в ту пору строились на той же концептуальной основе — путем простой экстраполяции наблюдаемых тенденций. Любопытным примером такого прогноза является вычислительная машина ЭПИКАК XIV, описанная К. Воннегутом в фантастическом романе "Утопия 14" [7]. Стоила эта ЭВМ 9 млрд долл., занимала 32 огромных зала в глубинах Карлсбадских пещер,

причем только в одном из этих залов проводов было столько, что хватило бы покрыть четыре раза расстояние от Земли до Луны. В одной этой машине электронных ламп было больше, чем их было во всем штате Нью-Йорк перед второй мировой войной. Этот сверхгигант (по Воннегуту) обеспечивал управление всей промышленностью Америки — чем не "Супер-Пентиум 14"?

Итак, наблюдаемые тенденции в развитии каждого из поколения электронной техники одинаковы — непрерывный рост производительности и функциональных возможностей за счет наращивания числа активных элементов в одном устройстве. И экстенсивное развитие продолжается до тех пор, пока используемая технологическая база в своем развитии не упирается в непреодолимую стену законов природы. Но, чтобы считать, что подобная тенденция существует, необходимо установить, имеется ли объективная причина, обуславливающая эту закономерность. Авторы тех работ, где упоминается закон Мура, в качестве одной из причин действия этого закона называют стремление производителей полупроводниковых приборов непрерывно наращивать граничную частоту устройств. Но чем стимулируется само это стремление?

Ответ можно получить, рассмотрев в самом общем виде, на концептуальном уровне, механизм действия рыночных отношений в современном постиндустриальном обществе. На рис. 1 по данным Брауна [1] доход от производства приборов микроэлектроники (линия  $P$ ) возрастает пропорционально росту инвестиций в это производство (линия  $C$ ). Но такая ситуация может иметь место лишь при условии, что рынок не насыщен изделиями данного рода. По мере того, как объемы мирового производства этих изделий возрастают, начинает проявляться непреодолимая закономерность рынка — чем больше возрастает предложение товара, тем больше должна снижаться его продажная цена (рис. 2).

Это положение прекрасно иллюстрируется, например, на рынке услуг сотовой связи. Так, в конце 90-х компания МТС предлагала тарифные пла-

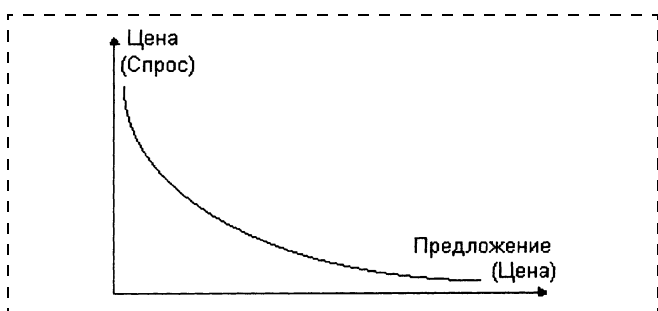


Рис. 2. Взаимосвязь цены, спроса и предложения

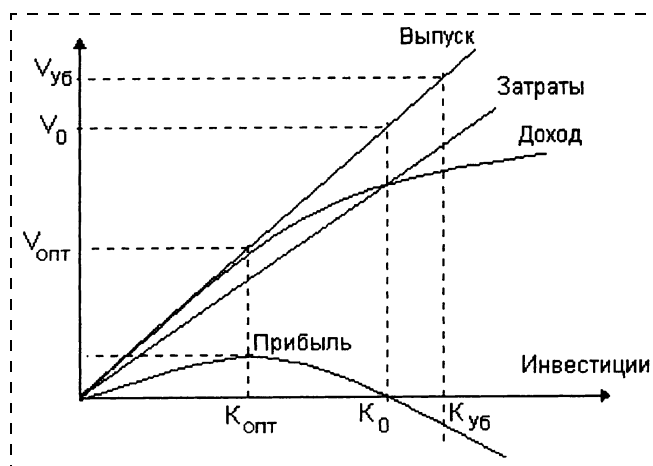


Рис. 3. Взаимосвязь объемов выпуска, прибыли и вовлеченного капитала в рыночной экономике:

$K_{\text{опт}}$  — оптимальный объем инвестиций;  $V_{\text{опт}}$  — оптимальный объем выпуска;  $K_0$  — "бездоходный" объем инвестиций;  $V_0$  — "бездоходный" объем выпуска;  $K_{\text{уб}}$  — убыточный объем инвестиций;  $V_{\text{уб}}$  — убыточный объем выпуска

ны с абонентской платой 40 долл./мес. Затем эта плата снизилась до 10 долл./мес и в настоящее время предлагаются тарифные планы с нулевой абонентской платой. И стимулируется это, отнюдь, не заботой компании об обеспечении услугами сотовой связи беднейших слоев населения, а исключительно стремлением увеличивать объемы продаж в условиях интенсивного насыщения рынка предложениями конкурирующих компаний.

На рис. 3 показано, как эта закономерность управляет производством промышленных товаров и стимулирует непрерывный прогресс в их развитии. Рассматривается ситуация, когда какой-нибудь товар (группа товаров) поставляется на рынок некоторой совокупностью независимых производителей.

Для простоты принято, что общий объем поставляемого товара (**Выпуск**) связан с общим объемом вовлеченных в производство этого товара инвестиций простой линейной зависимостью. Естественно, что аналогичной линейной зависимостью описывается и уровень затрат, необходимый для производства данного товара.

При рассмотрении ансамбля производителей необходимо учитывать влияние общего объема **Выпуска** на уровень рыночной цены на данный товар. Закономерность, представленная на рис. 2, неукоснительно действует в любой ситуации, где имеет место свободный обмен, и цена на выпускаемый товар неуклонно снижается с ростом объема его выпуска. Следовательно, с ростом объема вовлеченных в производство товара инвестиций по мере насыщения рынка темп роста дохода от его реализации будет постоянно снижаться и при ка-

ком-то значении  $K_0$  *Доход* сравнивается с *Расходом*. При этом *Прибыль*, равная разности между этими величинами, станет равной нулю. При дальнейшем увеличении инвестиций производство вообще становится убыточным.

Как видно на рис. 3, существует оптимальное значение вовлеченных инвестиций  $K_{\text{опт}}$ , при которой *Прибыль* достигает своего максимума, а объем *Выпуска* равен величине  $V_{\text{опт}}$ . В условиях рынка на ансамбль производителей однородного товара воздействует один регулировочный параметр — средняя норма прибыли. До той поры, пока объем *Выпуска* не в достаточной степени удовлетворяет потребностям общества, цены на него устанавливаются на достаточно высоком уровне, сбыт не представляет проблем и каждое увеличение *Выпуска* сопровождается приростом получаемой прибыли. Пока такая ситуация сохраняется, к производству данного товара подключаются новые и новые производители, вкладывая новые средства и увеличивая, тем самым, общий объем вовлеченного капитала.

Так происходит до тех пор, пока суммарная величина вовлеченных инвестиций не достигнет значения  $K_{\text{опт}}$ . При этом значении *относительная* величина общей прибыли достигает значения *нормы прибыли*, которая на свободном рынке формируется автоматически и имеет одинаковое значение для всех без исключения товаров, обращающихся на рынке. Преодолеть пороговое значение нормы прибыли, т. е. получить сверхприбыль производитель может двумя способами: за счет совершенствования технологии снизить себестоимость продукта по сравнению с конкурентами или начать производство товара, обладающего более высоким качеством, который можно продавать по более высокой цене.

Первый путь в определенной мере реализуется в процессе постоянного уменьшения геометрических размеров МОП-структур. Что касается второго пути, то для производителей приборов микро-

электроники он в настоящее время имеет определенные особенности. Дело в том, что массовая продукция электронной техники в эпоху высоких технологий — компьютеры, мобильные телефоны, музыкальные центры, домашние кинотеатры и т. п. — приобретаются не столько для удовлетворения жизненных потребностей, а в большей мере ради комфорта, престижности. Это накладывает существенный отпечаток на поведение потребителя.

Потребитель в настоящее время уже располагает достаточно производительной и качественной техникой, которая по большому счету, вполне соответствует его реальным потребностям. Конечно, он не прочь ради комфорта, престижности перейти на новую, более производительную модель. Но это стремление не является столь сильным, чтобы подвигнуть его на весьма существенный прирост стоимости. В результате этого производитель, пытающийся получить сверхприбыль за счет выпуска значительно более дорогих изделий, неизбежно теряет свою долю рынка, со всеми негативными последствиями.

В этих условиях производители приборов микроэлектроники применяют иную ценовую политику. Оставаясь в рамках установившегося ценового коридора, они постоянно увеличивают основные показатели качества выпускаемых изделий, повышая тем самым ценность данного изделия для потребителя. Таким путем они стремятся расширить свою нишу на рынке за счет вытеснения менее расторопных (в плане технологического прогресса) конкурентов.

В доказательство приведенных рассуждений о вынужденном снижении цен на устройства микроэлектроники и о вынужденном дальнейшем сохранении ценового коридора можно было бы построить кривые по данным последних тридцати лет и проследить тенденцию роста показателей качества при относительном сохранении ценовых показателей. Однако достаточно привести лишь один, весьма убедительный пример. В табл. 3 приведены це-

Таблица 3

Цены на компьютерную технику, зима 1990 (совместное советско-франко-итальянское предприятие "ИНТЕРКВАДРО")

| Изделия ВТ                      | Характеристики                               | Цена, долл. |
|---------------------------------|----------------------------------------------|-------------|
| Системные блоки и комплектующие | 286 4.7/10 MHz, 640K RAM, HD20M, FD360K, EGV | 1102,50     |
|                                 | 386 20 MHz, 2M RAM, HD40M, FD 1.2M           | 4363,80     |
|                                 | "Мышь", совместимая с Microsoft Mouse        | 66,15       |
|                                 | Расширение ОЗУ на 1M                         | 331,80      |
| Мониторы                        | Цветной 14" 640 × 350                        | 525,00      |
|                                 | Многочастотный цветной 14" 800 × 600         | 1302,00     |
|                                 | Многочастотный цветной 20" 1024 × 768 64 цв. | 5945,63     |
| Накопители                      | FD 5.25", 360K                               | 193,20      |
|                                 | FD 3.5", 1.44M                               | 236,25      |
|                                 | HD 40M                                       | 724,50      |
|                                 | HD 80M                                       | 1512,00     |

ны не столь далекого прошлого на вычислительную технику [8], качественные показатели которой не устроят сегодня даже сельского школьника.

Таким образом, в эпоху высоких технологий рыночная гонка *количества* переходит в гонку *качества*. Причем это гонка — на выживание. Итак, истинный механизм непрерывного прогресса в области как микроэлектроники, так и в остальных областях техники может быть сформулирован следующим образом:

*Если производитель по темпам развития уровня своей технологической базы отстает от среднестатистических темпов в данной отрасли техники, то он неизбежно теряет свои позиции в своей нише на рынке, и уровень его прибыли неизбежно снижается.*

Снижение доли прибыли естественно уменьшает возможности развития технологической базы. Порочный круг замыкается и этот процесс может завершиться коллапсом, если только ценой невероятных усилий не удастся совершить технологический прорыв за счет удачного выбора принципиально новой технологической стратегии.

Итак, суровые непреодолимые законы рыночных отношений обрекают нас на неизбежный прогресс, который будет продолжаться вечно, пока существует человечество. Мур, по существу, лишь констатировал показатель технического прогресса в СБИС применительно к определенному поколению твердотельной электроники. Но эпоха твердотельной электроники завершается и постепенно сменяется эпохой наноэлектроники, основной особенностью которой является то обстоятельство, что все элементы электронных схем производятся на основе нанотехнологии. В настоящее время пожалуй, еще не существует канонического определения понятия "нанотехнология", и в данной работе будем применять это понятие в том смысле, как это сделано в работе Меслера (Robert W. Messler) [11], где *нанотехнология* определяется как *изучение и использование материалов в нанометровом диапазоне размеров*.

#### От твердотельной электроники к наноэлектронике — смена эпох

Исходя из данного выше определения последнее поколение эпохи твердотельной электроники является в то же время первым поколением наноэлектроники. Почему собственно нынешнее поколение твердотельной электроники является последним? По причине неизбежного перехода количества в качество. Теперь, когда размеры элементов электронных схем достигли нанометрового диапазона, настала пора переосмыслить такие фундаментальные понятия, как "атом", "вещество", "твердое тело". Классическое определение "...**атом** —

мельчайшая частица химического элемента, сохраняющая его свойства" [12], десятками столетий не вызывало никаких неясностей, пока атом был некой недостижимой по малости размеров величиной. Но теперь, когда толщины изолирующего слоя составляет 5—6 атомных слоев, возникает законный вопрос — какие именно свойства сохраняет атом? Химический элемент *золото* является металлом, обладающим блестящим желтым цветом. Металл пластичен, не поддается коррозии и обладает прекрасной электропроводимостью. А атом золота? В какой мере присущи ему перечисленные свойства?

Кремний — полупроводник. Обладает кристаллической структурой. В его кристаллической решетке атомы располагаются в определенном порядке. А атом кремния? Из одних и тех же атомов углерода состоят уголь, графит и алмаз. Так чьи же свойства сохраняет атом углерода? Возможно, более системным было бы такое определение:

*Атом — мельчайшая частица химического элемента, системообразующие свойства которой определяют (задают?) макросвойства этого элемента.*

Не вызывает вопросов классическое определение вещества. "**Вещество** — вид материи, совокупность дискретных (прерывных) образований, обладающих массой покоя (атомы, молекулы и то, что из них построено)" [12]. Здесь все строго — нельзя ни добавить, ни убавить. Один атом — это вещество. Два, три, пять атомов — тоже вещество. Но при каком минимальном числе атомов это вещество может существовать в виде твердого тела? То есть обладать свойствами, присущими твердому телу?

"**Твердое тело**, характеризуется стабильностью формы и тем, что образующие его атомы совершают малые (тепловые) колебания вокруг фиксированных положений равновесия. Твердые тела делятся на кристаллические и аморфные. В кристаллах существует дальний порядок в расположении атомов и молекул, в аморфных же телах колебания частиц происходят вокруг хаотически расположенных точек" [12].

Вопрос состоит в том — до сколь малых размеров можно уменьшать объем твердого тела, чтобы в этом объеме сохранялись указанные выше свойства? А чтобы заострить вопрос, наряду с указанными свойствами следует добавить, что твердое тело обладает поверхностью — граничным слоем (слоями?) атомов (молекул), макросвойства которой существенно отличаются от свойств "внутренних" участков твердого тела. При достаточно больших объемах твердого тела его макросвойства мало зависят от свойств поверхности, а при исчезающе малых? Несомненно, что существует предел в миниатюризации размеров, после которого оставшаяся часть вещества попросту теряет свойства

твердого тела, переходя в иную, малоизученную ипостась. По крайней мере, ясно одно, что, начиная с какого-то предела, твердое тело теряет свою кристаллическую структуру и становится аморфным. А это неизбежно влечет за собой кардинальное изменение его макроскопических свойств. Алмаз, обладающий кристаллической структурой, — абсолютный изолятор, тогда как аморфный графит является хорошим проводником.

Так что проблема туннелирования электронов через очень тонкий слой изолятора обусловлена не просто недостаточными изолирующими свойствами исходного материала. Структура исходного материала в весьма тонком (толщиной в несколько атомных слоев) слое изменяется. Материал, в конце-концов, теряет присущие ему свойства твердого тела (например, дальний порядок в расположении атомов и молекул). Конечно, можно подобрать такой материал для изолятора, который дольше сохраняет свои свойства с уменьшением толщины. Однако достижимый благодаря этому предел дальнейшего ее уменьшения отодвинется не на много.

Поколение электронных схем, элементы которых, являясь участками твердого тела, имеют нанометровые размеры, можно назвать твердотельной наноэлектроникой. Поколение твердотельной наноэлектроники является последним для эпохи твердотельной электроники и первым для эпохи наноэлектроники. Следующим поколением этой зарождающейся эпохи является поколение, которое можно назвать кластерной наноэлектроникой.

Относительно недавно обнаружено, что при весьма малом числе атомов вещества могут существовать в виде организованных кластеров. Среди первых таких кластеров были обнаружены нанотрубки [13–15], фуллерены [16] и др. [17]. Несомненно, что в дальнейшем будут обнаружены и другие организованные кластеры. Следует подчеркнуть, что организованный кластер (например, нанотрубка или фуллерен) — это не просто элемент твердого тела. Считается, что это молекула. Но напрашивается представление, что на самом деле это автономное твердое тело, состоящее только из поверхностного слоя, т. е. не имеющее "внутренних" областей. Ряд замечательных свойств, которыми обладают организованные кластеры, делает их весьма привлекательными для использования в качестве исходных "строительных" элементов при создании электронных схем. Таким образом, и зарождается новое поколение эпохи наноэлектроники — кластерная наноэлектроника.

А на горизонте уже следующее поколение эпохи наноэлектроники — молекулярная наноэлектроника [18, 19].

Естественно, что имеющаяся могучая технологическая база по производству элементов твердотельной электроники стимулирует усилия по продлению срока жизни этого направления при сохранении высоких темпов прогресса в дальнейшем улучшении показателей качества. Разработки по преодолению проблем, возникающих в граничных областях существования рабочих областей элементов как участков твердых тел, ведутся в двух основных направлениях — усовершенствовании структуры транзистора и поиске новых материалов. В рамках данной статьи не представляется возможным дать исчерпывающий обзор состояния дел по этим направлениям. Да и надобности в этом нет, поскольку обзоров на эту тему опубликовано достаточно.

Какое из поколений получит наибольшее развитие в последующие десятилетие, зависит не только от достижений науки и технологии, но и от экономических показателей предлагаемых технологических решений. В конце-концов, победить направление, приносящее производителям электронной техники наибольшую прибыль.

#### Список литературы

1. Dennard R. H. et al. // IEEE. J. Solid-State Circuits, SC-9. 1974, 256 p.
2. International Technology Roadmap for Semi-conductor (ITRS). 2001 Edition // Semiconductor Industry Association, 2003.
3. Brown G. A. et al. Scaling CMOS: materials & devices // Materialstoday, January 2004. P. 20–25.
4. Thompson S. et al. 130 nm Logic Technology Featuring 60 nm Transistors, Low-K Dielectrics, and Cu Interconnects // Intel Technology Journal. 2002. V. 6. N 2. P. 5–13.
5. Thompson S. et al. MOS scaling: Transistor challenges for 21st century // Intel Technology Journal. 1998. V. Q3. P. 1–19.
6. Moore G. E. Electronics, 1965. 114 p.
7. Воннегут К. Утопия 14. М.: Молодая гвардия. 1967. 398 с.
8. Кублаханов И. Жертвы закона Мура // Интернет, апрель 2001. № 30.
9. Алексеев А. Г. Наноиндустрия как научно-техническая основа микросистем // Chip News — инженерная микроэлектроника. 2001. № 9(62). С. 55–57.
10. Прангишвили И. В., Алексеев А. Г., Бабаев Р. Р. Нанотехника, наноиндустрия, микросистемы // Датчики и системы. 2002. № 7. С. 57–65.
11. Messler R. W. Grows of a new discipline // Materialstoday, March. 2004. P. 44–47.
12. Советский энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия. 1985.
13. Минаев В. В., Неволин В. К., Петрик В. И. Нанотрубки из углеродной смеси высокой реакционной способности // Микросистемная техника. 2002. № 1. С. 41–42.
14. Принц В. Я., Селезнев В. А., Чеховский А. В. Самоформирующиеся полупроводниковые микро- и нанотрубки // Микросистемная техника. 2003. № 3. С. 29–34.
15. Дьячков П. Н. Углеродные нанотрубки — материалы для компьютеров XXI века // Природа. № 11. 2000. С. 23–30.
16. Kroto H. et al. // Nature. 1985. N 318. P. 162.
17. Zhong Lin Wang. Nanostructures of zinc oxide // Materialstoday, June 2004. P. 26.
18. Санько С. Транзисторы на единичных атомах // Интернет-газета "Компьютерные вести On-Line. 2002. № 23. <http://www.kv.by/index2002233403.htm>.
19. Бобринецкий И. И., Гирфанова Н. А., Неволин В. К. Новый тип нанопроводных приборов // Микросистемная техника. 2003. № 10. С. 42–43.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 621.3

Л. Ф. Фомин,  
Институт проблем механики  
Российской академии наук

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУЛЬСИРУЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ ГИБКИХ МИКРООБЪЕКТОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

*Приводятся результаты исследований по микромеханике самопродвижений в вязкой жидкости гибких деформируемых микрообъектов за счет возбуждения пульсирующих колебаний их формы. Рассматриваются движения с осевой симметрией.*

### Введение

Для целей позиционирования микрообъектов обычно предлагается использовать пьезоэлектрические, индуктивные, электростатические и многие другие двигатели, принцип действия которых основан не только на взаимодействии электрических и магнитных полей, но и на использовании электростатических сил, на том, что некоторые материалы при их нагревании или охлаждении, при прохождении через них электрического тока или при других воздействиях деформируются, изгибаются, сжимаются или удлиняются, а также на использовании других физических явлений и эффектов [1]. Интенсивное развитие нанотехнологий и нанохимии, наблюдаемое в последние годы, способствует открытиям новых эффектов и новых материалов и частиц, элементы которых обладают способностью изгибаться, сокращаться или удлиняться под действием внешнего электромагнитного поля. В связи с развитием техники сканирующих микроскопов ближнего поля и атомно-силовых микроскопов с оптоволоконными зондами большое внимание уделяется исследованиям флуктуационных движений наночастиц в условиях воздействия электромагнитного поля и пониманию природы возникающих при этом флуктуационно-диссипативных сил [2, 3]. Однако сами наночастицы считаются твердыми, недеформируемыми. В предлагаемой статье проводятся анализ и теоретическое исследование более общего случая позиционирования наночастиц с помощью использования возможности взаимодействия с электромагнитными

полями гибких, первоначально почти сферических, деформируемых наночастиц, в которых при их взаимодействии с внешними электромагнитными полями могут генерироваться разнообразные моды пульсирующих деформационных колебаний формы или оболочки наночастиц, способствующие перемещениям наночастиц в окружающей вязкой жидкости и их позиционированию соответственно с целями современных нанотехнологий.

### Постановка задачи

Рассматривается задача самопродвижения в вязкой несжимаемой жидкости под действием внешних электромагнитных полей гибкой деформируемой наночастицы с герметичной оболочкой, первоначально имеющей почти сферическую или эллипсоидальную форму.

Задача рассматривается в двумерной постановке в плоскости  $x, y$  с переходом к осесимметричной постановке задачи в полярных или сферических полярных координатах  $(r, \theta)$ :  $x = r \cos \theta$ ,  $y = r \sin \theta$ . При этом вектор скорости движения  $\mathbf{v}$  имеет две компоненты:  $v_r$  — в направлении радиуса  $r$  и  $v_\theta$  — в перпендикулярном к радиусу направлении  $\theta$ .

Учитывая малые скорости  $U$  движения наночастиц и их малые размеры с диаметром  $d$  как характерным размером, их движение в несжимаемой вязкой жидкости с динамическим коэффициентом вязкости  $\mu$  (или кинематическим коэффициентом  $\nu = \mu/\rho$ , где  $\rho$  — плотность) будет происходить при таких малых числах Рейнольдса

$$Re = \rho U d / \mu = U d / \nu < 10^{-4},$$

что влиянием инерционных эффектов можно пренебречь.

### Уравнения движения

Обозначив через  $p$  давление, векторные уравнения медленных движений деформируемой наночастицы в вязкой несжимаемой жидкости запишутся в следующем виде:

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0;$$

$$\operatorname{grad} p = \mu \nabla^2 \mathbf{v}. \quad (1)$$

Рассматривая только осесимметричную задачу, в сферических полярных координатах  $(r, \theta)$  система уравнений движения (1) примет вид

$$\partial(r^2 v_r \sin \theta) / \partial r + \partial(r^2 v_\theta \sin \theta) / (r \partial \theta) = 0; \\ \nabla^4(r v_r) = 0. \quad (2)$$

Решение полученной системы уравнений движения пульсирующей наночастицы может быть получено аналитическим путем с помощью разложения искомых функций либо в ряды Фурье, либо используя полиномы Лежандра, либо с помощью разложения в степенные ряды.

При исследовании задачи с помощью рядов на основе полиномов Лежандра положительной целой степени [4–6] для рассматриваемых нами действительных значений аргумента используем следующее тригонометрическое представление полиномов Лежандра  $P_n(\cos \theta)$ :

$$P_n(\cos \theta) = 2 \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \dots (2n-1)}{2^n \cdot n!} \times \\ \times \left[ \cos n\theta + \frac{1}{1} \cdot \frac{n}{2n-1} \cos(n-2)\theta + \right. \\ \left. + \frac{1 \cdot 3}{1 \cdot 2} \frac{n(n-1)}{(2n-1)(2n-3)} \cos(n-4)\theta + \right. \\ \left. + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{1 \cdot 2 \cdot 3} \frac{n(n-1)(n-2)}{(2n-1)(2n-3)(2n-5)} \cos(n-6)\theta + \dots \right] \quad (3)$$

Кроме полиномов Лежандра  $P_n(\cos \theta)$  для решения системы уравнений (2) необходимы еще полиномы  $W_n$  некоторого специального вида, связанные с присоединенными функциями Лежандра 1-го рода  $P_n^1(\cos \theta) = \sin \theta$  и определяемые следующим уравнением:

$$W_n = (2/\sin \theta) \int_{\cos \theta}^1 P_n(t) dt = \\ = [2/n(n+1)] P_n'(\cos \theta) \sin \theta = \\ = -[2/n(n+1)] P_n^1(\cos \theta). \quad (4)$$

Для всех  $n \geq 1$  функция  $W_n$  является нечетной функцией от  $\theta$ , обращающейся в нуль при  $\theta = \pi$  и при  $\theta = 0$ .

С помощью введенных полиномов можно подбирать некоторые частные простейшие значения для последовательных приближений компонент вектора скорости  $v_r$ ,  $v_\theta$ , удовлетворяющие системе (2). Для получения общего решения заметим, что в рассматриваемом нами случае осесимметричного движения компонента вектора скорости  $v_r$  должна быть четной функцией от  $\theta$ , а компонента вектора скорости  $v_\theta$  — нечетной. Отсюда следует, что их значения на поверхности сферического деформируемого объекта радиуса  $a = d/2$  также могут быть разложены в ряды вида

$$(v_r)_{r=a} = \sum_0^\infty A_n(t) P_n(\cos \theta); \\ (v_\theta)_{r=a} = \sum_1^\infty B_n(t) P_n(\sin \theta). \quad (5)$$

В качестве коэффициентов  $A_n(t)$ ,  $B_n(t)$  могут быть взяты полиномы Лежандра первого и второго рода или присоединенные функции Лежандра 1-го и 2-го рода, а также их комбинации, обеспечивающие возможность получения разнообразных гармоник колебаний и деформаций формы наночастицы или волновых движений элементов ее гибкой оболочки.

Для получения движений с конечным значением полной энергии системы принято считать, что начало координат полярно-сферической системы координат только приближенно находится в центре деформируемого объекта и может совершать вдоль оси симметрии движения со скоростью

$$U = (1/3)[2B_1 - A_1]. \quad (6)$$

Для рассматриваемых нами медленных ползущих движений добавление таких перемещений начала координат не влияет на решение уравнений (2), но теперь к компонентам скорости в качестве составляющих необходимо добавлять следующие добавочные значения:

$$v_r = -U \cos \theta, \quad v_\theta = U \sin \theta. \quad (7)$$

Учитывая (4), (6), (7), общее решение системы уравнений движения (2) можно представить в следующем виде:

$$v_r = -U \cos \theta + A_0(a/r)^2 + \\ + (2/3)(A_1 + B_1)(a/r)^3 \cos \theta + \sum_{n=2}^\infty \{ [0,5n(a/r)^n - \\ - (0,5n-1)(a/r)^{n+2}] A_n(t) P_n(\cos \theta) + \\ + [(a/r)^{n+2} - (a/r)^n] B_n(t) P_n(\cos \theta) \}; \quad (8)$$

$$v_\theta = U \sin \theta + (1/3)(A_1 + B_1)(a/r)^3 \sin \theta + \\ + \sum_{n=2}^\infty \{ [(0,5n(a/r)^{n+2} - (0,5n-1)(a/r)^n] \times \\ \times B_n(t) W_n(\cos \theta) + 0,5n(0,5n-1) \times \\ \times [(a/r)^n - (a/r)^{n+2}] A_n(t) W_n(\cos \theta) \};$$

$$p = \mu \sum_{n=2}^\infty [(2n-1)/(n+1)(nA_n(t) - \\ - 2B_n(t)[d^n/(2^n r^{n+1})] P_n(\cos \theta)).$$

Полное сопротивление гибкой наночастицы при ее перемещениях в вязкой среде является суммой радиальных и тангенциальных напряжений на ее поверхности. Радиальные  $\sigma_{rr}$  и тангенциальные  $\sigma_{r\theta}$  напряжения на поверхности наночастицы при ее взаимодействии с окружающей средой определяются выражениями

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= p - 2\mu(\partial v_r/\partial r); \\ \sigma_{r\theta} &= -\mu\{r[\partial(v_\theta/r)/\partial r] + (1/r)(\partial v_r/\partial \theta)\}.\end{aligned}\quad (9)$$

При этом сопротивление от радиальных напряжений называется сопротивлением формы или профиля, а сопротивление от тангенциальных или поверхностных напряжений — поверхностным сопротивлением. Интегрируя отдельно радиальные и отдельно тангенциальные напряжения в (9) по поверхности рассматриваемой гибкой наночастицы, можно заключить, что поверхностное (или вязкое) сопротивление в 2 раза превышает сопротивление формы.

Таким образом, комбинируя моды или гармоники колебаний элементов оболочки наночастицы и ее формы, можно получить сопротивление в некотором направлении меньшим, чем в других направлениях, что обеспечивает возможность ее продвижения [7—10]. Для полного сопротивления рассматриваемых гибких деформируемых наночастиц при их медленных "ползущих" движениях по-прежнему сохраняется известная формула Стокса, выражающая полное сопротивление или равную ему и противоположно направленную движущую силу  $F$  следующей формулой:

$$F = 3\pi\eta U d.$$

### Некоторые основные моды колебаний

Для описания движения некоторой первоначально почти сферической гибкой деформируемой наночастицы предполагаем, что точки ее поверхности в процессе деформации в произвольный момент времени имеют координаты

$$\begin{aligned}R &= a\left[1 + \sum_0^\infty \alpha_n(t) P_n(t)\right]; \\ \Theta &= \theta + \sum_1^\infty \beta_n(t) W_n.\end{aligned}\quad (10)$$

Коэффициенты  $\alpha_n(t)$  и  $\beta_n(t)$  являются колебательными функциями (в частном случае они могут быть и гармоническими колебательными функциями), в любой произвольный момент времени равными поверхностной деформации с присущей

ей соответствующей модой или гармоникой колебаний точек поверхности наночастицы.

Через координаты  $R$ ,  $\Theta$  компоненты вектора скорости перемещений гибкой наночастицы запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned}v_r(R, \Theta) &= \dot{R} = a \sum_0^\infty \dot{\alpha}_n(t) P_n; \\ v_\theta(R, \Theta) &= R\dot{\Theta} = a\left[1 + \sum_0^\infty \alpha_n(t) P_n\right] \sum_1^\infty \dot{\beta}_n(t) W_n.\end{aligned}\quad (11)$$

Рассмотрим некоторые последовательные приближения.

В нулевом приближении, согласно (10), мода  $\beta_0$  отсутствует, а мода  $\alpha_0$  представляет собой равномерные пульсации наночастицы с последовательными увеличениями и уменьшениями ее радиуса.

В первом приближении, учитывающем линейные члены и не учитывающем квадраты и более высокие степени деформаций, граничные условия (11) принимают вид

$$A_n = a \dot{\alpha}_n(t); \quad B_n = a \dot{\beta}_n(t).$$

При этом мода  $\alpha_1 = 0$ , поскольку она представляет колебания или движения относительно начала координат, которые уже учтены введением подвижной системы координат и соответствующими добавками (7) к компонентам вектора скорости движения. Для скорости  $U$  перемещения начала координат при этом имеется ограничение:

$$U = (2/3) a \dot{\beta}_1(t).$$

Таким образом, в первом приближении единственной модой остается  $\beta_1$ , обеспечивающая лишь бесконечно малые перемещения гибкой наночастицы и представляющая собой тангенциальные движения оболочки без изменения формы, а выражения (10) принимают вид

$$R = a; \quad \Theta = \theta + \beta_1 \sin\theta.$$

Перемещения гибкой наночастицы со скоростями конечной величины возможны только с учетом квадратов и более высоких степеней деформаций, т. е. начиная со второго и более высоких приближений [8—10].

Второе приближение уже учитывает все начальные члены, включая квадраты деформаций, но не учитывает кубы и более высокие степени деформаций.

При этом скорость перемещения гибкой наночастицы уже не является точной производной по времени от колебательных функций, как в предыдущих случаях нулевого и первого приближения, и

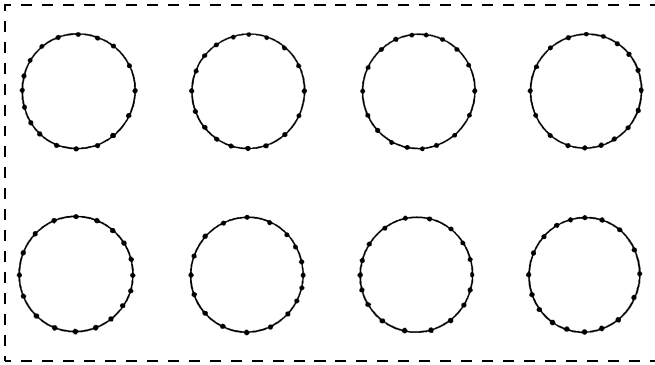


Рис. 1. Поверхностные деформации гибкой наночастицы при действии моды  $\beta_1\beta_2$

возможен подходящий выбор комбинаций различных мод колебаний для обеспечения наиболее оптимальных перемещений. Можно ограничиться деформациями, состоящими из двух мод, например,  $\alpha_2\beta_3$ ,  $\alpha_0\beta_1$ ,  $\alpha_3\beta_4$ ,  $\alpha_4\beta_5$ ,  $\beta_1\alpha_2$ ,  $\beta_2\alpha_3$ ,  $\beta_3\alpha_4$ ,  $\beta_1\beta_2$ ,  $\beta_2\beta_3$ ,  $\beta_3\beta_4$ , но можно добавлять к ним также еще одну или несколько мод. Для третьего и более высоких приближений выбор неизмеримо увеличивается.

Из всего бесконечного разнообразия возможных мод колебаний или мод деформаций элементов гибкой оболочки или формы деформируемой гибкой наночастицы в данной работе рассматриваются только моды  $\alpha_0\beta_1$  и  $\beta_1\beta_2$ .

Некоторые двумерные состояния или конфигурации гибкой деформируемой наночастицы при подобных деформационных колебаниях в плоскости  $x, y$  представлены на рис. 1 и 2.

Деформации, соответствующие моде  $\alpha_0\beta_1$ , определяются на основании выражений (10) и могут быть записаны в виде следующих формул:

$$R = a[1 + 0,202 \cos(2\pi t/T)];$$

$$\Theta = \theta + 0,265 \sin \theta \sin(2\pi t/T).$$

При этом средняя скорость перемещений определяется выражением

$$U = 0,11a/T.$$

Деформации, соответствующие моде  $\beta_1\beta_2$ , записываются в виде следующих формул:

$$R = a;$$

$$\Theta = \theta + 0,214 \sin \theta \cos(2\pi t/T) + 0,127 \sin 2\theta \sin(2\pi t/T).$$

При этом средняя скорость перемещений определяется выражением

$$U = 0,09a/T.$$

## Выводы

Показано, что гибкая деформируемая наночастица первоначально почти сферической или эл-

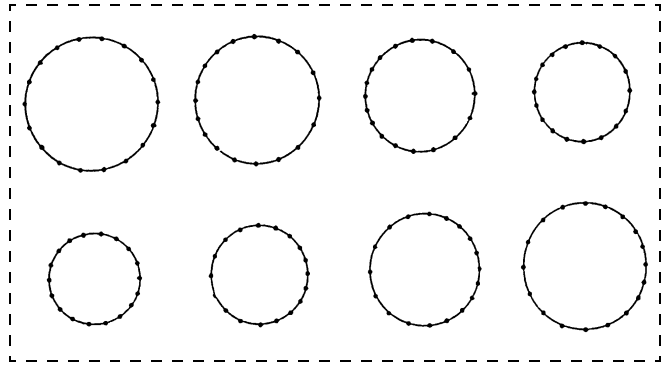


Рис. 2. Совместное действие радиальных пульсаций и тангенциальных деформаций для моды  $\alpha_0\beta_1$

липсоидальной формы может осуществлять самопередвижения и самопозиционирование в вязкой окружающей среде, если в ней за счет внешнего электромагнитного поля генерируются пульсирующие колебания или волновые деформации ее формы и элементов ее гибкой оболочки.

Проведен предварительный асимптотический анализ движения пульсирующей за счет внешнего электромагнитного поля почти сферической наночастицы в двумерном случае осесимметричной задачи на основе применения полиномов Лежандра.

*Работа выполнялась в рамках Федеральной целевой научно-технической программы Минпромнауки на 2003—2006 гг. по разделу "Фундаментальные исследования в области физических наук", тема "Закономерности движения объектов в микромеханике".*

## Список литературы

1. Дятлов В. Л., Косцов Э. Г. Высокоэнергоёмкие микро-двигатели на основе тонких сегнетоэлектрических пленок // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 22—31.
2. Полевой В. Г. Тангенциальные молекулярные силы между движущимися телами, обусловленные флуктуационным электромагнитным полем // ЖЭТФ. 1990. Т. 98. Вып. 6(12). С. 1990—1999.
3. Дедков Г. В., Кясов А. А. Диссипативные флуктуационные силы и поток тепла между зондом сканирующего зондового микроскопа и поверхностью // Микросистемная техника. 2003. № 3. С. 29—34.
4. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. М.: Наука, 1968. 344 с.
5. Уиттекер Э. Т., Ватсон Дж. Н. Курс современного анализа. В 2-х ч.: Пер. с англ. Изд. 3-е, стереотипное. М.: Едиториал УРСС, 2002. 856 с.
6. Lighthill M. J. On the squirming motion of nearly spherical deformable bodies through liquids at very small Reynolds numbers // Communications on Pure and Applied Mathematics. 1952. Vol. 5. N 2. P. 109—118.
7. Blake J. R. A spherical envelope approach to ciliary propulsion // J. Fluid Mech. 1971. Vol. 46. N 1. P. 199—208.
8. Taylor G. I. Analysis of the swimming of microscopic organisms // Proc. Royal Soc. Ser. A. 1951. Vol. A209. N 1099. P. 447—461.
9. Фомин Л. Ф. Движущий эффект колебаний в микромеханике // Микросистемная техника. 2002. № 10. С. 26—30.
10. Фомин Л. Ф. Моделирование плавания микророботов // Микросистемная техника. 2003. № 5. С. 30—34.

УДК 621.38

**В. В. Ерохин**, канд. техн. наук, доц.,  
ООО "Новэлком"

## ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ: ПРОЦЕССОРЫ

*Рассматриваются современные тенденции в развитии процессорных ядер, используемых при построении систем на кристалле. Обсуждаются характерные особенности как традиционных процессоров, используемых в системах на кристалле, так и процессоров, разработанных специально для СНК.*

Самой необходимой частью любой системы на кристалле (СНК) является его процессорное ядро. Поэтому к процессорам, применяемым в СНК, предъявляются специфические требования.

*Во-первых* — это высокая производительность при низких по современным меркам тактовых частотах, так как тактовая частота, повышение которой является одним из возможных способов увеличения производительности в "больших" системах, в СНК ограничена возможностями других компонентов, например памяти. Кроме того, использование буферных устройств, таких как кэш-память, в ряде случаев нецелесообразно в связи с ограниченностью площади кристалла.

*Во-вторых* — это компактность, что опять же вытекает из соображений экономии площади кристалла.

*В-третьих* — это специфические требования к оформлению и условиям поставки процессорного ядра его разработчиком.

По поводу последнего требования необходимо сделать некоторые пояснения.

Одной из тенденций современного развития микроэлектроники является приближение разработки изделия к конечному заказчику. В целом ряде случаев заказчик предпочитает по разным соображениям самостоятельно выполнять разработку СНК, по крайней мере, на уровне поведенческой или даже RTL (register transfer level) модели. В то же время самостоятельно разрабатывать основные блоки СНК часто бывает нецелесообразно. В этом случае можно приобрести такие блоки (СФ-блоки или IP-блоки) у поставщиков, специализирующихся на их разработке. К таким блокам, к которым относятся и процессоры, предъявляются особые требования. Во-первых, они должны поставляться в виде синтезируемого RTL-кода на одном

из языков проектирования аппаратуры (soft IP) или хотя бы в виде топологической конструкции (hard IP), если есть полная уверенность в работоспособности такого модуля. Во-вторых, желательно, чтобы этот блок был инвариантным по отношению к изменениям технологии, и разработчик имел возможность использовать его в дальнейшем. Это накладывает дополнительные требования к оформлению RTL-кода, которые здесь не обсуждаются. Заметим, что СФ-блоки в виде топологической конструкции не являются технологически независимыми.

Описанные требования к процессорным блокам привели к тому, что в настоящее время в СНК используют как ранее известные процессоры с традиционной архитектурой, так и процессорные ядра, специально разработанные для систем на кристалле.

### 1. ПРОЦЕССОРЫ С ТРАДИЦИОННОЙ АРХИТЕКТУРОЙ ДЛЯ СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ

Как правило, разработанные для СНК функциональные аналоги традиционных микропроцессоров отличаются от оригиналов, во-первых, повышенными тактовыми частотами и сокращенным временем выполнения команды в тактах, вплоть до того, что разрабатываются RISC-версии широко известных процессоров.

Во-вторых, другим направлением доработки традиционных архитектур является модификация шинных интерфейсов. Так, в СНК нецелесообразно использовать характерные для обычных процессоров мультиплексированные шины адреса/данных, так как это снижает пропускную способность интерфейсов. Поэтому шины адреса/данных, как правило, демультиплексируются.

Третье изменение по сравнению с обычными процессорами также касается шин. Использование тристабильных шин в СНК нецелесообразно, поэтому, как правило, единая шина данных разделяется на две шины — входных и выходных данных, что также способствует повышению производительности системы.

#### 1.1. 8-битовые процессоры

В системах, не требующих высокой производительности, с успехом применяются функциональные аналоги широко известных микроконтроллерных процессоров, таких как I8051, M6805 и других. Привлекательным для разработчиков систем на кристалле является большое количество разрабо-

танного программного обеспечения и средств отладки: кросс-ассемблеры, кросс-компиляторы, эмуляторы, макетные платы и др.

Рассмотрим как пример 8-разрядные I8051-подобные процессоры для систем на кристалле.

**8-битовый процессор Intel 8051 и его функциональные аналоги.** Основные характеристики I8051:

- центральный 8-битовый процессор, оптимизированный для задач управления;
- большие возможности обработки булевых переменных;
- адресное пространство памяти программ — 64 Кбайта;
- адресное пространство памяти данных — 64 Кбайта;
- 4 Кбайта встроенной памяти программ;
- 128 байтов встроенной оперативной памяти данных;
- 32 двунаправленных индивидуально адресуемых порта ввода — вывода;
- два 16-разрядных таймера/счетчика;
- полнодуплексный универсальный синхронный приемопередатчик;
- двухуровневая система прерываний с шестью источниками;
- встроенный осциллятор;
- набор инструкций, содержащий 256 операционных кодов;
- различные режимы адресации — прямая, косвенная, регистровая, непосредственная, индексная.

**RISC-подобные 8-битовые микроконтроллеры DR8051 и DP8051 (Digital Core Design Corp.).**

DR8051BASE — оптимизированный по быстродействию 8-битовый СФ-блок, специализированный для операций с быстрой памятью программ (обычно встроенной).

Этот СФ-блок полностью совместим по кодам с промышленным стандартом I8051 8-битовым микроконтроллером. DR8051BASE имеет архитектуру RISC, которая в 6,7 раз быстрее в типовых приложениях по сравнению со стандартной архитектурой и может достигать производительности до 65 млн команд в секунду по современным технологиям интегральных схем. Эта производительность дает также большое преимущество в маломощных приложениях, где ядро может быть синхронизировано до 7 раз более медленным сигналом тактирования по сравнению с оригиналом без потери производительности.

**Особенности:**

- полностью программно совместим с промышленным стандартом 8051;
- RISC-архитектура;
- в 6,7 раз более высокая производительность по сравнению со стандартной архитектурой;

- до 256 байт внутренней (встроенной) памяти данных;
- до 64 Кбайт внутренней (встроенной) памяти программы;
- до 16 Мбайт внешней памяти данных (вне кристалла);
- программируемые пользователем задержки сигналов чтения и записи во внешнюю память;
- демultipлексированная шина адреса/данных;
- контроллер прерываний с двумя уровнями приоритетов и двумя источниками прерывания;
- четыре 8-битовых порта ввода — вывода;
- передача данных более чем в 10 раз быстрее, чем в оригинале;
- интерфейс для дополнительных специальных функциональных регистров;
- полностью синтезируемый статический синхронный дизайн с синхронизацией по фронту, отсутствие внутренних тристабильных шин;
- виртуальная частота 1,3 ГГц по технологии 0,35 мкм.

Конвейеризированный 8-битовый микроконтроллер RISC DP8051 отличается от DR8051 более чем в 2 раза более высокой производительностью.

## 1.2. 16-битовые процессоры

Среди 16-разрядных традиционных процессоров при построении СНК практически вне конкуренции находятся различные клоны I80186, что объясняется обилием и доступностью как программного обеспечения, так и всевозможных средств его разработки и отладки.

Процессор Intel 80186 и его аналоги. Для систем на кристалле средней производительности разработаны различные версии популярного процессора I80186, имеющего следующие системные возможности:

- маломощный статический расширенный процессор I8086 (практически это I286, работающий в реальном режиме);
- два независимых последовательных интерфейса с поддержкой ПДП;
- четыре независимых канала ПДП;
- три мультиплексированных порта ввода — вывода;
- два встроенных 8259А-совместимых программируемых контроллера прерывания;
- три программируемых 16-битовых таймера;
- 10 независимых устройств выбора кристаллов, каждый с генератором состояний ожидания;
- устройство регенерации памяти;
- устройство управления мощностью;
- 32-битовый сторожевой таймер;
- блок управления периферией;

- прямая адресуемая память 1 Мбайт и 64 Кбайт портов ввода — вывода;
- режимы работы с энергосбережением:
  - Idle (процессор не работает, периферия включена);
  - Powerdown (процессор и периферия не работают);
  - Powersave (процессор и периферия работают на пониженной частоте);
- поддержка арифметического сопроцессора 80C187.

Аналоги I8086 различных фирм: iCOn186 (*VAutomation*), i386EX (*Intel*), Am186ER (*AMD*), TURBO186 (*VAutomation*), C80186tx (*Evatronix*) полностью совместимы со стандартными *Intel* 80C186 микроконтроллерами.

Каждый из процессоров имеет маломощное статическое расширенное процессорное ядро I8086. TURBO186 имеет оптимизированное ядро (1 такт на инструкцию) и способен работать с синхронной памятью.

## 2. RISC-ПРОЦЕССОРЫ

RISC-процессоры особенно часто используются при построении СНК. Это вполне объясняется соотношением компактности и производительности, которое они обеспечивают. Среди процессоров этой группы, используемых для построения СНК, можно указать как 8-разрядные процессоры с гарвардской архитектурой, например, PIC17 (*Microchip Corp.*), AVR (*Atmel*), так и мощные 32- и 64-разрядные PowerPC (e300, e500, e600, e700) и SPARC. Однако абсолютным лидером по всем показателям является семейство процессоров ARM, доля которых среди RISC-процессоров для СНК достигает 75 % (рис. 1, см. вторую сторону обложки).

С точки зрения российского потребителя использование ARM в СНК сдерживается очень высокой стоимостью лицензии на использование процессоров этой группы. Кроме того, ARM-процессоры поставляются только в виде топологических конструкций (*hard IP*), что практически не позволяет их изготавливать по отечественным технологиям. Повторение же архитектуры ARM в собственных разработках на RTL-уровне сдерживается весьма мощными патентными ограничениями. Тем не менее, возможности семейства ARM настолько замечательны, что их рассмотрению необходимо уделить особое место.

**Процессоры семейств ARM.** Процессоры ARM занимают особую нишу в системах на кристалле. Процессоры ARM — это несколько семейств процессоров, разработанных как для систем с невысо-

кой производительностью, так и для мощных приложений. Спектр возможных приложений процессоров ARM — от мощных систем телекоммуникаций до индивидуальных переносных MPEG-проигрывателей.

На рис. 2 (см. вторую сторону обложки) изображена зависимость тактовых частот, на которых функционируют процессоры различных семейств ARM, от существующих и перспективных технологий.

Обсудим свойства другой, не представленной на рис. 2, новой группы процессоров ARM — ARM10.

Предвидя потребности рынка мультимедиа в цифровых устройствах, ARM разработал семейство расширенных ядер микропроцессора ARM10 с производительностью 390...700 целочисленных MIPS (Dhrystone 2.1) и специализированным сопроцессором с плавающей точкой.

Разработанные специально для встроенных систем реального времени семейство ARM10 идеально подходит для высокоэффективных приложений с низким энергопотреблением типа видеофонов, "умных" телефонов, управления автомобильным и промышленным оборудованием и др.

### **Особенности семейства ARM10:**

ARM1020E: наличие DSP-подобных расширений системы команд, двойной 32-килобайтовой кэш-памяти и полной поддержки MMU, возможность внутрикристалльной отладки — делает его идеальным для Windows-CE, EPOC, Linux и PalmOS.

ARM1022E: двойная кэш-память объемом 16 Кбайт.

VFP10: векторный сопроцессор с плавающей точкой, который совместно с ARM10 может обеспечить производительность до 600 MFLOPS в реальном масштабе времени в приложениях графики, задачах управления в автомобилях и в промышленности.

### **Свойства семейства ARM10**

#### **Высокая производительность:**

- 32-разрядное ядро RISC-процессора с ARM, Thumb и DSP набором команд;
- целочисленный конвейер с шестью стадиями конвейеризации с предсказанием ветвлений достигает 1,3 MIPS/МГц;
- 390 MIPS (Dhrystone 2.1) в типовом процессе 0,15 мкм;
- дополнительный VFP10 сопроцессор обеспечивает работу с плавающей точкой;
- 600 MFLOPS для приложений трехмерной графики, кодирования/декодирования в MPEG-4 и системы управления в реальном масштабе времени;
- двойные 64-битовые АНВ шины и внутренняя 64-битовая шинная архитектура.

#### ✎ **Небольшое энергопотребление:**

- 0,7 мВт/MIPS (0,15 мкм-процесс);
- новые режимы энергосохранения;
- система команд ARM Thumb.

#### ✎ **Поддержка проверенных промышленностью операционных систем:**

- MMU для поддержки Windows-CE, EPOC, Linux, PalmOS;
- оптимизирован для реальных систем памяти;
- двойная 32-килобайтовая кэш-память данных и команд;
- параллельные модули загрузки/сохранения;
- 8-входной буфер записи двойного слова не останавливает процессор при записи во внешнюю память;
- система команд ARM Thumb уменьшает размер памяти и требования к пропускной способности до 35 %;
- высокоэффективная АНВ система с двойными 64-битовыми устройствами управления шиной.

#### ✎ **Система команд Thumb**

Система команд Thumb — расширение 32-разрядной архитектуры ARM. Команды Thumb — подмножество обычно используемых 32-разрядных команд ARM, которые сжаты в 16-разрядные операционные коды. Во время выполнения эти 16-разрядные команды декомпрессируются в 32-разрядные команды ARM в реальном времени без потери производительности.

Проектировщики могут использовать и 16-разрядные и 32-разрядные системы команд ARM Thumb и поэтому имеют полную возможность компилирования для обеспечения максимальной производительности или минимального размера объектного кода так, как этого требует приложение. Использование кода Thumb обеспечивает типичное сбережение памяти на 35—40 %.

#### ✎ **DSP расширение команд**

Многие системы требуют комбинации гибкости микроконтроллера с возможностью обработки данных DSP-процессоров, что вынуждает проектировщиков искать компромисс между производительностью и стоимостью, или принимать сложные мультипроцессорные решения. DSP-расширение системы команд ARM дает возможность использовать DSP-инструкции в рамках функциональных возможностей микроконтроллера. Теперь DSP-функции и возможности обычного микроконтроллера доступны в едином ядре центрального процессора — это позволяет упростить проектирование систем с высокой производительностью и большей гибкостью.

#### ✎ **DSP-расширение системы ARM, которое обеспечивает:**

- 16-разрядные операции над данными;
- насыщенную арифметику;
- операции с MAC (multiply and accumulate).

#### ✎ **Поддержка систем реального масштаба времени**

Системы реального масштаба времени поддерживаются динамически конфигурируемым режимом прерывания. Определенные строки в кэш-памяти могут быть заблокированы, что обеспечивает мгновенную доступность кода с критическим временем, как в программах обработки прерывания.

#### ✎ **Простота интеграции**

Внешние шинные интерфейсы семейства AM-BA АНВ обеспечивают простоту интеграции с другими компонентами и быстрой разработкой SoC.

АНВ-совместимые периферийные устройства поставляются как ARM, так и сторонними поставщиками. Простота интеграции обеспечивается возможностью полной программной отладки систем на кристалле.

### **3. DSP-ПРОЦЕССОРЫ**

Системы на кристалле, даже простейшие или предназначенные для бытовых приложений типа MPEG флэш-проигрывателей — это прежде всего системы реального времени. Вторая заметная особенность значительной части СНК — цифровая обработка сигналов. С этой точки зрения представляется естественным, что при построении СНК большое распространение получили процессоры цифровой обработки сигналов или DSP-процессоры. Достоинством DSP-процессоров является высокая эффективность при решении классических задач обработки сигналов, причем производительность DSP-процессоров при решении такого рода задач может на порядки превосходить производительность процессоров с классической архитектурой. Среди DSP-процессоров, получивших распространение в СНК, выделяются ядра фирмы MIPS Corp, Motorola и др.

#### **3.1. Синтезабельное процессорное ядро MIPS32 4Km и MIPS64 5Kc**

**MIP32 4Km** (MIPS corp.) — это 32-разрядное ядро MIPS в минимальной конфигурации с мощными возможностями. Его особенности:

- команды быстрого умножения-накопления (*fast MAC*);
- команды "лидирующие нули" и "лидирующие единицы" (*Lead Zeros and Ones*);
- команды условной пересылки данных;
- команды выбора данных из кэш-памяти с упреждением для потоковых данных;

- выполнение команд пользовательского уровня процессоров R3000 и R4000;
- конвейер, оптимизированный для систем на кристалле с управлением питанием;
- программируемый контроллер кэш-памяти и управление памятью командного файла;
- полностью статический дизайн на основе фронтальных триггеров с единым сигналом тактирования;
- блок одноканального умножителя  $32 \times 16$ .

MIPS32 4Kм ядро — это высокоэффективное 32-разрядное ядро процессора MIPS с быстрыми командами MAC. MIPS32 4Kм ядро разработано специально для рынка 32-разрядных приложений. Это ядро — мощный процессор, способный к выполнению алгоритмов типа MP3-декодера и программных модемов на сетевом и цифровом потребительском рынках. Ядро может быть очень легко интегрировано в системы на кристалле, что хорошо поддерживается обширными инструментальными средствами разработки (рис. 3, см. вторую сторону обложки).

MIPS32 4Kм — член основного семейства MIPS32/MIPS64, обеспечивает хорошее соотношение гибкости и широкого диапазона вариантов цены/производительности с инвестициями низкого риска для множества конечных продуктов. Это ядро полностью синтезируемо и может быть легко перенесено на новые технологические процессы.

К ключевым параметрам ядра (влияющим на соотношение цена/производительность) могут быть отнесены:

- выбор размера кэш-памяти данных/команд от 0 Кбайт до 16 Кбайт;
- поддержка прямого отображения, или ассоциативности с четырьмя путями, тремя путями или двумя путями;
- выбор конфигурации EJTAG;
- множество вариантов исполнения регистрового файла.

Архитектура MIPS — одна из наиболее широко поддерживаемых процессорных архитектур (более чем 60 продавцами инструментов и 170 изделиями). MIPS32 4Kм ядро — лучшее решение для дешевых встроенных систем, которые требуют высокоэффективной обработки и низкого энергопотребления.

MIPS64 5Kс — это высокоэффективное синтезируемое 64-битовое процессорное ядро MIPS, предназначенное для приложений типа "система на кристалле". Это ядро особенно подходит для сетевых приложений, автоматизации офиса и встроенных приложений, требующих расширенной 64-битовой обработки данных. Модуль управления памятью предназначен для работы под Windows-CE или другой ОС.

Архитектура процессора является 64-разрядным расширением процессора MIPS32 4Kм.

Имеется также широкий диапазон MIPS32 и MIPS64 — совместимых доступных ядер, включая:

- MIPS32 4Kм: 32-разрядный процессор с быстрым MAC-блоком;
- MIPS64 20Kс: 64-битовый процессор с производительностью 1000 MIPS и дополнительным устройством для работы с плавающей точкой MIPS3D.

### 3.2. Серия DSP-процессоров фирмы Motorola (DSP56824)

#### Особенности DSP56824

📖 Ядро цифровой обработки сигналов:

- эффективное ядро 16-разрядного семейства DSP56800;
- 35 млн команд в секунду (MIPS) при частоте 70 МГц;
- одноканальный MAC  $16 \times 16$ ;
- два 36-битовых сумматора, включая биты расширения;
- 16-разрядное двунаправленное барабанное сдвигающее устройство;
- параллельная система команд с уникальными способами адресации;
- аппаратные средства организации циклов *do* и *rep*;
- три внутренних адресных шины и одна внешняя адресная шина;
- четыре внутренних и одна внешняя шины данных;
- система команд поддерживает и функции контроллера, и функции DSP;
- способы адресации контроллерного стиля и команды для компактного кода;
- эффективный C-компилятор и поддержка локальных переменных;
- стеки программ и прерываний с неограниченной глубиной.

📖 Память:

- гарвардская архитектура позволяет целых три одновременных доступа к памяти программ и памяти данных;
- встроенная память;
  - $32 \text{ К} \times 16$  ROM программ;
  - $128 \times 16$  оперативных блоков памяти программы;
  - $3,5 \text{ К} \times 16$  оперативной памяти, пригодной к использованию для данных и программ;
  - $2 \text{ К} \times 16$  ROM данных;
- возможности расширения памяти вне кристалла;

- до  $64\text{ К} \times 16$  памяти данных;
- до  $64\text{ К} \times 16$  памяти программы;
- внешний порт расширения памяти с программируемыми 1—15 состояниями ожидания;

- Большой набор периферийных устройств.
- Программируемый синтезатор частоты на основе PLL (phased locked loop).
- Эффективные схемы потребления:
  - единственное 2,7...3,6 В напряжение электропитания;
  - сохранение энергии в режимах "wait" и возможные множественные режимы "Stop";
- Полностью статический дизайн.

#### 4. КОНФИГУРИРУЕМЫЕ ПРОЦЕССОРЫ

Конфигурируемые процессоры — особый вид процессоров для СНК, позволяющий подстроить ядро под требования заказчика.

Конфигурируемые процессоры способны полностью изменить картину проектирования СНК. Традиционно проектировщики должны были выбрать между быстрым временем выхода на рынок с программируемым процессором (как обычным микропроцессором, так и DSP-процессором) и высокой производительностью с использованием заказных БИС. Конфигурируемые процессоры заполняют этот разрыв, предлагая программируемость вместе с возможностью быстро добавить необходимую заказную логику для увеличения производительности.

Существуют два главных класса конфигурируемых процессоров: конфигурируемые RISC-процессоры и конфигурируемые VLIW-процессоры (VLIW-процессор с очень длинным словом инструкции).

Для встроенных микроконтроллеров архитектура с сокращенным набором команд (RISC) стала основной. Главной особенностью конфигурируемых RISC-процессоров таких как процессоры фирм *Tensilica* (Санта-Клара, Калифорния) и *Arc Cores Ltd.* (Elstree, Великобритания) является возможность вводить заказные команды в RISC-процессоры для ускорения обычных операций. Заказная логика для этих операций добавляется в последовательностную логику обработки данных процессора.

Этот тип ускорения не обеспечивает достаточного увеличения производительности, чтобы сделать RISC-процессоры жизнеспособной альтернативой заказным БИС, поэтому VLIW-подход становится все более обещающим в высококачественном секторе DSP. Причина этого очевидна: VLIW обеспечивает параллельное выполнение операций, что значительно увеличивает производительность.

В отличие от суперскалярного подхода, предельного случая параллелизма, расплата осуществляется на стадии компиляции, а не в процессе выполнения приложения. Ценой за производительность является ширина инструкции и потенциальное увеличение объема памяти, требуемой данным приложением.

Подобно конфигурируемым RISC-процессорам, проектировщики, работающие с конфигурируемыми VLIW-процессорами, могут достичь существенных преимуществ, добавляя заказную логику в аппаратуру обработки данных. Однако VLIW-подход дает проектировщикам большие возможности, чем конфигурируемые RISC-процессоры. Возможные альтернативы конфигурирования VLIW-процессора включают:

- определение набора параллельных элементов обработки данных;
- добавление в процессор заказных вычислительных модулей;
- конфигурирование VLIW-инструкции для обеспечения параллелизма инструкции;
- изменение числа каналов доступа к памяти как внутри, так и вне процессора.

##### 4.1. Процессоры ARCTangent-A4 и ARCTangent-A5

**Микропроцессор ARCTangent-A4** — настраиваемое пользователем 32-битовое RISC-ядро для заказных БИС и систем на кристалле. Это синтезабельный, конфигурируемый и расширяемый процессор — разработчики могут легко изменить и расширить архитектуру для своих приложений. Эта необычная гибкость позволяет разработчикам творчески скроить аппаратуру для программного обеспечения, вместо того, чтобы подгонять программное обеспечение под жесткую архитектуру центрального процессора. Разработчики могут оптимизировать процессор ARCTangent-A4 по вычислительной производительности под цифровую обработку сигнала, по производительности ввода-вывода, под прикладные алгоритмы, по потребляемой мощности, по площади или по стоимости.

Процессор ARCTangent-A4 совместим со стандартными промышленными инструментами проектирования и приспособлен для широкой области применения.

Как синтезабельное ядро, поставляемое в HDL (VHDL или Verilog), процессор ARCTangent-A4 портативен в любой технологии, библиотеке для синтеза. Диапазон использования процессора ARCTangent-A4 — от контроллеров дисководов, цифровых камер до звуковых и видеокодеков, сетевых маршрутизаторов.

Процессор ARCtangent-A4 вписывается в существующий маршрут проектирования и поставляется с удобными в работе инструментами, включая инструмент конфигурации ARChitect, который имеет дружелюбный пользовательский интерфейс для изменения процессора.

В основе процессора лежит 32-битовая RISC-архитектура с четырьмя стадиями конвейера. Большинство инструкций имело дополнительное условное (предикативное) выполнение. Набор инструкций, регистровый файл, коды условий, кэш-память, шины, и другие архитектурные особенности являются конфигурируемыми пользователем и масштабируемыми.

Благодаря множеству шин ввода-вывода и малому числу вентилях — в базовой конфигурации приблизительно 8 500 вентилях — процессор ARCtangent-A4 идеален для мультипроцессорных проектов.

Процессор ARCtangent-A4 был разработан изначально как настраиваемое пользователем ядро микропроцессора для БИС/СМК.

Поставляемый базовый вариант процессора ARCtangent-A4 — это мощная 32-битовая RISC-архитектура с полностью функциональным набором инструкций.

Как и большинство RISC-архитектур, процессор ARCtangent-A4 имеет файл из 32 основных регистров по 32 бита (рис. 4, см. вторую сторону обложки). Разработчики могут удвоить размер основного регистрового файла, если желают.

Разработчики могут также конфигурировать процессор ARCtangent-A4 как гарвардскую архитектуру (отдельные шины команд/данных) или как архитектуру фон Неймана (объединенные шины команд/данных), в зависимости от требований приложения к производительности.

**Процессор ARCtangent-A5** обладает схожей с ARCtangent-A4 архитектурой, но имеет существенные дополнительные достоинства:

▢ ARCtangent-A5 — это оптимальный по стоимости быстродействующий цифровой обработчик сигналов. Его основные особенности:

- RISC-набор команд, резко уменьшающий требуемые объемы кода;
- SIMD-инструкции, ускоряющие выполнение сложных функций цифрового обработчика сигналов;
- сдвоенные MAC-блоки, сдвоенные преобразователи Viterbi, сдвоенные умножители-вычитатели;
- дополнительные инструкции ускорения функций DSP общего назначения (функции поддержки деления, округления, битовая манипуляция, насыщенная арифметика);

- в системах, чувствительных к мощности и стоимости, RISC и DSP могут совмещаться в одном процессоре;
- в мультипроцессорных системах с высокой производительностью использование одинаковой архитектуры, программных модулей и всего инструментария в каждом процессоре уменьшает затраты на разработку;
- с использованием ARChitect можно выбрать и оптимизировать только те расширения, которые необходимы для заданного приложения;

▢ Высокая производительность обработки данных:

- многосшинная архитектура центрального процессора дает эффективное разделение потоков данных;
- малое время ожидания дополнительных вспомогательных шин не мешает работе с памятью или периферийными устройствами;
- до четырех банков XY-памяти;
- обработка одного банка и одновременная загрузка другого;
- 8 регистров-указателей модифицируются в устройстве генерации адреса (AGU);
- конфигурируемые блоки кэш-памяти команд и данных.

▢ Продвинутое DSP свойства:

- ARCompact 16/32-бит RISC-система команд;
- условное выполнение большинства команд;
- $2 \times 40$ -разрядных сумматоров;
- две шины чтения и одна шина записи операнда;
- отдельные шины программ и данных;
- отдельная одноканальная вспомогательная шина;
- конфигурируемые блоки кэш-памяти и данных (512 байт — 32 килобайта, от 1 до 4 портов);
- поддержка насыщенной арифметики;
- дополнительный модуль отладки в реальном масштабе времени.

▢ Встроенная периферия:

- USB;
- Ethernet адаптер;
- UART;
- таймер.

▢ Опции энергосохранения:

- спящий режим;
- спроектирован с поддержкой технологии "clock gating", что обеспечивает малую потребляемую мощность.

Все продукты сопровождаются мощным *средством поддержки конфигурирования процессоров ARChitect™*.

Идеи, заложенные в процессорах ARCtangent-A4 и ARCtangent-A5, дальнейшее развитие получили в процессорах ARC 600 и ARC 700.

## 4.2. Процессор Xtensa V (Tensilica)

Xtensa — первая процессорная архитектура и набор инструментальных средств, связанные в единую комбинацию технологий, помогающую проектировщикам создавать, проверять и осуществлять процессорные решения, которые могут выделить их продукты среди прочих. Используя Xtensa, разработчики могут одновременно настроить и прикладное программное обеспечение и аппаратные средства процессора, чтобы удовлетворить их по скорости, мощности, и другим свойствам способом, ранее недоступным.

### Особенности Xtensa V:

- легко конфигурируемая 32-разрядная архитектура;
- высокая производительность: более 220 MIPS на 200 МГц;
- малая мощность —  $< 0,4$  мВт/МГц, основная конфигурация в типовом процессе CMOS с технологией 0,18 мкм;
- эффективное использование площади — основная конфигурация требует порядка  $0,7 \text{ мм}^2$  при использовании типовых стандартных ячеек;
- небольшой код: патентованные методы кодирования команды дают на 10...50 % лучшую плотность кода, чем другие процессоры ядра;
- дополнительный 16-разрядный аппаратный умножитель;
- дополнительный 16-разрядный DSP-модуль — полностью конвейеризованный 16-разрядный умножитель с сумматором на 40 бит, с командами загрузки пары операндов и обновлением адреса;
- дополнительный встроенный отладочный модуль с JTAG-интерфейсом, аппаратными средствами наблюдения и 40-битовым трассировочным портом;
- поддержки дополнения в реальном масштабе времени определенных проектировщиком команд с использованием Tensilica Instruction Extension Language (TIE);
- технология кодирования, гарантирующая синтезабельность и переносимость кода;
- каждая аппаратная конфигурация поддерживается автоматически генерируемым инструментарием программной поддержки на основе GNU;
- поддержка совместной верификации с шинной функциональной моделью (BFM) и конфигурированным имитатором системы команд (ISS);
- операционная система реального масштаба времени (RTOS) поддерживается для ядер Nucleus фирмы Accelerated Technology, Inc и Tornado для VxWorks фирмы Wind River Systems, Inc.

**Генератор процессора Xtensa** быстро и надежно помогает в создании специфических встроенных процессоров. Используя комбинацию процессора, САПР (электронный цифровой анализатор) и технологию разработки встроенного программного обеспечения, генератор процессора Xtensa позволяет учитывать характеристики конкретного приложения для определения архитектуры процессорного ядра.

Перед передачей на производство кремния можно с помощью генератора в реальном масштабе времени на основе обратной связи неоднократно предпринимать архитектурные исследования, достигая компромисса между площадью, скоростью, мощностью и плотностью кода, пока не будет достигнута оптимальная конфигурация. Используя соответствующую стандартную библиотеку ячеек, можно привязать оптимизированный процессор Xtensa к технологическому процессу любого поставщика.

Генератор процессора Xtensa работает через удобный в работе интерфейс web-браузера, и включает выбранные пользователем параметры для широкого диапазона вариантов опций конфигурации. Структура системы команд может быть конфигурирована с дополнительными функциональными модулями, различными размерностями и типами интерфейсов памяти, дополнительными модулями отладки, и/или командами, определяемыми проектировщиком. Новые конфигурации могут быть сделаны не более чем за час.

## 4.3. Процессор DSP JAZZ

Jazz-процессор DSP — второе поколение VLIW-процессора с перестраиваемой конфигурацией от *Improv Systems*. Jazz-процессор DSP имеет много расширенных архитектурных особенностей, включая обработку данных с оверлеем, распределенную регистровую систему, сжатие кода и управление питанием. Jazz-процессор DSP поддерживает гибкую методологию проектирования, используемую для настройки вычислительных ресурсов и системы команд процессора, что обеспечивается полным набором инструментов. Jazz DSP может включить дополнительные вычислительные модули и коды команд, обеспечивая универсальность, необходимую для поддержки широкого диапазона прикладных решений.

### Особенности процессора DSP JAZZ:

- VLIW-архитектура с перестраиваемой конфигурацией;
- выбираемая пользователем 16- или 32-разрядная обработка данных;

- типичная производительность — более 1000 MIPS на 100 МГц;
- готовая многопроцессорная система;
- не требует дополнительной связующей логики;
- поддерживаемый Jazz PSA компилятор;
- малая мощность — менее 0,1 мВт/МГц по 0,13 мкм-технологии;
- полностью статический дизайн с остановом, холостым ходом и спящим режимом;
- минимальный объем вентилях в конфигурации (50 K);
- эффективный размер кремния — менее 0,25 мм<sup>2</sup> по 0,13 мкм-технологии;
- поддерживает добавление определенных проектировщиком команд, используя инструментальный набор программ Джазовый Композитор PSA;
- поддерживает быстрое добавление полностью параллельных исполнительных модулей;
- полностью синтезируемый повторно используемый дизайн на основе библиотеки стандартных ячеек (никаких заказных ячеек не требуется);
- расширенная плотность кода — сжатие кода и назначение слота команды уменьшают размер кода;
- дополнительные встроенные средства отладки;
- широкий выбор дополнительных 16- или 32-разрядных исполнительных модулей DSP, включая особенности типа выбираемого пользователем 40/64-разрядного сумматора и команды загрузки двойного операнда, поддержка комплексной арифметики;
- все конфигурации DSP Jazz процессора поддерживаются полностью интегрированной цепочкой инструментов разработки программного обеспечения, включая интегрированную среду разработки, компилятор, ассемблер, имитатор системы команд, профилировщик, отладчик и поддержку эмуляции на FPGA.

**Архитектура процессора Jazz DSP.** Процессор DSP Jazz имеет встроенную архитектуру VLIW-процессора с конвейером команд с двумя стадиями и одноктактными исполнительными модулями. Базовый процессор включает один арифметический логический модуль (арифметико-логическое устройство), двойные интерфейсы памяти и блок управления (декодер команды, управление переходами, управление задачами). Главная особенность архитектуры — это то, что проектировщику позволено добавлять заказные команды и/или заказные исполнительные модули с помощью инструментального набора программ Джазовый Композитор PSA. Большинство аспектов архитектуры, например, число и размеры модулей интерфейсов памя-

ти или типы и число исполнительных модулей, может быть сконфигурировано независимо, с использованием Джазового Композитора. Проектировщик может выбрать также номер прерываний, уровни приоритетов прерываний и поддержку отладки. Архитектура процессора DSP Jazz является ключевой в обеспечении увеличения количества параллельных вычислительных ресурсов и заказных команд. Частично это допускается с помощью распределенного регистрового файла так, чтобы не было ни одного критического места при вводе-выводе данных между исполнительными модулями ядра процессора и периферийными ресурсами. Масштабируемая, неблокируемая "соединительная ткань", называемая DataCom модуль, расположена между исполнительными ресурсами и ресурсами памяти, обеспечивая пропускную способность к вычислительным ресурсам процессора.

#### **Набор программ Джазовый Композитор Jazz PSA**

Инструментальный набор программ Джазовый Композитор PSA процессора обеспечивает различные возможности конфигурации:

- расширение системы команд — добавление кодов операций для дополнительных и заказных исполнительных модулей (умножителей, MAC, заказных);
- интуитивный интерфейс для добавления новых команд и/или заказных исполнительных модулей; среда PSA генератора создает RTL Verilog шаблоны для пользователя, чтобы он мог добавлять новые операции;
- определение памяти команд и данных;
- карта памяти системных ресурсов;
- определение прерываний и вариантов исключений;
- поддержка отладки — определение точек останова по данным и командам, проверка и модификация регистров и т. д.;
- платформы многопроцессорных конфигураций, включая карты памяти и интерфейсы;
- целевая технология.

#### **Заключение**

Таким образом, процессорные ядра, используемые в системах на кристалле, можно разделить на следующие группы:

1. Доработанные для СНК процессоры с традиционной архитектурой, получившие ранее распространение в обычных системах. Достоинствами их является большой объем накопленного программного и аппаратного обеспечения, а также хорошее знакомство с ними разработчиков. Основной недостаток — недостаточная производительность для

большого ряда приложений. Доработка осуществляется в следующих направлениях:

— повышение тактовой частоты по сравнению с прототипом;

— сокращение времени выполнения команд в тактах;

— изменение шинных интерфейсов (демультиплексирование шин адреса/данных, разделение шины данных на шины входных и выходных данных).

2. RISC-процессоры, разработанные специально для СНК и реже заимствованные из обычных систем. Здесь можно отметить тенденцию к наращиванию дополнительных DSP-функций, повышающих возможности процессоров этой группы.

3. DSP-процессоры, разработанные специально для СНК или заимствованные из обычных систем.

4. Конфигурируемые процессоры, которые в свою очередь можно разделить на две группы: конфигурируемые RISC-процессоры и конфигурируемые VLIW-процессоры. Здесь также можно отметить тенденцию снабжения базовых ядер DSP-функциями, как универсальными, так и специализированными (команды поддержки преобразования Витерби и др.). Конфигурируемые процессоры снабжаются развитыми средствами конфигурирования, а также средствами разработки и отладки программного обеспечения (компиляторы, отладчики), без которых они теряют значительную часть привлекательности для покупателей.

Для всех отмеченных групп обязательным является требование специального оформления поставляемых устройств в виде RTL-кода на языках описания аппаратуры. Редкое исключение — процессоры ARM.

Как особо положительное свойство производители отмечают, что при проектировании устройства используется только один фронт сигнала тактирования.

Атрибутом качественного дизайна является наличие JTAG-интерфейса для отладки и тестирования проектов на основе данного процессора, а также возможность самотестирования процессора.

Одно из обязательных требований — полностью статический дизайн устройств, т. е. полное отсутствие динамических элементов, что позволяет менять частоту работы от максимальной до полной остановки. Таким образом обеспечиваются дополнительные режимы энергосохранения, связанные со снижением рабочей частоты и остановкой (выключением) сигнала тактирования.

Еще одна тенденция — разработка особых режимов энергосбережения, что для СНК очень актуально. Для дальнейшего сокращения энергопотребления используется специальный подход к проектированию — *"clock gating"*. Заметим, что этот прием может использоваться в любом проекте (современные программы синтеза позволяют автоматически применить эту технологию к любому дизайну), однако это требует особого стиля написания RTL-кода.

#### Список литературы

1. **Heath S.** Microprocessor Architectures RISC, CISC and DSP. Clays Ltd, 1995. 384 p.
2. **www.eetimes.com.** Cary Ussery, Improv Systems Inc., Beverly, Mass.
3. **www.arm.com.**
4. **www.arc.com.**
5. **www.improvsys.com.**
6. **www.mips.com.**
7. **www.tensilica.com.**
8. **www.dcd.com.**
9. **www.motorola.com.**
10. **www.cast-inc.com.**
11. **www.evatronix.com.**
12. **www.microchip.com.**
13. **www.atmel.com.**
14. **www.freescale.com.**
15. **Erokhin V., Warren C., Fügert E.** Erfahrungen zum Einsatz von BIST Strukturen für wiederverwendbare IP Blöcke // DASS2000 workshops. Dresden, Germany.
16. **Ерохин В. В.** Архитектурно-зависимое самотестирование сложных функциональных блоков // Микросистемная техника. № 5. 2004. С. 39—42.
17. **Keating M., Bricaud P.** Reuse Methodology Manual for System-on-a-Chip Designs. Kluwer Academic Publishers, 1998. 224 p.
18. **Stroud C. E.** A Designer's Guide to Built-In Self-Test. Kluwer Academic Publishers, 2002. 319 p.

УДК 523.44+621.3+629.735.45+629.78

Е. В. Трошин, канд. техн. наук,  
ФГУП "НПО "Орион"

## О ПРОБЛЕМЕ КЛАССИФИКАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, ПОРОЖДЕННОЙ МИНИАТЮРИЗАЦИЕЙ

*Миниатюризация в космонавтике приводит к появлению нового класса космических систем, основой которых служат космические аппараты малой и сверхмалой массы. В связи с этим появляются различные попытки классификации космических аппаратов в зависимости от их массы. В статье представлена критика существующих подходов классификации, и предложен системный подход к ней.*

Миниатюризация в космосе набирает обороты, в то же время осмысление происходящих процессов и научное их истолкование отстают, что чревато хаотичностью, непредсказуемостью, неэффективностью и даже ошибочностью развития тенденций. Одной из проблем теоретического осмысления миниатюризации в космосе является проблема классификации космических аппаратов (КА) по их массе.

Масса космического объекта искусственного происхождения является чрезвычайно важным параметром. КА в космосе не может существовать вне движения, причем движения достаточно сложного и специфического, поэтому можно смело сказать, что как минимум половина всей космической проблематики лежит в сфере баллистики, и соответственно, основным параметром КА становится его масса. В своем полете ракета-носитель (РН) и КА взаимодействуют непосредственно с огромным телом, а именно, с планетой Земля, масса которой несоизмеримо больше массы и РН, и КА. (При межпланетных полетах также приходится взаимодействовать и с другими планетами.) В силу этого запуск КА на орбиту, связанный с преодолением земного притяжения, требует значительных энергетических затрат, и чем выше масса КА, тем эти затраты больше. Вполне естественно, что энергетические затраты порождают и экономические, а также экологические и ресурсные проблемы.

Существуют попытки классифицировать КА по габаритным размерам, в частности, используется понятие малогабаритного КА — МГКА. На наш

взгляд это не совсем верно, так как габарит является второстепенным параметром по сравнению с массой, хотя и связан с ней, поэтому и термин МГКА мало отражает суть процессов миниатюризации в космосе. Габарит КА приобретает самостоятельное значение при рассмотрении вопросов размещения КА под обтекателем РН.

Становится понятно, что классификация КА по массе вполне объяснима, но это вовсе не означает, что к этой проблеме нужно подходить "в лоб", не задумываясь о качественных различиях между аппаратами, имеющими различную массу. Именно так, "в лоб", не учитывая качественную специфику, и подошли к проблеме классификации авторы деления КА по массе, результаты которого представлены ниже:

большие спутники — более 1500 кг;  
малые спутники — 500—1000 кг;  
мини-спутники — 100—500 кг;  
микроспутники — 10—100 кг;  
наноспутники — 1—10 кг;  
пикоспутники — 0,1—1 кг;  
фемтоспутники — менее 0,1 кг.

Данная классификация вызывает множество вопросов и возражений. Раскроем вначале смысл полуслов, образовавших названия групп спутников.

Мини — происходит от латинского *minimus*, что значит наименьший.

Микро — происходит от греческого *mikros*, что переводится как малый. При этом микро употребляется в значениях: 1) часть сложных слов, указывающая на малое значение чего-либо; 2) приставка для образования наименьших дольных единиц, равных одной миллионной доле исходных единиц.

Первоначальные смыслы мини и микро как будто не различимы, но, учитывая сложившуюся традицию, пока еще можно терпеть предлагаемое деление спутников на группы. Однако идем дальше.

Нано — от греческого *nanos*, т. е. карлик, приставка для образования наименьшей дольной единицы, равной одной миллиардной доле исходной единицы.

Пико — от испанского *pico* — малая величина, приставка для образования наименьших дольных единиц, равных одной триллионной доле (или  $10^{-12}$ ) исходных единиц.

Фемто — от латинского *femten* — пятнадцать (!), приставка к наименованию единицы физической величины, равной  $10^{-15}$  от исходной.

Как видно, нано и пико в своей морфологической основе ничем не отличаются друг от друга, а также от мини и микро. Фемто же напротив выби-

вается из этого ряда. Таким образом, морфологическая система образования названий классов, содержащая морфемы из четырех языков, включая русский (большие и малые), не выдерживает критики, точнее системой вообще не является.

Признаки системности появляются, если рассматривать микро, нано, пико, и фемто как обозначения доли исходной величины, имеющей размер, соответствующей отрицательной степени 10. Но здесь сразу возникает два вопроса. Первый — причем тут тогда мини, малый и большой. Второй, более интересный, — пикоспутник, например, является одной триллионной долей чего? Какой величины? Большого спутника? Метра? Килограмма?

Можно было бы и согласиться с такими названиями, именно названиями, групп спутников. В конце концов, подобные названия используются для классов компьютеров: мини-компьютер, микрокомпьютер, и можно было бы последовать этой традиции, если бы дело заключалось только в названиях классов. Классификация должна отражать существующие принципиальные различия объектов, принадлежащих разным классам, и служить конкретной цели, позволяющей получать положительный эффект в исследуемой области, а не являться самоцелью. Классификация, представленная выше, по мнению автора и его коллег, не отражает сути процессов, зарождающихся в космонавтике, связанных с появлением принципиально новых космических систем, о чем будет сказано чуть ниже. Она дезориентирует специалистов и более того, вносит существенную путаницу. Прагматический эффект показанного формального разделения КА по массе равен нулю.

В настоящее время активно развивается такое новое направление в науке, технологиях, технике как нанопроблематика, включающая в себя нанотехнологии, наноматериалы, наноприборы и т. д. О том, что понимать под нанотехнологиями и наноматериалами до сих пор спорят между собой специалисты. Отметим здесь только, что нанотехнология это не просто технология, работающая с чем-то очень малым, это технология, которая непосредственно работает с конкретной частицей, имеющей размер порядка нанометров, т. е. конструкция собирается из отдельных атомов. Такая технология действительно является принципиально новой, она обладает огромными возможностями и позволяет получать приборы и материалы ранее принципиально не доступные производству. Сейчас уже много написано о грядущей революции, которую обеспечат нанотехнологии. Заметим также, что наноприбор — это не просто маленький приборчик, это принципиально новый прибор, созданный с помощью нанотехнологии.

А теперь снова вопрос к авторам приведенной выше "классификации" (теперь уже в кавычках). Наноспутник имеет наноразмер, или он создан нанотехнологией? С помощью нанотехнологий можно получать и другие спутники, даже большие по массе, например, если использовать в них наноматериалы. В то же время "наноспутник", имеющий массу, как указано от 1 до 10 кг, может быть выполнен и без нанотехнологий.

Налицо настоящая путаница в терминологии, нарушение ее единства, теперь уже не только в морфологическом аспекте, но и в семантическом, т. е. в смысловом.

Может возникнуть вопрос — зачем нужно уделять столько внимания разделению спутников на классы?

Наука стоит на трех китах, расположенных в вершинах воображаемого треугольника: выдвижение гипотез, измерение, систематизация. Утопите одного из них, и треугольника не станет, а значит, рухнет и все здание науки. Поэтому разговор о классификации или систематизации вовсе не является бесполезным. Он особенно важен, когда формируется новое направление, появляются новые типы и виды объектов, обладающих принципиально новыми свойствами и характеристиками, которые и нужно закрепить в системе признаков, т. е. в классификации и терминологии.

В настоящее как практические, так и теоретические разработки в области миниатюризации космической техники ведутся во многих странах мира. Работает в этом направлении и ряд отечественных предприятий. Следует отметить, что есть определенные, иногда значительные, успехи. В то же время многие разработчики видят в миниатюризации только лишь экономический эффект, возникающий в результате удешевления запуска спутника малой массы. При этом они стремятся выполнить уменьшенными спутниками те же целевые задачи, что и выполняемые большими спутниками, с не худшим качеством. Польза от подобных разработок несомненно есть, так как любое снижение массы выводимой в космос полезной нагрузки всегда актуально. Но здесь вряд ли можно говорить о принципиальном изменении облика космических систем.

Результаты системных исследований в области миниатюризации в космосе позволяют говорить о появлении нового класса космических систем (КС), возникающих вследствие снижения массы КА как системообразующего элемента КС, на порядки относительно традиционных станций, созданных в парадигме 1960—1970 гг., т. е. до единиц килограммов. В этом случае становится возможным запускать многоспутниковые орбитальные

группировки (ОГ), позволяющие решать задачи информационного обеспечения потребителей на качественно новом уровне, что происходит вследствие удовлетворения требований ГНОТ-факторов, т. е. требований глобальности, непрерывности, оперативности и тотальности. Комплексные показатели эффективности при этом возрастают скачкообразно. Многоспутниковая ОГ, имеющая в своем составе десятки, сотни и даже тысячи КА, рассматривается как единый распределенный в пространстве технический объект. Сама ОГ представляет собой не простую совокупность КА, а является системой с эффектом эмерджентности. При таком подходе к созданию КС меняются кардинально подходы и к созданию систем управления, и к созданию самих КА, и к целевому применению космических систем в целом. Настоящий подход нашел отражение в ряде статей [1–4], НИИР, обсуждался с коллегами на многих технических совещаниях, научных и научно-практических конференциях [5–9], и получил поддержку у ведущих разработчиков космических систем.

Вот здесь-то и можно говорить о появлении нового класса космических аппаратов. Сработал закон диалектики перехода количества в качество — снижение масса КА привело к появлению качественно нового типа космической системы. Снижение массы КА на порядки дает увеличение соответственно на порядки численности ОГ, что в свою очередь, приводит к появлению принципиально иных КС. Миниатюризация здесь — не цель, а средство.

Представляет интерес сателлитная концепция. Здесь также появляется новый класс аппаратов, обладающий новыми чертами и решающий принципиально новые задачи, причем масса КА-сателлитов также стремится к единицам килограммов.

Класс больших КА вне конкуренции, поэтому обсуждать его не будем. Класс малых КА, имеющих массу в сотни килограмм, видимо, имеет право на жизнь, так как он позволил пересмотреть многие подходы к построению и использованию КС. Но по мнению конструкторов, снизить массу малого КА, используя традиционные подходы, без снижения эффекта целевого применения можно не более чем до 100–120 кг, т. е. существует физический предел. Аппараты, имеющие массу порядка сотен килограмм, т. е. от 100 до 1000 кг называются малыми КА или МКА.

Аппараты, имеющие массу порядка 10 кг и ниже, предлагается называть сверхмалыми КА или СМКА. Этот термин не нов, он стал появляться в публикациях с 1997–1998 гг. Правда, различные разработчики вкладывали в него разный смысл и часто понимали под СМКА устройства массой в десятки килограмм. Создание СМКА требует

принципиально новых подходов к конструкции, компоновке, системам управления ОГ из СМКА. Это, прежде всего, определяется тем, что в ограниченном объеме и при значительных ограничениях по массе невозможно разместить многие устройства и узлы, поэтому такой аппарат приобретает принципиально иной облик по сравнению с традиционными КА. Уменьшение размеров ниже определенного предела путем конструктивных усовершенствований становится для узлов КА невозможным — необходимы новые материалы и новые технологии создания микросистем на уровне формирования структур непосредственно из атомов и молекул. Кроме того, СМКА становится существенно более автономным; меняется подход к обеспечению надежности и живучести отдельного КА — на передний план выходит обеспечение надежности и целевой эффективности ОГ; появляется новая подсистема разведения большого числа КА по орбите(-ам), утилизации и снятия с орбиты СМКА. Важной особенностью новых КА является комплексирование в нем различных подсистем между собой как в конструктивном, так и в функциональном отношениях.

Аппараты, имеющие массу между 10 и 100 кг, следует относить к первому (МКА) или второму (СМКА) классу, в зависимости от их конкретных характеристик и специфики использования. Существенно, что аппараты из этого диапазона масс широкого применения пока не нашли, а те, что используются или разрабатываются, следует рассматривать либо как наиболее удачных представителей класса МКА (решают те же задачи при меньших затратах), либо как промежуточные, опытные образцы, прообразы КА из класса СМКА.

Предлагается классифицировать КА не непосредственно по массе, а в зависимости от их специфики, которая в свою очередь связана с массой. Классификация, содержащая класс больших КА, МКА и СМКА является содержательной, отражающей функциональную и конструктивную специфику КА и КС на их основе, которая зависит от массы, рассматриваемой в качестве побудительного мотива, а не причины отнесения к классу. Данная классификация имеет однородную морфологическую основу, семантическую определенность и прагматическую обоснованность.

Почему для СМКА выбрана масса именно 10 кг?

Во-первых, расчеты показывают, что именно такая, около 10 кг и ниже, масса СМКА позволяет создавать при тех же или меньших затратах ОГ, с большей информационной эффективностью, что и существующие системы.

Во-вторых, удобство соотнесения с обычным математическим порядком чисел, т. е. 10 в первой

степени, на самом деле масса может быть и 11, и 9 кг, и около того.

В-третьих, технология производства десятикилограммового аппарата не требует строительства огромных цехов, использования крупных капитальных конструкций, испытательных стендов, кранов и др. Становится возможной серийная и мелкосерийная сборка многими производителями без значительных капиталовложений, т. е. "настолярная" сборка.

В-четвертых, аппарат массой в 10 кг можно создать в ближайшее время, аппараты массой от 1 кг и ниже — задача будущего, пока необходимо освоить обсуждаемый этап.

Изложенные критические замечания и соображения относительно классификации КА вовсе не следует считать бесспорными. Новое направление требует и новой терминологии, и новых подходов к классификации — вот это бесспорно. Говорить о сложившейся терминологии можно тогда, когда она будет признана большинством специалистов.

И последнее. Д. И. Менделеев говорил, что технологии бывают только отечественные, а Ф. М. Достоевский писал: "У них великий аргумент, что наука общечеловечна, а не национальна. Взор, наука везде и всегда была в высшей степени национальна — можно сказать, науки есть в высочайшей степени национальны". Мы были в космосе первыми, и русское слово "спутник" вошло во все словари мира. Негоже нам наспех хвататься за модные словечки с иноязычными приставками, чтобы "блистать" эрудицией перед невеждами и создавать видимость наукообразия, преследуя при этом сиюминутные конъюнктурные интересы. Необходимо в новой области работать системно, вдумчиво и от-

ветственно. Формирование нового направления в космонавтике должно осуществляться на научной основе, важной составляющей которой является классификация КА.

#### Список литературы

1. Квасников А. Ю., Ермак С. Н., Стреж С. В., Трошин Е. В. Инновационный подход к созданию космических систем на основе нанотехнологий // Радиоэлектроника и управление. 2002. № 7—9.
2. Стреж С. В., Трошин Е. В. Создание космических систем на базе микроаппаратов // Микросистемная техника. 2003. № 11. С. 35—41.
3. Стреж С. В., Трошин Е. В. Информатизация космотехносферы путем создания единого информационного пространства // Информационные ресурсы России. 2001. № 5.
4. Провинцев П. М., Стреж С. В., Трошин Е. В. Миниатюризация космических систем: новое направление развития космонавтики // Интеграл. 2003. № 6.
5. Стреж С. В. Технологические проблемы и направления исследований в области создания перспективных космических систем нового поколения // Материалы конференции V Международного Форума "Высокие технологии XXI века", Москва, 2004.
6. Трошин Е. В. Космические системы на базе сверхмалых аппаратов — новый класс систем. Доклад // Материалы конференции V Международного Форума "Высокие технологии XXI века", Москва, 2004.
7. Трошин Е. В. Системный подход к проблеме создания нового класса космических систем на основе миниатюризации космических аппаратов // Материалы IV международной конференции-выставки "Малые спутники. Новые технологии, миниатюризация. Области эффективного применения в XXI веке". Книга II. 31 мая — 4 июня 2004 г., г. Королев Московской обл.
8. Стреж С. В. Проблемы и направления исследований в области создания перспективных космических систем нового поколения // Материалы IV международной конференции-выставки "Малые спутники. Новые технологии, миниатюризация. Области эффективного применения в XXI веке". Книга II. 31 мая — 4 июня 2004 г., г. Королев Московской обл.
9. Трошин Е. В. Многоспутниковые космические системы — новый класс систем // Материалы III конференции "Микротехнологии в авиации и космонавтике", 8—9 июня 2004 г., г. Санкт-Петербург.

## НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

### Прозрачные пленки из нанотрубок

Для производства гибких компьютерных мониторов нужны такие электронные компоненты, которые были бы и электропроводными, и гибкими, и прозрачными.

Исследователи из Университета Флорида (США) и ученые из Венгерской академии наук разработали технологию производства гибких прозрачных пленок из однослойных нанотрубок. При этом пленка является электропроводной. Прозрачные и гибкие дисплеи на основе нанотрубок могут использоваться в компьютерной технике, инфра-

красных камерах, мобильных телефонах, электронной бумаге и т. д.

Технология изготовления пленок проста: исследователи погрузили нанотрубки в жидкость, а затем профильтровали раствор на специальном мембранном фильтре, который потом растворили. В итоге получилась пленка, состоящая из электропроводных нанотрубок и гибкого пластикового субстрата.

Как утверждают исследователи, толщину пленки можно изменять с нанометровой точностью. Сейчас же ученые изготовили пленочный диск диаметром 10 см и толщиной всего от 50 до 150 нм.

Пленка толщиной в 50 нм пропускает 70 % видимого света и 90 % инфракрасного.

Исследователи использовали пленку для того, чтобы сделать "оптический транзистор", который изменяет свою прозрачность в зависимости от присутствия электрического поля. Производственный процесс нанотрубочных нанопленок может быть налажен уже через два года, сообщают ученые. Они описали свою работу в августовском выпуске *Science*.

## Проект наномеханического вентиля

Для того, чтобы разработать работоспособные наносистемы (редукторы, подшипники и др.), необходимо иметь математическую модель, которая учитывает взаимодействия отдельных атомов. Но так как эти устройства обычно состоят из нескольких тысяч атомов, то математическое моделирование такой сложной системы представляет определенные трудности.

Ученые из Калифорнийского института технологии нашли компромисс: они соединили классические инженерные приемы с молекулярным моделированием для того, чтобы спроектировать наномеханический вентиль для жидкостей. Это устройство может с успехом использоваться в доставке лекарств, биологических и химических тестах, в качестве инжектора для микро- и нанодвигателей, и даже в струйных принтерах.

Основа вентиля — кремниевая однослойная нанотрубка. Она играет роль "шланга", по которому протекает жидкость. На нанотрубку опирается консоль, которая может давить на нанотрубку. Как только необходимо прекратить протекание жидкости через нанотрубку, консоль деформируется, пережимая нанотрубку настолько, что жидкость не течет.

Консоль покрыта сверху органическим слоем акриловой кислоты. Все устройство будет находиться в жидкости с изменяющимся pH. Как только pH окружающей среды повысится, суммарный заряд консоли будет негативным (вследствие отбора протонов органического слоя). Этот избыточный отрицательный заряд может вызвать деформацию консоли. Как только pH вернется в норму, органический слой получит дополнительные протоны, и консоль выпрямится (рис. 1). Для нанесения акрилового слоя на кремниевую консоль ученые предлагают использовать специально модифицированную кремниевую поверхность — Si (100).

В этом проекте исследователи использовали классические инженерные методики для определения конструкции устройства и молекулярное моделирование для того, чтобы узнать, как нанотрубка

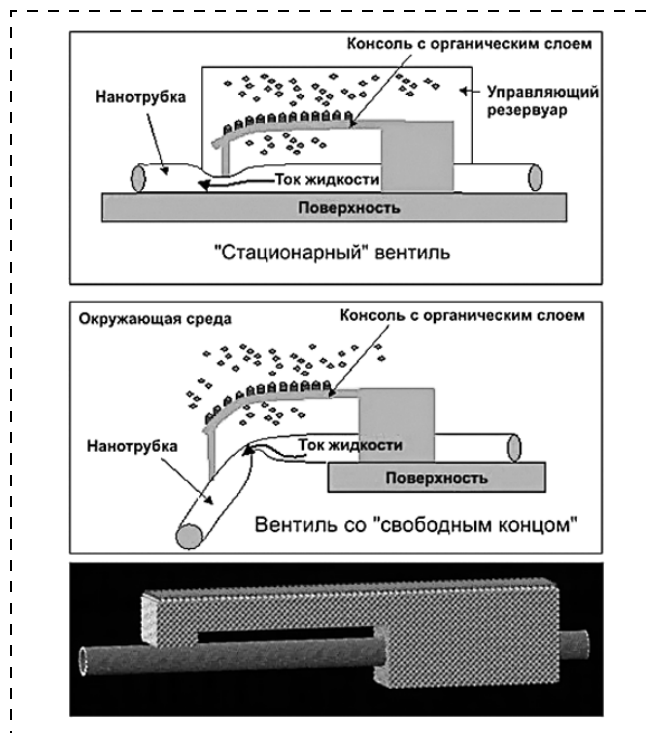


Рис. 1. Принцип действия наномеханического вентиля

поведет себя под действием нагрузки со стороны консоли. Размер управляемого вентиля будет от 34,5 до 70 нм в длину, а все устройство целиком будет состоять из 75 000 атомов.

Для производства прототипа устройства нужно решить еще ряд технологических проблем: нанесение органического слоя на кремниевую консоль; соединение консоли с нанотрубкой, а также производство и соединение с вентилем резервуара жидкости.

Одно из применений нового устройства — наносборка. Точные порции "строительного материала" могут доставляться непосредственно к наноманипуляторам и молекулярным конвейерам.

Струйные принтеры с высоким разрешением печати смогут появиться на рынке уже через три года после производства прототипа вентиля. А вот использования его в доставке лекарств можно ожидать только через 10 лет.

Однако прототип устройства будет создан не ранее, чем через год, — так заявляют ученые из Калифорнийского института технологии.

## Наномеханическая память вскоре заменит традиционную магнитную

Новая технология не предполагает возврата к перфокартам и подобным немагнитным способам хранения информации. С 2000 г. профессор физи-

ки Бостонского университета Притирэй Моханти старался создать более эффективные системы хранения информации на основе наномеханических осцилляторов. Моханти изготовил механические ячейки памяти из кремния, которые в 1000 раз меньше диаметра человеческого волоса.

Если использовать эти наноустройства в качестве элементов хранения информации, то полученная механическая память будет выгоднее по плотности информации, чем современные электромагнитные системы. Моханти заявил, что механопамять обгонит по емкости даже те магнитные устройства, которые по нынешним технологиям изготовления приближаются к физическому пределу плотности информации для магнитных устройств. Механопамять может работать, выполняя миллионы и миллиарды циклов в секунду. Также Моханти сказал, что механические ключи новой памяти потребляют в миллион раз меньше энергии, чем их электронные аналоги. "Это будущий новый игрок на рынке устройств хранения информации", — сказал Моханти. — "Взяв старые принципы за основу и воспользовавшись последними достижениями в области МЭМС- и нанотехнологий, мы можем производить компьютерную память, которая будет быстрее, дешевле и меньше современной электронной. Эти наномеханические устройства — новое слово в области хранения данных".

С помощью электронно-лучевой литографии исследователи сделали "шаблон" для матрицы механических ключей и вытравили их из монокристаллического слоя кремния, покрытого слоем оксида кремния. Электронно-лучевая литография уже давно используется МЭМС- и нанотехнологами в качестве основного производственного инструмента. Она также является основным инструментом для производства микроэлектронных схем; ею пользуются при массовом производстве микросхем и процессоров. Так что для массового производства механопамяти не нужно будет использовать дополнительные устройства, готовый продукт можно производить на уже имеющемся оборудовании (рис. 2).

Одиночная ячейка памяти состоит из струны нанометровых размеров, которая при воздействии на ее концы высокочастотного напряжения (с частотой в несколько мегагерц) изгибается. При определенной амплитуде напряжения струна принимает одно из конечных состояний ("1" или "0"), что как раз нужно для хранения информации.

Маленькие размеры устройства позволяют ему достичь высокочастотных вибраций (в опытах — до 23,57 МГц). Эта частота отражает скорость чтения записанной информации. Для сравнения, винчестеры в современных ноутбуках характеризуются

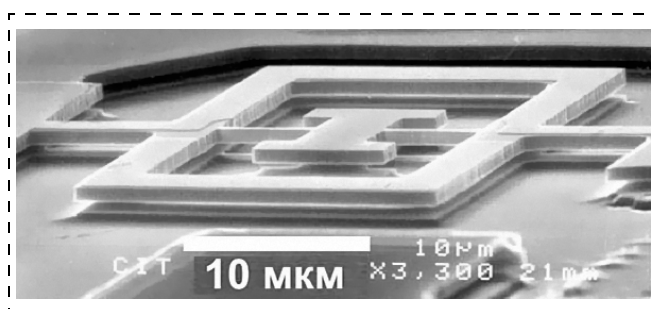


Рис. 2. Основа механопамяти — осциллятор

скоростью считывания информации в несколько сотен килогерц (тысяча циклов в секунду). Исследователи заверяют, что наномеханические ключи могут достичь скорости до миллиарда циклов в секунду. При этом их размеры могут быть меньше тех, которые изготовлены экспериментально Моханти и командой.

Другие преимущества наномеханики перед наноэлектроникой заключаются в том, что диапазон вибрации наноструны составляет несколько ангстремов. Для вибрации в таком диапазоне устройство потребляет всего несколько фемтоватт электроэнергии, в то время как современные ключи потребляют милливатты. Механическая память также свободна от ограничений суперпарамагнитного эффекта, который определяет граничные размеры магнитной памяти. Память на механотранзисторах может существенно превысить плотность хранения информации около 100 Гбит на квадратный дюйм.

Техническое описание новой технологии, характеристики и изображения механических ячеек памяти даны в выпуске *Applied Physics Letters* от 18 октября. Работы финансировались грантом от программы по нанотехнологическим исследованиям *National Science Foundation*, а также грантом от Министерства обороны.

## Наноэлектромеханический одноэлектронный транзистор с "механической рукой"

Профессором Робертом Блайком из Висконсина (США) и его коллегой Домиником Шебли из Мюнхенского университета (Германия) создан принципиально новый электромеханический одноэлектронный транзистор с "механической рукой", которая переносит отдельные электроны от истока к стоку.

Ранее (в 2001 г.) Блайк уже представлял рабочий электромеханический осциллятор, который вибрировал в диапазоне радиочастот и мог переносить отдельные электроны от одного электрода к друго-

му при активации "механической руки" устройства (т. е. работать как транзистор). Установка Блайка изображена на рис. 3.

В центре устройства — вибрирующий маятник, который был назван Блайком "электронным челноком", а журналистами — "механической рукой". Если между точками G1 и G2 приложить переменное напряжение, то маятник будет колебаться с частотой, пропорциональной частоте переменного напряжения. В рабочем устройстве маятник колебался с частотой в 100 МГц. Маятник С электрически изолирован от электродов G1, G2, S и D и заземлен. Электроды S и D представляют собой исток и сток транзистора соответственно. Как только маятник касается электрода S, на его поверхность благодаря туннельному эффекту переносится один электрон, который затем передается с помощью колебаний маятника на электрод D. На схеме показан источник напряжения транзистора  $V_{SD}$  и прибор, с помощью которого исследователи могли наблюдать за переносом электронов  $I_{SD}$ .

Осциллятор исследователи изготовили из кремния по технологии SOI (silicon-on-insulator). Устройство производилось в несколько этапов. Сначала исследователи с помощью электронно-лучевой литографии нанесли на кремниевую поверхность золотую маску, которая повторяла геометрию устройства а также алюминиевую маску травления (для тех участков на матрице, которые надо удалить). Далее был вытравлен механический маятник (посредством комбинации мокрого и сухого травления). И в заключение, исследователи вытравливали туннельные контакты маятника (с точностью до 10 нм).

Первые опыты по запуску транзистора исследователи провели при комнатной температуре. Напряжение, приводящее в движение маятник, было

$\pm 3$  В. Путем изменения частоты маятника исследователи определили оптимальные значения для переноса электронов маятником. Расстояние между электродами S и D составило 300 нм, а емкость перехода S — D составила 84 аттофарады. При напряжении  $V_{SD} = \pm 1$  В маятник мог перенести  $\pm 527$  электронов. Но это довольно много. Изменив напряжение, подаваемое на транзистор, Блайк добился эффекта переноса отдельного электрона. Далее исследователи снизили температуру устройства до 12 К. И тут они обнаружили, что устройство ведет себя по-другому. Протестировав транзистор на ряде значений напряжения  $V_{SD}$  (от 0 до 10 мВ) и изменяя частоту вибрации маятника, они обнаружили, что при частоте вибрации "механической руки" в 120 МГц он ведет себя как и при комнатной температуре. Видимо, это объяснялось влиянием тепловых эффектов, которые сильно проявлялись при комнатной температуре. Дальнейшее снижение температуры до 4 К не дало никаких результатов — транзистор отказал, так как его маятник стал жестче и потерялся туннельный контакт между электродами S и D.

В обычных микроэлектронных транзисторах переносится около 100 000 электронов для того, чтобы обеспечить состояние 1 или 0. В новом электромеханическом транзисторе эту роль выполняет один электрон. Преимущества нового устройства в отсутствии тепловых шумов, так как сток и исток физически разделены. Также уменьшится энергопотребление устройства, собранного на этих транзисторах.

Применение маятника в качестве переносчика электронов позволит транзистору работать в условиях повышенной радиоактивности, говорит Блайк. Поэтому одним из применений механотранзистора станет спутниковая электроника.

Летом 2004 г. Блайк и Шебли разработали технологию, по которой производить такой транзистор стало проще. Транзистор 2001 года нельзя было поставить на поток, а транзистор 2004 года — можно. Производство по новой технологии сводится всего к двум шагам: электронной литографии и травлению. Как говорит Блайк: "Почему мы не додумались до этого раньше [в 2001] — никак не можем понять". Ученые запатентовали производственный процесс и сам транзистор.

## Созданы электропроводящие нанотрубки максимальной длины

Специалисты из университета Калифорнии в Ирвайне создали самые длинные в мире электропроводящие нанотрубки. Длина этих углеродных нанотрубок (фактически — сверхбольших моле-

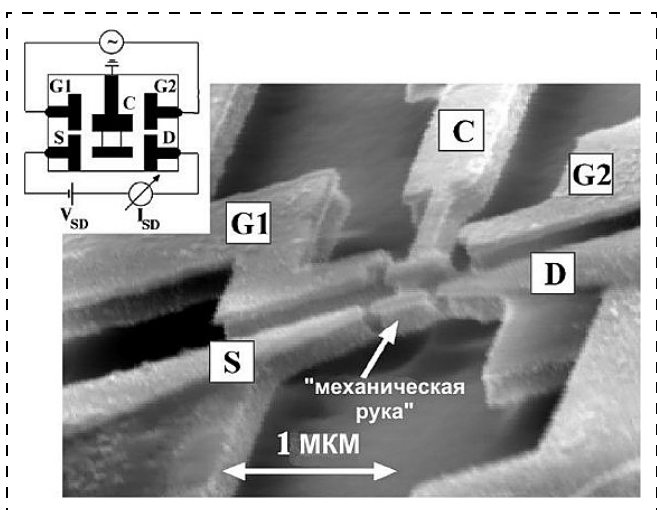


Рис. 3. Наномеханический осциллятор Блайка

кул) — 0,4 см. Ранее мы уже сообщали о том, как исследователям удалось создать обычные нанотрубки длиной 4 см, но они плохо проводили электричество.

Новая длина нанотрубок в 10 раз больше прежнего рекорда. Также полученные трубки оказались замечательными проводниками, превосходящими по электрическим свойствам медь. Работали над проектом ученые Питер Берк, Кристофер Рутгерлен и Жен Ю.

Ученые получили рекордные молекулы, нагнетая в специальную печь природный газ. В печь подавали наночастицы железа, с которыми реагировал газ. В итоге удалось синтезировать углеродные нанотрубки, которые осаждались на золотой подложке, представлявшей собой скопление тонких проводников. Присутствие золотой подложки и наночастиц железа позволило создать длинные нанотрубки.

Трубки повисали между отдельными золотыми электродами, к которым потом и подводили ток исследователи. На рисунке можно увидеть матрицу золотых проводников, между которыми росли нанотрубки. Эта работа — важный шаг на пути к созданию новых типов вычислительных устройств и компьютерной памяти.

Исследователи доложили о своем открытии в сентябрьском выпуске журнала *Nano Letters*.

## Сверхточный детектор массы и силы на основе нанотрубки

Физики из Университета Корнелла (США) сделали электромеханический резонатор нанометровых размеров, способный детектировать малые значения прикладываемой к нему силы. В качестве "рабочего органа" резонатора исследователи использовали нанотрубку (рис. 4), расположенную между двумя золотыми электродами (V. Sazonova и др. 2004 Nature 431 284).

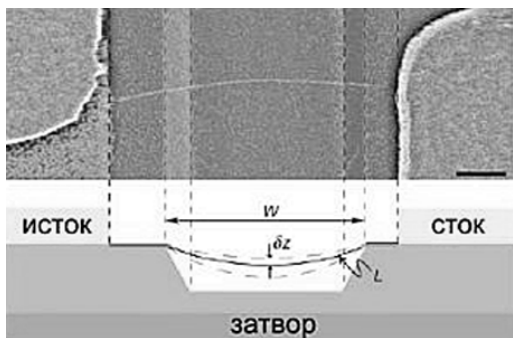


Рис. 4. Геометрия устройства и диаграмма расположения нанотрубки на электродах. Масштабная метка — 300 нм

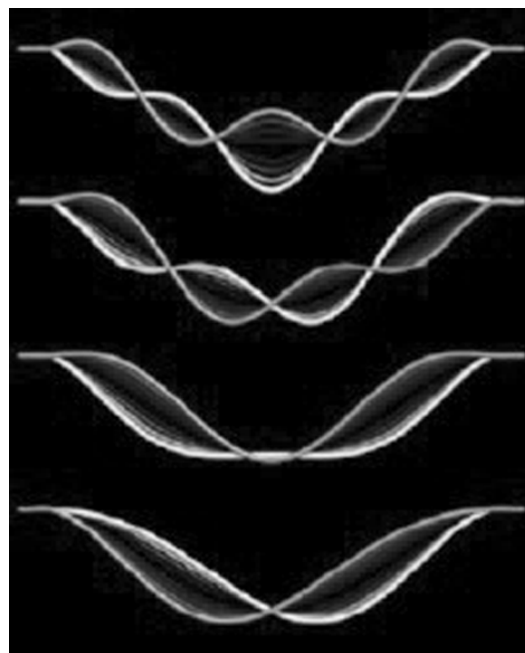


Рис. 5. Первые четыре резонансные состояния нанотрубки

Размеры канавки, через которую протянута нанотрубка: 1,5 мкм в длину и 500 нм в ширину (геометрия канавок вынесена штриховыми линиями).

Нанoeлектромеханические системы (НЭМС) такого типа могут быть полезны при конструировании различных ультрачувствительных масс-детекторов и детекторов силы. В таких устройствах "рабочий орган" сенсора изменяет свое положение в зависимости от воздействия на него внешней силы.

Эта симуляция (рис. 5) отображает первые четыре резонансные состояния нанотрубки, жестко закрепленной с двух сторон. В. Сазонова и П. МакЮн рассчитали эти состояния, и показали, что их можно "подстроить" под широкий спектр частот.

Углеродные нанотрубки — идеальные кандидаты для рабочего органа такого устройства, так как у них большая упругость. Это позволяет нанотрубке колебаться в широком диапазоне частот, а это, в свою очередь, необходимо для квантово-механических устройств. Более того, нанотрубка может работать в качестве транзистора, что позволило исследователям определить частоту ее колебаний и смещения относительно положения покоя. Все сказанное выше характеризует однослойную углеродную нанотрубку как универсальный детектор массы и силы. В детекторе исследователи использовали нанотрубку диаметром 1...4 нм.

Пол МакЮн и его коллеги сделали детектор следующим образом: между двумя электродами, расположенными на желобке из оксида кремния,

протянули нанотрубку, жестко закрепленную на концах. В результате получился транзистор. Электроды были стоком и истоком, а подложка с канавкой из оксида кремния — затвором. Далее, изменяя напряжение на электродах, физики из Корнелла добились оптимального натяжения нанотрубки (за счет электростатического притяжения к затвору), а также заставили ее вибрировать. Теперь, измеряя изменения электрической емкости между нанотрубкой и затвором, можно было установить, насколько нанотрубка отклоняется от положения покоя, или же измерить частоту вибрации нанотрубки.

МакЮн и его команда смогли измерить резонансные частоты нанотрубки от 3 до 200 МГц. Также они смогли измерить смещение нанотрубки всего на 0,5 нм от положения равновесия. На сегодняшний день это лучшие результаты измерения массы, достигнутые при комнатной температуре.

Так как частота вибрации нанотрубки представляет собой функцию от ее массы, то добавление к этой массе посторонней массы изменит частоту колебаний. Проще говоря — если соединить с нанотрубкой очень маленький предмет, то можно будет его взвесить! Ранее на кремниевых кантилеверах можно было взвесить бактерию или вирус. Теперь, как говорит МакЮн, с помощью нового детектора "Мы достигли границы в измерениях массы — теперь с помощью нашего устройства (наверняка при его модификации — прим. переводчика) можно будет взвешивать отдельные атомы".

Исследователи проводили измерения в вакууме. В воздухе большое число разных молекул будет сталкиваться с нанотрубкой, или даже абсорбироваться с ней, изменяя ее массу. Поэтому, как сказал МакЮн, одно из применений сенсора, которое лежит "на поверхности", — детектирование газов.

Ю. Г. Свидиненко

## ИНФОРМАЦИЯ

### MICROWAVE OFFICE ТЕПЕРЬ УМЕЕТ МОДЕЛИРОВАТЬ MEMS-УСТРОЙСТВА

Компания Applied Wave Research ([www.mwofice.com](http://www.mwofice.com)) заявила об интеграции своего пакета проектирования СВЧ устройств Microwave Office с программным обеспечением для разработки микроэлектромеханических (MEMS) устройств EM3DS итальянской компании MEM Research ([www.memresearch.com](http://www.memresearch.com)).

Интеграция стала возможной благодаря использованию универсального интерфейса EM Socket, обеспечивающего передачу топологической информации между двумя системами.

Теперь пользователи пакета Microwave Office могут готовить схемы и топологии разрабатываемых ими устройств в рамках привычной им среды проектирования AWR Design Environment и передавать в систему EM3DS для дальнейшего моделирования без выполнения операции импорта и экспорта файлов. Пользователи, хорошо знакомые с пакетом EM3DS, могут работать в его собственном топологическом редакторе. При этом топологиче-

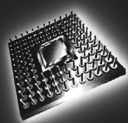
ские данные и результаты расчета оказываются напрямую встроенными в объектно-ориентированную базу данных Microwave Office.

Пакет EM3DS представляет собой программу трехмерного электромагнитного моделирования квазипланарных структур, специально предназначенную для проектирования микроэлектромеханических устройств (MEMS) и монолитных СВЧ интегральных схем (MMIC). Он позволяет моделировать толстые проводники, неоднородности в диэлектрике и эффекты в пьезоэлектрических материалах. Например, здесь есть возможность анализа резонаторов на объемных акустических волнах с учетом высокочастотных паразитных связей и акустических эффектов в средах с частотно-зависимыми свойствами.

Возможность описывать распределенные и управляемые источники токов впервые позволяет выполнить полное моделирование MESFET- и HEMT-транзисторов.

За любой дополнительной информацией  
просим обращаться по адресу [info@eltm.ru](mailto:info@eltm.ru) или телефону (095) 974-14-80

# Е•Х•Р•О ELECTRONICA



8-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ  
ВЫСТАВКА ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ  
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

8th INTERNATIONAL EXHIBITION FOR ELECTRONIC  
COMPONENTS AND TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

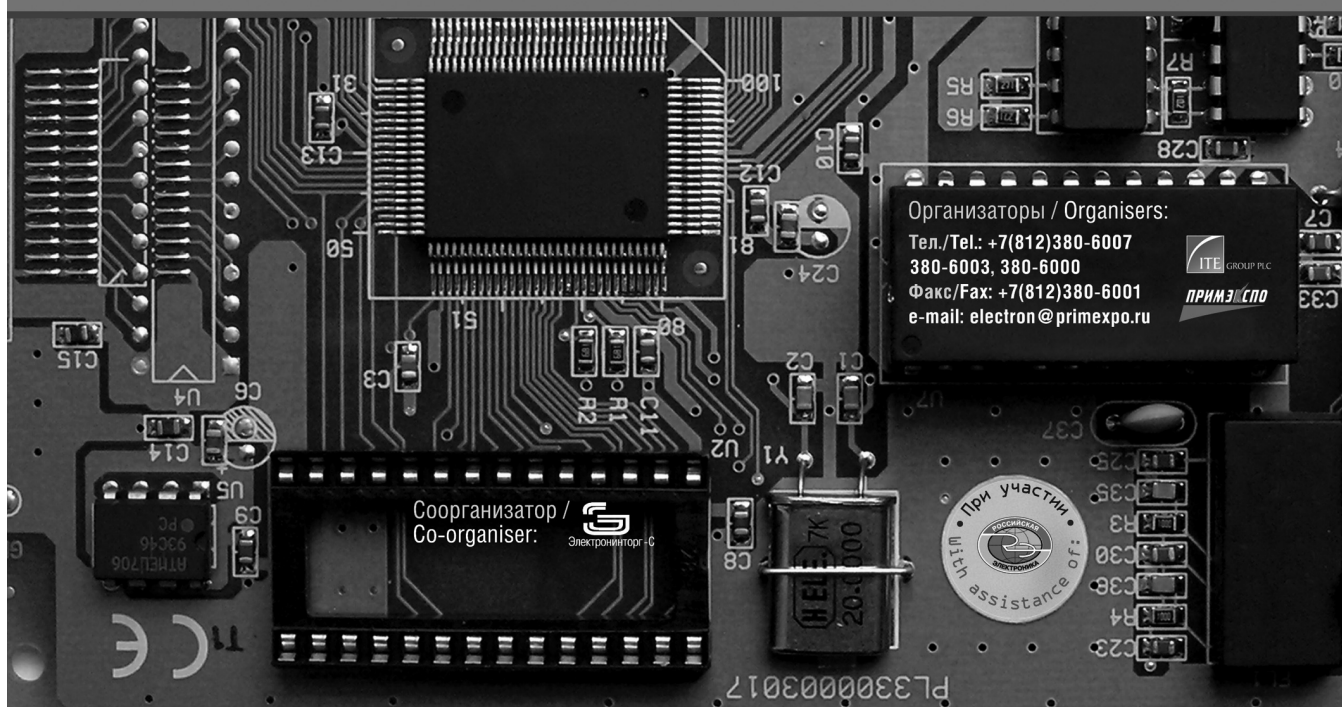
## 5-8 АПРЕЛЯ / APRIL 2005

РОССИЯ, МОСКВА, СК "ОЛИМПИЙСКИЙ"

OLIMPIYSKIY COMPLEX, MOSCOW, RUSSIA

Совместно с / Incorporating:

Electron<sup>tech</sup> expo



Организаторы / Organisers:

Тел./Tel.: +7(812)380-6007

380-6003, 380-6000

Факс/Fax: +7(812)380-6001

e-mail: electron@primexpo.ru



PRIMEXPO

Соорганизатор /  
Co-organiser:



При официальной поддержке / The official support:



Министерство промышленности и энергетики Российской Федерации  
Ministry of Industry and Energetic of the Russian Federation

Министерство экономического развития и торговли Российской Федерации  
Ministry of Economic Development and Trade of the Russian Federation

Министерство информационных технологий и связи Российской Федерации  
Ministry of Information Technologies and Communications of the Russian Federation

Правительство Москвы  
Moscow government

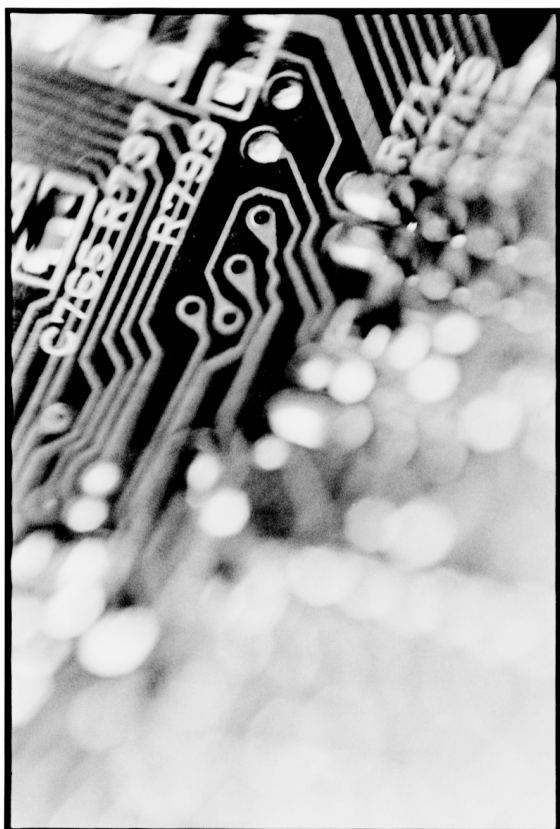
Информационные спонсоры / Information sponsors:



[www.expoelectronica.ru](http://www.expoelectronica.ru)

**2-я специализированная выставка**  
**EIF.UR (ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА)**

**22-25 марта 2005**



*Разделы выставки:*

*Средства и системы автоматизации,  
электронные компоненты  
для промышленности*

*Промышленные роботы и  
компоненты гибкой автоматки*

*Электронные компоненты и  
комплектующие*

Организатор:

**ЕХР**



МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
СОЮЗ ВЫСТАВОК И  
ЯРМАРОК

**УРАЛЭКСПОЦЕНТР**

Евро-Азиатский Выставочный Холдинг

Тел.: (343)3493017, 3493027

E-mail: [uralexpo@mail.ur.ru](mailto:uralexpo@mail.ur.ru)

<http://www.uralexpo.ur.ru>

Информационная  
поддержка:



**URALFIRM.ru**

Официальный  
интернет-провайдер:

**УралРелком**  
ваш Интернет

# CONTENTS

**Verner V. D., Maltsev P. P., Saurov A. N., Chaplygin Yu. A.**  
*Technology of Miniaturization "Top — down"*

or "Bottom — up". . . . . 5

Possible ways of future products miniaturization of microelectronics and microsystem technique have been presented.

**Maltsev P. P.** *About Classification in the Field*

*of Microsystem Engineering* . . . . . 9

The classification of Products of Microsystem engineering is considered in view of complexity and mass dimensions of the characteristics.

**Fedorinin V. N.** *MEMS-Technology of Infrared Vision*. . . . . 11

In this article the matrix receiver of infrared vision consisted of microacoustical chip.

**Tatmyshevski K. V.** *Mechanoluminescent (Light-Generative)*

*Sensor Elements for Modern Informative-Measuring*

*Technologies* . . . . . 13

The physics bases of the work and mathematic model of the mechanoluminescent pressure sensors made of the ZnS combinations are considered in the paper. The obtained results of the output optic signal's calculation of the sensor elements are shown.

**Soborover E. I., Tkachenko S. V.** *A Surface Acoustic Wave*

*(SAW) Chemical Sensors for Multisensoren Atmospheric Monitoring*

*Array*. . . . . 18

This state shows an opportunity ty the surface acoustic wave (SAW) chemical sensors with sensitive layers — functional copolymers alkylmethacrilate and polydimethylsiloxane with green cationic as sensor element of a multisensor array gas monitoring much of the main priority pollution's gases in the atmospheric air: carbon monoxide (CO), ammonia (NH<sub>3</sub>), sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>), hydrogen sulphur (H<sub>2</sub>S).

**Beskrovnyi I. M.** *Technological Generations of Modern Electronics* . . . . . 22

Concepts of a technological epoch and technological generation of electronic schemes are determined. Generations of an epoch of solid-state nanoelectronics are briefly considered. Definition of generation solid-state nanoelectronics, being boundary on a joint of two technological epoch is entered: namely solid-state epoch and epoch nanoelectronics. It is shown, that Moore's law can form a basis for the forecast of dynamics of development of technology of semi-conductor manufacture not only for generation SGIS, basing on MOP-structures. Briefly considered major factors of influence on manufacturers of electronic schemes, including the market mechanism, which is a primary factor, determining dynamics of development of technology. Inevitability of change of technological epoch — transition from solid-state epoch to nanoelectronics epoch is shown.

**Fomin L. F.** *The Modelling of Pulsatile Oscillations of Flexible*

*Microobjects for Purposes of Nanotechnologies* . . . . . 31

The results of investigations on micromechanics of self-propulsions in viscous fluids of flexible deformable microobjects by the excitation of pulsatile oscillations of their shape are presented. Axisymmetric slow creeping motions are considered.

**Erokhin V. V.** *Processors for SoCs* . . . . . 35

Modern trends into processor IP cores for system-on-a-chip are discussed. Typical properties both traditional processor analogs and special for SoCs are considered.

**Troshin E. V.** *About the Problem of Classification of Space*

*Vehicles, the Caused Miniaturization*. . . . . 45

Miniaturization in astronautics results in occurrence of a new class of space systems as which basis space vehicles of small and midget weight serve. In this connection there are various attempts of classification of space vehicles on their weight. In article criticism of existing approaches to such classification is submitted, and the system approach to classification is offered.

## For foreign subscribers:

Joint-stock company MK-Periodica. E-mail: [info@periodicals.ru](mailto:info@periodicals.ru) Tel.: +7(095) 284-5008. Fax: +7(095) 681-3798

The journal bought since november 1999.

Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev

ISSN 1684-6419.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(095) 269-5510.

E-mail: [it@novtex.ru](mailto:it@novtex.ru); <http://www.microsystems.ru>

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4/1. Телефон редакции журнала (095) 269-5510. E-mail: [it@novtex.ru](mailto:it@novtex.ru)

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства

в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т.Н. Погорелова. Технический редактор И.С. Павлова. Корректор А. В. Лабуть

Сдано в набор 01.11.2004. Подписано в печать 06.12.2004. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,88. Заказ 57. Цена договорная

Отпечатано в Подольской типографии — филиал ОАО "ЧПК", 142110, г. Подольск, ул. Кирова, 15