

# НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 5 ✧ 2006

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Издается с 1999 г.

## Главный редактор

Мальцев П. П.

## Зам. гл. редактора

Лучинин В. В.

## Редакционный совет:

Аристов В. В.  
Асеев А. Л.  
Гапонов С. В.  
Каляев И. А.  
Климов Д. М.  
Ковальчук М. В.  
Лифшиц В. Г.  
Мокеров В. Г.  
Никитов С. А.  
Чаплыгин Ю. А.  
Шевченко В. Я.

## Редакционная коллегия:

Абрамов И. И.  
Антонов Б. И.  
Астахов М. В.  
Быков В. А.  
Волчихин В. И.  
Гоев А. И.  
Горнев Е. С.  
Градецкий В. Г.  
Гурович Б. А.  
Журавлев П. В.  
Захаревич В. Г.  
Кальнов В. А.  
Карякин А. А.  
Квардаков В. В.  
Кузин А. Ю.  
Мокров Е. А.  
Норенков И. П.  
Панич А. Е.  
Панфилов Ю. В.  
Петросянец К. О.  
Петрунин В. Ф.  
Путилов А. В.  
Пятышев Е. Н.  
Сауров А. Н.  
Сигов А. С.  
Сухопаров А. И.  
Телец В. А.  
Тодуа П. А.

## Отв. секретарь

Лысенко А. В.

## Редакция:

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

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

### НАНОТЕХНОЛОГИИ

Волков Г. М. Технологические проблемы перехода от микро- к наносистемам консолидации дисперсных частиц вещества . . . . . 2

### ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Морозов С. В., Воронин О. Г., Карякина Е. Е., Карякин А. А. Водородные топливные электроды на основе ферментов . . . . . 9

Сафронов А. Я., Горнев Е. С., Зайцев Н. А., Матюшкин И. В.

Концептуализация маршрута проектирования микромеханических систем с пьезоэлементами. . . . . 13

### МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Агучин В. В., Кидяров Б. И., Первухина Н. В. Систематизация и взаимосвязь микро- и макроструктуры с физическими свойствами оксидных кристаллов без центра инверсии. Часть II. Нелинейно-оптические свойства бинарных оксидных кристаллов. . . . . 20

Лалетин Р. А., Бурханов А. И., Сигов А. С., Воротилов К. А. Воздействие

низко- и инфранизкочастотных электрических полей на поведение доменной структуры пленок PZT при различных механических напряжениях в материале . . . . . 26

### СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

Степченко Ю. А., Петрухин В. С., Дьяченко Ю. Г. Опыт разработки самосинхронного ядра микроконтроллера на базовом матричном кристалле. 29

### ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

Беляев В. МЭМС/МСТ в современной технике на примере автомобилестроения и авиации . . . . . 36

### СПРАВОЧНЫЕ СТРАНИЦЫ

Яшин К. Д., Лацапнёв Е. В. Англо-русский терминологический справочник по микро- и наносистемной технике . . . . . 45

СТРАНИЧКА РФФИ . . . . . 49

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ . . . . . 50

ИНФОРМАЦИЯ . . . . . 54

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)

УДК 678.012

Г. М. Волков, д-р техн. наук, проф.,  
МГТУ—МАМИ, Москва

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕХОДА ОТ МИКРО- К НАНОСИСТЕМАМ КОНСОЛИДАЦИИ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ВЕЩЕСТВА

*На примере углерода в аллотропной модификации графита показана возможность теоретической оценки верхнего предела наноразмерного диапазона дисперсных частиц вещества. По молекулярным диаграммам конденсированных молекул гомологического ряда ароматических углеводородов вычислено удельное значение индекса свободной валентности периферийных и внутренних атомов углерода. Рассматривая графит как предельную степень конденсации ароматических углеводородов, оценили критический диаметр его наночастиц.*

*На примере системы углерод — углерод показана возможность осуществления одностадийной технологии нанокompозитов. Углеродные наночастицы и связывающая их углеродная матрица формируются в едином технологическом процессе. Представлены структура и основные свойства нанокompозита системы углерод — углерод.*

Создание и эксплуатация современных технических устройств предъявляет повышенные требования к материалам. Свойства металлических и неметаллических материалов по отдельности в большинстве случаев не удовлетворяют предъявляемым требованиям. Только грамотное сочетание в едином материале требуемых свойств различных веществ как металлической природы, так и неметаллов, как органического, так и неорганического происхождения позволяет сознательно конструировать состав и структуру материала с заранее заданными свойствами.

Такие материалы, в отличие от материалов традиционной технологии, получили название композиционных материалов или, сокращенно, композитов. Основным критерием оценки композитов конструкционного назначения является их прочность.

Способность дискретного элемента наполнителя (в большинстве случаев это дисперсное зерно) препятствовать распространению трещины в матрице композита пропорциональна его прочности. Прочность зерна зависит от количества имеющихся в нем дефектов строения, по которым происходит разрушение зерна под действием нагрузки.

В процессе измельчения наполнителя вскрываются дефекты строения зерен, что приводит к их упрочнению. Поэтому в качестве наполнителя при создании композиционного материала предпочитают использовать дисперсный наполнитель, имеющий большую по сравнению с крупнозернистым наполнителем прочность.

Однако практически достижимая путем механического измельчения дисперсность вещества имеет определенный предел. Для получения более мелких частиц наполнителя с априори большей прочностью используют принцип фазовой перекристаллизации. В связи с этим представляет интерес оценить критический параметр перехода от микросистемы матрица — наполнитель, характерной для композиционных материалов традиционной технологии, к наносистеме композитов, получаемых по нанотехнологии.

Силовое поле атомов вещества, расположенных на границе раздела фаз, резко отличается от энергетического состояния атомов в объеме вещества (рис. 1). Внутренние атомы испытывают равномерное воздействие окружающих атомов. В данном случае равнодействующая сил атомарного взаимодействия практически равна нулю. Атомы на поверхности раздела фаз имеют неуравновешенные взаимодействия с другими атомами свободные валентности. При определенном размере дисперсной частицы влияние периферийных атомов на свойства вещества уравнивается влиянием внутренних атомов. Этот размер, который мы обозначим как  $d_{кр}$ , является критическим параметром нанотехнологии. При размере дисперсных частиц более  $d_{кр}$  комплекс их физических и химических свойств не отличается от свойств вещества в монолитном образце. При размере дисперсных частиц меньше  $d_{кр}$  влияние периферийных атомов на свойства вещества начинает преобладать над влиянием внутренних атомов, т. е. оно приобретает

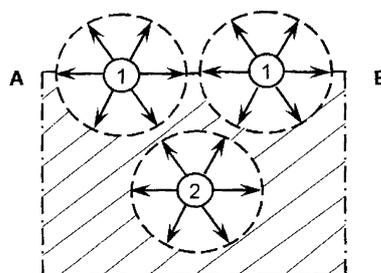


Рис. 1. Схема атомарного взаимодействия в объеме и на поверхности раздела фаз:

A—B — поверхность раздела фаз; 1 — поверхностные атомы; 2 — атом в объеме фазы

другие свойства, отличающиеся от свойств вещества в монолитном образце. Дисперсная частица переходит в новое качество: она становится наночастицей, а компактная консолидация наночастиц позволяет получить наноматериал.

Наноразмерные частицы занимают промежуточное положение между молекулами и микроскопическими объектами, которые имеют характеристические размеры около 1 мкм. В данном случае количественная разница в размерах переходит в качественное отличие свойств вещества. Свойства вещества частиц микроскопических размеров подчиняются закономерностям классической физики. Наноразмерные частицы вещества фундаментально отличаются от дисперсных частиц микроскопических размеров: свойства нанокристаллических веществ и материалов на их основе описываются законами квантовой физики.

Только при адекватной оценке размера наночастиц и удовлетворительном технологическом решении их получения и компактирования можем получить нанопродукт, свойства которого будут в разы отличаться от свойств идентичного по химическому составу материала традиционной технологии. В противном случае улучшение свойств материала за счет введения дисперсных, но выходящих за пределы наноразмерного диапазона частиц, будет измеряться процентами от исходного уровня.

*Наноразмерными* принято называть материалы, дискретные элементы структуры которых имеют хотя бы в одном измерении размеры менее 100 нм. Нижний предел диапазона наночастиц соответствует размеру молекул, а верхний предел принят равным 100 нм в качестве условного классификационного параметра. Умозрительные оценки разных авторов дают большой разброс значений реального размера наночастиц. Между тем критический диаметр наночастиц является одним из основных параметров нанотехнологии.

Для количественной оценки значения  $d_{кр}$  в качестве объекта анализа выбрали углерод, что интересно в научном плане: число известных химических соединений углерода многократно превышает суммарное число соединений всех остальных элементов таблицы Д. И. Менделеева. Это соотношение существенно увеличилось после открытия фуллеренов, углеродных нанотрубок и их производных.

Нанотрубки можно рассматривать как своеобразный химический реактор. Происходящие в них химические превращения существенно отличаются от тех же реакций, проводимых в обычных условиях. Это открывает большие перспективы для исследований в области теоретической и экспериментальной химии, которые закладывают основы нового раздела химической науки — химии наночастиц семейства фуллеренов. Объектами исследо-

вания нового раздела химии являются фуллереноподобные наночастицы, которые наиболее ярко выявляют разницу между классической химией и химией наночастиц.

В утилитарном плане представляет интерес углерод в аллотропной модификации графита: только он выделяется среди всех известных химических элементов и их соединений способностью оставаться в твердой фазе при температурах свыше 4000 °С и только на его основе создано крупнотоннажное производство углеродных материалов конструкционного назначения.

Для количественной оценки критического диаметра наночастиц графита его структуру рассматривали как предельную степень конденсации углеводородов ароматического ряда.

Классическое учение о реакционной способности органических соединений [1], рассматривающее химическую активность вещества как следствие особенностей его молекулярного строения, с появлением квантовой механики сблизилось с электронной теорией атомов и молекул. Способность вещества к химическим превращениям связывают с параметрами, характеризующими распределение  $\pi$ -электронной плотности изолированной молекулы в исходном состоянии. В случае исследования относительного изменения химических свойств в ряду однотипных молекул допускают, что изменением  $\sigma$ -электронных энергий и  $\sigma-\pi$  взаимодействий можно пренебречь. Для характеристики химической активности молекул используют индексы электронной структуры, которые обычно представляют в виде молекулярных диаграмм. Одним из параметров молекулярной диаграммы является индекс свободной валентности. Он служит мерой способности атома к взаимодействию с другими атомами или группой атомов, т. е. характеризует его химическую активность.

Четырехвалентный атом углерода может находиться в одном из трех валентных состояний (табл. 1). Для ароматических углеводородов и графита экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с тригональной моделью ядерно-электронного строения атомов углерода, согласно которой в результате  $sp^2$ -гибридизации электронных орбиталей атом углерода имеет три равноцен-

Таблица 1  
Характеристика углерод-углеродных связей

Аллотропная модификация	Углерод-углеродная связь		
	Тип	Длина, нм	Энергия, кДж/моль
Алмаз	C—C	0,1542	347
Графит	C=C	0,1415	611
Карбин	C≡C	0,1205	837

ные валентности, расположенные в одной плоскости и направленные под углом в  $120^\circ$  друг к другу. Они образуют  $\sigma$ -связи между атомами углерода, а электронное облако  $\pi$ -электрона расположено перпендикулярно плоскости размещения электронных облаков трех гибридных электронов.

Следует иметь в виду, что для атомов углерода кристаллической решетки графита тригональную модель строения можно рассматривать лишь как приближенную схему, так как непосредственно не связанные друг с другом атомы также оказывают взаимное влияние на ядерно-электронное строение кристаллита графита. Кроме того, в любом многоядерном химическом соединении любой его электрон делокализован по всему пространству, включающему все ядра химического соединения, и имеет отличную от нуля вероятность находиться в окрестности любого ядра. Поэтому разделение электронов многоядерных химических соединений, к которым относится и кристаллит графита, на  $\sigma$ - и  $\pi$ -электроны является достаточно условным.

Для некоторых конденсированных углеводородов ароматического ряда по методу молекулярных

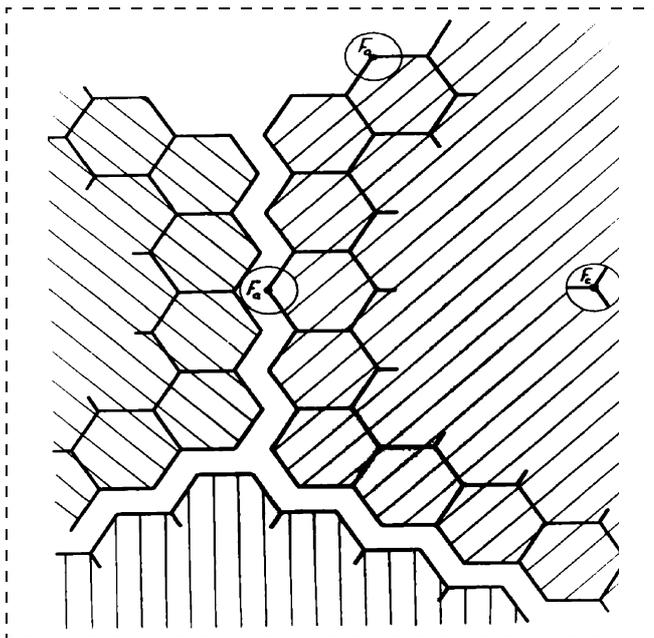


Рис. 2. Индексы свободной валентности периферийных ( $F_a$ ) и внутренних ( $F_c$ ) атомов углерода кристаллической решетки графита

Таблица 2  
Влияние размера молекул конденсированных ароматических углеводородов на долю насыщенных связей периферийных атомов углерода

Макромолекула	Средний размер макромолекулы, $L_a$ , нм	Удельный индекс свободной валентности атомов углерода		Доля ненасыщенных связей периферийных атомов, $\frac{F_a - F_c}{F_a + F_c}$ , %
		периферийных $F_a$	внутренних $F_c$	
	0,7	0,333	0,150	37,9
	0,8	0,336	0,153	37,4
	1,0	0,333	0,155	36,5
	1,3	0,343	0,161	36,1
	1,6	0,342	0,171	33,3

орбиталей рассчитаны молекулярные диаграммы [2]. Эти данные позволяют вычислить удельное значение индекса свободной валентности периферийных и внутренних атомов углерода конденсированных ароматических молекул (табл. 2). Рассматривая графит как крайний член гомологического ряда ароматических углеводородов (рис. 2), можно определить теоретическое значение  $d_{кр}$  его дисперсных частиц.

Следует отметить, что данный расчет не учитывает взаимодействия между атомами углерода, расположенными в параллельных слоях кристаллической решетки графита. Однако, принимая во внимание значительно более слабое взаимодействие  $\pi$ -электронов по сравнению с  $\sigma$ -связью, можно полагать, что введение поправки на взаимодействие между атомами углерода параллельных слоев кристаллической решетки графита не внесет значительных погрешностей в представленный расчет  $d_{кр}$ .

Экстраполяция зависимости индекса свободной валентности периферийных атомов углерода молекул конденсированных ароматических углеводородов от их размера (рис. 3) позволяет количественно оценить значение верхнего предела наноразмерного диапазона дисперсных частиц углерода в аллотропной модификации графита.

По результатам выполненного анализа  $d_{кр}$  дисперсных частиц графита составляет около 10 нм. Дисперсные частицы графита больших размеров будут иметь все свойства графита, определенные на макрообразцах, а свойства частиц меньших размеров будут от них отличаться. Компактируя час-

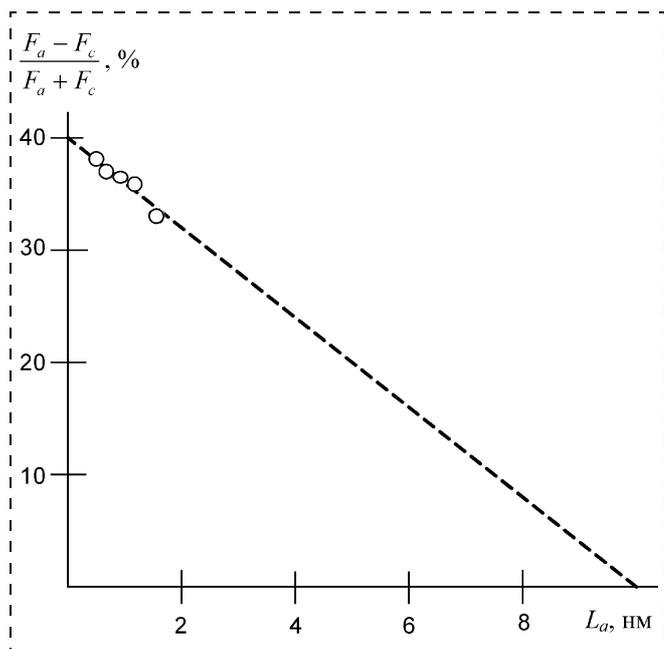


Рис. 3. Зависимость доли ненасыщенных связей периферийных атомов углерода в энергетическом поле конденсированных ароматических углеводородов от размера молекулы

тицы графита с размерами менее  $d_{кр}$  в единый монолит, можно надеяться получить наноккомпозит со свойствами, существенно отличающимися от свойств углеграфитовых материалов традиционной технологии.

Для успешной реализации потенциальных возможностей нанотехнологии в потребительских свойствах получаемого продукта разработчик должен решить следующие основные задачи:

1. Определить верхний предел наноразмерного диапазона дисперсных частиц вещества.
2. Отработать технологию получения вещества в виде дисперсных частиц наноразмерного диапазона.
3. Отработать технологию введения наночастиц в соответствующую матрицу.

Решение последней задачи обязательно при получении конечного продукта нанотехнологии в виде материала конструкционного или функционального назначения. В некоторых случаях, когда целевое применение находит наночастица, например, в нанoeлектронике или в сорбентах с порами наноразмерного диапазона, данная задача перед разработчиком нанопродукта не стоит.

Практическое осуществление технологии наноккомпозитов невозможно без рационального решения двух равнозначных задач: получения наполнителя наноразмерного диапазона дисперсности и введения его в матрицу будущего композиционного материала. Основные технологические операции нанотехнологии по решению этих задач фактически повторяют аналогичные переделы производ-

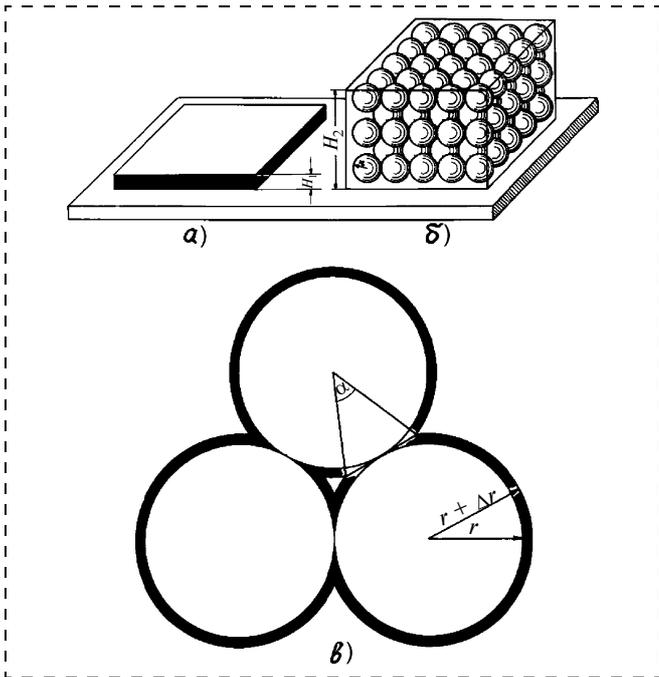
ства композиционных материалов традиционной технологии. Однако наноразмеры наполнителя многократно усложняют аппаратное оформление технологических процессов, которые требуют высококвалифицированного обслуживания сложного технологического оборудования и нового, более высокого уровня культуры производства.

Технологический процесс получения наночастиц достаточно сложен в аппаратном оформлении. Кроме того, получаемые наночастицы в большинстве случаев загрязнены примесями или частицами иного химического состава, например, катализатором процесса, или другой аллотропной модификацией и переходными формами того же вещества, например, графитом и сажой при получении фуллеренов и углеродных нанотрубок. Отделение наночастиц от примесей достаточно длительный и не менее сложный, чем получение наночастиц, процесс.

Практически все методы синтеза наноразмерного наполнителя приводят к его получению в неравновесном метастабильном состоянии. Свободная валентность периферийных атомов наночастиц реализуется в избыточной энергии наноразмерного наполнителя, что обуславливает его высокую химическую активность. Это создает значительные трудности в осуществлении как технологического процесса очистки наночастиц от сопутствующих примесей, так и последующего введения и равномерного распределения химически активного наполнителя в матрице композиционного материала. Завершающая операция нанотехнологии должна обеспечить компактирование наночастиц в монолитный материал, не допуская исчезновения фазовых границ, что привело бы к превращению нанокристаллического материала в обычный композиционный материал традиционной технологии с микроскопической структурой и соответствующими свойствами.

В настоящее время большинство активных разработчиков нанопродуктов сосредоточено на решении одной из технологических операций нанотехнологии — получении наночастиц или на их компактировании. Однако разделение этих технологических процессов в пространстве и во времени, на наш взгляд, экономически не оправданно и поэтому не может служить основой промышленного производства наноккомпозитов конструкционного назначения.

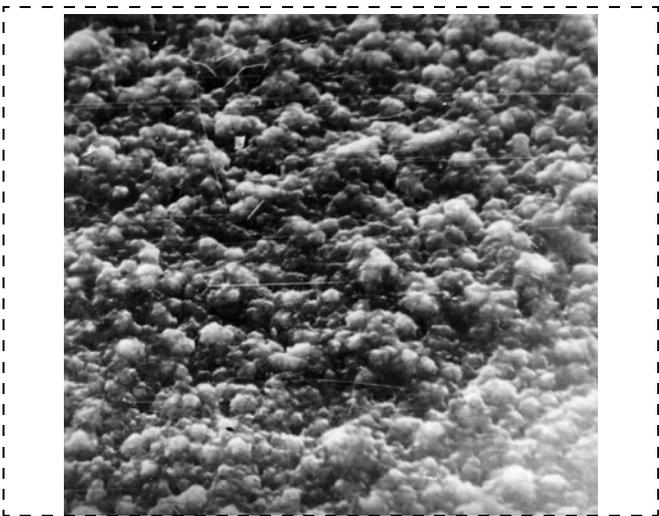
На основании представленного в данной работе теоретического анализа, который частично опубликован ранее [3], и технологических проработок [4] нам удалось совместить процесс получения наночастиц и их компактирования в едином технологическом процессе [5].



**Рис. 4.** Теоретическая модель формирования квазизотропной структуры нанокompозита в едином технологическом процессе: *a* — углеродная матрица; *б* — углеродные наночастицы; *в* — схема связывания углеродных наночастиц углеродной матрицей в единый монолит

Работы выполнены на примере системы углерод — углерод. Однако мы полагаем, что вышеназванные этапы осуществления технологического проекта по созданию одностадийной технологии нанокompозитов могут быть выполнены как для получения широкой гаммы других модификаций нанокompозитов системы углерод — углерод, так и применительно к системам наполнитель — матрица другого химического состава.

Теоретическая модель структуры нанокompозитов системы углерод — углерод представлена на



**Рис. 5.** Структура нанокompозита системы углерод — углерод

рис. 4, а экспериментальный результат ее практической реализации показан на рис. 5. Из сопоставления рисунков видно, что эксперимент не противоречит его теории.

Свойства углеродных нанокompозитов многократно превосходят свойства традиционных углеродных материалов.

Ниже представлены некоторые свойства одной из модификаций нанокompозитов системы углерод — углерод.

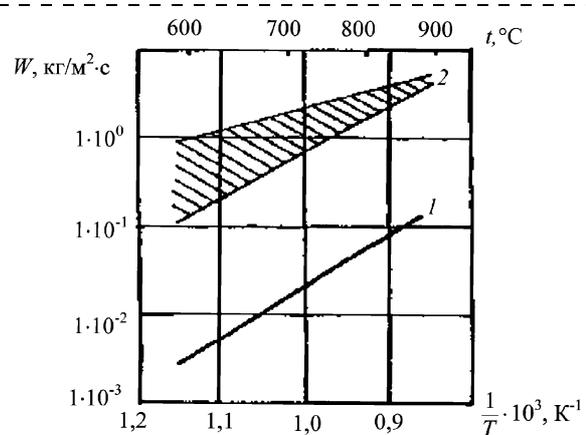
Основной недостаток всех углеродных материалов является следствием свойств углерода как химического элемента: независимо от аллотропной модификации его кристаллического строения он при повышенных температурах начинает активно взаимодействовать с кислородом и другими окислительными агентами, хотя скорость реакции существенно зависит от вида кристаллической решетки углерода и степени ее совершенства.

По химической стойкости в активных средах с окислительным потенциалом нанокompозит превосходит лучшие марки углеродных материалов конструкционного назначения до 300 раз (рис. 6), по коэффициенту катодного распыления — в 15 раз (рис. 7), по коэффициенту трения в жидких средах — в 5 раз (рис. 8).

Кроме отмеченных выше, углеродный нанокompозит обладает и другими уникальными свойствами.

Нанокompозит при нормальных условиях инертен практически ко всем химически активным средам. Следствием его химической инертности является биологическая инертность и тромборезистентность в среде нативной крови. Он работоспособен в условиях радиационного облучения.

По высокотемпературной удельной прочности нанокompозит превосходит вольфрам до 5 раз (рис. 9).



**Рис. 6.** Температурная зависимость скорости окисления углеродных материалов в воздушной атмосфере:

1 — углесталл; 2 — углеродные материалы традиционной технологии

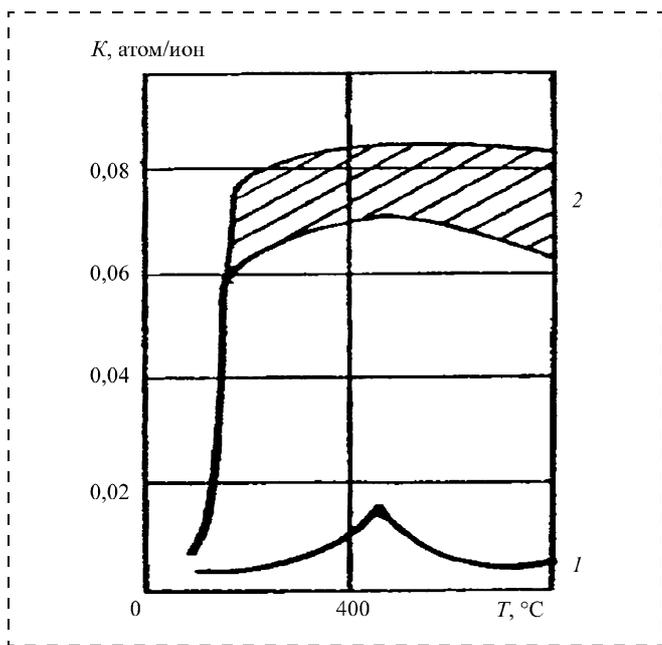


Рис. 7. Температурная зависимость катодного распыления углеродных материалов протонами энергии 10 кэВ:

1 — углеситалл; 2 — современные углеродные материалы

Ниже приведены физико-механические свойства нанокompозита:

Плотность, г/см <sup>3</sup> . . . . .	1,8
Предел прочности при, МПа:	
растяжении . . . . .	100
изгибе . . . . .	200
сжатии . . . . .	500
Микротвердость, МПа . . . . .	1000
Модуль упругости. . . . .	210
Коэффициент термического расширения, К <sup>-1</sup>	$5,5 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент теплопроводности, Вт/м · К . . .	30
Удельное электросопротивление, Ом · м . . .	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент газопроницаемости, см <sup>2</sup> /с . .	$1 \cdot 10^{-6}$

Разработанная нами одностадийная технология нанокompозитов системы углерод — углерод имеет промышленные перспективы. Продукция может быть изготовлена в виде пластин и труб, а также в виде конкретных изделий. В производственных условиях отработана технология получения нанокompозита в виде пластин размером до 100 × 200 мм, толщиной до 10 мм и труб с внешним диаметром до 150 мм, толщиной стенок до 10 мм и длиной до 200 мм.

Технология нанокompозитов теоретически обоснована и экспериментально отработана. Возможности управления технологией показаны на рис. 10. Изменяя концентрацию и размеры наночастиц углерода, получаем чередующиеся слои (рис. 10, а) углеродного материала кристаллоориентированной структуры и углеродный нанокompозит квазиизотропной структуры. Темное поле представляет собой нанокompозит квазиизотроп-

ной структуры с оптимальным содержанием наноразмерных частиц углерода в углеродной матрице, светлое поле — углеродная матрица с более крупными включениями дисперсных частиц углерода, размеры которых превышают верхний предел  $d_{кр}$  наноразмерного диапазона частиц углерода в аллотропной модификации графита. Увеличенный фрагмент структуры показан на рис. 10, б.

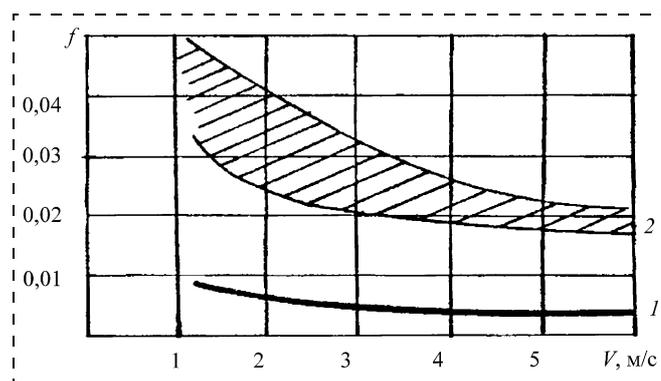


Рис. 8. Зависимость коэффициента трения углеродных материалов по коррозионно-стойкой стали марки 30X13 в режиме торцевого уплотнения водной среды:

1 — углеситалл; 2 — антифрикционные графиты

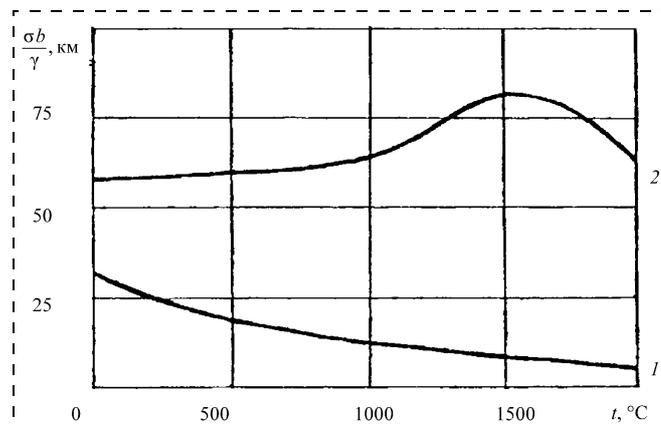


Рис. 9. Температурная зависимость удельной прочности высокотемпературных материалов:

1 — углеситалл; 2 — вольфрам

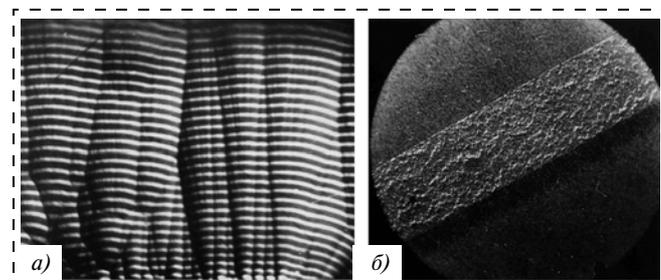


Рис. 10. Возможности одностадийной технологии нанокompозита системы углерод — углерод по управлению концентрацией дисперсных частиц углерода в углеродной матрице (снимки выполнены в поляризованном свете)

Представленные выше технические свойства нанокompозита системы углерод — углерод имеют многочисленные технические приложения с большим технико-экономическим эффектом. Возможность получения натуральных изделий в промышленных масштабах позволила реализовать уникальные свойства нанокompозита в самых смелых проектах человечества.

Современная цивилизация основана на использовании электроэнергии, сырьевые источники производства которой ограничены. Альтернативой энергетическому голоду считают производство электроэнергии в процессе синтеза ядер химических элементов, который осуществляется в термоядерных реакторах. Диафрагма из нанокompозита системы углерод — углерод [6] в течение многих лет эксплуатации термоядерных реакторов типа Токомак серии Т-4, Т-3М и Т-7 успешно ограничивала рабочее тело реактора из дейтерий-тритиевой плазмы с температурой около  $100 \cdot 10^6$  °С.

Основным ограничением продолжительности жизни человека в современных условиях являются сердечно-сосудистые заболевания. Поэтому предпринимаются попытки создания искусственных органов системы кровообращения. Наиболее востребованы искусственные клапаны сердца. Их работоспособность обеспечивает запирающий элемент, который должен выдерживать около 40 млн двойных (при открывании и закрывании клапана) ударов в год в химически активной среде нативной крови.

Запирающие элементы зарубежных фирм представляют собой сложную конструкцию с защитным покрытием из низкотемпературного пироуглерода толщиной до 200 мкм. Разработчики были вынуждены принять такое решение, так как зарубежные ученые считали невозможным получить покрытие большей толщины, а тем более монолитный конструкционный материал, работоспособный в условиях запирающего элемента искусственного клапана сердца [7].

Модифицирование структуры и свойств нанокompозита позволило создать запирающий элемент в виде монолитной детали [8], что упрощает конструкцию и повышает его надежность. Стендовые испытания показали, что ресурс безотказной работы нанокompозита в данных условиях соизмерим с продолжительностью жизни человека с пятикратным запасом. Все искусственные клапаны сердца российского производства имеют запирающие элементы монолитной конструкции из нанокompозита системы углерод — углерод.

Зарубежные производители искусственных клапанов сердца после получения возможности изучить клапаны российского производства были настолько озадачены монолитной конструкцией его

запирающего элемента, что глава фирмы проф. *J. C. Bokros* лично приезжал в Москву познакомиться с автором невозможного по западным представлениям материала.

Отметим, что представленные в данной статье работы по нанотехнологии [3—5] выполнены задолго до появления самого термина "нанотехнология", поэтому, чтобы подчеркнуть принципиально новый уровень структуры и свойств получаемых по данной технологии материалов, для их обозначения мы ввели новый термин — "углеситалл" [5] по аналогии технологии, структуры и свойств нового материала с ситаллами. Ситаллы также являются нанокompозитами, впервые созданными советскими учеными за много лет до широкого развития работ по нанотехнологии в мировом сообществе.

Для юридического обеспечения отечественного научного приоритета в разработке технологии нанокompозитов системы углерод — углерод была оформлена заявка на открытие [9]. Однако заявка не была понята советским бюрократическим аппаратом, поскольку существовала негласная установка, что все передовое может быть только заимствованным с Запада или же быть созданным в соавторстве с зарубежным ученым с более звучной фамилией. Изложить суть нашей работы в более доступных понятиях мы не могли, так как такой термин появился в зарубежной периодической печати только в 1974 г. [10] и позднее был успешно заимствован российским научным сообществом.

В заключение автор выражает глубокую признательность всем многочисленным сотрудникам самых разных организаций самого различного профиля за бескорыстную помощь в реализации амбициозного проекта молодого тогда советского ученого по созданию нового нанокласса композитов системы углерод — углерод со свойствами выше мирового уровня.

#### Список литературы

1. **Бутлеров А. М.** Сочинения. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1958.
2. **Pullman B.** // Proc. III Carbon Conf., N. Y. 1959.
3. **Волков Г. М.** // Теоретическая и экспериментальная химия. 1969. Т. V. № 1.
4. **Волков Г. М., Куркин А. Б., Леонтьев Е. А.** // Химия твердого топлива. 1970. № 3.
5. **Волков Г. М., Калугин В. И., Сысков К. И.** // Доклады АН СССР. 1968. Т. 183. № 2.
6. **Волков Г. М.** и др. Авторское свидетельство СССР № 1131364 от 15.02.1977.
7. **Bokros J. C.** Chemistry and Physics of Carbon. N. Y. 1969. V. 5.
8. **Волков Г. М.** и др. Авторское свидетельство СССР № 1102184 от 6.12.1977.
9. **Волков Г. М., Сысков К. И.** Заявка на открытие № 757 от 27.04.1967.
10. **Taniguchi N.** // Proc. Intl. Conf. Prod. Eng. Tokyo: Part II, 1974.

УДК 577.23:620.95

**С. В. Морозов**, канд. хим. наук, **О. Г. Воронин**,  
**Е. Е. Карякина**, канд. хим. наук,  
**А. А. Карякин**, д-р хим. наук, проф.,  
Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова  
e-mail: voronina@enzyme.chem.msu.ru

## ВОДОРОДНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ НА ОСНОВЕ ФЕРМЕНТОВ

*В качестве альтернативы платиновым катализаторам в топливных элементах рассмотрены электрокатализаторы на основе ферментов. Ферментные гидрогеназные электроды в нейтральном растворе продемонстрировали высокую активность в реакции окисления водорода, стабильность в течение 6 месяцев и толерантность к монооксиду углерода.*

### Введение

Одной из наиболее важных проблем современного общества является поиск альтернативных источников энергии. Наиболее перспективным вторичным видом топлива считается водород. Широкое использование водорода снизит загрязнение атмосферы, исключит парниковый эффект и, как следствие, приведет к замедлению глобального потепления. Для утилизации энергии реакции окисления водорода предпочтительно использовать электрохимические топливные элементы (ТЭ), поскольку в этом случае достигается наибольшая эффективность конверсии энергии.

В современных водородно-кислородных топливных элементах при конструировании топливных электродов используют платиновые катализаторы. Применение платины приводит к ряду значительных проблем, ограничивающих применение таких топливных элементов. Во-первых, это стоимость платины и недостаток ее ресурсов. Современные оценки стоимости компонентов топливных элементов дают значения от 200 до 2 000 долл. США на 1 кВт производимой энергии [1], при этом на каждый киловатт необходимо до 2 г платины. Таким образом, двигатель среднего автомобиля мощностью 50 кВт будет стоить 10 000—100 000 долл. США и будет использовать до 100 г платины. Мировое производство автомобилей согласно данным Международной организации производителей автомобилей достигло в 2004 г. 64 млн единиц [2]. Для того чтобы оборудовать все автомобили топливными

элементами, потребуется 6 400 тонн платины. Даже, если содержание платины будет снижено до теоретического предела, составляющего 0,2 г/кВт, платины потребуется намного больше ее годовой добычи (190 т). А количество платины, необходимое для замены всех ДВС на топливные элементы сравнимо с ее мировым запасом (100 000 т) [3]. При этом также существует потребность в ТЭ для других видов транспорта и для домашних автономных источников электроэнергетики.

Во-вторых, чувствительность платины к примесям оксида углерода (II) и серосодержащим соединениям. Платиновые катализаторы отравляются оксидом углерода в концентрации более 0,01 %, так при содержании CO 0,1 % платиновый электрод необратимо теряет 99 % активности за 10 мин [4]. В то же время технический водород, получаемый конверсией углеводородов, может содержать до 2 % CO, что приводит к необходимости дополнительной очистки. Вместе с тем, дешевый "биогаз" — возобновляемый водород, производимый микроорганизмами при разложении отходов органического происхождения, загрязнен примесью сероводорода (H<sub>2</sub>S), который отравляет платину в 100 раз эффективнее CO [1], т. е. такой газ неприменим в ТЭ без полной очистки.

В-третьих, проблема селективности катализатора. Электрокатализаторы на основе платины используются как для окисления водорода, так и для восстановления кислорода. Существующие мембранные технологии не позволяют предотвратить проникновение водорода в отсек кислородного электрода топливного элемента и наоборот. Поскольку электроды активны и в катодной, и в анодной реакциях, такое проникновение приводит к снижению КПД топливного элемента с 90...95 % до 60...70 %.

Эти проблемы, затрудняющие широкое внедрение водородно-кислородных топливных элементов, могут быть преодолены при использовании биокатализа. Биологические катализаторы (ферменты) могут быть использованы для катализа электродных реакций. Явление безмедиаторного биоэлектрокатализа основано на непосредственном переносе электрона между активным центром фермента и электродом [5]. Безмедиаторный биоэлектрокатализ был продемонстрирован для реакций H<sup>+</sup>/H<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O с использованием ферментов гидрогеназы [6] и лакказы [7] соответственно.

В данной статье показано, что указанные проблемы водородных топливных электродов могут быть преодолены при замене платины на ферменты гидрогеназы. Уникальные характеристики

ферментных электродов определяют возможность их широкого использования в топливных элементах.

### Безмедиаторный биоэлектрокатализ на углеродных материалах

Ранее нами было продемонстрировано достижение равновесного водородного потенциала водородными ферментными электродами [6]. При положительном перенапряжении наблюдались значительные токи окисления водорода, в то время как без фермента незначительный фоновый ток протекал в другом направлении. Однако эти исследования проводились с применением специально изготовленных сажевых электродов, отличавшихся низкой прочностью. Таким образом, было важно осуществить биоэлектрокатализ на коммерчески доступных углеродных материалах.

Были выбраны углеродные ткани, разработанные для топливных элементов. Процедура приготовления ферментных электродов включала предобработку электродного материала с последующей адсорбцией фермента [8].

При погружении ферментного электрода в нейтральный буферный раствор, насыщенный водородом, на электроде менее чем за 5 мин устанавливался равновесный водородный потенциал. В отличие от электрода без активного фермента (рис. 1) водородный ферментный электрод характеризовался значительным анодным током при положительных потенциалах. В системе без молекулярного водо-

рода во всем диапазоне потенциалов наблюдается катодный ток (рис. 1), т. е. анодный ток соответствует окислению водорода на гидрогеназном электроде, а наблюдаемый равновесный потенциал является равновесным водородным потенциалом.

Таким образом, безмедиаторный биоэлектрокатализ может быть достигнут с применением коммерчески доступных углеродных тканей, разработанных для топливных электродов. Фермент — гидрогеназа способна заменить платину в качестве катализатора электроокисления водорода. Достижение равновесного водородного потенциала на ферментном электроде обеспечивает 100 %-ную эффективность преобразования энергии.

### Улучшение стабильности фермента

Одной из важнейших характеристик для применения в топливных элементах является стабильность биологических катализаторов. Хотя ферменты обычно нестабильны, иммобилизация гидрогеназы на углеродную ткань приводит к значительному увеличению операционной стабильности и стабильности при хранении. Активность гидрогеназного электрода снижалась менее чем на 10 % после хранения в холодильнике в течение месяца [9]. Как видно из рис. 2, даже после хранения в течение полугода с периодическим тестированием сохранялось более 50 % исходной активности. Раствор фермента, применявшегося для изготовления ферментных электродов, полностью терял активность за 10 дней хранения в таких же условиях.

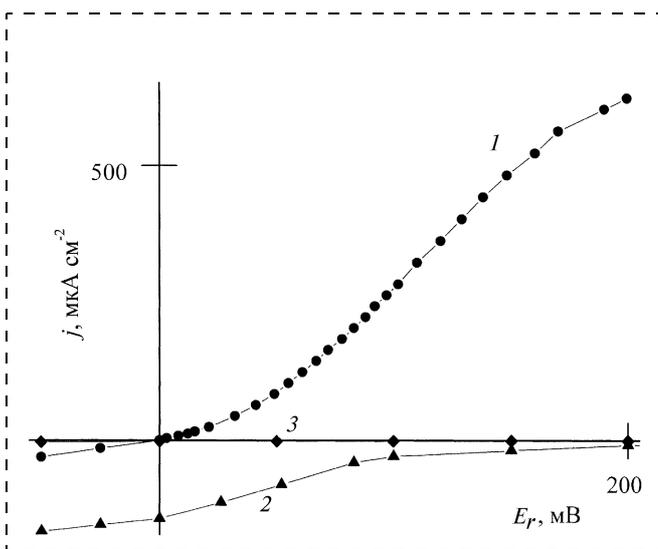


Рис. 1. Зависимость плотности тока от потенциала для электрода из углеродной ткани с адсорбированной гидрогеназой из *T. roseopersicina*:

кривая 1 — в  $H_2$ ; кривая 2 — в Ag; кривая 3 — без активного фермента. Фосфатный буфер pH = 7,0, 30 °C. Потенциал указан отн.  $H_2/Pt$  электрода в том же буфере [8]

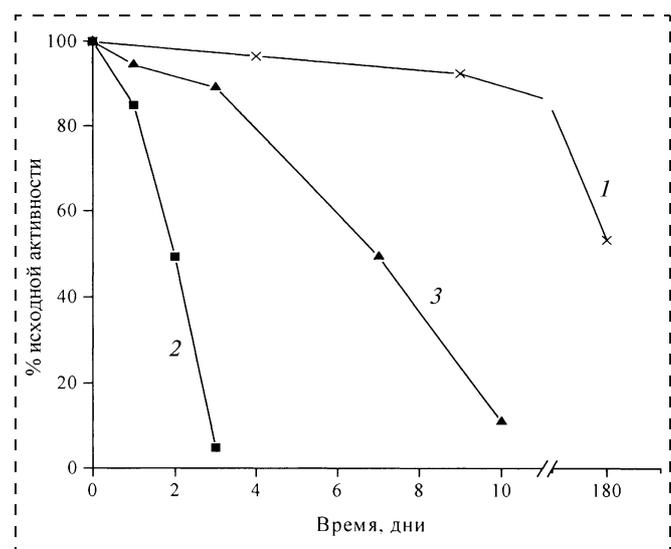


Рис. 2. Зависимость активности от времени хранения:

кривая 1 — электрода из углеродной ткани с адсорбированной гидрогеназой из *T. roseopersicina*; кривая 2 — раствора гидрогеназы; кривая 3 — раствора гидрогеназы со стабилизатором (азид натрия 0,2 %) [9]

Таким образом, оптимизируя процедуру иммобилизации, можно достичь необходимой для разработки топливных элементов стабильности ферментных электродов. Следует заметить, что традиционные топливные электроды изготавливаются с применением мелкодисперсной платины, нанесенной на углеродную подложку, и также не обладают 100 %-ной стабильностью.

### Устойчивость водородного ферментного электрода к оксиду углерода (II)

Одной из важных проблем катализаторов на основе платины является их отравление оксидом углерода (II). Хотя CO и является ингибитором гидрогеназной активности, это ингибирование полностью обратимо и характеризуется высокой константой ингибирования. Таким образом, можно ожидать, что применение биологического катализатора позволит решить эту важную проблему современных топливных элементов.

Действительно, при исследовании гидрогеназных электродов в разных смесях  $H_2$ —CO не наблюдалось заметного эффекта при содержании CO до 0,1 %. Только при 1 % CO скорость электроокисления водорода снизилась на 10 % [9]. Более того, ингибирование реакции окисления водорода на гидрогеназном электроде оксидом углерода (II) полностью обратимо. Даже после воздействия чистого CO, гидрогеназный электрод восстанавливает 100 % исходной активности, как только газовая фаза заменяется снова на водород [9].

Таким образом, использование ферментов в качестве электрокатализатора позволяет решить важнейшую проблему современных топливных элементов — отравление электродов примесями в топливе.

### Дизайн поверхности электрода для безмедиаторного биоэлектрокатализа

Безмедиаторный биоэлектрокатализ чрезвычайно чувствителен к морфологии электрода и его поверхностной химии. Для того чтобы расширить круг материалов, пригодных для разработки биотопливных электродов, было решено искусственно создавать требуемую поверхность. Для модификации электродов использовали электрополимеризацию замещенных пирролов. Использование искусственного медиатора гидрогеназ (виологена) в качестве заместителя пиррола, по нашему мнению, позволяет обеспечить электрический контакт между ферментом и электродом.

Электрополимеризация замещенного виологеном пиррола [N-метил-N'(12-пиррол-1-илдодецил)-4,4'-бипиридин дитетрафторборат (I)] проводилась на отшлифованном до зеркального блеска

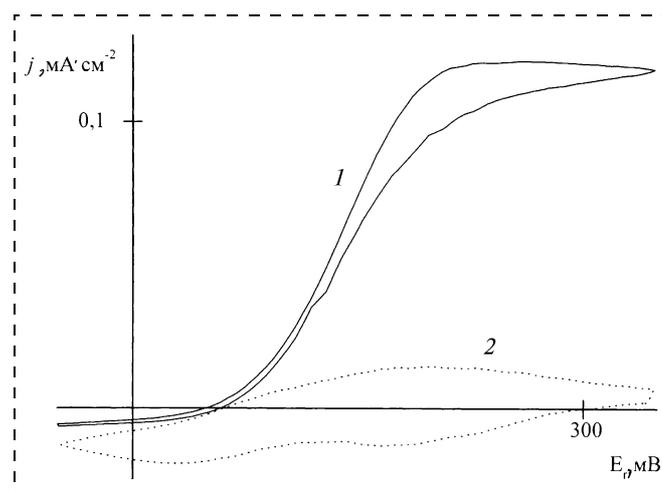


Рис. 3. Вольтамперограмма для стеклоуглеродного дискового электрода с нанесенным поли-(I) и адсорбированной гидрогеназой из *T. roseopersicina* (тип II):

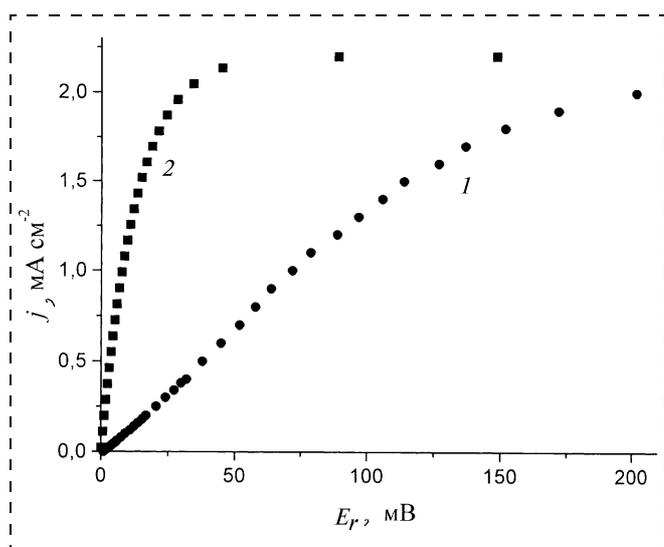
кривая 1 — в  $H_2$ , кривая 2 — в Ar. Скорость развертки потенциала 2 мВ/с. Фосфатный буфер pH = 7,0, 30 °C. Потенциал указан отн.  $H_2/Pt$  электрода в том же буфере [8]

стеклоуглеродном электроде. Такие электроды обычно не способны адсорбировать ферменты для достижения заметного биоэлектрокатализа.

Водородные ферментные электроды готовили адсорбцией гидрогеназы на стеклоуглеродные электроды, покрытые замещенным виологеном полипирролом. В атмосфере водорода вольтамперограмма для ферментного электрода имеет вид, характерный для каталитического процесса (рис. 3), что свидетельствует об эффективном биоэлектрокатализе [8]. В отсутствие водорода или активной гидрогеназы, фоновая циклическая вольтамперограмма включает только окислительно-восстановительную активность виологеновых групп (см. рис. 3). Поскольку удалось достичь активного биоэлектрокатализа на зеркальной поверхности стеклоуглерода, можно сделать вывод, что дизайн поверхности с помощью замещенного полипиррола позволяет создавать стандартную поверхность для эффективного биоэлектрокатализа гидрогеназами.

### Водородный топливный электрод на основе ферментов

Целью нашего исследования является поиск альтернативного платине катализатора, поэтому необходимо сравнить активность соответствующих топливных электродов. На рис. 4 представлена поляризационная кривая для топливного электрода на основе платины в серной кислоте (кривая 2) при благоприятных гидродинамических условиях [10] в сравнении с кривой для стационарного гидрогеназного электрода в нейтральном растворе с продуванием водорода через раствор (кривая 1).



**Рис. 4. Поляризационная кривая:**

кривая 1 — для электрода из углеродной ткани с нанесенным поли (I) и адсорбированной гидрогеназой из *T. roseopersicina* в фосфатном буфере pH = 7,0, насыщенном H<sub>2</sub>; кривая 2 — для вращающегося дискового электрода 900 мин<sup>-1</sup> с платиновым катализатором 7 мкг<sub>Pt</sub> см<sup>-2</sup> Pt/Vulcan (20 мВ/с) в 0,5 М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, насыщенной H<sub>2</sub> [10]. Потенциал указан отн. H<sub>2</sub>/Pt электрода в том же буфере

Следует заметить, что в нейтральных растворах активность платинового катализатора снижается в среднем в 100 раз, а значит, такие электроды становятся несравненно менее активными, чем ферментные. Однако даже в серной кислоте ток окисления водорода на платиновом топливном электроде при низких перенапряжениях всего в несколько раз выше по сравнению с током ферментного электрода в нейтральном растворе. Предельный ток, достигаемый на платиновом электроде при 3000 мин<sup>-1</sup>, почти совпадает с предельным током стационарного гидрогеназного электрода. Кривая 2 на рис. 4 также демонстрирует способность ферментных электродов функционировать при повышенных температурах. Гидрогеназы являются термостабильными ферментами, что позволяет реализовать биоэлектрокатализ даже при температуре выше 60 °С.

Таким образом, разработаны топливные ферментные электроды с электрокаталитическими характеристиками, близкими к характеристикам электродов на основе платины в серной кислоте. Однако существуют гидрогеназы, превосходящие по активности использованный нами фермент из *T. roseopersicina* на несколько порядков. Предварительные эксперименты с этими ферментами показали значительное улучшение биоэлектрокатализа, а значит, применение гидрогеназ из различных источников делает возможной разработку фермент-

ных электродов с такой же или даже большей активностью, чем у электродов на основе платины.

### Выводы

Биоэлектрокатализ является реальной альтернативой катализу благородными металлами при разработке топливных элементов. Ферментные электроды в нейтральных растворах имеют электрокаталитическую активность, сравнимую с активностью топливных электродов на основе платины в серной кислоте. Применение ферментов вместо платины позволяет избежать серьезных проблем, препятствующих широкому использованию топливных элементов, таких как: стоимость и доступность катализатора; отравление примесями в топливе; недостаток селективности.

С точки зрения стоимости и ресурсов использование благородных металлов экономически нецелесообразно уже в настоящее время, а в будущем эта проблема будет только усугубляться. Вместе с тем, современная биотехнология может сделать ферменты доступными и очень дешевыми. Ферменты уже широко используются в фармацевтической и пищевой промышленности, а также добавляются к стиральным порошкам и т. д.

В работе показано также, что водородные ферментные электроды практически нечувствительны к оксиду углерода (II), присутствующему в газе, получаемом конверсией углеводов. Активность таких электродов ингибируется обратимо, и может быть полностью восстановлена при снижении концентрации CO. Более того, гидрогеназные электроды нечувствительны к сульфид-иону. Это позволяет решить проблему использования доступных источников водорода в топливных элементах.

Ферментные электроды строго селективны по субстрату. В частности, лакказа не обладает активностью по отношению к водороду, а гидрогеназа лишь ингибируется кислородом. Однако некоторые гидрогеназы сохраняют 100 % активности в присутствии 5 % кислорода, что делает биоаноды в топливных элементах нечувствительными к следам кислорода.

Таким образом, использование биокатализа вместо традиционного катализа благородными металлами является перспективным для применения в водородно-кислородных топливных элементах.

*Работа выполнена при поддержке грантов INTAS N 03-56-102, программы Фундаментальные исследования Президиума РАН № 26 "Водородная энергетика", Федеральной целевой научно-технической программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники" по*

приоритетному направлению "Энергетика и энерго-сбережение" (ЭЭ.12.2/002).

А. А. Карякин благодарит Фонд содействия отечественной науке за предоставленный грант.

#### Список литературы

1. **FY 2003.** Progress Report for Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies Program. 2003, U.S. Department of Energy: Washington.
2. <http://www.oica.net/htdocs/Main.htm>
3. **Platinum 2003.** London: Johnson Matthey, 2002. 55 с.
4. **Igarashi H., Fujino T., Watanabe M.** Hydrogen electro-oxidation on platinum catalysts in the presence of trace carbon monoxide // J. Electroanal. Chem. 1995. **391**. 1–2. P. 119–123.
5. **Berezin I. V., Varfolomeyev S. D.** Principles of Bioelectrocatalysis. Enzyme Eng. 1980. **5**. P. 95–100.

6. **Yaropolov A. I., Karyakin A. A., Varfolomeyev S. D.** et al. Mechanism of H<sub>2</sub>-electrooxidation with immobilized hydrogenase // Bioelectrochem. Bioenerg. 1984. **12**. 3–4. P. 267–277.

7. **Березин И. В., Богдановская В. А., Варфоломеев С. Д.** и др. Биоэлектрокатализ. Равновесный кислородный потенциал в присутствии лакказы // Докл. АН СССР. 1978. **240**. 3. С. 615–617.

8. **Morozov S. V., Karyakina E. E., Zorin N. A.** et al. Direct and electrically wired bioelectrocatalysis by hydrogenase from *Thiocapsa roseopersicina* // Bioelectrochem. 2002. **55**. 1–2. P. 169–171.

9. **Karyakin A. A., Morozov S. V., Karyakina E. E.** et al. Hydrogen fuel electrode based on bioelectrocatalysis by the enzyme hydrogenase // Electrochem. Comm. 2002. **4**. P. 417–420.

10. **Schmidt T. J., Gasteiger H. A., Behm R. J.** Rotating Disk Electrode Measurements on the CO Tolerance of a High-Surface Area Pt/Vulcan Carbon Fuel Cell Catalyst // J. Electrochem. Soc. 1999. **146**. **4**. P. 1296–1304.

УДК 621.3.049.77

**А. Я. Сафронов**, канд. техн. наук,  
**Е. С. Горнев**, д-р техн. наук,  
**Н. А. Зайцев**, д-р техн. наук,  
**И. В. Матюшкин**, канд. физ.-мат. наук,  
ОАО "Элпа"

## КОНЦЕПТУАЛИЗАЦИЯ МАРШРУТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТАМИ

*Проведено концептуальное исследование маршрута проектирования микромеханических систем с пьезоэлементами (p-M(O)EMS) с использованием концептуальных методов школы С. П. Никанорова и принципов системного анализа. Проведено сравнение с конвенциональным маршрутом проектирования СБИС. Развита родоструктурная экспликация концептуальной схемы может быть обобщена на случай проектирования "систем-на-кристалле".*

В данной статье сделана попытка абстрактного рассмотрения проектирования систем-на-кристалле, которые в настоящее время являются объектами самого высокого уровня иерархии проектирования интегральных микросхем, что делает задачу анализа работы проектировщика этих систем актуальной. Высказываемые в общей форме положения будут наполняться конкретным содержанием для такого активно развивающегося сегмента систем-на-кристалле, как микро(опто)электромеханические системы с пьезоэлементами, или p-M(O)EMS. Очень часто формулировка для p-M(O)EMS может быть легко распространена на более общий случай. Хотя уже есть подходы к выработке общей точки

зрения на проектирование MEMS и M(O)EMS, но эти попытки зачастую стихийны и основаны лишь на интуиции системного подхода. Общая теория систем и системный анализ, зародившись в 60-е годы XX века на почве именно технических систем, де факто оставили эту сферу, переместив акценты на экономику и проектирование организационных систем (фирм, корпораций, городов). Принципиальная новизна нашей работы в том, что анализ p-M(O)EMS проводится средствами родоструктурной экспликации концептуальных схем, создаваемых в рамках концептуальных методов школы С. П. Никанорова (она создавалась в 70-е годы XX века внутри проектных организаций Госплана СССР). Для простоты назовем такой анализ концептуализацией [1].

### Качественный анализ

Процесс проектирования p-M(O)EMS нами рассматривается в двойственном структурно-алгоритмическом аспекте, т. е. ставится традиционный вопрос: каковы должны быть действия проектировщика данной сложной технической системы (иначе говоря, "маршрут проектирования", design flow), чтобы по заданному ее описанию она была бы воспроизводима при заранее predeterminedных технологических возможностях? Под "проектировщиком" понимается лицо, координирующее работу над проектом, как правило, нескольких человек, включая непосредственно инженеров-проектировщиков, которые с помощью САПР реализуют отдельные процедуры и этапы проектирования. Этим лицом, как правило, является главный конструктор или руководитель НИОКР, который вначале имеет лишь общую и неопределенную идею про-

екта, и соответственно имеется некоторая неопределенность требований технического задания (ТЗ), которое затем уточняется. Технологическое проектирование (TCAD), т. е. представление технологического маршрута изготовления (например,  $p$ -M(O)EMS), мы оставляем за рамками концептуализации. Основной акцент, таким образом, сделан на структурных особенностях  $p$ -M(O)EMS, а технология изготовления представлена в виде неявных ограничений на структуру. С формальной точки зрения маршрут проектирования является частным случаем *абстрактного* "технологического маршрута", концептуальная схема (КС) которого дана в [2]. Здесь в качестве субстрата изменений выступает представление проекта, в то время как субстратом изменений (технологических операций) в привычном нам технологическом маршруте является партия кремниевых пластин. Есть ряд особенностей, выводящих маршрут проектирования (МП) за рамки общего понятия "технологический маршрут" (TM), о которых сказано ниже. Сделаем несколько предварительных замечаний о различиях МП для  $p$ -M(O)EMS по сравнению с конвенциональным МП для СБИС [3].

- Во-первых, по определению  $p$ -M(O)EMS содержит, помимо электрических, механические, оптические и пьезоэлектрические элементы. Условно вся структура  $p$ -M(O)EMS может быть разделена на электрическую и неэлектрическую части, причем первая имеет управляющее значение, а вторая — операциональное. В большинстве случаев пьезоэлементы, формально относясь к последним, занимают промежуточное положение. Классическим примером служит пьезомикроактюатор, который за счет обратного эффекта при подаче управляющего напряжения поворачивает микрзеркало, что обеспечивает нужный угол сканирования или другой желаемый оптический эффект. Другими примерами могут служить разного рода сенсорные системы: микроакселерометры, микрогирометры, микродатчики давления и т. д. Здесь механическая часть в виде, например, пробной массы посредством нескомпенсированной механической силы вызывает накопление электрического заряда на внешних поверхностях пьезоэлемента, который "снимается" чувствительной схемой, например мостиком Уинстона. Интересным примером является система адаптивной оптики с микролинзами, изготовленными из пьезоматериала, позволяющая управлять фокусным расстоянием. В настоящее время ведется активный поиск пьезоматериалов для  $p$ -M(O)EMS с необходимыми значениями как пьезокоэффициентов ( $d_{33}$  или  $d_{31}$  в первую очередь), так и параметров адгезии (не забудем также о механических свойствах, определяемых размерами зерна керамики). Если при проектировании СБИС вы-

бор материала, как правило, предопределен (кремний), и в лучшем случае речь может идти о выборе легирующей примеси или материала для металлизации (Al или Cu), то состояние  $p$ -M(O)EMS характерно для отрасли, находящейся в стадии роста, и материаловедческая проблема является одной из основных для проектировщика, которому предстоит выбирать материал с учетом как требований технологичности производства, так и требований функциональности изделий из ряда пьезоэлектриков от монокристаллов (нитрид алюминия, оксид цинка и др.) до пьезополимеров и композитов.

- Во-вторых, наличие неэлектрической части приводит к необходимости поведенческого моделирования ее операционных характеристик для ответа на вопрос, соответствуют ли они требованиям ТЗ. Естественно расширение традиционных средств САПР специализированными, а также добавление соответствующих математических моделей. Поэтому получило распространение применение пакета AnSYS (см., например, [4]) как общефизического инструмента для моделирования совместного действия электрических, механических и тепловых полей на базе математического метода конечных элементов [5]. Более специализированным пакетом, интегрирующим в себя инструменты технологического проектирования  $p$ -M(O)EMS, является Coventor [6]. Для моделирования пьезоэлементов в нем предусмотрен компонент MemsPZR. Для M(O)EMS применяется пакет Chatoyant [8]. В последнее время получают признание пакеты MEMCAD (Массачусетский институт) и MEMS Pro, хотя на рынке существует множество независимых фирм-разработчиков (Abaqus), особенно в сфере моделирования микрооптических приборов. Можно выделить два пути развития САПР  $p$ -M(O)EMS, первый из которых заключается в отдельном использовании общих программ моделирования, начиная от серьезного пакета MathLab до написания небольших C++ скриптов. Второй основан на инкорпорации в существующие программные пакеты (Cadence, Synopsys, MG) библиотечных модулей для моделирования  $p$ -M(O)EMS.

Преимущество первого пути состоит в возможности получения исчерпывающего и полного результата моделирования, но при этом необходимо решить проблему согласованности представлений проекта для соседних этапов проектирования с данным. На втором пути такая проблема теряет остроту, но это достигается ценой потери качества и полноты моделирования. По-видимому, оптимальным будет ограничиться в рамках конвенционального САПР СБИС прорисовкой топологии  $p$ -M(O)EMS-элементов с добавлением библиотеки символов, как это уже делается в пакете Cadence. При условии реализации соответствия символов

поведенческим математическим моделям в рамках дополнительного языкового модуля, подключаемого к внешней мощной программе моделирования, можно будет успешно решить общую задачу. В этой связи имеет важное значение метод эквивалентных схем, идею которого можно перенести из радиотехники — идеология NODAS [11] (DAS — Design for Actuators and Sensors). На рис. 1, 2 (см. вторую сторону обложки) показаны возможные виды эквивалентного представления  $p$ -M(O)EMS-элементов для гребенчатого микрорезонатора [7]. Из этого следует, что для проектировщика получает осязаемый смысл выражение "экстракция МЭМС-параметров": если SPICE-параметры характеризовали электрическую часть транзистора интегральной схемы, связывая геометрические и электрофизические параметры (глубина залегания примеси, подвижность электронов) с вольт-амперными характеристиками прибора через модели Гуммеля—Пуна и подобные, то МЭМС-параметрами будут, например, жесткость балки, коэффициент электромеханической связи ЦТС-пьезопленки, а их экстракция будет вестись из данных измерений, например, для отклонения конца пьезоактюатора при поданном напряжении.

В то же время необходимо отметить, что в поведенческой модели транзисторов интегральных схем (ИС) возможно потребуются, особенно учитывая "соседство" пьезоэлемента и транзистора, исследовать и соответствующие модели, учитывающие паразитные емкости и индуктивности, миграцию и инжекцию заряда, формирование индуцированного канала и его влияние на электрофизику транзистора, формирование больших поверхностных напряжений и их влияние на поведение транзисторов, согласование импеданса и т. д.

- В-третьих, технология изготовления  $p$ -M(O)EMS гораздо более вариабельна, чем конвенциональная КМОП-технология. И хотя многие стремятся к стандартизации через многопользовательский МЭМС-процесс (Multi-User MEMS Processes), предложенный впервые в 1993 г. в рамках проекта фирмы Cronos [9, 10], но он задает только стандарты для технологии поверхностной микромеханики, а ведь ряд изделий производится по глубоко отличной от нее технологии объемной микромеханики. Так, например, SUMMiT-технология, разработанная учеными университета Беркли (Калифорния) [13] при поддержке DARPA, позволяет с помощью четырех поликремниевых уровней создавать произведения искусства — 1,8-миллиметровую (по высоте) 3D-копию часовой башни родного университета. При проектировании топологии  $p$ -M(O)EMS приходится создавать дополнительные правила проектирования design rules. Для формулировки этих правил разработан специальный язык L-SIF

(Language Solid Interchange Format), переводящий 3D-объекты в 2,5D-объекты [12]. По сравнению с конвенциональными усложнены правила, относящиеся к исполнению межсоединений. Кроме того, общая длина и сложность технологического маршрута увеличиваются по сравнению с конвенциональным, причем необходим поиск приемов, позволяющих в едином цикле *одновременно* создавать элементы как электрической части, так и неэлектрической. Одна из целей проектировщика — допустить наименьшее число фотолитографий.

Теперь рассмотрим возможные причины отказов  $p$ -M(O)EMS, следуя [15]:

- термические циклы менее значимы, чем для ИС;
- залипание (stiction) поверхностей является самой главной причиной отказов;
- коррозия из-за неблагоприятной внешней среды и появление какой-либо микроскопической пылинки между движущимися частями могут вызвать поломку;
- расслаивание нанесенных тонких пленок — это прежде всего проблема для материаловедения и технологов, но ее можно решить путем выбора безопасной конструкции;
- вибрация, влажность имеют здесь большее значение, чем для ИС — это проблема корпусирования; для RF-MEMS лучшим является корпусирование в вакууме;
- механическая циклическая усталость для гребенчатых элементов и мембран имеет важнейшее значение. Для пьезоэлементов это также важно ввиду петли гистерезиса.

Системы  $p$ -M(O)EMS можно условно сгруппировать в следующие конструктивные группы, имеющие:

- неподвижные части;
- подвижные части и нетрущиеся или неппульсирующие поверхности;
- подвижные части и пульсирующие поверхности.

Тогда вышеуказанные причины отказов следует дополнить такими, как загрязнение частицами при изготовлении, механическая усталость, трение, износ, механические разрушения при ударе.

### Маршруты проектирования $p$ -M(O)EMS

При проектировании  $p$ -M(O)EMS, очевидно, мы имеем дело со всеми пятью уровнями проектирования, что во многом предопределяет маршрут проектирования (табл. 1). В табл. 2 сохранены традиционные названия уровней проектирования, хотя на "схемотехническом" уровне МЭМС-часть представляется не электрической цепью, а, например, элементом микрогирроскопа; на функционально-логическом уровне поведение моделируется аналоговым способом. В данном случае проектировалась матрица микрзеркал. Отмечается [3], однако, что

Таблица 1  
Традиционная многоуровневая структура проектирования для МЭМС

УРОВЕНЬ	АСПЕКТ		
	Поведенческий	Структурный	Физический
Системный			
Транзакций			
Функционально-логический			
Схемотехнический	 Численная симуляция		
Физикотопологический			

поскольку для  $p$ -M(O)EMS существует многообразие физических связей, то пятиуровневая иерархия проектирования выделяется менее отчетливо, чем в случае МП СБИС.

Исходя из проведенного в предыдущем пункте качественного анализа становится понятным наличие в маршруте проектирования  $p$ -M(O)EMS ветви, посвященной моделированию неэлектрической части. Разумеется, эта ветвь при желании может быть сколь угодно глубоко развернута. В остальном МП совпадает с МП для КМОП СБИС, при этом тенденция к спиралевидности маршрута

сохраняется. Наиболее удачной нам представляется схема норвежца Фуруберга [16] (рис. 3). В работе [17] сделан акцент на средствах Cadence и раскрыта практическая сторона проектирования (рис. 4). Здесь появляется понятие "макромодель" для МЭМС-подсистем/функциональных блоков.

В частности, в [14] особое внимание уделено противостоянию топологического и схематического представлений проекта (LVS — Layout Versus Schematic) и двойной экстракции параметров. В презентации фирмы MEMScAP [18] поведенческие модели МЭМС разделены на четыре группы:

- модели эквивалентных схем, основанные на аналитическом решении и представленные через эквивалентные электромеханические цепи с соблюдением иерархии символического изображения;
- функциональные модели, основанные на аналитическом решении и представленные описаниями на Си-подобных языках;
- табулированные модели, основанные на экспериментальных данных;
- FEM-модели, основанные на симуляциях методом конечных элементов (включая для линейных случаев метод граничных конечных элементов — ВЕМ).

При симуляции МЭМС определенное значение имеет то, сколькими степенями свободы обладает система. С учетом этого обстоятельства в [19] рассматривался маршрут проектирования для M(O)EMS, указана роль HDL-AMS при симуляции компонентов, важность моделирования

Таблица 2  
Особенности проектирования МЭМС и интегральных схем [3]

Параметр	ИС (VLSI системы)	Макромеханические системы	MEMS
Площадь, где собрана энергия	Одиночная	Много таких взаимосвязанных площадей	Много таких взаимосвязанных площадей
Особенности декомпозиции	Короткий ряд примитивов; декомпозиция проста	Длинный список неструктурированных модульных элементов; иерархическая декомпозиция по функции трудна	Средний по длине список примитивов; декомпозиция лимитирована
Соответствие между топологией и функциональностью	Элементы четко различимы функционально и топологически	Нет четкого отображения "функция—форма", внутренние совместные топологические границы	Топологическая сегментация достаточно трудна, сходна с макросистемами
Правила проектирования	Простые правила межсоединений для примитивных элементов	Сложные правила	То же, что и для микросистем
Значимость размещения элементов на чипе	Геометрия подсистем второстепенна для проектирования	Геометрия существенно связана с выполняемой функцией; кинематика играет большую роль	Кинематика не так сложна, как для макросистем, остальное сходно с ними
Ключевая технологическая операция	Метод изготовления — литография	Широкий диапазон методов	Аналогично VLSI

длины оптического пути, плоскостности микрзеркала и дифракции. Проблемы языка программирования для MOEMS (VHDL-AMS) обсуждались в [20] на примере оптического фильтра.

### Концептуализация

Как объект концептуализации, маршрут проектирования обладает уникальными особенностями: во-первых, сам проект представляет собой информационное единство, средства отображения которого имеют второстепенное значение (чертеж, CIF-файл и т. п.); во-вторых, содержание проекта может непредсказуемым образом меняться по мере детализации и уточнения, и при этом его сложность есть величина переменная (например, увеличивается число функциональных узлов при корректировке ТЗ). Третьей особенностью является стиль проектирования, присущий данному инженеру-конструктору, определяющий субъективный образ проекта, который назовем *технолого-конструктивным образом* (ТКО). От того, каким проектировщик видит проект, зависит и результат работы. Будем также считать, что проект ведет группа людей, один из которых "проектировщик". При разработке КС МП неявно будем предполагать маршрут проектирования нисходящим, что не исключает присутствия в нем локальных петель design-verification. Влияние технологии на МП в КС дано только через правила проектирования, хотя, очевидно, связь тут более существенна. Параллелизм МП, когда одновременно выполняются несколько процедур проектирования, в данной КС исключен. Поскольку в КС мы работаем не с интервалами времени, а с номерами этапов, то указанный параллелизм может быть введен дополнительной аксиомой и перенумеровкой этапов.

Родоструктурная экспликация КС [1] состоит из четырех частей:

- понятий (исходные множества);
- структур (теоретико-множественные конструкции);
- ограничений (аксиом, которым удовлетворяют конструкции);

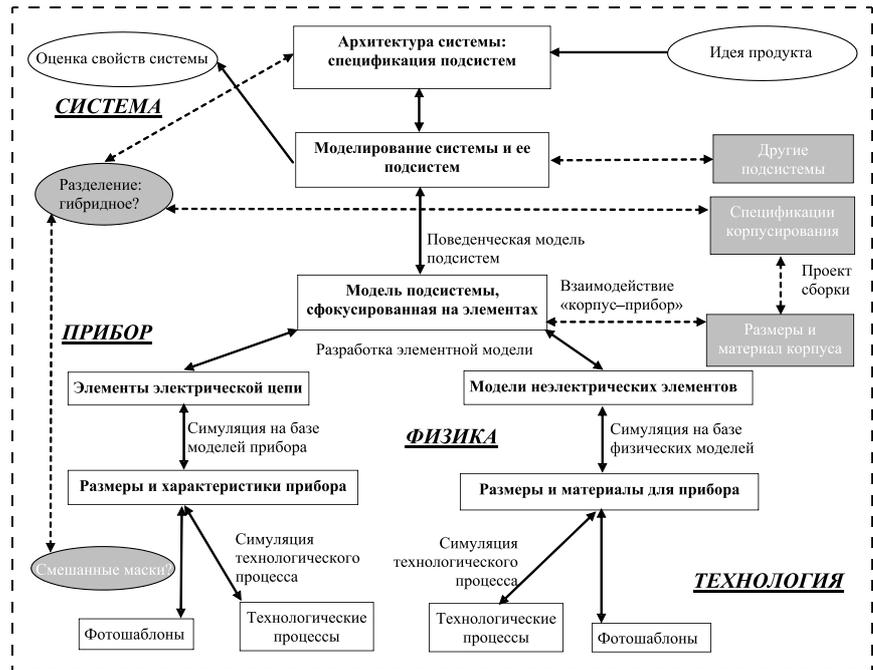


Рис. 3. Маршрут проектирования МЭМС [16]

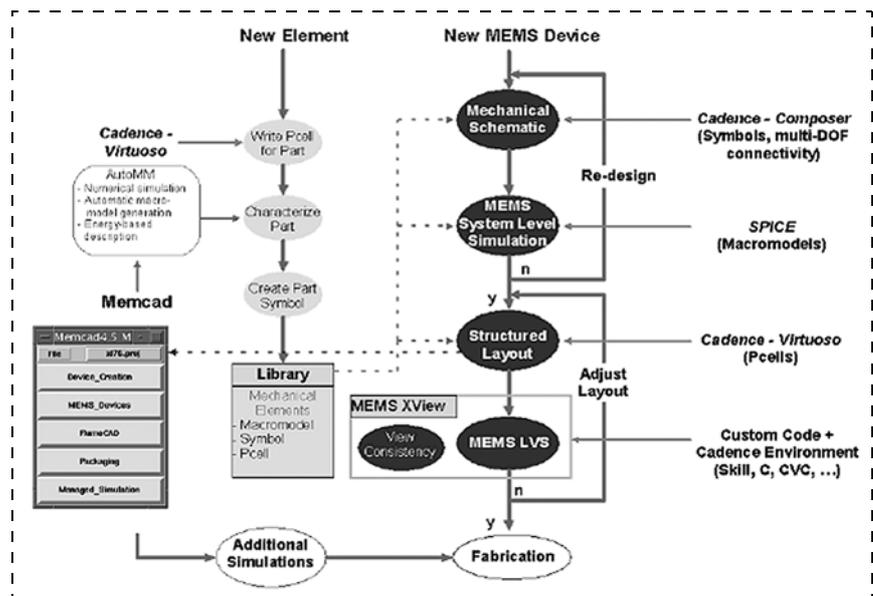


Рис. 4. Маршрут проектирования МЭМС, адаптированный под пакет Cadence [17]

- сужений (термов, которые выделяют по каким-то признакам элементы структур).

Будем использовать следующие обозначения:  $X(Y, Z, \dots)$  — множество;  $x(y, z, \dots)$  — его элемент;  $B(X)$  — булеан множества, т. е. множество его подмножеств;  $\times$  — знак декартова произведения;  $\text{card}(X)$  — мощность, т. е. число элементов, множества;  $\text{pr}_i d$  — проекция на  $i$ -ю ось элемента или даже структуры. Например, если  $D \in B(X \times B(Y))$ ,  $d \in D$ , то  $\text{pr}_1 d$  — некий элемент из  $x$ ,  $\text{pr}_2 d$  — подмножество из  $Y$ . Также будем использовать кванторы  $\forall$  ("любой") и  $\exists$  ("существует").

**КС "Маршрут проектирования р-М(О)EMS"**

**Понятия:**

- $\omega_0$  — начальный конечной отрезок натурально-го ряда, причем  $\text{card}(\omega_0) \leq 20$ ;
- $X_0$  — множество наименований проектов;
- $X_1$  — множество типов проектных процедур (=операций);
- $X_2$  — множество средств САПР или иных инструментальных средств;
- $X_3$  — множество правил проектирования;
- $X_4$  — множество типов представления проекта;
- $S$  — множество гетерогенных подсистем в системе-на-кристалле;
- $Y_1$  — множество проектировщиков;
- $Y_2$  — множество стилей проектирования;
- $Y_3$  — множество управляющей информации;
- $Z$  — множество (наименований) технолого-конструктивных образов (ТКО).

**Структуры:**

- $D_0 \in B(X_0 \times B(Y_3))$ ;
- $D_1 \in B(X_0 \times B(Y_1 \times B(Y_2) \times B(X_1)))$ ;
- $D_2 \in B(X_4 \times BB(S) \times B(X_3))$ ;
- $D_3 \in B(X_0 \times Y_1 \times Y_2 \times BB(S) \times Z \times B(Y_3))$ ;
- $D_4 \in B(X_1 \times B(X_2) \times (X_4 \times B(Y_3)) \times (X_4 \times B(Y_3)))$ ;
- $D_5 \in B(D_0 \times B(\omega_0 \times D_4))$ .

**Отношения:**

- $Ax_{11} - Ax_{12}$  "Все структуры непустые, все элементы структур непустые";
- $Ax_{13}: \forall d, p \in D_0 (pr_1 d = pr_1 p) \Rightarrow d = p$ ;
- $Ax_{14}: \forall d \in D_1 \forall p, q \in pr_2 d (pr_1 q = pr_1 p) \Rightarrow q = p$ ;
- $Ax_{15}: \forall d, p \in D_1 (pr_1 d = pr_1 p) \Rightarrow d = p$ ;
- $Ax_{16}: \forall d, p \in D_2 (pr_1 d = pr_1 p) \wedge (pr_2 d = pr_2 p) \Rightarrow d = p$ ;
- $Ax_{17}: \forall d, p \in D_3 (pr_1 d = pr_1 p) \wedge (pr_2 d = pr_2 p) \wedge (pr_3 d = pr_3 p) \wedge (pr_4 d = pr_4 p) \Rightarrow d = p$ ;
- $Ax_{18}: Pr_1 D_2 = X_4$ ;
- $Ax_{19}: \forall d \in D_0 \exists p \in D_1: (pr_1 d = pr_1 p)$ ;
- $Ax_{20}: \forall d \in D_3 \exists p \in D_0: (pr_1 d = pr_1 p)$ ;
- $Ax_{21}: \forall d \in D_3 \forall p \in D_1 (pr_1 d = pr_1 p) \Rightarrow (pr_2 d \in pr_2 p) \wedge (pr_3 d \in pr_2(pr_2 p))$ ;
- $Ax_{22}: \forall x \in X_4 \forall y \in BB(S) \exists d \in D_2: (x = pr_1 D_2) \wedge (y = pr_2 D_2)$ ;
- $Ax_{23}: \forall d \in D_3 \exists p \in D_2: (pr_4 d = pr_2 p)$ ;
- $Ax_{24}: \forall d, p \in D_4 \wedge_{i=1,2,3,4} (pr_i d = pr_i p) \Rightarrow d = p$ ;
- $Ax_{25}: \forall d, p \in D_5 (pr_1 d = pr_1 p) \Rightarrow d = p$ ;
- $Ax_{26}: \forall d, p \in D_5 (pr_1(pr_2 d) = pr_1(pr_2 p)) \Rightarrow (pr_2(pr_2 d) = pr_2(pr_2 p))$ ;
- $Ax_{27}: \forall d \in D_5 \forall p, q \in pr_2 d (p = q + 1) \Rightarrow (pr_3 p = pr_5 q) \wedge (pr_6 q \subseteq pr_4 p)$ ;
- $Ax_{28}: \forall d \in D_5 \text{card}(pr_1(pr_2 d)) = \text{card}(\omega_0)$ ;
- $Ax_{29}: \forall d \in D_5 (pr_1(pr_2 d) = \text{card}(\omega_0)) \Rightarrow pr_2(pr_1 d) \subseteq pr_2(pr_6 d)$ ;
- $Ax_{30}: \forall d \in D_5 (\forall x \in pr_2(pr_2 d))(\exists p \in D_1 | (pr_1 p = pr_1(pr_1 d)) \wedge (x \in pr_3(pr_2 p)) \wedge (\exists q \in D_3 | (pr_2 q \subseteq pr_2 p) \wedge (pr_4 p \subseteq pr_6 q)))$ .

**Термы:**

$TR_1 = \{y | \forall d \in D_1 y \in pr_1(pr_2 d)\}$  — определяет инженеров-конструкторов, участвовавших во всех проектах;

$TR_2 = \{x \in X_0 | \forall d, p \in D_5 (pr_1(pr_2 d) = pr_1(pr_2 p)) \Rightarrow (pr_i pr_2 pr_2 d = pr_i pr_2 pr_2 p) \forall i \in \{1, 3, 5\}\}$  — определяет множество проектов, для которых маршрут проектирования был одинаков.

Несколько содержательных комментариев к КС:

- $\omega_0$  вводится для нумерации этапов проектирования, причем чем больше номер, тем позже он выполнялся — длительность каждого этапа отдельно не вводится;
- элементом  $X_0$  может быть шифр НИОКР, включая ее название, например "Разработка пьезомикроинтерферометра Фабри-Перро...";
- элементы  $X_1$  соответствуют уровням проектирования (см. табл. 1), но могут быть раздвоены за счет конкретизаций операций анализа — синтеза или декомпозиции поведенческого моделирования;
- в  $X_3$  правила проектирования могут быть не только на топологическом уровне, но, что менее привычно, определяться для каждой проектной процедуры ( $X_1$ ) отдельно. Они могут быть самыми общими и иметь под собой разные основания — важно только, чтобы они были стандартизованы;
- типичным элементом  $X_4$  является представление проекта в виде Netlist, списка цепей. Для пьезосистем этот список содержит символически представленные пьезо- и микромеханические подсистемы;
- множества  $S$  и  $BB(S)$  есть ментальный образ проектируемого устройства, возникший у проектировщика. Он обязан, особенно при нисходящем МП, разбить систему на подсистемы, в частности, включающие пьезоэлементы;
- множества  $Y_i$  касаются собственно инженеров-проектировщиков, особая роль принадлежит  $Y_3$  и  $B(Y_3)$ . Последние трудно формализовать, и под элементами этих множеств мы имеем разного рода графики, таблицы, где могли бы быть представлены, например, результаты моделирования. Это та, почти неосязаемая, информация, которую проектировщик использует при выполнении проектной процедуры и которую он получает дополнительно при переходе к иному представлению проекта. Ее синтаксическая роль аналогична роли "процессора" в КС "Процесс с ролями" [1];
- множество  $Z$  имеет еще более неопределенную природу, во всяком случае называя ТКО;
- структура  $D_0$  задает множество технических заданий, а ее элемент — ТЗ для данного наименования проекта. ТЗ дается на универсальном языке таблиц  $B(Y_3)$ ;

- элемент  $D_1$  ставит каждому проекту команду его исполнителей, каждый из которых обладает стилем (стилями) проектирования, специализирован на выполнении одной или нескольких проектных операций. Не будет ошибкой добавить сюда список программ, с которыми он знаком. Например, элемент из  $D_1$  может указывать, что над проектом "Пьезоактюатор" могут работать Иванов и Петров, причем Петров более опытен в матмоделировании с помощью пакета AnSYS;
- следующая структура для каждого представления проекта указывает перечень ограничений, опять на универсальном языке  $B(Y_3)$ , которым он должен удовлетворять, причем для разных изделий они могут варьироваться;
- структура  $D_3$  определяет множество ТКО, причем  $X_0$  введено для удобства в первый компонент структуры. Сразу заметим, что таким приемом мы впоследствии легко свяжем структуры  $D_0—D_3$  между собой;
- в последнем компоненте ТКО получает более осязаемое выражение универсальным средством  $B(Y_3)$ ;
- структура  $D_4$  во многом аналогична "технологической операции", имеет типично процессную структуру — триаду "название операции — вход — выход". Проектная операция может или давать новое представление проекта, или расширять наше знание о нем. Классический пример — стадия верификации электрической схемы, когда SPICE-программа выдает ошибку, например, о незаземленном входе. Само представление не изменяется, но получена важная информация "да-нет" на вопрос "имеются ли ошибки?";
- $D_5$  есть собственно то, ради чего вводились предыдущие структуры — она определяет множество маршрутов проектирования.

Что касается аксиом, то большинство из них технические — устанавливается непустота компонентов, через признак единственности — функциональность отношений. Например, в  $D_4$  совпадение "входа" и кода операции гарантирует единственность "выхода" (с учетом "прицепленных" булеанов, которые дают нам шесть компонентов вместо трех).  $Ax_{18}$  заставляет полностью выписать правила проектирования для каждого представления.  $Ax_{19}$  и  $Ax_{20}$  связывают две разнородные структуры  $D_3$ ,  $D_1$  друг с другом, гарантируя совпадение первых компонентов.  $Ax_{27}$  определяет МП как цепь проектных операций, следующих по номеру одна за другой. Очень длинная  $Ax_{30}$  также техническая, но связывает  $D_5$  с предшествующими структурами, точнее, с их выбранными компонентами.

\*\*\*

Настоящая статья является первой из серии наших статей, посвященных проблемам разработки и изготовления  $p$ -М(О)EMS с позиций интеграции пьезотехники и микроэлектроники. На примере  $p$ -М(О)EMS мы рассмотрели особенности маршрута проектирования систем-на-кристалле. Во-первых, была показана возможность его включения в конвенциональные маршруты проектирования СБИС. Указано на важность метода эквивалентных схем и покрытие языком HDL-AMS потребностей проектировщика. Во-вторых, было выделено поведенческое моделирование неэлектрических подсистем, в частности, содержащих пьезоэлементы. Наконец, впервые предпринята попытка, опираясь на применение концептуальных методов анализа и синтеза структур для описания абстрактного технологического маршрута, в строгой математической форме изложить наше видение маршрута проектирования  $p$ -М(О)EMS.

В последующих статьях мы остановимся на некоторых вопросах разработки  $p$ -М(О)EMS, технологии их изготовления, их характеристики и применения.

#### Список литературы

1. Никаноров С. П., Никитина Н. К., Теслинов А. Г. Введение в концептуальное проектирование АСУ: анализ и синтез структур. М.: РВСН, 1995. 235 с.
2. Матюшкин И. В. Математическое моделирование технологических процессов на примере автоэпитаксии кремния: Дисс. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук, Долгопрудный, 2000. 126 с.
3. Antonsson E. K. Structured Design Methods for MEMS // Workshop sponsored by NSF, California Institute of Technology, Pasadena, USA, 1996. P. 131. [http://design.caltech.edu/NSF\\_MEMS\\_Workshop/](http://design.caltech.edu/NSF_MEMS_Workshop/)
4. Hallaert S., Sarraute E. Piezoelectric transformers: principles, structures and modeling // Proc. "Actuators-98". 1998. P. 337–340.
5. Сайт разработчика AnSYS фирмы CAD FEM GmbH. <http://www.cadfem.ru>
6. Сайт разработчика Coventor — фирмы CoventorWare. <http://www.coventor.com>
7. Jing Q., Mukherjee T. and Fedder G. K. Schematic Based Lumped Parameterized Behavioral Modeling for Suspended MEMS // Proc. ACM/IEE ICCAD'02, San Jose, CA, November 10–14. 2002. P. 367–373.
8. Kurzweg T. P. Modeling Optical MEM Systems // J. Of Modeling and Simulation of Microsystems. 2001. Vol. 2. N 1. P. 21–34.
9. Сайт фирмы Cronos Integrated Microsystems. <http://www.memsrus.com>
10. Koester D. A. et al. MUMPS™ Design Handbook: Revision 4.0 // Cronos Integrated Microsystems, May 1999. P. 40.
11. Jing Qi. Modeling and Simulation for Design of Suspended MEMS: Diss. on Ph.D., Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, 21.05.2003. P. 38.

12. **Mukherjee A.** et al. New Paradigms for Manufacturing // MIPS Division, CISE NSF, Arlington, Virginia, 1994.  
 13. **Hui E. E., Howe R. T., Rodgers M. S.** Single-step assembly of Complex 3D microstructures // Proc. MEMS-2000. P. 1—6.  
 14. **Baidya B.** Layout Verification for Mixed-domain Integrated MEMS: Diss. on PhD., Carnegie Mellon University, Pittsburg, USA, 5.09.2003. P. 230.  
 15. **Ramesham R., Ghaffarian R., and Kim N. P.** Reliability issues of COTS MEMS for Aerospace Applications // Proc. of the Inter. Soc. for Opt. Eng. (SPIE). 1999. Vol. 3880. P. 83—88.

16. **Презентация** лекций Liv Furuberg. SINTEF Mikrosystemer, Oslo, 2002. P 23. <http://www.oslo.sintef.no/fakta/index.e.html>  
 17. **Zaman M. H.** et al. An environment for design and modeling of electro-mechanical micro-systems // J. Of Modeling and Simulation of Microsystems. 1999. Vol. 1. N 1. P. 65—76.  
 18. **Liang Y.** Презентация MEMS Pro V3 System-Level Tools // MEMScAP Inc., 6.03.2002. P. 4.  
 19. **Morris A.** et al. A design flow for MOEMS // Proc. SPIE-2000. P. 1—8.  
 20. **Jacquemod G.** et al. MOEMS modeling for opto-electro-mechanical co-simulation // J. of Modeling and Simulation of Microsystems. 1999. Vol. 1. P. 38—49.

# МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

УДК 538.9 + 549.02:53

**В. В. Агучин**, канд. физ.-мат. наук,  
**Б. И. Кидяров**, канд. физ.-мат. наук,  
**Н. В. Первухина**, канд. хим. наук,  
 Институт неорганической химии СО РАН,  
 г. Новосибирск

## СИСТЕМАТИЗАЦИЯ И ВЗАИМОСВЯЗЬ МИКРО- И МАКРОСТРУКТУРЫ С ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ОКСИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ БЕЗ ЦЕНТРА ИНВЕРСИИ. Часть II<sup>1</sup>. Нелинейно-оптические свойства бинарных оксидных кристаллов

*Для семи аффинных групп нецентросимметричных бинарных оксидных кристаллов, включающих оксиды с определенным набором ацентричных физических свойств и с двумя разными длинами химических связей L(E-O) и L(M-O), построены розетки из двух эллипсов "ацентричности", а для совокупности полярных и неполярных оксидов с измеримыми нелинейно-оптическими свойствами также и экстремальные зависимости нелинейно-оптических свойств ( $\chi^{(2)}$ ) от L(E-O). Внутри всех эллипсов выявлены три характерных области расположения кристаллов с различным уровнем  $\chi^{(2)}$ : пересекающаяся часть эллипсов розетки и две симметричные части эллипсов вне общей (пересекающейся) части.*

### 1. Таксономия ацентричных фаз

В предыдущей статье данного цикла был проведен базовый анализ взаимосвязи "микро-, макро- структура — свойство" для 32 классов точечной

симметрии кристаллов [1]. В данной работе модель взаимосвязи микроструктурных и физических свойств ацентричных кристаллов бинарных оксидов рассмотрена более детально применительно к семи выделенным группам нецентросимметричных (НЦС) фаз. Собранная ранее коллекция экспериментальных данных по структуре и ацентричным свойствам бинарных НЦС оксидов включает 718 соединений, некоторые из них формально являются тройными оксидами, в которых два катиона занимают идентичную позицию в кристаллической решетке и имеют одну и ту же длину оксидной связи L(E-O), например  $\beta$ -Li(Nb, W)O<sub>6</sub>. Эта совокупность разбита на 21 подгруппу НЦС кристаллов, относящихся к разным точечным группам симметрии и объединенных в семь таксонов, аффинные группы (*affined group*) которых имеют определенное сродство и идентичный набор ацентричных свойств [1]. В дальнейшем анализе каждой из аффинных групп присвоено следующее условное название: I — неактивный ферроик — НаФ (*non-active ferroic*) — кристаллы сегнето- и пироэлектриков, не обладающие энантиоморфизмом (ЭМ) и оптической активностью (ОА); II — активные ферроики — АкФ (*active ferroic*) — ферроики, обладающие ОА; III — энантиоферроики — ЭнФ (*enanthioferroic*) — ферроики, обладающие ЭМ и ОА; IV — энантиопьезоэлектрики — ЭнП (*enanthio piezoelectric*) — пьезоэлектрики, обладающие ЭМ и ОА; V — активные пьезоэлектрики — АкП (*active piezoelectric*) — пьезоэлектрики, обладающие ОА; VI — неактивные пьезоэлектрики — НаП (*nonactive piezoelectric*) — пьезоэлектрики, не обладающие ЭМ и ОА; VII — активные ацентрики — АкА (*active acentric*) — непьезоэлектрики, не обладающие электрооптическими (ЭО) и нелинейно-оптическими (НЛО) свойствами, но обладающие ЭМ и ОА. Пример сводной таблицы структуры и свойств

<sup>1</sup>Часть I опубликована в № 4, 2006 г.

Ацентричные свойства, длина кратчайших оксидных связей  $L$  бинарных оксидов со структурой  $C_{6v}$ ,  $P_s$ ,  $\overline{\chi}^{(2)}$  — спонтанная поляризация,  $d$  — максимальный пьезоэлектрический модуль,  $r$  — максимальный электрооптический коэффициент,  $\chi^{(2)}$  — нелинейно-оптическая восприимчивость

№	Химическая формула	$L$ , пм М—О	$L$ , пм Е—О	$P_s$ , мкК/см <sup>2</sup>	$d$ , пК/Н	$r$ , пм/В	$\chi^{(2)}$ , пм/В
1	ZnO	197,3	197,3		13,9	2,6	7
2	ErMnO <sub>3</sub>	224,4	185,4	5,6			~1,25
3	YbMnO <sub>3</sub>	223,1	186,7	5,5			~1,25
4	YMnO <sub>3</sub> 293 К	227,5	186,3	5,5			~1,24
5	BeO	166	166				~0,23
6	YMnO <sub>3</sub> 180 К	226,8	186,3				
7	LuMnO <sub>3</sub>	223,4	185,9				
8	ScMnO <sub>3</sub>	205	179				
9	AlPO <sub>4</sub>	166,2	145,9				
10	Rb <sub>0,33</sub> (Ga <sub>0,1</sub> W <sub>0,9</sub> )O <sub>3</sub>	312	165				
11	Cu <sub>2</sub> WO <sub>4</sub>	175,3	169,7				
12	Zn <sub>2</sub> Mo <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	208	191				
13	Fe <sub>2</sub> Mo <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	196,2	195,6				
14	PbV <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	248,5	182,6				
15	F <sub>2,5</sub> V <sub>1,5</sub> <sup>3+</sup> V <sub>6</sub> <sup>4+</sup> O <sub>16</sub>	198	189				
16	Li <sub>2</sub> GeO <sub>6</sub>	193	175				
17	Li <sub>2</sub> SiO <sub>6</sub>	192	163				
18	CaAl <sub>12</sub> O <sub>19</sub>	270	174				
19	Ba <sub>5</sub> (ReO <sub>5</sub> ) <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	264	175				
20	Sr <sub>4</sub> Ru <sub>3,05</sub> O <sub>12</sub>	256	184				
21	La <sub>8</sub> Ru <sub>4</sub> O <sub>21</sub>	238,2	192				
22	YGaO <sub>3</sub>	227,7	184				
23	K <sub>4</sub> Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	248	173,9				
24	K <sub>6</sub> MgO <sub>4</sub>	267	199				

для гексагональных ( $C_{6v}$ ) НаФ кристаллов представлен в таблице. Для тригональных ( $C_{3v}$ ) и тетрагональных ( $C_{4v}$ ) НаФ кристаллов аналогичные данные приведены в работах [1, 2]. Краткая сводка данных по бинарным оксидам с измеренными или оцененными НЛО свойствами представлена в работе [3].

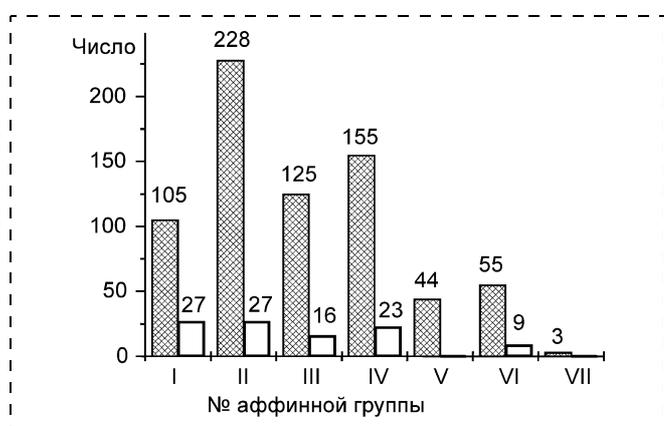


Рис. 1. Гистограмма распределения НЦС бинарных оксидов по аффинным группам:

штрихованные колонки — все кристаллы; серые колонки — кристаллы с измеримыми НЛО свойствами

Гистограмма распределения ацентричных кристаллов бинарных оксидов по аффинным группам показана на рис. 1, где кроме всей совокупности кристаллов представлена также их часть, обладающая измеримыми НЛО свойствами. Видно, что среди бинарных оксидов преобладают, прежде всего, полярные группы I—III (максимум 228 кристаллов в группе I, 31,8 %), и неполярная группа IV (155 кристаллов, 21,6 %). Совокупность полярных кристаллов (I—III) составляет ~63,8 %, оптически активных (II—V) — ~63 %, а энантиоморфных (III—IV) — ~49,2 %. Число выявленных активных ацентриков (VII) крайне мало (0,4 %). Доля кристаллов с измеримыми ацентричными свойствами колеблется от 25 % в группе I до их полного отсутствия в группе V. Ясно, что для более детального анализа и выявления необходимых корреляций следует, во-первых, расширять число синтезируемых НЦС фаз и, во-вторых, измерить ацентричные свойства уже известных кристаллов, прежде всего из аффинных групп V и VI.

## 2. Взаимосвязь "микро-, макроструктура — свойства сильных ацентриков"

Химический состав оксида частично предопределяет макроструктуру (точечную группу симмет-

рии) и микроструктуру кристаллов (набор длин оксидных связей, координацию металлоподобных и кислотообразующих катионов) [1–3]. Макроструктура кристалла задает набор его возможных физических свойств, а микроструктура и ее мотив в значительной мере определяют значение и анизотропию физических характеристик кристаллов. Ранее было показано, что среди ацентричных свойств кристаллов более полно изучены, или оценены их НЛО свойства [3]. Кроме того, НЛО восприимчивость кристаллов ( $\chi^{(2)}$ ) определяется в первом приближении совокупностью и параметрами простейших электронных осцилляторов [4]. Хотя ацентричные свойства кристаллов являются многофакторной функцией ряда взаимозависимых микроструктурных величин, тем не менее, эмпирический анализ их свойств необходимо начинать с наиболее интегральной характеристики электронной подсистемы кристаллической решетки, НЛО

восприимчивости  $\chi^{(2)}$  и ее зависимости от главного структурного фактора — минимальной длины оксидной связи  $L(E-O)$ , определяющей мотив кристаллической решетки [3].

Действительно, макро- и микроструктурная группировка кристаллов с различными длинами оксидной связи отражается и на значениях их НЛО свойств, что, в частности, показано на рис. 2, а, б, содержащем зависимости  $\chi^{(2)} = F(L(E-O))$  для полярных и неполярных фаз бинарных оксидов с измеримой НЛО восприимчивостью ( $\chi^{(2)} > 0,05$  пм/В, 101 оксид из 14 классов точечной симметрии). Хотя функция  $\chi^{(2)} = F(L(E-O))$ , как и следовало ожидать, является нечеткой (недоопределенной) [4], ее верхняя огибающая имеет выраженные экстремумы, как для полярных, так и для неполярных кристаллов (см. рис. 2, а, б). Пологий максимум  $\chi^{(2)} \approx 3,2$  пм/В при  $134 < L(E-O) < 144$  пм соответствует полярным кристаллам  $Li_2B_4O_7$  ( $C_{4v}$ ),  $ViB_3O_6$  ( $C_2$ ), и  $PbB_4O_7$  ( $C_{2v}$ ). Точки для полярных кристаллов с высоким уровнем  $\chi^{(2)} > 4$  пм/В концентрируются в области длин  $167 < L(E-O) < 197$  пм, с максимумом при 167,8 пм ( $TeSeO_4$ ,  $C_s$ ,  $\chi^{(2)} = 8$  пм/В), и с двумя резкими максимумами при 173,6...178 пм ( $\beta-Li(Nb, W)O_6$ ,  $C_{3v}$ ,  $\chi^{(2)} \approx 70$  пм/В,  $PbTiO_3$ ;  $C_{4v}$ ,  $\chi^{(2)} = 42,8$  пм/В) и 187 пм ( $LiNbO_3$ ,  $C_{3v}$ ,  $\chi^{(2)} = 40,7$  пм/В), а для неполярных кристаллов в области  $\sim 134 < L(E-O) < 148$  пм и  $\sim 176 < L(E-O) < 186$  пм с резким максимумом при 180 пм ( $HfO_2$  ( $D_2$ ),  $\chi^{(2)} \approx 7,2$  пм/В).

На рис. 3 кристаллы сильных НЛО ацентриков ( $\chi^{(2)} > 0,05$  пм/В) расположены на плоскости длин оксидных связей (ПДОС) внутри розетки из двух эллипсов "ацентричности". Здесь полярные фазы (кроме класса  $C_2$ ) выделены черным цветом, а неполярные — в основном обозначены открытыми символами. Среди сильных оксидных ацентриков пока не найдено шесть классов: четыре редких структурных класса  $C_4$ ,  $C_{3h}$ ,  $C_1$ ,  $D_6$ , и два класса ( $D_{2d}$ ,  $S_4$ ), образующих аффинную группу V. В верхней части вертикального эллипса (правой части горизонтального) ацентричные фазы отсутствуют, поскольку расстояние  $310 < L(M-O) < 350$  пм, как правило, наблюдается только среди оксидов радиоактивных элементов. Большая часть кристаллов четырнадцати групп сильных ацентриков расположена в правой части вертикального (верхней части горизонтального) эллипса. В пересекающейся части эллипсов (луковице) содержатся преимущественно неполярные тригональные кристаллы ( $D_3$ ) аффинной группы IV, а вне луковицы в левой части вертикального (нижней части горизонтального эллипса) расположены кристаллы шести ацентричных классов ( $C_{4v}$ ,  $C_{3v}$ ,  $C_{2v}$ ,  $C_2$ ,  $T$ ,  $D_2$ ), относящихся

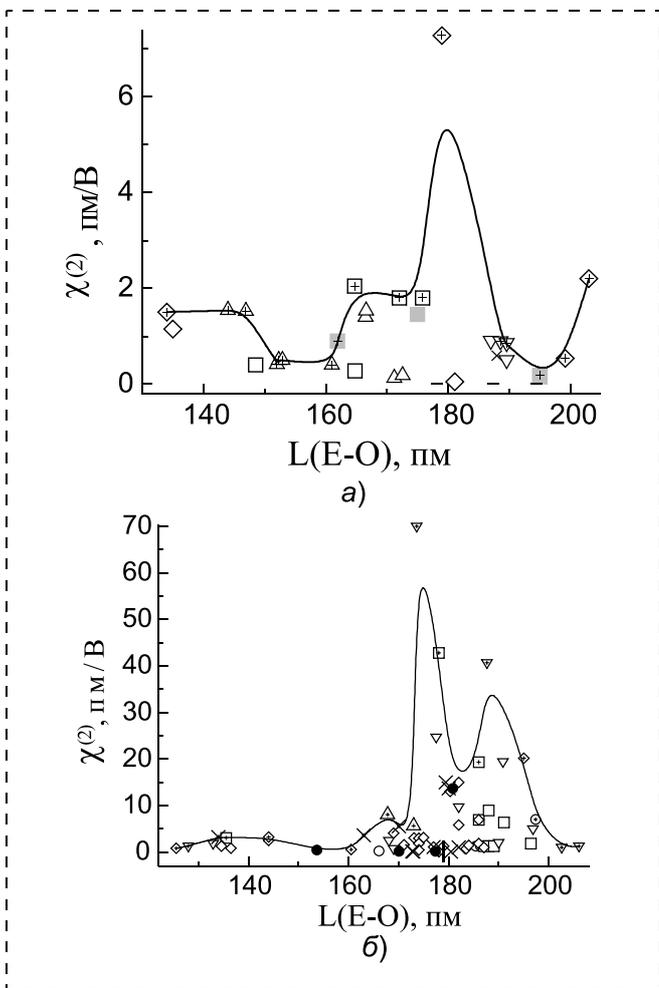


Рис. 2. Зависимость НЛО восприимчивости  $\chi^{(2)}$  от длины оксидной связи  $L$  для бинарных оксидных кристаллов (+ — верхняя огибающая линия):

а — неполярные ( $\square$  —  $T$ ;  $\times$  —  $D_4$ ;  $\Delta$  —  $D_3$ ;  $\diamond$  —  $D_2$ ;  $\square$  —  $T_d$ ;  $\nabla$  —  $D_{3h}$ ; — —  $O$ ); б — полярные ( $\circ$  —  $C_{6v}$ ;  $\square$  —  $C_{4v}$ ;  $\nabla$  —  $C_{3v}$ ;  $\diamond$  —  $C_{2v}$ ;  $\Delta$  —  $C_s$ ;  $\bullet$  —  $C_6$ ; — —  $C_3$ ;  $\times$  —  $C_2$ )

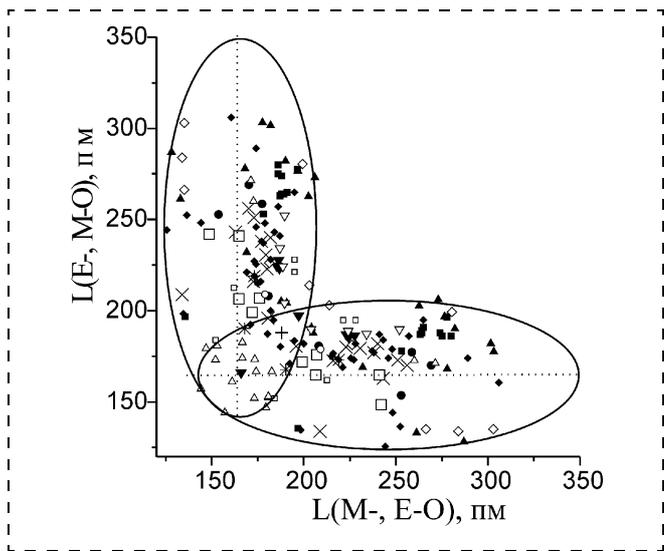


Рис. 3. Эллипсы "ацентричности" бинарных оксидов с измеримыми НЛО свойствами.

Полярные кристаллы:  $\blacktriangledown$  —  $C_{6v}$ ;  $\blacksquare$  —  $C_{4v}$ ;  $\blacktriangle$  —  $C_{3v}$ ;  $\blacklozenge$  —  $C_{2v}$ ; \* —  $C_s$ ;  $\bullet$  —  $C_6$ ;  $\circ$  —  $C_3$ ;  $\times$  —  $C_2$ . Неполярные кристаллы:  $\square$  —  $T_d$ ;  $+$  —  $D_4$ ;  $\triangle$  —  $D_3$ ;  $\diamond$  —  $D_2$ ;  $\square$  —  $T_d$ ;  $\nabla$  —  $D_{3h}$

ся к аффинным группам I—IV. Более детально картину расположения кристаллов на ПДОС можно выявить при раздельном построении розетки эллипсов "ацентричности" для каждой аффинной группы.

### 3. Взаимосвязь "микро-, макроструктура — свойства аффинных групп кристаллов"

В связи с малочисленностью группы VII (EM + OA кристаллы) в ходе дальнейшего анализа мы объединили ее с наиболее близкой группой IV ЭнП кристаллов, также обладающих (EM + OA) — свойствами. Это позволяет построить шесть графиков для эллипсов "ацентричности" групп I, II, III, IV + VII, V, VI, показанных на рис. 4, а—е. В дальнейшем анализе эти графики сгруппированы попарно для "полярной — неполярной" групп: I—VI, II—V, III—IV, поскольку набор других ацентричных свойств в них идентичен. Отмеченное выше разделение кристаллов по трем областям эллипсов "ацентричности" также четко выявляется в перечисленных групповых парах.

В луковиче отсутствуют сильные НаП кристаллы (аффинная группа VI, рис. 4, з). В ее вершинке имеется только пять гексагональных слабых НаП кристаллов ( $D_{3h}$ ) с низким уровнем  $\chi^{(2)} < 0,05$  пм/В. Из аффинной группы I (рис. 4, а) в луковиче преобладают гексагональные НаФ кристаллы ( $C_{6v}$ ), среди которых только два кристалла имеют измеримое значение НЛО восприимчивости:  $\chi^{(2)} = 0,23$  пм/В (в центре луковичи, ВеО), и  $\chi^{(2)} = 7$  пм/В (в вершинке луковичи, ZnO). Среди ак-

тивных ферроиков (АкФ) аффинной группы II только в верхней части и на границе луковичи имеются кристаллы с  $\chi^{(2)} > 0,05$  пм/В: TeSeO<sub>4</sub>,  $\chi^{(2)} = 8$  пм/В,  $C_s$ , нестабильный кристалл  $\gamma$ -LiJO<sub>3</sub>,  $\chi^{(2)} \approx 13$  пм/В,  $C_{2v}$ , и другие кристаллы этой структуры (SbNbO<sub>4</sub>,  $\chi^{(2)} \approx 5,8$  пм/В, Li<sub>2</sub>GeO<sub>3</sub>,  $\chi^{(2)} \approx 1,5$  пм/В, LiGaO<sub>2</sub>,  $\chi^{(2)} \approx 0,7$  пм/В), в то время как активные пьезоэлектрики АкП аффинной группы V вообще не имеют кристаллов с  $\chi^{(2)} > 0,05$  пм/В. Наоборот, в луковиче отсутствуют сильные и умеренные энантиферроики ЭнФ (аффинная группа III), в то время как умеренные энантипьезоэлектрики ЭнП (аффинная группа IV) представлены здесь более чем десятью тригональными кристаллами ( $D_3$ ) с  $\chi^{(2)} \approx 1,54 \div 0,4$  пм/В (рис. 4, в, е). Все кристаллы группы VII (рис. 4, е), для которых всегда  $\chi^{(2)} = 0$ , также располагаются в верхней половине луковичи (эллипс IV). Таким образом, только отдельные кристаллы сильных ферроиков с  $\chi^{(2)} > 4$  пм/В располагаются "вблизи — внутри" границы луковичи ближе к ее вершинке. Основная часть луковичи содержит полярные и неполярные кристаллы с низкими или умеренными НЛО свойствами.

Наибольшее число кристаллов с  $\chi^{(2)} > 4$  пм/В являются ферроиками аффинных групп I—III (см. рис. 2, 4, б, в) и концентрируется вне луковичи в правой части вертикального эллипса (в верхней половине горизонтального эллипса). Они относятся к ограниченному числу химических классов бинарных оксидов: титанатам (PbTiO<sub>3</sub>;  $C_{4v}$ ,  $\chi^{(2)} = 42,8$  пм/В, PbTiO<sub>3</sub>;  $C_{4v}$ ,  $\chi^{(2)} = 42,8$  пм/В, Bi<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>12</sub>,  $C_s$ ,  $\chi^{(2)} = 5,6$  пм/В), ниобатам ( $\beta$ -Li(Nb, W)O<sub>6</sub>,  $C_{3v}$ ,  $\chi^{(2)} \approx 70$  пм/В, LiNbO<sub>3</sub>,  $C_{3v}$ ,  $\chi^{(2)} = 40,7$  пм/В, KNbO<sub>3</sub>,  $C_{2v}$ ,  $\chi^{(2)} = 20,1$  пм/В.), иодатам (KIO<sub>3</sub>,  $C_{3v}$ ,  $\chi^{(2)} = 24,7$  пм/В, LiIO<sub>3</sub>,  $C_6$ ,  $\chi^{(2)} = 13,7$ ), танталатам (LiTaO<sub>3</sub>,  $C_{3v}$ ,  $\chi^{(2)} = 19,4$  пм/В), молибдатам (Tl<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>,  $\chi^{(2)} = 5,5$  пм/В), вольфраматам (Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub>,  $\chi^{(2)} = 4$  пм/В). Только один неполярный кристалл из аффинной группы IV имеет столь же высокий уровень НЛО свойств (HfO<sub>3</sub>, ( $D_2$ ),  $\chi^{(2)} \approx 7,2$  пм/В). В аффинной группе VI содержатся кристаллы с умеренным значением оптической нелинейности (DyTa<sub>7</sub>O<sub>19</sub>,  $D_{3h}$ , 2,1 пм/В). Вне луковичи в левой половине вертикального эллипса (в нижней половине горизонтального эллипса) на рис. 2, а, б и 4, а—е располагаются как полярные, так и неполярные кристаллы аффинных групп I—IV, VI с весьма умеренным уровнем НЛО свойств ( $0,05 < \chi^{(2)} < 3,5$  пм/В). Вне всех розеток эллипсов "ацентричности" аффинных групп I—VI имеется небольшая часть НЦС кристаллов с очень низким уровнем НЛО свойств ( $\chi^{(2)} < 0,05$  пм/В).

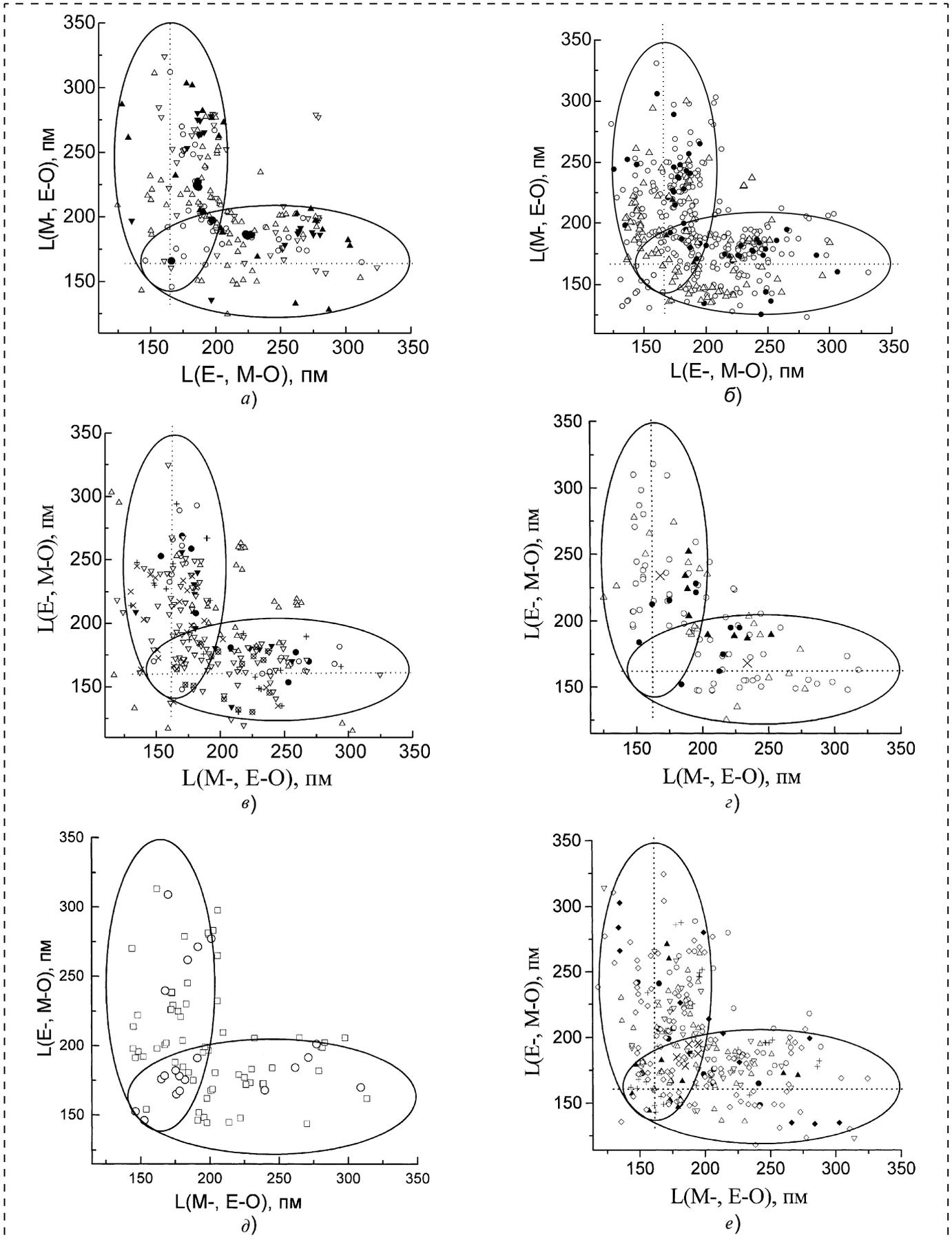


Рис. 4. Эллипсы "ацентричности" бинарных оксидных кристаллов:  
 темные точки — кристаллы с измеримыми НЛО свойствами,  $\chi^{(2)} \geq 0,05$  пм/В; светлые точки —  $\chi^{(2)} < 0,05$  пм/В.  
 Полярные кристаллы: *a* — группа I, ○ —  $C_{6v}$ ; Δ —  $C_{4v}$ ; ▽ —  $C_{3v}$ ; *b* — группа II, ○ —  $C_{2v}$ ; Δ —  $C_s$ ; *в* — группа III, ○ —  $C_6$ ; + —  $C_4$ ; Δ —  $C_3$ ; ▽ —  $C_2$ ; × —  $C_1$ . Неполярные кристаллы: *г* — группа VI, ○ —  $T_d$ ; Δ —  $D_{3h}$ ; × —  $C_{3h}$ ; *д* — группа V, □ —  $D_{2d}$ ; ○ —  $S_4$ ; *e* — группы IV и VII, ○ —  $T$ ; + —  $D_6$ ; ▽ —  $D_4$ ; Δ —  $D_3$ ; ◇ —  $D_2$ ; × — ○

#### 4. Обсуждение результатов и заключение

Таким образом, расположение НЦС кристаллов в эллипсах I—VI является частично специфичным для кристаллов с различной точечной симметрией, и особенно для кристаллов с разным значением  $\chi^{(2)}$ . Максимальный уровень  $\chi^{(2)}$  уменьшается по мере нарастания номера группы (I —  $\text{PbTiO}_3$ ,  $C_{4v}$ ,  $\chi^{(2)} = 42,8$ ; II —  $\text{KNbO}_3$ ,  $C_{2v}$ , 20,1; III —  $\text{LiIO}_3$ ,  $C_6$ , 13,7; IV —  $\text{NiO}_3$ ,  $D_2$ , 7,28; VI —  $\text{DyTa}_7\text{O}_{19}$ ,  $D_{3h}$ , 2,1 пм/В). Поскольку для оптоэлектроники необходимы кристаллы не с одним избранным высоким свойством, а с комплексом "ацентричных" и других свойств, то практическое применение находят кристаллы различной сингонии из всех аффинных групп [5]. Например, кристаллы с кратчайшими длинами оксидной связи из левой части эллипсов "ацентричности" (прежде всего бораты) прозрачны в ультрафиолетовой области спектра. Многие бинарные и тернарные НЦС бораты пригодны для создания активных лазерных сред, обладающих одновременно эффектом "самогенерации" гармоник основного излучения [6]. Кристаллы, располагающиеся в "луковице", широко используются для изготовления устройств акустоэлектроники (пьезокварц и другие) [5]. Поэтому систематизация взаимосвязи "состав — структура — свойство" с разбивкой оксидов на аффинные группы позволяет предсказывать области поиска новых

"ацентричных" кристаллов, перспективных для того или иного направления ацентричной диэлектрики и прикладной физики [5]. Однако дальнейшее расширение списка потенциальных сегнето- и пьезоэлектриков требует перехода к анализу указанной триады для многокомпонентных кристаллов, прежде всего тройных оксидов с длиной химической связи, соответствующей максимуму НЛО и других "ацентричных" свойств [7]. Такого рода анализ взаимосвязи "структура — свойство" для кристаллов титанатов и частично других тройных оксидов мы предполагаем провести в следующей статье.

#### Список литературы

1. Атучин В. В., Кидяров Б. И., Первухина Н. В. Систематизация и взаимосвязь микро- и макроструктуры с физическими свойствами оксидных кристаллов без центра инверсии. I. Симметричные ограничения и статистика // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 4. С.
2. Кидяров Б. И., Атучин В. В., Первухина Н. В. Компьютерное выявление эмпирической взаимосвязи "структура — свойство" и дизайн ацентричных оксидных кристаллов для оптоэлектроники // "Рост монокристаллов и тепломасоперенос" / Сборник трудов 6-й Международной конференции. В 4-х т. Под ред. В. П. Гинкина. Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ. 2005. Т. 3. С. 701—710.
3. Atuchin V. V., Kidyarov B. I., Pervukhina N. V. Phenomenological modeling and design of new acentric oxide crystals for optoelectronics // Computational Materials Science. 2004. Vol. 30. N 3—4. P. 197—206.
4. Kidyarov B. I., Pestyakov E. V. Nonlinear optical crystals: principles of search for new promising materials // Proceedings of SPIE. 1999. Vol. 3734. XVI, Int. Conf. on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO-98). P. 382—391.
5. Рез И. С., Поплавко Ю. М. Диэлектрики. Основные свойства и применение в электронике. М.: Радио и связь, 1989.
6. Kaminskii A. A. Crystalline lasers: Physical properties and operating schemes. CRC Press, Boca Raton, 1996.
7. Atuchin V. V., Kidyarov B. I., Pervukhina N. V. Shortest chemical bond length as a criteria for searching new non-centrosymmetric niobate and tantalate crystals with high optical non-linearity // J. Cryst. Growth. 2005. Vol. 275. P. e1941—e1946.

## И Н Ф О Р М А Ц И Я

26—30 июня 2006 г. в г. Ульяновске состоится

### VIII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**ОПТО-, НАНОЭЛЕКТРОНИКА, НАНОТЕХНОЛОГИИ И МИКРОСИСТЕМЫ**

#### Оргкомитет конференции

**Председатель оргкомитета:** Булярский Сергей Викторович, тел.: (8422) 41-20-86

**Ученый секретарь оргкомитета:** Скаляух Ольга Вячеславовна, тел.: (8422) 41-20-86

**e-mail:** kuv@ulsu.ru

**Адрес:** 432970, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, д. 42; УлГУ, УНИ, Оргкомитет конференции  
**НАНОТЕХНОЛОГИИ—2006**

*Текущая информация о конференции — на сайте [www.uni.ulsu.ru](http://www.uni.ulsu.ru)*

УДК 537.226.33

<sup>1</sup>Р. А. Лалетин, канд. физ.-мат. наук,

<sup>1</sup>А. И. Бурханов, д-р физ.-мат. наук,

<sup>2</sup>А. С. Сигов, д-р физ.-мат. наук,

<sup>2</sup>К. А. Воротилов, д-р техн. наук,

<sup>1</sup>Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

<sup>2</sup>Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)

## ВОЗДЕЙСТВИЕ НИЗКО- И ИНФРАНИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ПОВЕДЕНИЕ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПЛЕНОК PZT ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЯХ В МАТЕРИАЛЕ

*Представлены результаты исследования влияния механических напряжений на диэлектрические свойства тонкой сегнетоэлектрической пленки PZT. К образцу прикладывалась внешняя нагрузка G, приводящая к росту остаточного напряжения растяжения вдоль одной из осей пленки. Определено, что при малых и средних электрических полях рост напряжения  $\sigma$  способствует увеличению диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  образца. Дальнейшее увеличение напряженности измерительного поля ведет к обратному эффекту — наблюдается уменьшение  $\epsilon'$  с возрастанием G. Отмечена тенденция возрастания полуширины пика поляризации  $E_{HW}$  (диэлектрических потерь) при приложении более высокой механической нагрузки.*

*Наблюдаемые эффекты объясняются с позиции взаимодействия внутренних напряжений с доменной структурой пленки.*

### Введение

Среди множества нелинейных диэлектрических материалов особый интерес в последнее время вызывают тонкие сегнетоэлектрические пленки, которые являются удобными объектами как для технических применений, так и для изучения так называемых "размерных" эффектов.

Одним из перспективных сегнетоэлектрических материалов для изготовления тонких пленок является твердый раствор цирконата-титаната свинца  $Pb(Zr_x, Ti_{1-x})O_3$  (PZT) с составом, близким к морфотропной фазовой границе (МФГ,  $x \approx 0,52 \div 0,55$ ).

Частной особенностью тонких пленок PZT является наличие большого двухосного механического напряжения в плоскости пленки [1—9]. Например, в

работах [6—9] сообщается, что пленки PZT, имеющие текстуру с преимущественной ориентацией в направлении [111], подвергаются воздействию растягивающего остаточного напряжения  $\sigma_R \sim 100$  МПа, которое приводит к снижению составляющей вектора поляризации, перпендикулярной плоскости пленки, и увеличению его параллельной составляющей.

Основной источник механического напряжения в тонких пленках заключается в несоответствии между коэффициентами теплового расширения пленки, электродов и подложки. Кроме того, в процессе изготовления пленки PZT подвергаются высокотемпературному отжигу ( $T \sim 600$  °С). В ходе последующего за этим охлаждения до комнатной температуры они испытывают фазовый

переход из кубической фазы в тетрагональную и/или ромбоэдрическую, что приводит к дополнительным внутренним напряжениям в структуре пленки. Частичная или полная релаксация указанных механических напряжений происходит в результате образования дислокаций несоответствия в высокотемпературной параэлектрической фазе и формирования доменной структуры необходимой конфигурации ниже температуры фазового перехода. При этом очевидно, что в зависимости от величины и знака остаточных внутренних напряжений диэлектрические свойства пленок могут существенным образом изменяться, что в конечном итоге будет предопределять и свойства конструируемого на их основе устройства.

Целью настоящей работы было выявление характера и степени влияния механических напряжений на диэлектрический отклик тонких пленок PZT при различных частотах и амплитудах измерительного электрического поля.

### Экспериментальные результаты и обсуждение

В качестве объектов исследования была выбрана пленка PZT, полученная золь-гель-методом [10]. Согласно результатам рентгеноструктурного анализа [10] исследуемая пленка имеет текстуру с преимущественной ориентацией в направлении [111]. Ее состав соответствовал МФГ с отношением  $Zr/Ti = 0,53/0,47$  ( $Pb(Zr_{0,53}Ti_{0,47})O_3$ ). Толщина пленки составляла 0,2 мкм. В качестве подложки была использована кремниевая пластина, которая подвергалась термическому окислению для формирования слоя  $SiO_2$ , затем наносился слой Ti, необходимый для повышения адгезии следующего за ним слоя Pt. При измерениях платиновый слой был использован в качестве

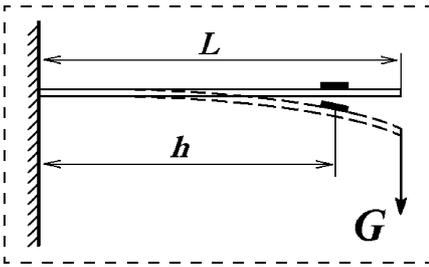


Рис. 1. Схематический вид измерительной установки ( $L = 35$  мм,  $h = 24$  мм)

нижнего (общего) электрода. Верхние электроды (контактные площадки) площадью  $0,03$  мм<sup>2</sup> были изготовлены из никеля.

Закрепленная одним концом подложка Si/SiO<sub>2</sub>/Ti/Pt длиной  $L = 35$  мм с нанесенной на нее пленкой деформировалась под действием нагрузки  $G$ , приложенной к незакрепленному концу (рис. 1). Напряжение, вызываемое внешней нагрузкой в пленке PZT при деформации подложки, носило характер растяжения. При определенном "начальном" значении  $G$  измерялся ряд петель поляризации (ПП) конденсаторной ячейки пленки, находящейся на расстоянии  $h$  от точки закрепления. В данной работе исследовалась ячейка, для которой  $h = 24$  мм. Измеряемый ряд ПП соответствовал различным амплитудам  $E_0$  (от  $15$  кВ/см ( $0,3$  В) до  $250$  кВ/см ( $4,8$  В)) и частотам  $\nu$  (от  $1$  Гц до  $10$  кГц) переменного синусоидального поля. После этого нагрузка ступенчато увеличивалась (от  $0,49$  до  $1,57$  Н) на фиксированную величину  $\Delta G = 0,098$  Н и для каждого последующего значения  $G$  проводилось измерение нового ряда ПП. Все этапы измерений осуществлялись при комнатной температуре. Изучаемые диэлектрические параметры пленок были получены посредством компьютерной обработки ПП.

На рис. 2, а представлены характерные амплитудные зависимости диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$ , измеренные на частоте  $1000$  Гц, при двух значениях

нагрузки  $G$  — минимальной ( $0,49$  Н) и максимальной ( $1,57$  Н). Хорошо видно, что вблизи максимума зависимости  $\epsilon'(E)$  данные кривые имеют область пересечения в некотором интервале значений электрического поля ( $140$ – $160$  кВ/см). Для упрощения дальнейшего анализа воспользуемся величиной  $E_M$ , характеризующей середину данного интервала. При этом поля, лежащие в интервале  $E \leq E_M$ , будем называть слабыми и средними, а поля, превышающие величину  $E_M$ , будем считать сильными. С учетом этого видно, что увеличение механической нагрузки  $G$  в слабых и средних полях ( $E \leq E_M$ ) приводит к небольшому росту значения  $\epsilon'$  (рис. 2, б, кривые 1–2).

Для объяснения характера поведения  $\epsilon'$  в зависимости от значения  $G$  можно воспользоваться двумя подходами. Один из них рассмотрен в работах [6, 7] и основывается только на изменении текстуры пленок. При этом он не учитывает доменную структуру материала, а также ее динамику в электромеханических полях.

Мы попытаемся объяснить поведение диэлектрических параметров пленки под действием внешней механической нагрузки (напряжения) другим способом, учитывающим доменную конфи-

гурацию. Согласно такому подходу наблюдаемое увеличение  $\epsilon'$  можно связать со срывом доменных стенок с точечных дефектов, вызываемым добавочным "внешним" механическим напряжением. Кроме того, это напряжение может снизить энергию, требуемую для зарождения новых противоположно направленных доменов, которые будут вносить дополнительный вклад в общую поляризацию образца. Как видно на рис. 2, б, при приближении значения измерительного электрического поля к  $E_M$  происходит постепенное уменьшение наклона зависимости  $\epsilon'(G)$  (кривые 1 и 2), а при  $E \approx E_M$  (кривая 3) наклон становится нулевым. Иными словами, в электрических полях, близких к коэрцитивному, когда в процессе переполяризации участвует основная часть объема (доменов) образца, внешняя нагрузка не оказывает влияния на диэлектрическую проницаемость. В сильных полях ( $E \geq E_M$ ) рост величины  $G$  приводит к незначительному уменьшению  $\epsilon'$ , что можно связать с зажатием некоторой части доменов и их исключением из процесса переключения при перераспределении растущего в пленке напряжения (рис. 2, б, кривая 4).

Рис. 3, а иллюстрирует амплитудные зависимости полушири-

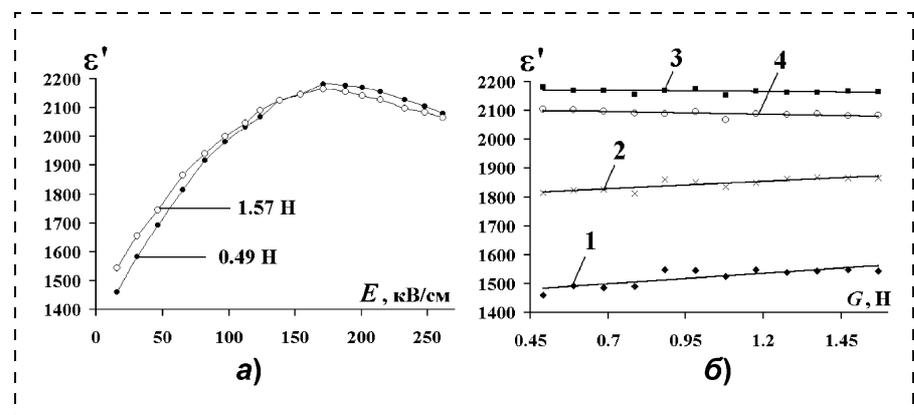


Рис. 2. Амплитудные зависимости диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$ , измеренные на частоте  $1000$  Гц при двух значениях нагрузки  $G$  — минимальной ( $0,49$  Н) и максимальной ( $1,57$  Н) (а); зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  от внешней нагрузки  $G$ , измеренная при различных амплитудах электрического поля (1 —  $15$  кВ/см ( $0,3$  В), 2 —  $65,5$  кВ/см ( $1,2$  В), 3 —  $171$  кВ/см ( $3,3$  В), 4 —  $250$  кВ/см ( $4,8$  В)) (б)

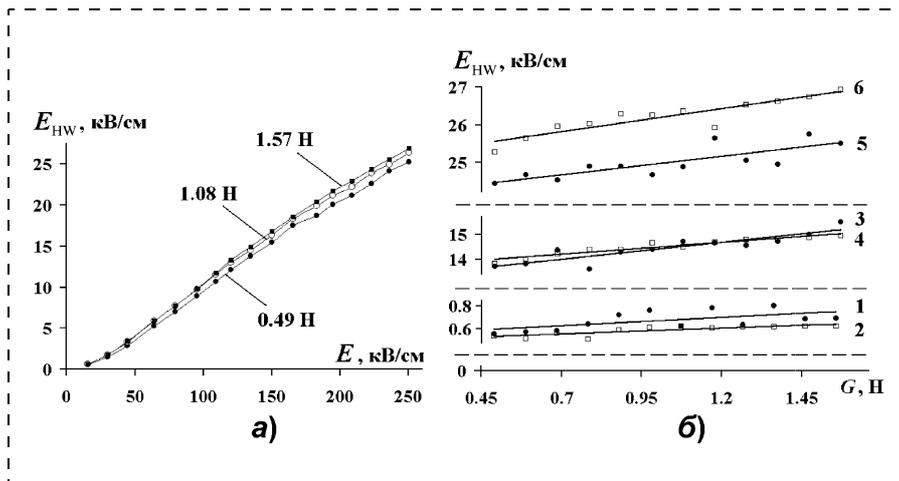


Рис. 3. Амплитудные зависимости полуширины петель поляризации  $E_{HW}$ , измеренные на частоте 1000 Гц при различных значениях внешней нагрузки  $G$  — минимальной (0,49 Н), средней (1,08 Н) и максимальной (1,57 Н) (а); зависимость полуширины петель поляризации  $E_{HW}$  от внешней нагрузки  $G$ , измеренная при различных амплитудах и частотах электрического поля (1 — 15 кВ/см (0,3 В), 10 Гц; 2 — 15 кВ/см (0,3 В), 1 кГц; 3 — 135 кВ/см (3,3 В), 10 Гц; 4 — 135 кВ/см (3,3 В), 1 кГц; 5 — 250 кВ/см (4,8 В), 10 Гц; 6 — 250 кВ/см (4,8 В), 1 кГц (б))

ны петлю поляризации  $E_{HW}$  при различных значениях внешней нагрузки. Видно, что при минимальном поле кривые  $E_{HW}(E)$  практически накладываются друг на друга. Однако увеличение напряженности электрического поля приводит к постепенному их расхождению, причем при всех равных значениях  $E$  выше расположена кривая, соответствующая большему значению внешней нагрузки  $G$ . Это говорит о возрастании  $E_{HW}$ , а следовательно, и площади петли (диэлектрических потерь) с ростом  $E$ . Это хорошо видно на рис. 3, б, на котором представлены зависимости  $E_{HW}(G)$ , измеренные при двух частотах (10 Гц и 1 кГц) и трех амплитудах измерительного поля — минимальной (15 кВ/см (0,3 В)), средней (135 кВ/см (2,7 В)) и максимальной (250 кВ/см (4,8 В)). Наблюдаемое поведение параметра  $E_{HW}$  можно объяснить увеличением числа  $90^\circ$ -ных доменов при возрастании внутреннего механического напряжения. Частично уменьшая это напряжение, они

в то же время увеличивают переключательную "жесткость" материала пленки, приводя к росту площади ПП, а следовательно, и диэлектрических потерь.

Необходимо также отметить увеличение наклона прямых, аппроксимирующих зависимости  $E_{HW}(G)$ , с ростом  $E$ . Такое поведение, по-видимому, связано с относительной трудностью полного переключения активного объема образца, заполненного возрастающим числом  $90^\circ$ -ных доменов по сравнению с его поляризацией в слабых и средних полях.

Таким образом, предложенный подход, связанный с динамикой доменной структуры тонкой сегнетоэлектрической пленки при воздействии внешней механической нагрузки, позволяет непротиворечиво объяснить характер поведения ее диэлектрических параметров, исследованных в данной работе.

*Работа выполнена при поддержке гранта "Ведущие научные школы" (НШ-1514.2003.2).*

### Список литературы

1. Перцев Н. А., Емельянов А. Ю. Диаграмма устойчивости упругих доменов в эпитаксиальных сегнетоэлектрических тонких пленках // ФТТ. 1997. Т. 39. № 1. С. 127.
2. Емельянов А. Ю. Влияние ширины доменных границ на статику  $90^\circ$  доменов в эпитаксиальных сегнетоэлектрических тонких пленках // ФТТ. 2001. Т. 43. № 2. С. 316.
3. Alpay S. P., Nagarajan V., Bendersky L. A., Vaudin M. D., Aggrawal S., Ramesh R., Roytburd A. L. Effect of the electrode layer on the polydomain structure of epitaxial  $\text{PbZr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8}\text{O}_3$  thin films // J. Appl. Phys. 1999. V. 85. N 6. P. 3271.
4. Nagarajan V., Jenkins I. G., Alpay S. P., Li H., Aggrawal S., Salamanca-Riba L., Roytburd A. L., Ramesh R. Thickness dependence of structural and electrical properties in epitaxial lead zirconate titanate films // J. Appl. Phys. 1999. V. 86. N 1. P. 595.
5. Roytburd A. L., Alpay S. P., Bendersky L. A., Nagarajan V., Ramesh R. Three-domain architecture of stress-free epitaxial ferroelectric films // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. N 1. P. 553.
6. Пронин И. П., Каптелов Е. Ю., Гольцев А. В., Афанасьев В. П. Вклад механических напряжений в самополяризацию тонких сегнетоэлектрических пленок // ФТТ. 2003. Т. 45. № 9. С. 1685.
7. Пронин И. П., Каптелов Е. Ю., Хосина Н. Г., Афанасьев В. П. Оценка механических напряжений в тонкопленочных структурах с сегнетоэлектрическими пленками цирконата-титаната свинца // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. № 6. С. 25.
8. Youngsung Kim, Wangkyu Lim, Jaichan Lee. The electrical properties and retention characteristics of strained PZT thin film capacitors // Integrated Ferroelectrics. 2001. V. 37. P. 285.
9. Lei Lian. Stress and orientation effects in ferroelectric thin films // Ph. D. thesis. Urbana, Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign. 2001. 139 p.
10. Соловьева Л. И., Обвинцева И. Е., Яновская М. И., Воротилов К. А., Васильев В. А. Сегнетоэлектрические пленки цирконата-титаната свинца, полученные золь-гель-методом с использованием алкоголятов металлов // Неорганические материалы. 1996. Т. 32. № 7. С. 866.

УДК 004.451.88

**Ю. А. Степченков**, канд. техн. наук, **В. С. Петрухин**,  
**Ю. Г. Дьяченко**, канд. техн. наук  
Институт проблем информатики РАН,  
YStepchenkov@ipiran.ru

## ОПЫТ РАЗРАБОТКИ САМОСИНХРОННОГО ЯДРА МИКРОКОНТРОЛЛЕРА НА БАЗОВОМ МАТРИЧНОМ КРИСТАЛЛЕ

*Рассматриваются состояние и проблемы создания строго самосинхронных (ССС) схем. СССР-схемы и системы на их основе обладают рядом свойств, выделяющих их из общего ряда цифровых устройств. СССР-схемы "естественно надежны", поскольку гарантируют сохранение работоспособности устройства при изменении условий окружающей среды в широком диапазоне, сравнимом с физическими ограничениями области работоспособности приборов на интегральных схемах. СС-схемотехника в полной мере отвечает требованиям, предъявляемым к элементной базе для критических областей применения.*

*Описана разработка средств проектирования и изготовления СССР-БИС на основе отечественного базового матричного кристалла (БМК 5503). Приведены предварительные результаты разработки (по итогам моделирования и топологического проектирования на отечественной промышленной САПР БМК "Ковчег 2.6") синхронного и самосинхронного вариантов исполнения тестового кристалла "Микроядро", реализующего функции вычислительного ядра 8-разрядного микроконтроллера PIC18CXX, широко используемого в отечественных разработках.*

### Введение

Теоретические исследования подтверждают, что самосинхронные (СС) схемы имеют ряд неоспоримых преимуществ по сравнению с другими типами цифровых электронных схем: синхронными, асинхронными и квазисамосинхронными. Главные преимущества СС-схем — сохранение работоспособности (устойчивой работы без сбоя) в любых возможных условиях эксплуатации и прекращение функционирования (всех переключений) в момент возникновения константной неисправности элементов. Указанные особенности обеспечивают высокую эффективность создания надежных изделий и, в первую очередь, реализацию отказоустойчивой аппаратуры для бортовых вычислительных комплексов в базисе СС-схем.

Достигнутый уровень разработ-

ки теории СС-схем и средств автоматизации их проектирования выдвигает в число первоочередных задач практическое подтверждение декларируемых свойств СС-схемотехники. При этом апробация методологии СС-проектирования должна учитывать возможности отечественной электронной промышленности и проводиться на уровне представительного функционально-законченного устройства.

В докладе отражены предварительные результаты разработки (по итогам моделирования и топологического проектирования на отечественной промышленной САПР БМК "Ковчег 2.6") синхронного и самосинхронного вариантов исполнения тестового кристалла "Микроядро", реализующего функции вычислительного ядра 8-разрядного микроконтроллера PIC18CXX, широко

используемого в отечественных разработках. Получение первых опытных образцов кристаллов, реализованных на БМК 5503, было запланировано на конец 2005 года.

Оценка полученных результатов сравнительного проектирования синхронного и самосинхронного вариантов тестового кристалла будет малоинформативна без точной идентификации класса схем, к которой может быть отнесен разработанный СС-вариант "Микроядро".

В литературе для обозначения схем, обладающих вышеуказанными свойствами, используется (не всегда обоснованно) целый "букет" названий [1]: СС-схемы (*self-timed circuits*); не зависящие от скорости (*speed-independent*); апериодические (*dead-beat*); не зависящие от задержек (*delay-independent*); полумодулярные (*semi-modular*), не чувствительные к задержкам (*delay-insensitive*). В последнее время СС-схемами (в узком смысле) иногда стали называть схемы, где глобальная (на уровне системы) синхронизация заменена совокупностью локальных источников синхроимпульсов (*self-clocking*) или где синхронизация отсутствует (*clockless circuits*), но работоспособность зависит от некоторого соотношения задержек (например, считается, что задержка любых трех последовательно переключаемых элементов больше, чем задержка любого одного или двух элементов).

В работе [2] рассмотрено десять различных методологий проектирования асинхронных схем. Отвлекаясь от деталей, их можно разделить на две группы.

1. Методологии, базирующиеся на модели с ограниченной задержкой, например, схемы Хаффмана (*Huffman*) и микроконвейеры. Другие методологии предназначены для проектирования модулей, не чувствительных к задерж-

кам (например, *I-net*), однако их объединение требует использования либо линий задержки в цепях обратной связи, либо системы локальной синхронизации. Подобно синхронным схемам, они вынуждены ориентироваться на худший случай срабатывания элементов (правда, не глобально, во всей схеме, а локально, в отдельных ее частях), т. е. не являются схемами, полностью самопроверяемыми относительно константных неисправностей. В дальнейшем такие схемотехнические решения будем называть *квазисамосинхронными*. Наиболее известные зарубежные самосинхронные микросхемы и реализованные проекты относятся именно к этому классу [3–6].

2. Подходы, базирующиеся на модели элементов и соединительных проводов до точки разветвления с неограниченной задержкой. При этом предполагается, что разница в задержке проводов после разветвления меньше, чем минимальная задержка элемента. Если используемая технология производства ИС удовлетворяет требованию изохронности ветвления, то подобные методологии проектирования позволяют разрабатывать СС-схемы, полностью самопроверяемые. Примеры таких методологий: графы сигнальных переходов (STG), диаграммы изменений (CD) и трансляция процессов связи Мартина (*Martin*). При необходимости эти методологии могут быть расширены для разработки схем, не удовлетворяющих требованию изохронности ветвления, путем введения повторителей после разветвления. В настоящее время эти подходы носят, в основном, исследовательский характер. Во всяком случае, коммерчески выпускаемых изделий на их базе не обнаружено.

Схемы, методология которых разрабатывается в ИПИ РАН, и в том числе использованная в "Микроядре", относятся ко вто-

рой группе, и для их точной идентификации используем термин "строгие самосинхронные схемы" (ССС-схемы, *strictly self-timed circuits*). Они характеризуются совокупностью следующих особенностей:

- на концептуальном уровне они базируются на теории Д. Майлера (*Muller D.*) [7]; правильная работа таких схем не зависит от задержек составляющих их элементов (задержка любого элемента схемы, например элемента НЕ, может быть любой, но конечной величиной);
- на схемотехническом уровне использование дополнительных логических и топологических приемов позволяет обеспечить правильную работу ССС-схем независимо от задержек соединительных проводов (задержек проводов после разветвления, если такие задержки критичны);
- на уровне взаимодействия с внешней средой и другими ССС-схемами они используют асинхронный (запрос-ответный) принцип с фиксацией действительного окончания любого инициированного переходного процесса; функционирование самих ССС-схем обеспечивается без применения каких-либо синхросигналов, генераторы могут быть использованы только для сугубо второстепенных целей, например, для подсчета астрономического времени.

Только принадлежность к классу ССС-схем позволяет получить на практике все эти потенциальные преимущества [8].

### 1. Обоснование реализации тестовой схемы в виде БИС с программируемой структурой

Возможно несколько путей реализации тестовой ССС-схемы.

1. *Разработка специализированной ССС-ИС высокого уровня интеграции, сравнимой со стан-*

*дартными синхронными ИС.* Однако это связано с очень большими затратами средств и времени на проектирование ИС, что, с учетом недостаточной отработанности ССС-схемотехнических решений, делает этот подход в настоящее время нецелесообразным.

2. *Разработка ССС-схемы на базе микросхем малого и среднего уровней интеграции.* Применение МИС и СИС приводит к резкому росту числа корпусов ИС и усложнению монтажа. В результате снижается надежность изделий и их быстродействие. Этот тупиковый путь может скомпрометировать саму идею самосинхронизации; ее основные достоинства — повышение надежности и быстродействия — сводятся на нет использованием ИС малой степени интеграции.

3. Наиболее предпочтительной представляется *разработка схемы на базе программируемых изделий, отвечающих, в том числе, требованию создания специфичной аппаратуры с оригинальной схемотехникой.* Современные программируемые средства позволяют создавать целую "систему на кристалле". В настоящее время говорить о собственных российских разработках программируемых логических ИС (ПЛИС) высокой степени интеграции пока, к сожалению, не приходится. В то же время разработчикам ИС доступна целая гамма базовых матричных кристаллов (БМК), выпускаемых отечественной электронной промышленностью; сектор полужаказных микросхем на основе БМК развивается достаточно интенсивно. Именно эти изделия удовлетворяют потребности многих разработчиков радиоэлектронной аппаратуры и широко применяются в системах и комплексах специального и военного назначения.

В работе [9] подробно рассмотрено соответствие конструктивных, технологических и схемотехнических аспектов БМК

требованиям самосинхронного исполнения аппаратуры, и сделан вывод о практической непригодности базиса ПЛИС для проектирования ССС-схем. Схемотехнические решения, применяемые в ПЛИС, соответствуют принципу *синхронного* проектирования и определяются конструктивными особенностями ПЛИС. Это, прежде всего, наличие в ПЛИС глобальных сигналов синхронизации. Напротив, конструктивные решения, реализуемые в БМК, ориентированы на *асинхронное* проектирование, что соответствует требованию СС-исполнения.

Целям проектирования тестовой БИС "Микроядро" отвечает тип БМК 5503БЦ7У в рамках БМК серии 5503 (5478 условных вентилях в поле БМК, тип приемки 5). Обширная библиотека логических (210) и периферийных (140) элементов в рамках этой серии обеспечивает эффективное проектирование синхронной аппаратуры. Однако требованиям разработки ССС-схем отвечают только 26 функционально простых элементов:

- INV, INV2, INV3, INV4;
- AND2, AND3;
- OR2, OR3;
- NAN2, NAN3;
- NOR2, NOR3;
- A210I, A220I, A310I; A210, A220, A310;
- O21AI; O22AI; O31AI; O21A, O22A, O31A;
- RS, RSB.

Любая ССС-схема условно разбивается на две части — функциональную (ФЧ), выполняющую обработку входных данных, и индикаторную (ИЧ), фиксирующую окончание переходных процессов в отдельных частях ФЧ и ССС-схемы в целом. Основная причина отказа от большинства элементов библиотеки — нарушение требования их индицируемости: любой инициированный переходный процесс (процесс возбуждения) в этом элементе должен быть завершен, и факт

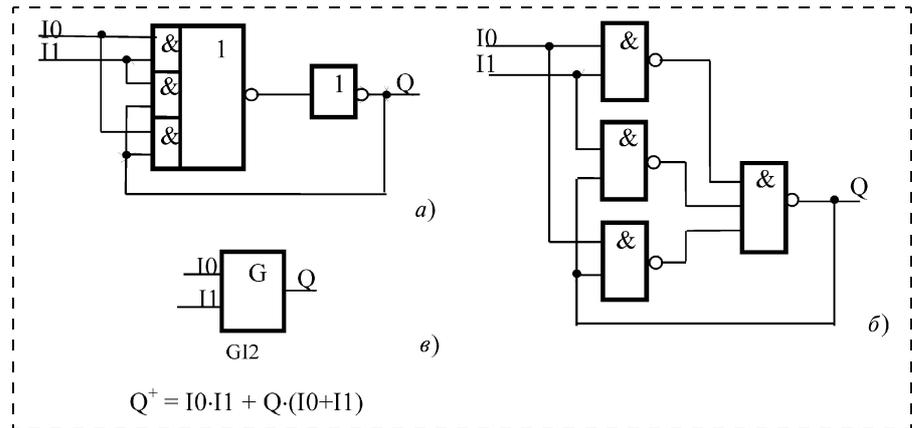


Рис. 1. Реализация индикаторных G-триггеров для инфазных сигналов:

*a* — корректная (однокаскадная) в своей основной логической части; *б* — некорректная (двухкаскадная); *в* — условное графическое обозначение (УГО), наименование и формульная запись функционирования G-триггера (G12)

завершения должен быть зафиксирован (индицирован). Снятие возбуждения до завершения переходного процесса является признаком нарушения самосинхронности, и такая реализация схемы не может быть аттестована как самосинхронная. Одно из наиболее простых (но не оптимальных и не обязательных) требований построения сложных многокаскадных элементов для ССС-реализаций — возможность индикации каждого его выхода, т. е. каждого каскада.

Любой однокаскадный элемент со стандартным (с двумя состояниями) выходом отвечает требованию индицируемости, а однокаскадная реализация ФЧ индикаторов является необходимым условием их реализации. Индикаторные элементы, по существу, это средство синхронизации процессов в ССС-схемах. Именно к их построению предъявляются наиболее жесткие требования, в данном случае — однокаскадность реализации. Теоретически и практически доказано, что корректные индикаторные элементы нельзя построить на упрощенном базисе И—НЕ и ИЛИ—НЕ. Для его построения необходим базис И—ИЛИ—НЕ. На рис. 1 приведены две реализации индикатора для двух инфазных (непарных) сигналов — так называемого гис-

терезисного триггера (G-триггера); также приведена его таблица истинности.

Таблица истинности элемента G12

№	Входы		Выход
	I0	I1	
1	0	0	0
2	0	1	Хранение
3	1	0	Хранение
4	1	1	1

Если наборы на входах I0 и I1 (00 и 11) фиксируются на длительное время, за которое успевают закончиться все переходные процессы, оба варианта реализации свободны от состязаний. Однако, если в схеме, показанной на рис. 1, *a*, изменение выхода является признаком окончания всех переходных процессов, то в схеме на рис. 1, *б* после изменения выхода переходные процессы в элементах первого каскада могут продолжаться.

G-триггер должен индицировать окончание переходных процессов не только в схемах, подключенных к его входам, но и в себе самом. При этом предполагается, что логические состязания на уровне одного однокаскадного элемента невозможны, так как время его переключения определяется, в основном, временем перезаряда его выходной емкости.

Рассмотрим возможные состояния в схеме на рис. 1. Исходное состояние  $I_0 = I_1 = 0$ , при котором на выходах всех элементов первого яруса сигналы равны 1, а  $Q = 0$ . Изменение выхода ( $Q = 1$ ) произойдет после того, как будет выполнено условие  $I_0 = I_1 = 1$ . Предположим, что задержки элементов первого яруса, охваченные обратной связью, так велики<sup>1</sup>, что сигналы на их выходах (или на выходе хотя бы одного элемента) остались равными 1, в то время как один из входов  $I_0$  или  $I_1$  перешел в исходное состояние 0. При этом выход элемента  $I_0 \cdot I_1 / NE$  станет равным 1. Тогда выход  $Q$  может перейти из 1 в 0, не дожидаясь окончания переходных процессов в других элементах первого яруса — выполнения условия  $I_0 = I_1 = 0$ ; схема, таким образом, не выполнит функцию индикатора.

Однокаскадным называется элемент, перезаряд выходной емкости которого осуществляется только через транзисторы с затворами, соединенными с его входными сигналами. К выходу однокаскадного элемента может быть подключено любое число последовательно/параллельно включенных элементов НЕ, что удовлетворяет требованию индикации.

Для эффективной реализации самосинхронного тестового кристалла на БМК разработан минимальный состав базовых, типовых и периферийных ССС-элементов (56 элементов) и выполнено их топологическое проектирование. Библиотечные элементы введены в состав САПР БМК "Ковчег 2.6". Кроме того, в классе ССС-макроэлементов разработано 12 макроэлементов, представляющих собой устойчивые и часто исполь-

зуемые комбинации библиотечных элементов.

## 2. Основные задачи и функциональное наполнение тестового кристалла

Цель настоящей работы — подтверждение потенциальных преимуществ ССС-схемотехники на примере опытного образца вычислительного устройства (ВУ), удовлетворяющего требованиям критических областей применения, например, формирователя команд управления как части баллистического вычислителя. Разработка и реализация архитектуры отдельного ВУ создает практическую базу для проектирования широкого класса ССС-схем с использованием отечественных серий БМК, а также обеспечивает проверку на опытных образцах соответствие ССС-схемотехники требованиям аппаратуры специального и военного назначения. Было доказано, что этим целям отвечает программно-аппаратный вариант реализации ВУ на базе программной модели одного из семейств микроконтроллеров фирмы *Microchip*. При этом требованиям по вычислительным ресурсам отвечает семейство микроконтроллера PIC18CXX. Для реализации его вычислительного ядра нужно порядка 6000 ячеек (без учета затрат на реализацию памяти программ, памяти данных и стека). Для отработки отдельных функционально значимых элементов ССС-реализации архитектурно-совместимого ядра данного семейства по экономическим соображениям было решено выбрать серию БМК 5503. К реализации архитектуры ССС-ВУ в полном объеме можно будет приступить только после проведения испытаний и подтверждения соответствия характеристик ССС-ВУ требованиям гарантоспособных изделий электронной техники.

Кроме основных задач, функциональное наполнение БИС

"Микроядро" должно было облегчить решение таких проблем как:

1) состыковка стандартного контрольно-измерительного и тестового оборудования (КИТО) завода-изготовителя БИС БМК, которое предназначено для проверки стандартных синхронных и асинхронных изделий, с СС-изделием;

2) ограниченное число выводов БМК, удовлетворяющих требованиям военной приемки;

3) ограничения со стороны КИТО и периферийных элементов входа БМК при проведении граничных испытаний по напряжению питания и температуре окружающей среды;

4) обеспечение как можно более точной локализации возможного дефекта при производстве опытных образцов с минимальной длиной тестовых последовательностей;

5) демонстрация работоспособности БМК-кристаллов и проведение сравнительных испытаний на площадке потенциальных пользователей.

Проблемы 1—3 были решены за счет организации подготовительных (настроечных) процедур со стороны КИТО на базе синхронного подхода, не требующего существенного увеличения контактов. В основном автоматическом режиме тестирования оборудование КИТО только осуществляет съем необходимой информации. Проблема 4 была решена с помощью метода сканирования точек индикации переходных процессов вместо использования метода периферийного сканирования, требующего существенных аппаратных затрат. Для решения проблемы 5 было использовано формирование сигналов, частота которых меньше рабочей частоты БИС в 256 раз.

В Микроядре можно выделить три функциональные части: формирователь потока команд (ФПК), собственно вычислитель

<sup>1</sup>Напомним, что СС-схема (в данном случае *G*-триггер) должна работать корректно при любых значениях задержек элементов, ее составляющих.

и последовательно-параллельный порт (ПП-порт). Структура ФПК (рис. 2) функционально приближена к прототипу (контроллеру PIC18CXX), в том числе и по названиям элементов структуры. Имеющиеся отличия связаны с упрощением структуры прототипа и выводением части внутренних сигналов на внешние контакты Микроядра.

ФПК содержит: память программ (PM — *program memory*); регистр команд (IR — *instruction register*); мультиплексор адреса памяти программ (MX1); счетчик команд (PC — *program counter*); регистр перехода (JR — *jump register*); дешифратор команд (ID — *instruction decoder*); устройство управления (CU — *control unit*); буферы для организации шины данных (B1...B4, B — *bus*).

ФПК обеспечивает исполнение одиночной команды или четырех команд, располагаемых в программной памяти (PM) в произвольном порядке с возможностью циклического повтора. Одна и та же команда может располагаться в произвольной ячейке PM от 1 до 4 раз. Последний случай моделирует  $n$ -кратное исполнение команды. Небольшое число команд в Микроядре, тем не менее, позволяет имитировать основные этапы вычислительного процесса: процедуру вхождения в конвейер (первая команда после сброса требует для своего выполнения семь последовательных действий — два цикла, если следовать терминологии прототипа), исполнение команд в режиме насыщения конвейера (NOP, MUL и ROT за один цикл) и процедуру разрушения конвейера (команды GOTO и JUMP).

Напомним, что в функциональном плане прототип Микроядра (синхронный PIC18CXX2) содержит простейший двухступенчатый конвейер. Все команды (за исключением команд ветвления) выполняются за один машинный цикл [10].

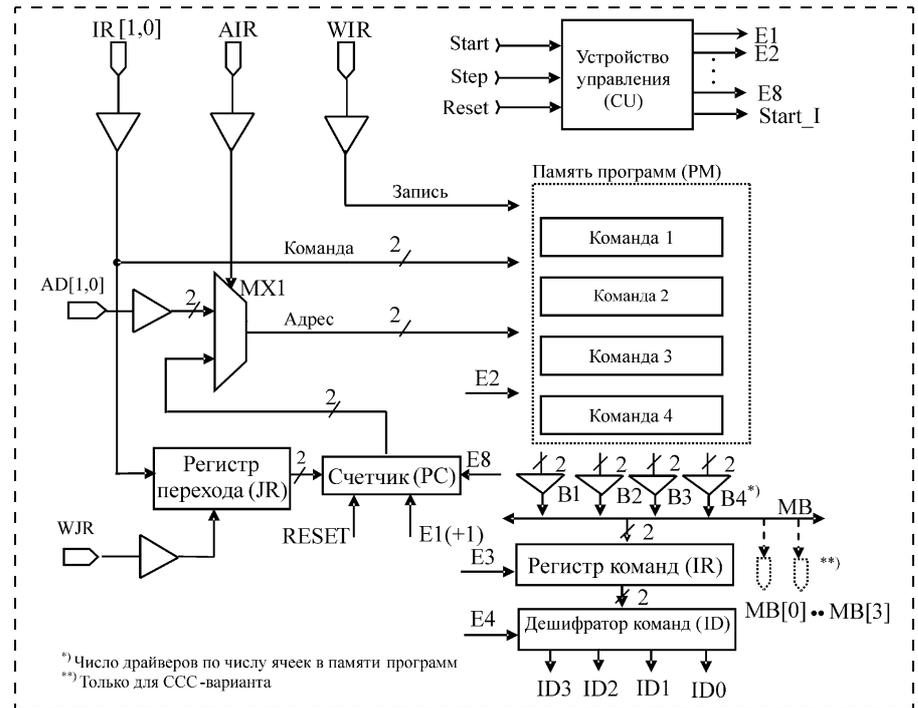


Рис. 2. Формирователь потока команд Микроядра

Возможны четыре режима состояния Микроядра, которые определяются управляющими сигналами Reset, Start и Step: режим простоя, режим автономной работы, режим пошаговой работы и режим ожидания. Перед инициацией автономного или пошагового режимов необходимо определить состояние всех ячеек памяти программ. Запись в память программ осуществляется по сигналу WIR = 0. Перед записью необходимо установить код команды на входах IR1, IR0 и адрес ячейки на входах AD1, AD0 и настроить мультиплексор на установку адреса извне (AIR = 0).

Память PM построена на регистрах-защелках и содержит дешифратор адреса ячейки памяти. В регистр JR заносится адрес перехода при выполнении команды JUMP. Для записи адреса перехода необходимо установить на шине IR адрес и активизировать сигнал WJR. При приходе команды JUMP в первом цикле активных действий не происходит; во втором цикле содержимое регистра JR переписывается в PC; в

следующем цикле по значению PC команда считывается из PM.

Вычислитель Микроядра (рис. 3) — упрощенная структура соответствующей части контроллера PIC18CXX, которая содержит, вместе с тем, ряд дополнительных элементов, облегчающих тестирование экспериментального образца Микроядра и обеспечивающих выдачу пользователям ряда параметров при проведении сравнительных испытаний двух вариантов его реализации.

- В состав вычислителя входят:
- два последовательных двоичных счетчика команд IDC (IDCH:IDCL — IDCHigh:IDCLow);
  - устройство сдвига (SU — *shift unit*);
  - аппаратный умножитель (MU — *multiplying unit*);
  - регистр устройства сдвига (SUR — *shifter unit register*);
  - регистр умножителя (*product*), состоящий из двух частей (PRODH:PRODL).

Память данных прототипа (DM — *data memory*) имитируется двумя последовательными дво-

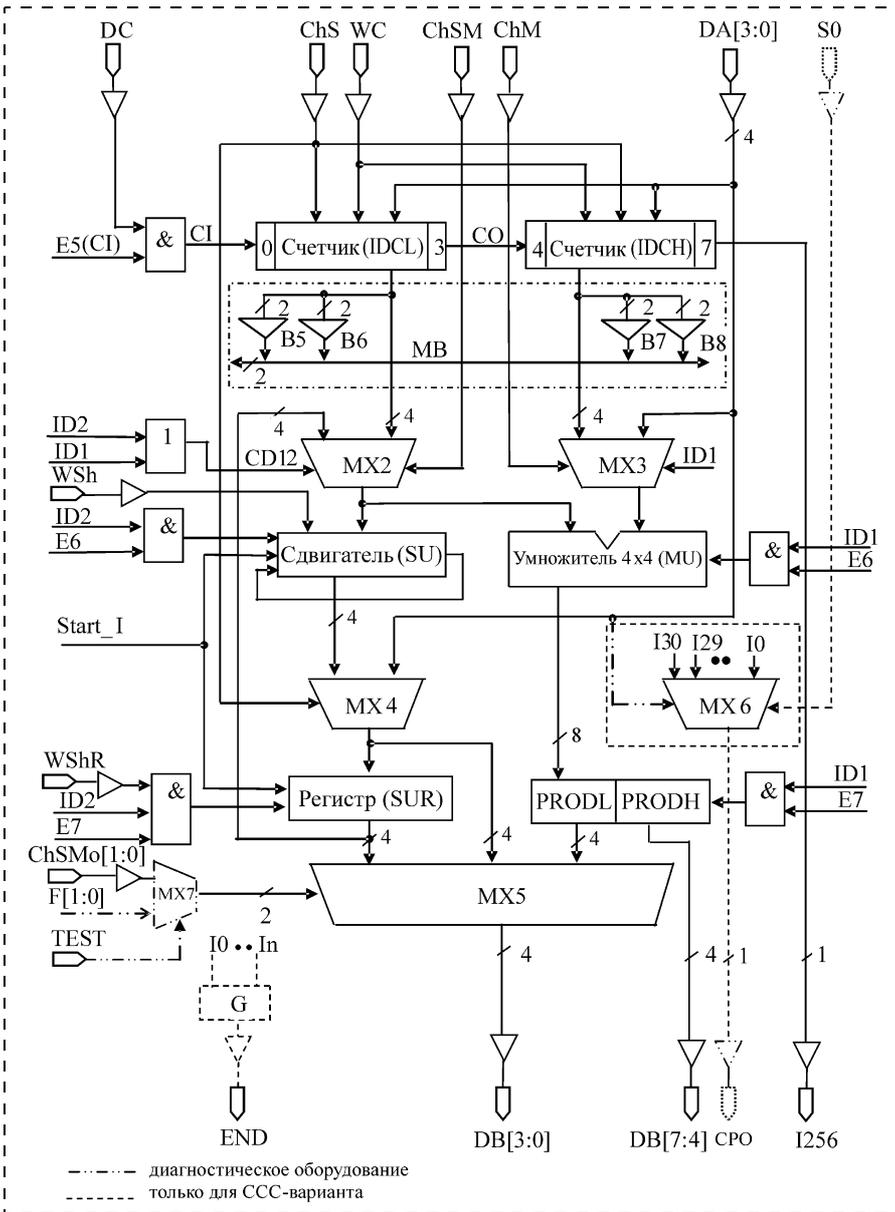


Рис. 3. Вычислитель Микродроз

ичными 4-разрядными счетчиками IDC с параллельной записью информации (канал считывания данных) и регистром сдвигателя SUR (канал записи данных). Регистр умножителя PROD имитирует регистровую память (выход умножителя MU соединен непосредственно со входом регистра PROD).

Счетчик IDC выполняет две основные функции:

- является средством автоматизированного тестирования сдвигателя (SU) и умножителя (MU) на всем диапазоне обрабатываемых операндов;

- вырабатывает сигнал 1256 (*Instruction 256*), формируемый один раз за 256 выполненных команд.

Третья функция, которая может быть возложена на счетчик — функция таймера, в том числе и для подсчета интервала времени тайм-аута (перехода на саморемонт).

Сравнительные результаты моделирования С-(синхронного) и ССС-вариантов исполнения основной части Микродроза в САПР КОВЧЕГ 2.6 следующие: по реальному быстродействию —

в 1,5—3,1 раз в пользу ССС-варианта (в зависимости от смеси используемых команд); область устойчивой работоспособности по питающему напряжению — не менее 2 раз в пользу ССС-варианта; по числу используемых транзисторов — в 1,3 раза в пользу С-варианта.

### 2.3. Отказоустойчивый преобразователь последовательного кода в параллельный

Введение в состав тестовой БИС "Микродроз" отказоустойчивого фрагмента преследовало цель сопоставить эффективность реализации отказоустойчивости в рамках двух альтернативных схмотехник — синхронной и самосинхронной. Его функциями были:

- обнаружение неисправности — оперативная фиксация ошибки в работе устройства;
- диагностирование неисправности — локализация места, где произошла ошибка;
- выполнение саморемонта, например, замещение неисправного модуля резервным.

Реализация первой функции — "встроенный" атрибут любой ССС-схемы (100 %-ное бестестовое обнаружение константных неисправностей). Вторая функция в ССС-схемах реализуется без труда, так как каждый индикаторный сигнал несет информацию об исправности (неисправности) конкретного мелкогранулированного фрагмента схемы — отдельного разряда регистра, отдельного разряда мультиплексора и т. д. Для регулярных параллельных участков ССС-схемы используется метод саморемонта, где неисправный элемент заменяется резервным по методу скользящего резервирования с замещением посредством сдвига [11]. Этот метод в полной мере использует возможности ССС-схем по локализации неисправности. Однако, поскольку в вычислителе Микродроза для организа-

ции циклического сдвига используются последовательные регистровые структуры, было принято решение и в ПП-порту использовать их же. При этом удалось избежать разработки новых ССС-элементов для реализации ПП-порта.

В качестве примера на рис. 4 представлена схема синхронного преобразователя последовательного кода в параллельный. Восьмиразрядный сдвиговый регистр 3 предназначен для автоматизированного формирования кодовой последовательности на входе преобразователя кода.

Запись в сдвиговый регистр-задатчик (3) осуществляется тетрадами путем активизации сигнала WSP. Выбор соответствующей тетрады (младшей или старшей) осуществляется по сигналу HTLT.

Кодовая последовательность от сдвигового регистра 3 поступает на вход двух приемных каналов. Первый приемный канал состоит из сдвиговых регистров П11, П12 и устройства сравнения, второй приемный канал — из сдвиговых регистров П21, П22 и устройства сравнения. Мультиплексор позволяет переключать выходы приемных каналов в зависимости от состояния сигнала S12. Устройство сравнения в каждом приемном канале осуществляет проверку принятых кодовых комбинаций и в случае обнаружения ошибки формирует сигнал ошибки: Error1 — для первого канала, Error2 — для второго канала. Синхронизирующие импульсы для ПП-порта формирует сигнал CLKS.

Для проведения испытаний преобразователя кода необходимо кодовую последовательность, поступившую в приемный канал, снова передать в сдвиговый регистр 3. Для этого перед подачей синхросигналов CLKS сигнал LOOPS переводится в состояние логического нуля. Предусмотрена возможность анализа измене-

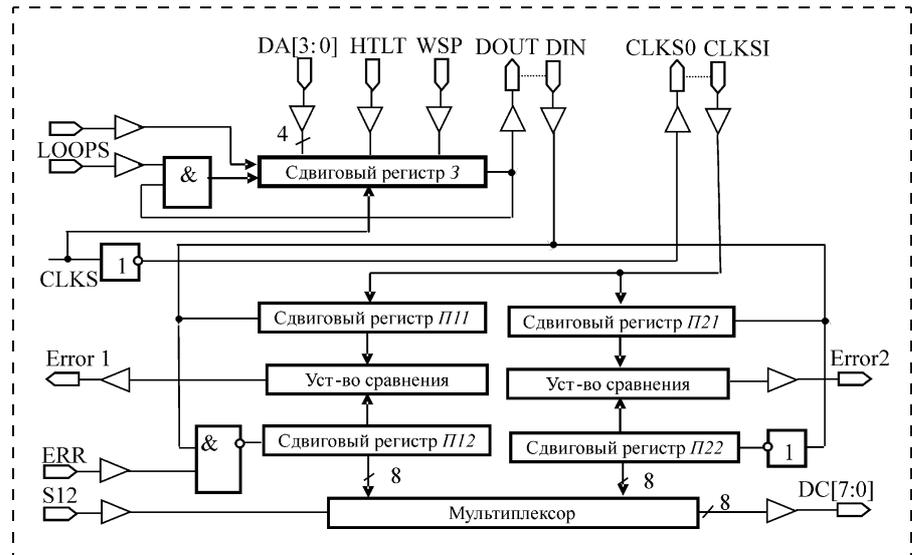


Рис. 4. Функциональная схема отказоустойчивого синхронного варианта последовательного порта тестового кристалла

ния характеристик ПП-порта при изменении длины последовательного канала — как между контактами DOUT и DIN, так и между CLKSO и CLKSI.

Для демонстрации отказоустойчивости преобразователя кода используется сигнал ERR. Если перед подачей синхроимпульсов CLKS данный сигнал перевести в состояние логического 0, это позволит внести изменения в кодовую последовательность, принятую в сдвиговый регистр П12. После подачи восьми синхроимпульсов устройство сравнения выдаст сигнал ошибки (Error1). Таким образом осуществляется имитация отказа в первом приемном канале преобразователя кода.

Сравнительные результаты моделирования ПП-портов С- и ССС-вариантов исполнения Микроядра — по всем показателям в пользу ССС-варианта: по реальному быстродействию — в 1,3...1,7 раза (в зависимости от геометрической длины последовательного канала); по числу транзисторов — в 1,3 раза; по области устойчивой работоспособности — в 2 раза; по числу покрытых неисправностей — в 3 раза.

Кроме того, ССС-схемы ха-

рактеризуются двумя главными преимуществами:

- устойчивой работой без сбоев при любых задержках и любых возможных условиях эксплуатации;
- безопасной работой: прекращением всех переключений в момент появления константных неисправностей элементов.

Авторы приносят благодарность канд. техн. наук Л. П. Плеханову за предложения по оптимизации ряда схемотехнических решений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по Государственному контракту № 1.4/03 (регистрация РАН: № 10002-251/ОИТВС-04/103-098/260503-201).

#### Список литературы

1. Varshavsky V., Kishinevsky M., Marakhovsky V. et al. Self-timed Control of Concurrent Processes / Ed. by V. Varshavsky. Kluwer Academic Publishers, 1990. 245p.
2. Scott Hauck. Asynchronous Design Methodologies: An Overview // Proceedings of the IEEE. 1995. Vol. 83. N 1. P. 69—93.
3. TIME Laboratory. ANNUAL REPORT 2002. May 2003. 252 p.
4. Payne R. Self-timed FPGA systems // Fifth International workshop on

Field Programmable Logic and Applications (W. Moore and W. Luk, eds.), V. 975 of Lecture Notes in Computer Science. 1995. P. 21—35.

5. **Karthik S., de Souza I., Rahmeh J., Abraham J.** Interlock Schemes for Micropipelines: Application to a Self-Timed Rebound Sorter // Proceedings of ICCD. 1991. P. 393—396.

6. **Liebchen A., Gopalakrishnan G.** Dynamic Reordering of High Latency Transactions Using a Modified Micropi-

peline // Proceedings of ICCD. 1992. P. 336—340.

7. **Muller D., Bartky W.** A theory of asynchronous circuits // Annals of computation laboratory of Harvard University. 1959. V. 29. P. 204—243.

8. **Филин А. В., Степченко Ю. А.** Компьютеры без синхронизации // Сборник "Системы и средства информатики". Вып. 9. М.: Наука, 1999. С. 247—261.

9. **Степченко Ю. А., Денисов А. Н., Дьяченко Ю. Г., Гринфельд Ф. И., Фи-**

**лимоненко О. П., Фомин Ю. П.** Библиотека элементов БМК для критических областей применения // Сборник "Системы и средства информатики". Вып. 14. М.: Наука, 2004. С. 318—361.

10. **PIC18CXX2 Data Sheet.** High-Performance Microcontrollers with 10-Bit A/D. 1999. 295 p.

11. **Автоматное** управление асинхронными процессами в ЭВМ и дискретных системах / Под ред. В. И. Варшавского. М.: Наука, 1986. 400 с.

# ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

УДК 621.3.049.77; 629.113/.115, 629.73

**В. Беляев**, д-р техн. наук, проф.,  
ЦНИИ Комета, МГИРЭА

## МЭМС/МСТ В СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИКЕ НА ПРИМЕРЕ АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЯ И АВИАЦИИ

*Рассматриваются основные признаки и области применения изделий микросистемной техники (МСТ), современные тенденции рынка МСТ, указаны основные зарубежные и российские разработчики и производители изделий на основе этой технологии. На примере датчиков для автомобилестроения и авиации показывается, как происходит замена традиционных датчиков на МСТ/МЭМС в США и России.*

### О МСТ/МЭМС

Микросистемная техника (МСТ) — это научно-техническое направление, цель которого — создание в ограниченном объеме твердого тела или на его поверхности микросистем, представляющих собой упорядоченные композиции областей с заданным составом, структурой и геометрией. Статическая или динамическая совокупность этих систем обеспечивает генерацию, преобразование, передачу энергии и движения в интеграции с процессами восприятия, обработки, трансляции и хранения информации при выполнении запрограммированных операций и действий в требуемых условиях эксплуатации с заданными функциональными, энергетическими, временными и надежностными показателями [1, 2]. Микросисте-

мы могут выполнять все или часть перечисленных функций.

За рубежом устройства, преобразующие или передающие механическую энергию или движение под действием электронных сигналов (гальванические связи находятся в тесном взаимодействии с механическими), называют также "микромашинами" и "микроэлектромеханическими" системами или устройствами (МЭМС или МЭМУ).

Изготовление МСТ/МЭМС, по сравнению с классическими промышленными технологиями — механообработкой, литьем, технологией пластмасс, применяемыми при производстве традиционных электромеханических устройств, более выгодно из-за низкой цены изделий микроэлектроники, более легкой достижимости малых и сверхмалых линейных размеров при повышенной точности [3]. В МЭМС-технологии все изделие может изготавливаться в едином технологическом производственном процессе, что при массовом производстве снижает себестоимость всего электромеханического блока почти до нуля. Более того, изделие с микрометровыми размерами получается функционально полным и имеет малое энергопотребление.

В последние 20 лет благодаря уникальным свойствам кремния и появлению так называемой объемной фотолитографии МЭМС-технология получила опережающее развитие. Как материал с полупроводниковыми электрофизическими свойствами кремний известен с середины прошлого века, но благодаря открытию его пьезоэлектрических свойств оказалось возможным создание электромеханических конструкций на кремниевой основе. Вторым фактором стало появление промышленной технологии объемного жидкостного травления кремния, а также разработанной в Германии LIGA-технологии, позволяющей не только форми-

Таблица 1

Структура изделий и разработок МСТ

Класс объектов МСТ	Направление разработок
Микроэлектромеханические системы и машины	Микромеханизмы, микропривод, микродвигатели
Оптико-механические микросистемы	Микрооптика, оптико-механические интегральные схемы
Биотехнические микросистемы	Миниатюрные автономные системы для диагностики организма и замещения органов
Микросистемы энергообеспечения	Автономные миниатюрные источники энергии, микротурбины, микросистемы рекуперации энергии
Сенсорные микросистемы	Мультисенсоры, интеллектуальные сенсоры, сенсоры с обратной связью
Микроаналитические системы	Миниатюрные аналитические приборы
Технологические микросистемы	Микрореакторы, микроинструменты, микрорегуляторы, микронасосы
Мини- и микроробототехнические системы	Автономные многофункциональные диагностические и технологические мини-системы для специальных условий эксплуатации

ровать объемные структуры внутри полупроводника, но и изменять его физико-химические и электрофизические свойства, а также наносить тонкие покрытия с использованием синхротронного излучения, гальванического осаждения и прецизионного литья. Это дало возможность производить датчики и микромеханизмы самой различной формы и назначения.

Основные направления разработок современных изделий МСТ перечислены в табл. 1 [1].

С учетом специфики нашего журнала за пределами этого обзора оказываются такие интересные разновидности МСТ, как биотехнические и аналитические микросистемы для биомедицинского анализа, во многих из которых выполнение запрограммированных операций и функций осуществляется на клеточном или молекулярном уровне, и так называемые биологические или капиллярные микрочипы, которые не являются интегральными схемами в привычном понимании [4].

### Тенденции рынка МСТ/МЭМС

По данным органа Европейской Комиссии NEXUS в 1996—2002 гг. рынок изделий микросистемной техники увеличивался в среднем на 18 % в год и в 2002 г. составил 38 млрд долл. При этом рынок новейших разработок в области микросистем, включая системы микроподачи жидкости и газа, аналитические ДНК-чипы, оптические микропереключатели и сетевые затворы, микродвигатели и реле, достиг по разным данным от 4,2 до 5 млрд долл. [3].

### Основные разработчики и производители МСТ/МЭМС за рубежом и в России

Решающим толчком для развития МСТ стали программа "Микроэлектромеханические системы", разработанная Управлением перспективных исследований Министерства обороны США (DARPA) и японский проект "Микромашинные технологии" стоимостью 250 млн. долл. В Японии только на изучение фундаментальных закономерностей микромира в области механики, гидродинамики, теплопередачи, а также на разработку новых материалов, в том числе с управляемыми свойствами, и исследование элементной базы микроустройств (включая технологии их изготовления) было затрачено порядка 100 млн. долл. [6]. Японский проект осуществлялся в рамках многоцелевой программы "Программа передовой науки и технологии для промышленности" Министерства внешней торговли и промышленности (MITI). Проект финансировался через государственную корпорацию "Организация развития новых видов энергетики и промышленности" (NEDO). Головная организация — Центр микромашин (ММС) в Токио. Другие ведущие организации МЭМС/МСТ — лаборатория инженерной механики в Цукубе (Япония), Институт робототехнических систем и Федеральный институт технологий в Лозанне (Швейцария).

Благодаря высокой концентрации интеллектуальных, промышленных и финансовых ресурсов формирование центров развития МСТ/МЭМС в зарубежных странах пошло по пути образования кластеров, наиболее известными аналогами которых явились Кремниевая долина (США), технопарк в Цукубе (Япония) и Зеленоград (Россия). Первый микросистемный кластер появился в 1989 г. в компаниях *Steag Microparts* (Дортмунд, Германия), разрабатывавшей небулайзеры для больных астмой, и *H. L. Planar*, производившей датчики наклона для автомобилей [7]. При поддержке Министерства труда и технологии земли Северный Рейн-Вестфалия этим направлением в дортмундском кластере на самом высоком технологическом уровне занимаются теперь 13 компаний, в которых работает более тысячи человек.

В Гренобле (Франция) при поддержке государственных, региональных и городских правительственных органов была реализована программа "Микро- и наносистемная инициатива". За 20 лет в программу было инвестировано 186 млн. долл., в результате чего появился кластер MINATEC, состоящий из известной компании *CEA/LETI* и еще более 20 компаний, таких как *STMicroelectronics* (полупроводники), *SOI Tech* (кремниевые "вафли"), *Tronics* (МСТ-датчики давления), *MEMsCAP* (программное обеспечение, фотонные и радиочас-

тотные МЭМС), *PHMEMS* (фотонные и радиочастотные МЭМС).

В 1998 г. в штате Огайо (США), при поддержке НАСА и правительства штата была начата микросистемная инициатива Гленнана, главной целью которой была разработка технологий на основе карбида кремния и соответствующих датчиков для НАСА и коммерческого рынка. Было инвестировано 20 млн долл. и разработано многопользовательское производство (*MUSIC*). Эта инициатива стала "катализатором" развития компаний *Orbital* (высокотемпературные датчики давления), *MOVAZ* (компоненты оптических МЭМС), *Fiberlead* (оптические МЭМС), *Makel* (химические датчики).

В 1997 г. был основан Вашингтонский технологический центр (штат Вашингтон на северо-западе США), ныне объединяющий 17 компаний и 39 исследовательских групп. Большую роль в разработке и производстве новых МЭМС/МСТ играют университет штата Вашингтон, Восточный, Западный и Центральный вашингтонский университеты, компании *Micronics* (фотоника), *Nu Element*, *Neah Power*.

Один из крупнейших МСТ-кластеров в США находится в штате Мичиган в районе г. Анн-Арбор, где фундаментальная и прикладная наука представлена университетами Мичиган (штат Мичиган), Уэйна и Мичиганским технологическим университетом, среди которых, в основном, распределяются гранты "коридорной" программы штата по наукам о жизни. В фокусе этой программы как раз и находятся МЭМС. Коммерческие компании, выросшие в этой технологии на лицензиях Мичиганского университета — *ISSYS*, *Handylab* (биоМЭМС), *Sensicore* (биоМЭМС), *Tessera* (радиочастотные МЭМС).

Другие известные МСТ/МЭМС кластеры находятся в Южной Флориде, Техасе, четырех "угловых" штатах (Нью-Мексико, Аризона, Колорадо, Невада), Олбани и штате Нью-Йорк, Джорджии, Невшателе (Швейцария), Гетеборге (Швеция), Энхеде (Нидерланды), Лювене (Бельгия).

В России исследования в области МСТ/МЭМС выполняются в лабораториях институтов РАН (Институт проблем механики, Институт ядерной физики, Институт молекулярной биологии, Физико-технический институт, Институт кристаллографии), в лабораториях и научных центрах университетов (МГТУ им. Н. Э. Баумана, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (Центр микротехнологии и диагностики), Таганрогский университет радиоинженеров, МГУ им. М. В. Ломоносова, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Московский

авиационно-технологический институт), а также в Центральном научно-исследовательском институте "Электроприбор" (г. Санкт-Петербург), в Исследовательском центре суперкомпьютеров и нейрокомпьютеров (г. Таганрог), в НПК "Технологический центр" при МИЭТ (г. Зеленоград), в МНТК "Робот", АО "ТОСС", в Раменском конструкторском приборостроительном бюро (г. Раменское), в ГНЦ "Государственный оптический институт" (г. Санкт-Петербург), в ЦИАМ (г. Москва) и в других организациях [5, 8, 9].

### МСТ/МЭМС в автомобилестроении

Решающими факторами, обусловившими приоритетное развитие МСТ-технологий в мире и обеспечившими их массовое производство, стали потребности современной авиационной и автомобильной промышленности. Рассмотрим на последнем примере более подробно, какие типы датчиков и МЭМС оказываются наиболее востребованными и какие прежние электромеханические и дискретные решения они заменяют.

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) и микросистемные технологии (МСТ) впервые появились в устройствах управления параметрами автомобильных двигателей в виде датчиков абсолютного давления во впускном коллекторе в 1979 г. С начала 1990-х годов первый кремниевый акселерометр применялся в датчике подушки безопасности. Еще 5—7 лет назад в автомобилях массового производства применялись только эти два типа МЭМС/МСТ-датчиков.

Однако постоянный рост требований к надежности, экономичности и экологичности двигателей, повышению комфорта автомобилей, а также удешевление микроконтроллеров, элементов памяти и дисплеев подтолкнули автопром США к замене обычных технологий для датчиков на МЭМС/МСТ-технологии [10].

Динамика производства и рынка автомобилей и автомобильных датчиков за последние пять лет отражена в табл. 2. Средний годовой прирост количества автомобилей — 6,3 %, рынка датчиков для них — 6,5 %, а объема их производства — 7 %. В этой же таблице показана динамика мирового рынка МЭМС/МСТ (20,1 % прироста в год), в том числе и для автомобилей (16,9 % прироста в год).

Растет производство следующих типов датчиков:

- акселерометров для динамического управления автомобилем и подушек безопасности;
- датчиков давления для трансмиссии, тормозов, подачи дизельного топлива, охлаждения, шин, паров бензина;
- датчиков скорости поворота для динамического управления автомобилем и поддержки GPS (системы спутниковой навигации);

Таблица 2

Динамика производства и рынка автомобилей и автомобильных датчиков

Параметр	1997 г.	2000 г.	2002 г.	2005 г.
Мировое производство легковых автомобилей, микроавтобусов и легких грузовиков, млн шт.	46,5	47,5	52,0	54,0
Рынок автомобильной электроники, млрд долл.	18,9	22,7	25,7	30,9
Стоимость электроники в одном автомобиле, долл.	406	477	494	572
Мировое производство автомобильных датчиков, млн шт.	738	904	1108	1268
Мировой рынок автомобильных датчиков, млрд долл.	5,18	6,17	6,86	8,45
Мировой рынок автомобильных МЭМС/МСТ, млрд долл.	0,5	1,75	—	2,27
Мировой рынок МЭМС/МСТ, млрд долл.	—	14,11	—	36,22

- датчиков положения колеса, коленчатого вала (*crankshaft*), заднего хода (*camshaft*), педалей;
- датчиков влажности для управления комфортом кабины;
- датчиков солнечного освещения и дождя или влаги;
- дистанционных датчиков для обнаружения препятствий и предотвращения столкновений.

Специфика деталей автомобильного оборудования должна учитывать экстремальные температуры, удары, вибрацию, высокую влажность, наличие веществ, вызывающих коррозию, и другие неблагоприятные факторы. Кроме того, каждый компонент автомобиля должен производиться в чрезвычайно большом количестве, не менее 1 млн. шт. в год. Это нужно не только с точки зрения конструкции, но и для того, чтобы окупить инвестиции на конструирование и производство. Срок службы должен быть не менее 10 лет при пробеге не менее 250 тыс. км. При этом детали должны быть очень дешевыми. Таким образом, автомобильные компоненты, в том числе и МЭМС/МСТ, должны одновременно обладать надежностью военных изделий и дешевизной потребительской продукции.

Суммарная цена датчика или микродвигателя включает в себя стоимость самой МЭМС/МСТ, сигнальной электроники, например, схем температурной компенсации, фильтрации или усиления, корпуса, интерфейсов и кабелей, проверочных устройств. В результате стоимость самой МЭМС составляет не более трети стоимости поставляемого прибора.

МЭМС/МСТ хорошо подходят для множества автомобильных применений. Их производство одностадийно, поэтому объем выпуска деталей с высокой однородностью может быть большим при низких затратах на единицу продукции. МЭМС/МСТ фактически не имеют изнашивающихся частей, поэтому они чрезвычайно надежны. Кремний уже показал себя в течение последних 25 лет как один из основных материалов для датчиков в военной, гражданской и автомобильной технике. Благодаря совместимости с микропроцессорами кремний обеспечивает высокий уровень монолитной вертикальной функциональной интеграции с использованием известных полупроводников и классической микромашиной обработки.

В табл. 3 показано, какие МЭМС/МСТ датчики постепенно заменяют обычные электромеханические

Таблица 3

Применение МЭМС/МСТ в автомобилях

Применение датчика	Предыдущее техническое решение	МЭМС/МСТ-решение	Изготовитель МЭМС/МСТ	Состояние производства
Подушка безопасности Акселерометр	Шариковые и трубчатые подшипники ( <i>Breed, TRW Teknar</i> )	Микромашина	<i>Analog Devices, Motorola, Sensor-Nor, Nippondenso</i>	50 %
Скорость колеса	Смазка	Эффект Холла Анизотропное магнитное сопротивление Гигантское магнитное сопротивление	—	Ранняя стадия
Поток воздуха	Дискретный "горячий провод" (дискретный анемометр) ( <i>Hitachi</i> )	Микромашина	<i>Bosch</i>	
Давление	Керамический конденсатор Дискретное переключение давления Смазка		<i>Keller</i> (Швейцария), <i>Measurement Specialties, SSI Technologies, Fasco, Integrated Sensor Solutions (ISS)/Texas Instruments</i>	Конечная стадия
Давление хладагента	Керамический конденсатор	Измеритель механического напряжения	—	Ранняя стадия

Применение МЭМС/МСТ для автомобильных систем безопасности

Применение датчика	Состояние производства в мире	Возможность применения МЭМС/МСТ	Производители соответствующих МЭМС/МСТ за рубежом	Особенности конструкции	Цена, долл.
<i>Антиблокирующие тормозные/Динамические/Суспензионные</i>					
Положение руля	Производство	Средняя	<i>Bosch, Matsushita, Lucas, Temic, Siemens, C.S. Draper Lab, General Motors, Analog Devices, Systron Donner, BEI Electronics</i>	—	~25
Вращение колеса					
Давление	Ограниченное производство	Высокая			
Линейное ускорение					
Угловое ускорение	НД	НД	Поверхностная микромашина ( <i>Bosch</i> ), регулируемая "вилка" ( <i>Matsushita, Systron Donner</i> )		
Клапан	В будущем	Низкая	НД	—	НД
Скорость	Ограниченное производство	Высокая			
Смещение		Низкая	<i>Analog Devices, Breed, Motorola</i>	Суспензионные системы Активные или полуактивные системы датчиков смещения и ускорения ± 2g в поглотителях удара	Полностью активные системы 2,5...4 тыс.
		Подшипники	Высокая	НД	
<i>Раскрытие подушки безопасности</i>					
Ускорение	Производство	Высокая	США: <i>Analog Devices, Ford/Visteon, CM/Delco, Motorola</i> Европа: <i>Sensoror</i> (Норвегия) Япония: <i>Nippondenso</i>	Кремниевые акселерометры для диапазона 50 g и выше. Многочиповое решение для датчиков и управления сигналом. <i>Analog Devices</i> — полностью интегрированный монолитный прибор	НД
Давление в бензобаке	В будущем	Средняя	НД	—	
Давление (боковое воздействие)	Ограниченное производство				
<i>Занятость сиденья/Положение пассажира</i>					
Наличие/Сила	Ограниченное производство	Средняя	НД	—	НД
Смещение					
<i>Натяжение ремня безопасности</i>					
Ускорение	Ограниченное производство	Высокая	НД	—	НД
<i>Предотвращение столкновения с объектом</i>					
Наличие/Смещение	Ограниченное производство	Средняя	НД	—	НД
<i>Навигация</i>					
Скорость вала/гироскоп	Ограниченное производство	Высокая	НД	GPS и электронная карта	1,5 тыс. — сейчас, 900 — в недалеком будущем, 500 — в долгосрочной перспективе
Вращение колеса		Средняя			
<i>Дорожная обстановка</i>					
Оптические	В будущем	Высокая	НД	—	НД
Примечание: НД — нет данных.					

ские автомобильные датчики и каков современный уровень производства различных МЭМС/МСТ для автомобилей.

Автомобиль является сложной системой, состоящей из ряда подсистем. Перспективы применения МЭМС/МСТ в различных подсистемах и их производства рассмотрены в работе [10]. Обобщенные данные анализа сведены в табл. 4—7, в которых также указаны производители автомобильных МЭМС/МСТ-датчиков, их цена и особенности конструкции, обеспечивающие преимущество перед обычными электромеханическими и дискретными техническими датчиками.

В системах безопасности (табл. 4) наиболее широкое применение имеют кремниевые акселерометры для раскрытия подушки безопасности. Были также разработаны различные суспензионные МЭМС для обеспечения оптимальных параметров вождения автомобиля на крутых поворотах, неровных дорогах, при резком торможении и ускорении. Полностью активные системы оказались дороги, тяжелыми и расходующими много энергии. Поэтому разработчики МЭМС создали ряд полупассивных систем с датчиками смещения в поглотителях удара и линейными акселерометрами. Они вполне смогут заменить традиционные акселерометры для диапазона ускорений  $\pm 2g$ . Кремниевые датчики давления уже используются в течение последних восьми лет в тормозной системе "Мерседес" класса С. Для динамического контроля автомобилей "Мерседес", "БМВ", "Кадиллак" применяются сравнительно недорогие датчики угловой скорости, угла поворота руля, скорости колеса, акселерометры. После ожидаемого снижения цен на системы навигации автомобиля, содержащие функцию глобального спутникового позиционирования (GPS) и электронные карты, хорошие перспективы применения имеют датчики вращения колеса, МЭМС-гироскопы и магнитные компасы.

В подсистеме комфорта, удобства и надежности (табл. 5) наибольшие возможности использования имеют датчики давления в компрессоре кондиционера, которые смогут заменить керамические емкостные датчики компании *Texas Instruments*. Однако и она переориентируется на рынок МЭМС, образовав стратегическое партнерство с *Measurement Specialties* и *Integrated Sensor Solutions (ISS)*.

Самый большой сегмент рынка датчиков в автомобилестроении, в том числе и МЭМС, принадлежит подсистеме электронного управления двигателем (табл. 6). Фирмы *Delco*, *Motorola* и *Bosch* миллионами производят кремниевые датчики абсолютного давления во впускном коллекторе, которые используются вместо традиционных приборов, контролирующих расход воздуха. Кроме того, исследуется возможность замены громоздких и доро-

Таблица 5

**Применение МЭМС/МСТ для автомобильных систем комфорта и охраны. Стратегическое партнерство *Measuring Specialties & Texas Instruments, Keller* (Швейцария), *Fasco, ISS/Texas Instruments***

Применение датчика	Состояние производства в мире	Возможность применения МЭМС/МСТ
<i>Управление сиденьем</i>		
Наличие пассажира	Ограниченное производство	Низкая
Клапаны	В будущем	Средняя
Смещение		Низкая
<i>Климат</i>		
Поток воздуха	В будущем	Низкая
Температура	Производство	
Влажность	Ограниченное производство	
Качество воздуха	В будущем	Высокая
<i>Контроль компрессора</i>		
Давление	Производство	Высокая
Температура		Низкая
<i>Охрана/безопасность</i>		
Приближение	Ограниченное производство	Низкая
Движение		Средняя
Вибрация		Низкая
Смещение		
Опознание владельца		Высокая
Наклон		

гих анемометров *Hitachi* на тонкопленочные устройства *Bosch*. Перспективными также являются датчики барометрического давления для получения информации о высоте и соответствующей компенсации изменения состава смеси топлива/воздух.

Для измерения давления в цилиндрах хорошо подходят термостойкие пьезоэлектрические и волоконно-оптические датчики *Optran*, но пока высокая цена препятствует более широкому их распространению. МЭМС для рециркуляции выхлопных газов уже стоят в машинах фирм "Форд" и "Крайслер". В них также установлены кремниевые пьезоэлектрические датчики вместо керамических емкостных датчиков давления. Изолированные от гидравлической жидкости МЭМС, например диафрагмы, могут найти широкое применение в трансмиссии. Около 5—8 лет назад компания "Форд" произвела свыше трех миллионов микромашиных кремниевых впрыскивателей топлива,

Применение МЭМС/МСТ для автомобильных систем двигателя и управления

Часть системы двигателя	Применение датчика	Состояние производства в мире	Возможность применения МЭМС/МСТ	Производители соответствующих МЭМС/МСТ за рубежом	Особенности конструкции
<i>Цифровое управление двигателем</i>					
Топливо*	Уровень	Производство	Низкая	НД	—
Цилиндр	Давление	В будущем		Высокая	<i>Optran</i>
Впускной коллектор		Производство	Средняя	НД	—
Барометрическая	Вибрация				
Детонация		Поток	Ограниченное производство	Средняя	НД
Воздуходув	Производство		Низкая		
Выбросы	Анализ газов	Производство	Средняя	НД	—
Коленчатый вал	Положение	Большое производство	Средняя		
Задний ход		Ограниченное производство			
Клапан двигателя внутреннего сгорания		Ограниченное производство			
Повторная циркуляция выхлопного газа	Давление	Производство	Высокая	<i>Kavlico</i>	Керамические емкостные датчики
Накачка топлива		В будущем		НД	
Момент	Момент	Ограниченное производство	Средняя	<i>Fasco, Measurement Specialties, ISS/Texas Instruments, SSI Technologies</i>	Гибридный датчик с кремниевыми КМОП
Непрерывно изменяемая трансмиссия (передача)	Температура	В будущем	Низкая		
	Давление	Ограниченное производство	Высокая		
Впрыскивание топлива	Микроклапан	В будущем	Низкая	НД	—
	Давление	Ограниченное производство	Высокая		
Турбонаддув	Впрыскиватель			Давление	НД

\*Приблизительная стоимость системы 25 долл.

которые давали очень однородный и прямоугольный поток топлива. Однако сейчас их производство прекратилось, по-видимому, из соображений цены и надежности.

В подсистеме диагностики и мониторинга автомобиля (табл. 7) наиболее интересным считается применение МЭМС/МСТ для измерения давления в шинах в режиме реального времени. Эти системы были установлены в ряде концептуальных автомобилей на автошоу 2000 г., а к 2004 г. ими должны быть оснащены все легковые автомобили в США. Большие надежды возлагаются на использование МЭМС/МСТ для мониторинга масла в двигателе, для чего цена датчика должна быть снижена до 5—7 долл. Большие возможности совершенствования есть для датчиков паров топлива в баке.

### Примеры МЭМС/МСТ датчиков в России

Одной из основных отечественных организаций, работающей в названном направлении, является Научно-производственный комплекс "Технологический центр" (НПК ТЦ) при Московском институте электронной техники (МИЭТ) в Зеленограде, имеющий для производства микросхем и микро-сенсоров участки общей площадью 2200 м<sup>2</sup>, включая чистые помещения класса "100" площадью 1000 м<sup>2</sup> [11]. По технологии объемной микрообработки изготавливаются кристаллы микросенсоров давления с плоской мембраной (интегральные преобразователи давления) ИПД-1 и ИПД-2 на номинальные давления от 0,1 до 30 МПа, ИПД-4 с жестким центром для диапазонов давления 10...100 кПа, а также оригинальная конструкция кристалла

Применение МЭМС/МСТ для автомобильных систем диагностики и мониторинга

Часть системы	Вид датчика	Состояние производства в мире	Возможность применения МЭМС/МСТ	Производители соответствующих МЭМС/МСТ за рубежом
Система охлаждения	Температура	Производство	Низкая	НД
	Уровень	Ограниченное производство	Низкая	
Шины	Давление			Высокая
Масло в двигателе*	Давление	Производство	Высокая	НД
	Уровень		Низкая	
	Состав	Ограниченное производство	Средняя	
Система тормозов	Давление		Высокая	
	Уровень	В будущем	Низкая	
Приводная жидкость	Давление	Ограниченное производство	Высокая	
	Уровень	В будущем	Низкая	
Топливная система	Давление	Ограниченное производство	Высокая	
	Уровень	В будущем	Низкая	
	Давление паров	Ограниченное производство	Высокая	
Скорость автомобиля	Скорость	Производство	Средняя	

\*Приблизительная стоимость 5...7 долл.

ИПД-3 с тремя жесткими центрами и расположенными между ними параллельно друг другу резисторами мостовой схемы. Кристаллы поставляются различным организациям (ОАО "АВТОЭЛЕКТРОНИКА", г. Калуга, НПП "Персей", г. Раменское, Московская обл. и др.).

Среди других датчиков давления, в том числе и прецизионных общепромышленного применения с классом точности 0,2 % в диапазоне температур -50...70 °С, следует отметить разработки ТЖИУ406Д (ВНИИ автоматики Минатома, г. Москва) и ПМ-100, ПМ-500 (ЗАО МЕДИКОН-М, г. Москва).

Следующим примером реализации в НПК ТЦ возможностей объемной микрообработки кремния является разработка двух типов балочных тензопреобразователей (ТКБ-5 и ТКБ-6) для изготовления датчиков силы в электронных бытовых безменах. Более сложный датчик, рассчитанный на номинальное усилие 100...150 Н, обеспечивает независимость показаний от точки приложения силы. Он устанавливается в портативных торговых весах, разработанных Сосненским приборостроительным заводом (Калужская обл.). Эта же конструкция применена для разработки лабораторных весов

с динамическим диапазоном 10 тыс. (0,1...1200 г, 0,05...560 г и 0,02...240 г). Впервые в мире на полупроводниковых датчиках получены значения нелинейности и гистерезиса менее 0,03 % при выходном сигнале 40 мВ [11].

Балочный тензопреобразователь ТКБ-5 использован для создания серии акселерометров АВИ, разработанных совместно со специалистами ЛИИ им. Громова (г. Жуковский, Московская обл.) [12]. Данные акселерометры благодаря малым размерам и прочному титановому корпусу оказались весьма удобны при измерении вибраций в летных испытаниях.

Ряд инерциальных датчиков для авиационных систем навигации и ориентации разработан в РПКБ [13]. Основой конструкции ряда компенсационных акселерометров, выпускающихся в модификациях А-12, А-15, А-16 и А-17, является маятник диаметром 18 мм, выполненный из монокристаллического кремния, подвешенный на двух упругих перемычках, которые позволяют ему поворачиваться вокруг оси, лежащей в плоскости маятника. Маятник и перемычки изготовлены методами химического травления из одной пластины монокристаллического кремния толщиной 0,38 мм. Перемычки

имеют размеры  $1,3 \times 0,12 \times 8 \cdot 10^{-4}$  мм. На маятнике установлена обмотка датчика момента и напылены электроды для датчика угла. Для подвода питания к катушкам датчика момента используются гибкие токоподводы. Кроме того, для увеличения инерции на маятнике установлена дополнительная масса. Датчик угла — емкостного типа, и состоит из двух конденсаторов. В качестве одной общей обкладки используется маятник, а в качестве двух других — специальные электроды, напыленные на корпусе прибора. Зазор между маятником и электродами составляет 0,021 мм. По технологичности и порогу чувствительности, который составляет  $10^{-11}$  м, емкостной датчик угла идеально подходит для изделий кремниевой микромеханики.

Акселерометры устанавливаются в карданные и бескарданные инерциальные системы разработки ОАО РПКБ. При существенном упрощении конструкции с датчиком, состоящим из двух маятников, каждый из которых подвешен на трех упругих перемычках, был разработан акселерометр разомкнутого типа с частотным выходом [14], который используется в блоке датчиков ускорения системы катапультирования летчика.

## Заключение

В обзоре затронута лишь малая часть современных достижений и проблем МСТ. На примере автомобилестроения показано, как МСТ/МЭМС постепенно вытесняют датчики старого типа, делая автомобиль более удобным и безопасным. При этом в России большее распространение получили датчики для авиации. В одном из следующих номеров ЭК будет показано, как МЭМС практически полностью заняли рынок проекционных устройств.

В России пока мало востребованы, но за рубежом очень актуальными считаются исследования по интеллектуальной микроробототехнике и автоматизации, мобильным микросистемам и микромашинам, в том числе для использования в медицине, биотехнологии, космосе, машиностроении, энергетике [8] (в этой же публикации указаны перспективы таких направлений МЭМС, как распределенное управление коллективами микророботов, управление на основе нечеткой логики и нейросетей в микромире, управление упругоподатливыми микросистемами, декомпозиционное управление на основе интеграции датчиков, траекторное и оптимальное управление мобильными машинами, управление с элементами искусственного интел-

лекта, автоматическое принятие решений на основе нечеткой логики, способы взаимодействия человека с микросистемами и интерфейсы). Для реализации названных задач микро- и наносистемной техники должны вводиться государственные программы, позволяющие сконцентрировать усилия исследовательских и промышленных организаций.

## Список литературы

1. **Климов Д. М., Васильев А. А., Лучинин В. В., Мальцев П. П.** Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. 1999. № 1.
2. **Шалобаев Е. В.** Микросистемная техника и мехатроника: особенности соотношения микро- и макроуровней // Микросистемная техника. 2000. № 4.
3. **Рубцов И. В., Нестеров В. Е., Рубцов В. И.** Современная зарубежная военная микро- и мини-робототехника // Микросистемная техника. 2000. № 3.
4. **Зимина Т. М., Лучинин В. В., Крапивина Е. В., Регин А. С.** Микросистемная техника и проблемы биомедицинского анализа // Микросистемная техника. 2000. № 2.
5. **Мальцев П.** Микросистемная техника: новые возможности микроэлектроники // Живая электроника России. 2003. С. 44—50.
6. **Бочаров Л. Ю., Мальцев П. П.** Состояние и перспективы развития микроэлектромеханических систем за рубежом // Микросистемная техника. 1999. № 1.
7. **Grace R. H., Ramsighani M.** Technology clusters and their role in the development of the microsystems industry. www.rgrace.com
8. **Лучинин В. В., Таиров Ю. М.** К вопросу об организации подготовки инженерных кадров по специальности "микросистемная техника" // Микросистемная техника. 2000. № 2.
9. **Корляков А. В., Лучинин В. В., Пузанков Д. В., Таиров Ю. М.** Научно-технические и образовательные приоритеты России // Петербургский журнал электроники. 2002. № 3. С. 3—15.
10. **Grace R. H.** Application opportunities of MEMS/MST in the automotive market. The Great Migration from electromechanical and discrete solutions // Proc. of 6th Annual Strategic and Technical Symposium Vehicle Displays and Microsensors'99, Ypsilanti, Michigan, September 22—23. 1999. P. 25—31.
11. **Шелепин Н. А.** Кремниевые микросенсоры и микросистемы: от бытовой техники до авиационных приборов // Микросистемная техника. 2000. № 1.
12. **Галушков А. И., Зимин В. Н., Чаплыгин Ю. А., Шелепин Н. А.** Кремниевые интегральные датчики физических величин на основе технологии микроэлектроники // Электронная промышленность. 1995. № 4—5. С. 95—101.
13. **Будкин В. Л., Паршин В. А., Прозоров С. В., Саломатин А. К., Соловьев В. М.** Инерциальные датчики для систем навигации и ориентации // Микросистемная техника. 2000. № 2.
14. **Баженов В. И., Мухин А. Н., Рязанов В. А., Соловьев В. М.** Акселерометр. Патент РФ 2083989. БИ 1997. № 19.
15. **Беляев В.** От электромеханических и дискретных решений к МЭМС/МСТ. МЭМС/МСТ в современной технике на примере автомобилестроения и авиации // Электронные компоненты. 2003. № 2. С. 27—34.

УДК 802.0(075.8)

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

## АНГЛО-РУССКИЙ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК ПО МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ

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

### Ф

**Fabrication** — производство. Имеется в виду производственное предприятие. Fab — так сокращенно называют отдельный завод или крупный цех по производству конкретного микроизделия или серии однотипных микроизделий. Здесь реализуется однотипная технология. Как правило, производственники, отвечая перед нанимателем за качество, производственный план и себестоимость продукции, не занимаются сами маркетингом и продажами. Для этого существуют специальные головные фирмы (подразделения) в концерне или в крупной корпорации.

**Fault models** — модели с неисправностью. Программные критерии для определения разных типов неисправностей в ходе электрических испытаний.

**Ferroelectric** — сегнетоэлектрик. Сегнетоэлектрики — это кристаллические диэлектрики. Пример: титанат бария  $\text{BaTiO}_3$  и др. Обладают самопроизвольной поляризацией в определенном интервале температур. Характеризуются высокой диэлектрической проницаемостью. Это связано с их доменной структурой. Все сегнетоэлектрики — сильные пьезоэлектрики и используются как пьезоэлектрические материалы.

**Film electrostatic actuator** — тонкопленочный электростатический актюатор. В качестве механизма активации использует электростатическую силу. Пленочный актюатор приводится в действие электростатической силой между статором и ползунком (перемещаемым микрообъектом). Эта конструкция позволяет применять актюатор без электрода на перемещаемом объекте, реализуется это посредством использования индуктивного заряда

на высокоомной пленке. Такой тип актюатора не нуждается в регулировании положения или угла между статором и перемещаемым объектом. Он характеризуется малым трением, поскольку сила левитации, получаемая при запуске микродвигателя, устраняет потребность в подшипниковом механизме. Наоборот, когда актюатор останавливается, то возникает сила притяжения и большая сила задержки, фиксации. Особенность данного актюатора в том, что он может быть изготовлен в форме тонкой и гибкой пленки. Поскольку сила генерируется от всей поверхности перемещаемого объекта, эта генерируемая сила и высокое выходное усилие могут быть получены простым увеличением площади пленки. Вдобавок, перемещение по трем степеням свободы может быть реализовано с использованием многочисленных пар электродов, расположенных в разных направлениях.

**Finite Element Analysis (FEA)** — анализ конечных элементов. Фактически это расчет методом конечных элементов (МКЭ). Это есть процедура моделирования для анализа многих физических свойств. Основная идея МКЭ состоит в том, что любая непрерывная величина (температура, давление, перемещение и др.) аппроксимируется дискретной моделью, построение которой выполняется на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей. Алгоритм построения дискретной модели изучаемой непрерывной величины заключается в следующем: 1) в рассматриваемой области фиксируют конечное число точек; эти точки в дальнейшем называют узлами; 2) полагают, что исследуемая непрерывная величина в каждом узле является переменной, подлежащей определению в процессе решения задачи; 3) область изменения непрерывной величины разбивают на элементы; эти элементы имеют между собой общие узлы и в совокупности аппроксимируют форму области в целом; 4) непрерывную величину аппроксимируют в пределах каждого элемента полиномом, коэффициенты которого рассчитывают на основании значений этой величины в узлах; 5) каждый элемент аппроксимируют своим полиномом, а коэффициенты полиномов подбирают таким образом, чтобы сохранялась непрерывность величины вдоль границ соседних элементов. Процедура моделирования FEA лежит в основе многих систем автоматизированного проектирования микросистем, например, этот метод заложен в основу ANSYS.

**Fixed-fixed beam** — фиксированная/фиксированная балка. Балка, с жесткой заделкой (с жестким креплением) с двух концов. Один из простей-

ших, базовых элементов МЭМС-устройств и конструкций микроактюаторов.

**Flagellar motor** — жгутиковый двигатель. Двигатель, который приводит в движение жгутики бактерии. Источником энергии движения жгутиков является разница электрохимического потенциала между концентрациями ионов водорода внутри и за пределами клетки. Двигатель вращения жгутика — это единственный орган, который совершает постоянное вращательное движение среди всех живых существ на Земле. Это самый маленький двигатель из всех известных. Основа жгутикового двигателя — это химический мотор, состоящий из волокна, крючка и основания. Считается, что вращающий момент является результатом потока ионов водорода внутрь клетки из-за ее пределов. Однако механизм преобразования потока ионов во вращательное движение остается пока невыясненным. См. также *Chemical bearing*.

**Flat pack** — плоский корпус. Так называется корпус, который имеет следующие особенности: он квадратный; выводы планарные (горизонтально расположенные); выводы корпуса имеют конструкцию в виде "крыльев чайки"; выводы располагаются по одну, или по две стороны изделия (корпуса), или сразу с четырех сторон; и, главное, это сверхтонкий корпус (по сравнению с принятыми на сегодня стандартами по высоте корпусов). Еще так называется технология сборки (упаковки) чипов микроизделий в такие корпуса. Это так называемая сборка микроизделий "с низким профилем", т. е. сборка чипов в сверхтонкие корпуса. Плоский корпус имеет пять следующих разновидностей: LQFP (*Low profile Quad Flat Pack*) — сверхтонкий квадратный плоский корпус; PQFP (*Plastic Quad Flat Pack*) — пластмассовый квадратный плоский корпус; CQFP (*Ceramic Quad Flat Pack*) — керамический квадратный плоский корпус; MQFP (*Metal Quad Flat Pack*) — металлический квадратный плоский корпус; VQFN (*Very thin Quad Flat Pack Non-leaded*) — сверхтонкий квадратный плоский корпус "без внешних выводов".

**Flexible microactuator** — гибкий микроактюатор. Может двигаться в любом направлении, служит для управления пневматическим или гидравлическим давлением в гибком теле. Гибкий, эластичный микроактюатор — это тип пневматического или гидравлического актюатора, который может изгибаться, растягиваться и закручиваться в любом направлении, управляя тем самым гидравлическим давлением в трех или более отсеках (камерах), встроенных в него. Имеет следующие характеристики: простая структура или легкость в миниатюризации; много степеней свободы, которые позволяют использовать микроактюатор в микророботах для получения перемещений; нет элементов сколь-

жения, поэтому движение плавное, нет частиц продуктов износа; компактность; высокая удельная мощность. Примеры использования: манипуляторы, руки роботов, перемещаемые микророботы для исследования труб.

**Flip chip** — перевернутый кристалл. Так называется один из известных методов второй стадии монтажа кристаллов в корпуса. На первой стадии монтажа кристалл обратной стороной механически прикрепляют к соответствующему основанию. На второй стадии контактные площадки со схемной стороны кристалла электрически соединяются с выводами корпуса. Метод перевернутого кристалла изобретен IBM (США). Суть технологии: чип присоединяется к пластмассовой или керамической подложке лицевой стороной вниз без использования периферического монтажа проволочных межсоединений. Сеть шариковых выводов на поверхности рабочей области кристалла соединена непосредственно с соответствующим набором контактных площадок на подложке. Соединение с металлизированными межсоединениями осуществляется за одну операцию. Основными преимуществами технологии сборки методом перевернутого кристалла являются возможность матричного расположения контактных площадок (по сравнению с контактными площадками, расположенными по краю кристалла) и очень малая протяженность межкомпонентных соединений, что приводит к минимуму их индуктивности. Основные недостатки технологии: худшие тепловые характеристики (по сравнению с кристаллом, присоединенным обычным способом) и трудность герметизации матрицы контактных площадок.

**Flow quantity** — потоковая величина, параметр потока. Различают потоки: жидкости, газа, излучения. Поток излучения (лучистый поток, мощность излучения) — полная энергия, переносимая светом в единицу времени через данную поверхность. Понятие потока излучения применимо к интервалам времени, значительно превышающим периоды световых колебаний.

**Flow sensor** — датчик потока (расхода). Датчик для измерения скорости потока жидкости или газа либо его расхода. Для измерения скорости потока или расхода газа разработан термоанемометр. Принцип действия термоанемометра основан на зависимости между скоростью потока и теплоотдачей проволочки, помещенной в поток и нагретой электрическим током. Для измерения потока жидкости используются различные дифференциальные водомеры. Принцип действия последних основан на измерении падения давления в микроотверстии.

**Fluorosilicate Glass (FSG)** — фторсиликатное стекло. Стекло ( $\text{SiO}_2$ ), в котором фтор добавлен для

уменьшения диэлектрической постоянной этого материала. Фторсиликатное стекло используется в технологии многослойной металлизации.

**Focused Ion Beam (FIB)** — фокусированный пучок ионов. Точно сфокусированный пучок ионов используется для формирования микроизображений и травления покрытий. Наиболее часто применяется для анализа дефектов и повреждений микроструктуры.

**Focused ion beam machining** — обработка сфокусированным ионным лучом. Технология использует ускоренные и остро сфокусированные пучки ионов для удаления микроскопических частиц материала с поверхности подложки, микроизделия или с поверхности отдельных частей этого микроизделия. Использование сфокусированных ионных лучей диаметром до 0,1 мкм делает возможным получение микроскопических отверстий с высокой точностью. Технология позволяет заострять (точить) зонды всевозможных типов, изготавливать и усовершенствовать асферические поверхностные линзы. Путем измерения изменений в интенсивности вторичных ионов или вторичных электронов, испускаемых веществом, можно точно контролировать ширину обработки. Недостатки технологии: достаточно медленная скорость процесса; относительно сложное оборудование, необходимое для получения требуемого высокого вакуума.

**Foundry** — полупроводниковое производство. Часто так называют самостоятельное полупроводниковое производственное предприятие. Оно обладает определенным набором технологического оборудования для изготовления СБИС и МЭМС-устройств, а также для их последующего непродолжительного мелкосерийного производства. Такое предприятие обычно обладает набором стандартных технологических процессов и, как правило, специализируется на индивидуальных заказах, т. е. на заказных разработках.

**Fourier number** — число Фурье. Число Фурье

$$F = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{t}{L^2}$$

указывает на соотношение между накопленной энергией и проведенной тепловой энергией. Проблемы переходного процесса при переносе теплоты подобны, если их число Фурье одинаково. Число Фурье определяет степень проникновения и распространения теплоты в случае переходного процесса при переносе теплоты через коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , удельную теплоемкость  $c$  и плотность  $\rho$ . Число Фурье обратно пропорционально квадрату длины  $L$  и прямо пропорционально времени. Для  $F < 1$  тело имеет однородную температуру и переходной эффект не имеет значения. Если размеры уменьшены до ко-

эффициента 10, то переходный процесс переноса теплоты ускоряется до коэффициента 100 для постоянного числа Фурье. В микросистемах тепловые актюаторы достаточно быстры для того, чтобы выполнить механическую функцию. Актюаторы макродиапазона слишком медленны из-за своей тепловой инерции. Этот эффект становится очевидным в случае теплового биметаллического актюатора. Если положить  $F = 1$ , то зависимость может служить для определения длины тела, ответственной за рассеяние теплоты,  $L^2 = \lambda t / (c\rho)$ , внутри которой температура может быть принята однородной.

**Frequency** — частота. Частота колебаний — это число колебаний в единицу времени (1 с), измеряется в герцах (Гц). Различают еще частоту появления случайного события — отношение числа появлений этого события в какой-либо серии испытаний к общему числу испытаний.

**Frequency domain** — частотная область. Широкое понятие. Так могут обозначаться: ограниченный спектр частот; полоса частот; область частот в спектре; диапазон частот. Пример: полоса пропускания — диапазон частот. Ширину полосы пропускания выражают в герцах, а неравномерность характеристики в пределах полосы пропускания — в децибелах или относительных единицах.

**Frequency response** — частотная характеристика. Широкое понятие. Способность устройства обрабатывать частоты, приложенные к нему. Частотная характеристика определяется как отношение диапазона выходного сигнала к входному сигналу. Выражает зависимость амплитуды, фазы, чувствительности или какого-либо параметра линейной динамической системы от частоты поступающего на ее вход гармонического колебания. Различают амплитудно-частотную характеристику, фазочастотную характеристику и т. д. Другой пример понятия: частотно-контрастная характеристика оптических систем, описывает способность таких систем передавать модуляцию яркости объекта (контраст).

**Friction** — трение. Различают: внешнее и внутреннее трение. Внешнее возникает в плоскости касания двух соприкасающихся и прижатых друг к другу тел при их перемещении. Внешнее трение — это трение скольжения и трение качения. Учет трения чрезвычайно важен при проектировании МЭМС. Известны работы японских ученых в изучении явления трения в МЭМС в целях его минимизации. Вредное влияние трения уменьшают смазкой или использованием "скользящих" слоев. Внутреннее трение — это свойство твердых тел необратимо поглощать механическую энергию, полученную телом при его деформации. Внутреннее трение газов и жидкостей (вязкость) — свойство,

характеризующее сопротивление этих веществ действию внешних сил, вызывающих их течение.

**Froude number** — число Фруда. Число Фруда

$$F = \frac{v^2}{gL}$$

имеет важное значение для всех динами-

ческих перемещений в гравитационном поле. Оно характеризует отношение инерционных сил к силам гравитации (весу) в зависимости от скорости  $v$ , ускорения силы тяжести  $g$  и длины  $L$ . При больших значениях числа Фруда эффектом силы тяжести тела пренебрегают, в то время как при малых значениях числа Фруда можно пренебрегать силами инерции. Так как число Фруда обратно пропорционально длине, эффект гравитации уменьшается при уменьшении размеров тела. Действительно, маленькие животные и микроорганизмы используют более высокую частоту шага, чем люди или большие животные.

**Fullerene** — фуллерен. Фуллерены — это химически стабильные замкнутые поверхностные структуры углерода. Атомы углерода расположены в вершинах правильных шестиугольников или пятиугольников, регулярным образом покрывающих поверхность сферы или сфероида (в бубликах, например, может быть 12 пятиугольников и несколько шестиугольников). Своим названием эти соединения обязаны инженеру и дизайнеру Р. Бакминстеру Фуллеру (США), чьи геодезические конструкции построены по этому принципу. Впервые фуллерены были синтезированы в 1985 г. Х. Крото (Великобритания) и Р. Смолли (США), а в 1992 г. их обнаружили в породах докембрийского периода. Фуллерены в значительном количестве содержатся в саже, легко образуются в дуговом разряде на угольных электродах. Наиболее полно изученный представитель семейства фуллеренов — фуллерен-60 ( $C_{60}$ ). Фуллерен-60, в котором 60 атомов углерода, соединенных одинарными и двойными связями, образуют многогранник из 20 шестиугольников и 12 пятиугольников. Молекулы высших фуллеренов  $C_{70}$ ,  $C_{74}$ ,  $C_{76}$ ,  $C_{84}$ ,  $C_{164}$ ,  $C_{192}$ ,  $C_{216}$  также имеют форму замкнутой поверхности. Фуллерены с  $n < 60$  оказались неустойчивыми, хотя из чисто топологических соображений наименьшим возможным фуллереном является правильный додекаэдр  $C_{20}$ . Фуллерены обладают необычными химическими и физическими свойствами, а также магнитными и сверхпроводящими свойствами. См. также *Buckminsterfullerene*.

**Fusion bonding** — прямое соединение (прикрепление) материалов методом сплавления. Так называется прямая, "упрощенная" технология соединения вместе двух кремниевых чипов (сенсор и актюатор) в ходе производства МЭМС-устройств. "Упрощение" заключается в следующем. Сначала

структуры двух чипов изготавливаются независимо друг от друга, каждый на отдельной пластине. Фактически предлагается запутанные каналы и емкости (полости) травить отдельно на каждой пластине (чипе). Затем эти чипы соединяют вместе в единое микроустройство (что-то схожее с микросборкой). Технологию соединения двух чипов можно пояснить следующим образом. При таком соединении отполированные поверхности двух кремниевых подложек приводятся в непосредственный контакт между собой. Затем пара подложек (чипов) подвергается отжигу при высокой температуре. Используются три температурных диапазона отжига: до 450 °С для металлизированных подложек; до 800 °С для подложек с легированными слоями (например для  $p+$  барьерных слоев); выше 1000 °С для соединения кремниевых подложек. В ходе процесса отжига при такой температуре в течение двух часов соединение, сформированное между подложками, может быть таким же сильным, как монолитный (объемный) кремний. Подробнее процесс можно описать так. Сначала подложки очищаются в сильном окислительном растворе. Стандартный процесс включает обработку в органическом растворителе, защиту планарной стороны чипов, погружение в плавиковую кислоту и ионную очистку. Эта процедура в результате дает гидрофильную поверхность подложки (поверхность с высокой плотностью гидроксильных групп). После очистки подложки промывают в деионизированной воде и сушат. Затем подложки сдавливаются (сжимаются) полированными поверхностями. Этого легко достигнуть, если подложки удерживаются и сжимаются с обратной стороны вакуумным держателем (зондом). При контакте подложки будут слипаться (как бы склеиваться) вследствие водородной связи гидроксильных групп и Ван-дер-Ваальсовских сил на поверхности подложек. Соединенные пары подложек затем подвергаются отжигу в инертной среде, такой как азот. Тепловой (термический) оксид можно выращивать в ходе такого же процесса, но проводя отжиг в кислороде или влажном кислороде. Водород освобождается с поверхности гидроксильных групп и диффундирует наружу между подложками; соединения Si—Si или Si—O формируются вдоль контактирующих поверхностей (границ). Прямое соединение полупроводниковых материалов методом сплавления очень прочное. В дальнейшем соединение двух чипов (монтаж в корпус) проводится методом термоультразвуковой сварки (реже термокомпрессионной сваркой). Такое соединение проявляет малую зависимость либо полную независимость разрушения от времени.

## АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

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

**Жидкокристаллические полимерные сетки: связь хиральной структуры с электромеханическими свойствами**

Номер проекта: 99-03-33411  
Год представления отчета: 2001

В 2000 г. работа по проекту проводилась по нескольким основным направлениям:

- синтез жидкокристаллических (ЖК) сеток на основе хиральных двойных и тройных сополимеров различного строения и состава с использованием химического сшивателя в целях получения полидоменных структур;
- исследование структуры и фазового состояния химически сшитых жидкокристаллических сеток на основе хиральных двойных и тройных сополимеров;
- исследование механических свойств полидоменных сеток различного строения и состава;
- синтез новых водородно-связанных полимерных сеток и исследование их структуры, а также отклика на действие механического поля.

*Основные результаты:*

- Осуществлен синтез акриловых сополимеров, содержащих в своем составе нематогенные и смектогенные цианобифенильные звенья с различной длиной алифатической развязки, звенья гидроксипропилакрилата, обеспечивающие реакцию сшивания с гексаметилендиизоцианатом, а также хиральные звенья на основе производных холестерина и оптически активных эфиров бифенилкарбонной кислоты. Показано, что структура ЖК мезофазы линейного тройного сополимера не изменяется в условиях химического сшивания.
- Разработаны, изготовлены и отлажены установка для получения оптических характеристик полидоменных ЖК образцов и прибор для измерения механических характеристик и времен релаксации образцов эластомеров в области рабочих температур от комнатных до 250 °С. Использование высокочувствительного датчика с предельной нагрузкой в 25 г позволяет использовать установку для исследования небольших механических напряжений, характерных для деформационных процессов

в областях так называемой мягкой моды. Данные с установки через модуль аналого-цифрового преобразователя подаются на персональный компьютер.

- Исследованы деформационные кривые полидоменных ЖК эластомеров, характеризующихся нематическим, холестерическим и смектическим типом мезофазы. Обнаружено существенное сходство механических свойств нематических и холестерических эластомеров, если последние получены на основе холестеринсодержащих полимеров. Раскрутка холестерической спирали в полидоменных холестериках происходит при ничтожно малых значениях деформации и напряжения, и образец в целом ведет себя подобно нематическому полидоменному эластомеру.

- Отмечены существенно более низкие значения модулей деформации смектических сеток по сравнению с нематическими и холестерическими. Наблюдаемые различия нашли объяснение в рамках представлений о слоевом строении смектической мезофазы. Ориентация ЖК смектических слоев вдоль направления деформирования означает, что скольжение слоев вносит основной вклад в процесс деформирования полидоменных смектических эластомеров.

- Показано, что деформирование полидоменных сеток, в которых ЖК порядок формируется в результате водородного связывания соответствующих элементов химической структуры, сопровождается формированием высокоориентированных образцов, в которых смектические слои располагаются в плоскости пленки, а мезогенные группы лежат под углом к плоскости слоя с регулярным чередованием угла наклона от слоя к слою. Предложен механизм деформирования эластомеров с водородно-связанной ЖК структурой, который контролируется разрывом и восстановлением водородных связей, одновременно отвечающих за формирование ЖК структуры и стабилизацию пространственной сетки даже в присутствии химически сшитых структур.

*Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН*

## Ученые будут слышать шум болезни в теле пациента

С помощью крошечного устройства, работающего подобно игле проигрывателя грампластинок, американские ученые теперь могут слышать звуки, издаваемые белками внутри клеток дрожжей (рис. 1, см. третью сторону обложки). Уже создан опытный образец инструмента, который позволяет медикам обнаруживать болезни, такие как рак, слушая звуки в телах пациентов.

Об этой работе химиков UCLA мы немного рассказывали в апреле 2004 г., теперь же ученые говорят, что заметно продвинулись.

"Мы уже делаем это с сердцем, — рассказывает профессор биохимии университета Калифорнии (UCLA) Джеймс Джимзевски. — А если мы сможем то же самое сделать с печенью, почками, селезенкой? Услышим ли мы, что там творится? Идея сама по себе очаровательная".

Исследователи слушают звуки в клетках, используя атомный силовой микроскоп, но Джимзевски говорит, что в данном случае это — неправильное название прибора: "Это не микроскоп, в котором вы через линзы смотрите на что-то. Я вижу, в некотором смысле, изменения парадигмы. От взгляда на вещи мы идем к тому, чтобы чувствовать их".

Устройство имеет очень острый наконечник, который присоединен к пружине, как игла на проигрывателе. Джимзевски и его коллеги обнаружили, что, если прикоснуться иглой к клетке дрожжей, мембрана клетки колеблется на слышимой частоте. Когда они пропустили эти вибрации через компьютер, то смогли услышать звуки.

Ученые считают, что звуки издают крошечные "белковые моторы", т. е. белки, которые могут перемещать питательные вещества и другие материалы внутри клетки, вибрируя при этом.

В ходе одного из экспериментов исследователи поместили на клетку дрожжей каплю водки — и клетка "закричала". В другом опыте клетку лишили всех питательных веществ. Ответом был "звук смерти" — шипение, похожее на шум телевизора, потерявшего сигнал.

В настоящее время исследователи разрабатывают устройство, способное работать с человеческими клетками, которые, как говорит Джимзевски, "больше похожи на воздушные шары" — они слишком мягкие для имеющейся иглы. Поэтому в новом приборе используется лазер.

**Membrana.ru:** Ученые будут слышать шум болезни в теле пациента (<http://www.membrana.ru/lenta/?5642>)

## Искусственный коллаген — от хирургии до нанодатчиков

Коллаген является наиболее важным структурным белком организма (рис. 2, см. третью сторону обложки), он укрепляет соединительные ткани, кости и зубы, формирует длинные фиброзные тяжи, являющиеся основой сухожилий. Он также образует тонкие слои ткани, поддерживающие структуру кожи и всех внутренних органов. Практически все ткани организма в той или иной мере зависят от коллагена.

В медицине животный, главным образом коровий, коллаген используется для восстановления тканей при ожогах и обширных ранах. Он также применяется пластическими хирургами для операций по увеличению губ или щек. Кетгут — рассасывающийся шовный материал — изготавливают из коллагена, полученного из кишечника коров и лошадей.

Попытки синтезировать искусственный коллаген многократно предпринимались в течение последних 30 лет. Проблема заключалась в том, что до сих пор ученым не удалось объединить синтезируемые фрагменты коллагена в длинные фиброзные молекулы.

Однако совсем недавно группе исследователей из Висконсинского университета удалось разработать метод создания точной копии человеческого коллагена в лабораторных условиях. Они научились модифицировать концы синтезируемых коллагеновых фрагментов так, что они приобрели способность к самосборке в длинные волокна. Этот метод позволяет создавать волокна даже более длинные, чем существующие в природе.

Синтетический коллаген более пригоден для использования в медицине, так как он, в отличие от материала природного происхождения, не вызывает иммунного ответа и не является потенциальным переносчиком патогенов.

Нанотехнологи могут использовать синтетический коллаген в качестве своего рода нанопроволоки, так как его волокна тоньше даже знаменитых карбоновых нанотрубок, используемых в нанотехнологии.

Покрытые серебром или золотом, коллагеновые волокна могут использоваться в качестве имплантируемых электрических датчиков, которые могут, например, мгновенно информировать диабетиков о резком снижении уровня сахара в крови.

И это только малая часть возможных областей применения искусственных волокон коллагена.

**Интернет-журнал "Коммерческая биотехнология":** (<http://www.cbio.ru/>)

## Зеркальные кремниевые наномембраны

Ученые из университета Висконсин-Мэдисон, США, получили ультратонкие кремниевые мембраны, которые оказались отличными проводниками электричества.

Вообще-то ультратонкие пленки кремния — плохие проводники вследствие того, что на их поверхности при контакте с воздухом образуется слой оксида кремния. Но Полу Эвансу и его коллегам удалось создать кремниевую мембрану толщиной всего 10 нм, которая хорошо проводит электричество.

Теперь ее структуру легко исследовать с помощью сканирующего туннельного микроскопа — ведь его принцип действия основан на измерении туннельного тока, проходящего между зондом и поверхностью, следовательно, поверхность должна быть электропроводной.

Кремниевая наномембрана при ее исследовании под сканирующим туннельным микроскопом находилась на диэлектрической подложке из оксида кремния. Полученная структура называется silicon-on-insulator (SOI) и широко используется в микроэлектронике.

Обработка первоначальной пленки германием позволила удалить слой оксида кремния, образовавшегося при ее изготовлении. Затем ученые очистили ее поверхность от примесей настолько, что она стала миниатюрным зеркалом (рис. 3, см. третью сторону обложки). Именно абсолютно ровная поверхность наномембраны позволяет проводить электричество — так заявляют исследователи.

Также команда уверена в том, что наномембрана будет широко использоваться в высокоскоростной электронике и нанoeлектронных сенсорах нового поколения.

Результаты исследования ученые опубликовали в журнале Nature.

**Nanotechweb.org:** Nanolayers of silicon conduct well is clean (<http://www.nanotechweb.org/articles/news/5/1/22/1>)

## Клеточный ДНК-чип сортирует клетки

Новая технология, разработанная учеными из США, позволит присоединять биологические объекты (клетки, белки и макромолекулы) к небологическим, что существенно ускорит их анализ в биочипах.

Эта группа ученых из Американской национальной лаборатории Беркли и Университета Калифорнии продемонстрировала первый в мире прибор, являющийся "клеточным" аналогом известных ДНК-чипов, применяющихся в генетических исследованиях. Эта технология позволит значительно улучшить исследования нейросетей, тканей и культур

клеток, не говоря о том, что ДНК-чипы — основа любых будущих экспресс-анализаторов.

"С тех пор, как ДНК-чипы произвели революцию в анализировании генома человека, мы надеялись, что в недалеком будущем появится возможность создать клеточные чипы (самособирающиеся матрицы клеток на небольшом чипе), которые используют эффект адгезии клеток к молекулам ДНК, — говорит Рави Чандра, один из исследователей из Беркли. — Клеточные чипы могут находить патогены, анализировать лекарства, выступать в роли биосенсоров". (Чандра — автор статьи, появившейся в последнем выпуске международного журнала *Angewandte Chemie*. Статья называется "Программируемая адгезия клеток, управляемая ДНК-гибридизацией".)

Напомним, что ДНК-чипы представляют собой результат скрещивания "микросхемных" технологий (в частности, фотолитографии и нанолитографии) с приемами биохимического исследования (рис. 4, см. третью сторону обложки).

Теперь ученые решили, что аналогичный чип можно создать и для целых живых клеток. Правда, для этого им пришлось решить задачу присоединения клеток к небологическим поверхностям.

Как пишут авторы работы в статье, большинство клеток сами по себе "липкие" (т. е. на их поверхности присутствуют адгезивные белки) и охотно присоединяются к едва ли не любой поверхности. Но не все клетки таковы, некоторые совершенно не липнут ни к чему. Это зависит от биохимической структуры клеточных мембран, которые содержат различные белки, липиды и другие органические соединения.

Кроме адгезии, ученым еще нужно было добиться, чтобы на определенные участки чипа налипали (из раствора) клетки лишь строго определенного типа. Эта задача уже попроще — многие типы так называемых белковых маркеров уже хорошо известны ученым. Для раковых клеток, например, известен особенный белок, находящийся на их поверхности, который может быть использован как для идентификации, так и для соединения больной клетки с другими биологическими объектами.

Задачу селективной адгезии (избирательного прилипания) в Беркли решили с помощью нового эффекта, связанного с особенностями цепочек ДНК.

Исследуемый препарат обрабатывали с помощью ряда реактивов так, что к поверхности нужных клеток присоединялись одиночные спирали ДНК (со строго определенной последовательностью букв-оснований). После обработки каждая клетка была покрыта 270 тыс. молекул ДНК. Такое присоединение было осуществлено впервые. Таким образом, на поверхности клеток создавались уникальные застежки-липучки. Комплементарные час-

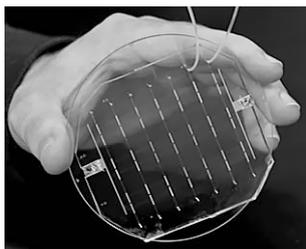


Рис. 5. Так выглядит сам чип

ти ДНК (также одиночные спирали), подходящие к первым "как ключи к замкам", исследователи разместили на поверхности золотой пластины, которую встроили в микрожидкостный чип (рис. 5). Так ученые впервые создали сложное гибридное наноустройство, позволяющее селективно выбирать клетки определенного типа в растворе. Как уже говорилось выше, это новое слово в биочипах вообще.

"Адгезия клеток оказалась достаточно сильной, этот эффект можно будет использовать и в других практических приложениях разработанной нами теории клеточной ДНК-гибридизации. Процесс адгезии полностью завершился всего за 35 мин. И в течение следующих 25 часов клетки все еще были жизнеспособны. Быстрое налипание позволит очень долго использовать клеточный чип," — говорит Чандра.

Пропуская через чип раствор, авторы убедились, что только нужные им клетки задерживались на пластине, а остальные уносились потоком. Определить тип клеток теперь можно было простым просмотром чипа — по появившемуся рисунку. Ведь клетки занимали свои позиции, соответствующие основаниям ДНК, находящихся на поверхности клеток. Так клеточный чип может отделять один тип клеток от другого быстро, надежно, а главное — не требуя сложных систем визуализации результатов, например, флуоресцентной маркировки.

"К примеру, мы сможем на основе клеточного чипа создать матрицу неадгезивных клеток, получив так называемую мини-иммунную систему, которая будет полезна в медицинской практике," — сказал Чандра.

Следующим шагом в исследованиях будет развитие технологии для быстрого и массового производства таких чипов. Они могут служить биодатчиками опасных или загрязняющих среду веществ, или, скажем, пригодятся фармацевтическим компаниями при испытании новых препаратов.

**Berkeley:** Berkeley Researchers Lay Groundwork for Cell Version of DNA Chip (<http://www.lbl.gov/Science-Articles/Archive/PBD-DNA-chip.html>)

## Нанотрубки помогут определить химический состав живой клетки

Уникальный сенсор для определения следовых концентраций различных веществ в живой клетке разработали в Университете штата Иллинойс в Урбане-Шампейне.

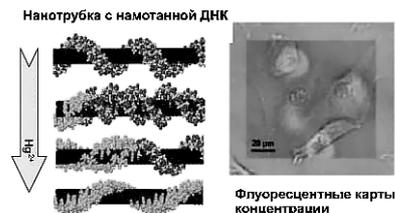


Рис. 6. Нанодетектор: ДНК на нанотрубке

Исследователи намотали двойную спираль ДНК на однослойную углеродную нанотрубку, подобно тому, как наматывается на карандаш телефонный провод (рис. 6). Углеродная нанотрубка заставляет ДНК принять одну из двух возможных форм, которую специалисты называют формой *B*. Однако под воздействием ряда веществ, в частности, кальция, натрия и ртути ДНК переходит в другую форму, обозначаемую *Z*. При этом меняется частота, на которой молекула ДНК флуоресцирует под воздействием инфракрасного света.

Исследователи уже показали, что этим методом можно определить присутствие в живой клетке даже очень незначительного количества ртути. Это поможет в будущем проводить детальную диагностику отдельных клеток на выявление токсичных веществ и энзимов.

**University of Illinois at Urbana-Champaign:** DNA-wrapped carbon nanotubes serve as sensors in living cells (<http://www.news.uiuc.edu/news/06/0126nanotubes.html>)

## Подслушивающий АСМ-зонд позволит подсмотреть тайны наномира

Ученые из университета Джорджии, США, сконструировали высокочувствительный атомно-силовой микроскоп, способный получать изображение сканируемого предмета в 100 раз быстрее, чем это могут сделать современные модели. Это неоценимый вклад в развитие нанотехнологических инструментов, так как теперь с помощью новой технологии можно будет получить изображения биомолекул в реальном времени. Кроме наблюдения взаимодействия между молекулами, процессы, происходящие в НЭМС- и МЭМС-системах, можно будет сразу записывать в виде видеороликов.

Столь существенный прорыв в области АСМ-микроскопии вызван появлением нового типа зондов для атомно-силовых микроскопов. Зонд "FIRAT" (Force sensing Integrated Readout and Active Tip — чувствительный к силе активный зонд) (рис. 7) гораздо "быстрее" современных зондов-кантилверов, используемых в АСМ при исследованиях в области материаловедения, молекулярной биологии и физики твердого тела. Также новый тип микроскопии будет полезен фармакологам при изучении свойств новых лекарств.

Как говорит глава исследователей доктор Левент Дегертекин: "Новый подход в визуализации с помощью активного кантилевера может полностью вытеснить современную АСМ-микроскопию. В целом, мы получили микроскоп, который вдесятеро лучше стандартного атомно-силового, а его быстродействие увеличилось почти стократно".

Кроме визуализации нанообъектов и микро-структур (рис. 8, см. третью сторону обложки) зонд FIRAT может быть использован при изготовлении наносистем: НЭМС и микроэлектроники.

С помощью зонда устраняются два главных недостатка АСМ: то, что этот тип микроскопии не позволяет записывать видео, и то, что с его помощью нельзя получить информацию о физической структуре исследуемой материи.

Революционным подходом в создании зонда оказалось изобретение, совместившее принцип действия микрофона и трости для слепых. Сверхтонкая мембрана, расположенная на конце зонда, колеблется еще до того, как вступит в непосредственный контакт с поверхностью из-за действия на нее сил притяжения. Как только зонд прикасается к поверхности, мембрана реагирует на то, насколько жестко ведет себя материал по отношению к ней. Поэтому, кроме исследования топологии образца, зонд может доставить информацию о его жесткости. "С помощью одного только сканирования мы можем сразу узнать топологию, жесткость, эластичность и адгезию образца", — говорит Дегертекин.

Исследователи из Джорджии заявили, что они могут адаптировать экспериментальный вариант FIRATa для использования в коммерческих современных АСМ. С его помощью можно получить сканы с частотой до 60 Гц. По их прогнозам, первый коммерческий вариант зонда может появиться уже в этом году, а более сложные устройства на его основе появятся через несколько лет.

Работа ученых поддержана Национальным институтом здоровья и Национальным научным обществом США.

**GaTech:** New Device Revolutionizes Nano Imaging (<http://www.gatech.edu/news-room/release.php?id=858>)

## 45 нанометров — новый рекорд плотности микросхем от Intel

Корпорация Intel изготовила первый в мире чип статической оперативной памяти (SRAM) с 1 млрд транзисторов и первый — по техпроцессу 0,045 мкм, т. е. с расстоянием между элементами схемы 45 нм.

"Это означает, что мы можем упаковать в 2 раза больше транзисторов на одной схеме, которая будет требовать меньше энергии", — объяснил ведущий инженер корпорации Марк Бор. По его сло-



Рис. 7. Зонд FIRAT

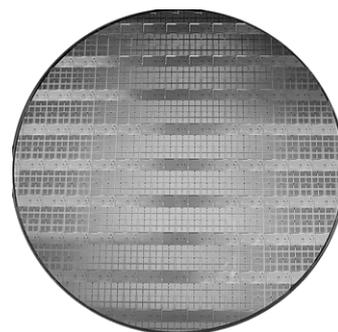


Рис. 9. 300-миллиметровая пластина, из которой инженеры нарежут новые SRAM-чипы (фото Intel)

вам, новый чип в лишний раз подтверждает закон, сформулированный соучредителем Intel Гордоном Муром, который гласит, что число транзисторов на кристалле удваивается каждые 18 месяцев.

Серийно производить чипы по новой технологии, используя кремниевые пластины диаметром 300 мм (рис. 9), Intel намеревается во второй половине 2007 г. Эта матрица была создана в Орегонской лаборатории D1D. Также производить 45-нм чипы могут: фабрика Fab 32 в Аризоне и Fab 28 в Израиле.

Ранее мы уже упоминали о том, что Intel планирует выпуск 45-нм чипов. По плану, очередной барьер — 30 нм.

**Intel:** Intel First to Demonstrate Working 45 nm Chips (<http://www.intel.com/pressroom/archive/releases/20060125comp.htm>)

## Создан солнечный мотор из одной молекулы

Винсенто Бальзани из университета Болоньи и его коллеги из Испании и США построили самый маленький и самый быстрый наномотор, состоящий из одной молекулы.

Поперечник двигателя, состоящего из единственной, хотя и сложной молекулы, называемой ротаксан (об актуаторах на основе ротаксанов мы уже писали), составляет 6 нм. В ее составе есть кольцевая структура, способная смещаться вперед и назад на расстояние 1,3 нм. При этом данное кольцо можно уподобить поршню классического ДВС, так как наномотор работает в четыре цикла (рис. 10, см. третью сторону обложки).

Только в качестве топлива в этой молекуле выступает электрон, который, будучи иницилируемым солнечным светом, пробегает по цепочке атомов, заставляя смещаться кольцо ротаксана. Затем электрон перебрасывается с одного конца молекулы на другой, заставляя "поршень" вернуться к исходному положению. КПД двигателя составляет 12 %.

Цикл движений занимает примерно 100 мкс. Все перемещения кольца и электрона, выбиваемого светом, ученые уподобляют впрыску топлива и сгора-

нию, выхлопу, всасыванию и сжатию в двигателе внутреннего сгорания. Мотор изменяет свою конфигурацию под воздействием световой энергии.

Авторы работы отмечают, что их двигатель-молекула работает достаточно долго, пока есть свет. По крайней мере, опыты показали устойчивость ротаксана после 1000 циклов работы. Кроме того, этот двигатель совершенно автономен, может быть разогнан до частоты 1 кГц и не требует особых ус-

ловий (функционирует в жидких растворах при комнатной температуре).

Новый наномотор может использоваться для создания наномашин и "химических компьютеров", транспортировки лекарств внутри клеток и в других сходных областях применения.

**Nanotech-Now:** Chemists Design and Create Nano Motor Powered by Solar Energy ([http://www.nanotech-now.com/news.cgi?story\\_id=13424](http://www.nanotech-now.com/news.cgi?story_id=13424))

Составил Ю. Свидиненко

## ИНФОРМАЦИЯ

Десятая международная  
научно-техническая конференция  
и молодежная школа-семинар

### Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники ПЭМ-2006

пос. Дивноморское,  
Краснодарский край, Россия  
24—29 сентября 2006

#### Оргкомитет конференции

Калякин А. И.,	профессор, ТРТУ (председатель оргкомитета)
Червяков Г. Г.,	профессор, ТРТУ (заместитель председателя оргкомитета)
Агеев О. А.,	д. т. н., ТРТУ
Варзарев Ю. Н.,	доцент, ТРТУ
Ковалев А. В.,	доцент, ТРТУ
Королев А. Н.,	профессор, ТРТУ
Кравченко И. В.,	доцент, ТРТУ
Лысенко И. Е.,	доцент, ТРТУ
Малюков С. П.,	профессор, ТРТУ
Молчанова Л. Ф.,	ТРТУ (ученый секретарь)
Поляков В. В.,	доцент, ТРТУ (ученый секретарь)
Понарядов В. В.,	доцент, БГУ, Белоруссия
Роздобудько В. В.,	профессор, ТРТУ
Рыгалин Б. Н.,	д. т. н., МИЭТ
Светличный А. М.,	профессор, ТРТУ

#### Сопредседатели конференции

Валиев К. А.,	академик РАН, ФТИ РАН
Минкин В. И.,	академик РАН, НИИФ и ОХ РГУ, ЮНЦ РАН
Захаревич В. Г.,	профессор, ТРТУ

#### Организаторы и спонсоры

- Министерство образования и науки РФ;
- Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь;
- Российская академия наук;
- Южный научный центр РАН;
- Академия инженерных наук РФ;
- Таганрогский государственный радиотехнический университет (ТРТУ);
- Московский государственный институт электронной техники (технический университет);
- Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет);
- НИКТП "Белмикросистемы", г. Минск;
- Северо-Кавказское отделение АИН РФ;
- ЦМО, Германия;
- Геленджикский филиал ТРТУ.

#### Тематика секций

- материалы электронной техники;
- микро- и наносистемная техника;
- микросхемотехника;
- нанoeлектроника;
- оптоэлектроника;
- проектирование приборов и микросхем;
- системы на кристалле;
- твердотельная электроника СВЧ;
- технология микро- и нанoeлектроники.

#### Телефоны для справок

(8634) 311-584, (8634) 371-767

#### Адрес оргкомитета

347928, РОССИЯ, г. Таганрог, ГСП-17А, Некрасовский, 44,  
ТРТУ, деканат ФЭП  
E-mail: pem@fep.tsure.ru

#### Секретариат

Молчанова Людмила Федоровна  
Поляков Вадим Витальевич

Данное и последующие информационные сообщения доступны  
в INTERNET по адресу:  
<http://www.fep.tsure.ru> в разделе "КОНФЕРЕНЦИИ"

---

**ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА****НА ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ  
И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

---

# НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

**(С 1999 по 2004 г.  
журнал выходил под названием  
"Микросистемная техника")**

---

Журнал освещает широкий круг проблем развития, моделирования, проектирования, конструирования, изготовления и применения микро- и наносистемной техники (МНСТ): основы материаловедения и микросистемной технологии; микроэлектромеханические системы (МЭМС, МОЭМС, БиоМЭМС), микроактюаторы, сенсоры и биочипы, молекулярная и биоэлектроника, зондовая микроскопия, рентгеновская оптика, нанотехнологии, наноматериалы, нанофотоника, гетероструктуры и квантовые точки, микромашины, микро- и наносистемы, системы-на-кристалле.

Дальнейшее развитие МНСТ связано с переходом от технологических приемов микроэлектроники к нанотехнологии.

*Задачей журнала является освещение современного состояния, перспектив и тенденций развития микро- и наносистемной техники, рассмотрение вопросов разработки и внедрения микро- и наносистем в различные области науки, технологии и производства.*

---

**ОСНОВНЫЕ ТЕМАТИЧЕСКИЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА**

- Элементы микро- и наносистемной техники
  - Материаловедческие и технологические основы МНСТ
  - Конструирование и моделирование МНСТ
  - Нанотехнологии и зондовая микроскопия
  - Молекулярная электроника и биоэлектроника
  - Применение МНСТ
  - Системы-на-кристалле
  - Новости нанотехнологий
  - Страничка РФФИ
- 

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

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

*Главный редактор журнала — д-р техн. наук, профессор П. П. Мальцев*

Аннотации статей журнала на русском и английском языках доступны по сети Internet по адресу:  
<http://www.microsystems.ru>

*Журнал распространяется только по подписке.*

*Оформить подписку можно в отделениях связи (индекс по каталогу Роспечати 79493,  
по каталогу "Пресса России" 27849) или непосредственно в редакции.*

---

**АДРЕС РЕДАКЦИИ ДЛЯ АВТОРОВ И ПОДПИСЧИКОВ**

107076, г. Москва, Стромьинский пер., 4

Изд-во "Новые технологии", Редакция журнала "Нано- и микросистемная техника"

Телефоны: (495) 269-55-10; 269-53-97. Факс: (495) 269-55-10

E-mail: [nmst@zknet.ru](mailto:nmst@zknet.ru), [it@novtex.ru](mailto:it@novtex.ru)

<http://www.microsystems.ru> <http://novtex.ru>

---

# CONTENTS

## **Volkov G. M.** *Technological Problems of Transition from Micro- to Nanosystems of Consolidation Dispersoidal Particles of Substance 2*

On an example of carbon in allotropic graphite modification the opportunity of a theoretical estimation of the top limit nanodimensions range of dispersoidal particles of substance is shown. Under the molecular diagrams of the condensed molecules of homologous line an aromatic hydrocarbons have calculated specific easing of an index of free valency of peripheral and internal atoms of carbon. Considering graphite as a limiting degree of condensation of aromatic hydrocarbons have estimated a critical diameter its nanoparticles.

On an example of system carbon-carbon the opportunity of realization the monostage nanocomposites technology is shown. Nanoparticles of carbon and carbon matrix, connecting them, are formed in uniform technological process. Are submitted structure and basic properties the nanocomposite of system carbon — carbon.

## **Morozov S. V., Voronin O. G., Karyakina E. E., Karyakin A. A.** *Hydrogen Fuel Electrodes Based on Enzymes . . . . . 9*

Hydrogen enzyme electrocatalysts are considered as an alternative to platinum in fuel cells applications. Hydrogenase electrodes have demonstrated high activity in reaction of hydrogen electrooxidation. The stability of enzyme electrodes during 6 months and tolerance to carbon monoxide were also demonstrated.

## **Safronov A. Ja., Gornev E. S., Zaitsev N. A., Matjushkin I. V.** *The Conceptualization of the Design Flow for Micromechanical Systems with Piezoelements . . . . . 13*

Conceptual research of the design flow for micromechanical systems with piezoelements (*p*-M(O)EMS) with use of conceptual methods of school of S. P. Nikanorov and principles of the system analysis is carried out. Comparison with conventional design flow for VLSI is realized. Advanced sort-structural explication of the conceptual scheme can be generalized on a case of "systems-on-chip" designing.

## **Atuchin V. V., Kidyarov B. I., Pervukhina N. V.** *Systematics and Relationship between Physical Properties and Micro- and Macrostructure of Noncentrosymmetric Oxide Crystals. Part II. Nonlinear Optical Properties of Binary Oxide Crystals. . . 20*

The ellipses of acentricity have been established for 7 affinic groups of noncentrosymmetric binary oxide crystals, including the oxides with specific combination of acentric physical properties and two different chemical bond lengths L(E-O) and L(M-O). The extreme dependences of nonlinear optical susceptibility ( $\chi^{(2)}$ ) on L(E-O) have been found for the sets of polar and nonpolar oxides possessing measurable nonlinear optical properties. Three characteristic regions containing the crystals with different  $\chi^{(2)}$  level have been revealed into the

rosette of ellipses: crossing part of the ellipses; two symmetric parts of ellipses away the crossing part.

## **Laletin R. A., Burkhanov A. I., Sigov A. S., Vorotilov K. A.** *Influence of Low- and Infralow Frequency Electric Fields on Behaviour of Domain Structure of PZT Films under Different Magnitudes of Mechanical Stress in the Material . . . . . 26*

Results of a study of influence of mechanical stress magnitudes on dielectric properties of PZT ferroelectric thin film are presented. An external load (*G*) giving rise to a growing of residual stress ( $\sigma$ ) along one of the film axes was applied to the sample. It was determined that under low and moderate electric fields the stress growing promotes increase of dielectric permittivity ( $\epsilon'$ ) of the sample. The further increase of measuring field strength led to the inverse effect — decrease of  $\epsilon'$  with rising of *G*. A tendency to widening of a half width of polarization loops (the dielectric losses) under applying of the higher mechanical loads was observed.

The experimental data are explained in a frame of interaction of internal stresses with a domain structure of the film.

## **Stephenkov Ju. A., Petruchin V. S., Diachenko Ju. G.** *Experience in Self-Timed Microcontroller Core Design on Basic Gate-Array . . 29*

The article considers state and design problems of strictly self-timed (SST) electronic circuits. SST-circuits are "naturally reliable" as they guarantee preservation of capacity for work of the device in the wide range of environment conditions comparable to the physical restrictions for integrated circuits. The SST-circuitry to the full meets the requirements, showed to element base for critical areas of applications.

This article is devoted to development of effective means for designing and fabrication the SST-VLSI on home Gate Array (GA) 5503 basis. The preliminary results of the development (after simulation and topological design on native industrial CAD for basic gate-array "Kovcheg 2.6") of synchronous and SST-variants of test silicon "Microcore" are presented. This silicon implements functions of 8-bit microcontroller PIC18CXX (widely used in manufactured in Russia devices) computational core.

## **Beljaev V.** *MEMS/MST in Modern Technology as an Example of Motocarstructure and Aviation . . . . . 36*

The main criterions and the areas of use of microelectromechanical systems (MEMS) and microsystem technology (MST) product, the modern trends of market MEMS and MST are considered. The main foreign and Russia projectors and generators of products on the base of these technology are indicated. As an example of sensors for motocarstructure and aviation the process of exchange of traditional sensors on MST in USA and Russia is shown.

### For foreign subscribers:

*Journal of "NANO and MICROSYSTEMS TECHNIQUES" (Nano- i mikrosistemnaa tehnika, ISSN 1684-6419)  
Joint-stock company MK-Periodica. E-mail: info@periodicals.ru Tel.: +7(495) 684-5008. Fax: +7(495) 681-3798*

*The journal bought since november 1999.  
Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev  
ISSN 1813-8586.*

**Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(495) 269-5510.  
E-mail: nmst@zknet.ru; http://www.microsystems.ru**

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4/1. Телефон редакции журнала (495) 269-5510. E-mail: it@novtex.ru; nmst@zknet.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.  
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т. Н. Погорелова. Технический редактор И. С. Павлова. Корректор Е. В. Комиссарова

Сдано в набор 28.02.2006. Подписано в печать 12.04.2006. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,20. Заказ 626. Цена договорная

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