

# НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 6 (131) ✧ 2011

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России  
и в систему Российского индекса научного цитирования

Издается с 1999 г.

**Главный редактор**  
Мальцев П. П.

**Зам. гл. редактора**  
Лучинин В. В.

**Редакционный совет:**

Аристов В. В.  
Асеев А. Л.  
Волчихин В. И.  
Гапонов С. В.  
Захаревич В. Г.  
Каляев И. А.  
Квардаков В. В.  
Климов Д. М.  
Ковальчук М. В.  
Нарайкин О. С.  
Никитов С. А.  
Сауров А. Н.  
Серебряников С. В.  
Сигов А. С.  
Стриханов М. Н.  
Чаплыгин Ю. А.  
Шахнов В. А.  
Шевченко В. Я.

**Редакционная коллегия:**

Абрамов И. И.  
Андривский Р. А.  
Антонов Б. И.  
Арсентьева И. П.  
Астахов М. В.  
Быков В. А.  
Горнев Е. С.  
Градецкий В. Г.  
Гурович Б. А.  
Кальнов В. А.  
Карякин А. А.  
Колобов Ю. Р.  
Кузин А. Ю.  
Мокров Е. А.  
Норенков И. П.  
Панич А. Е.  
Панфилов Ю. В.  
Петросьянц К. О.  
Петрунин В. Ф.  
Путилов А. В.  
Пятышев Е. Н.  
Сухопаров А. И.  
Телец В. А.  
Тимошенко С. П.  
Тодуа П. А.  
Шубарев В. А.

**Отв. секретарь**

Лысенко А. В.

**Редакция:**

Григорин-Рябова Е. В.  
Чугунова А. В.

Учредитель:  
Издательство  
"Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

### КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ

**Шевцов С. Н., Акопьян В. А., Панич А. А., Паринов И. А., Самощенко И. Г.**  
Оптимизация системы пьезоактуаторного гашения вибраций композитной лопасти вертолета . . . . . 2

### МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

**Кульчицкий Н. А., Мельников А. А.** Современное состояние производства CdTe, ZnTe,  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  и приборов на их основе . . . . . 9

**Хромова Л. П., Коростелев В. Ф.** Формирование квазикристаллических структур в условиях наложения давления . . . . . 17

**Печерская Е. А., Метальников А. М., Бобошко А. В.** Структура интеллектуальной системы поддержки исследований параметров сегнетоэлектрических материалов . . . . . 21

**Козлов Г. В., Афашагова З. Х., Маламатов А. Х.** Эффективность процесса кристаллизации нанокompозитов полиэтилен/карбонат кальция . . . . . 25

### ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

**Аравин В. В., Вернер В. Д., Сауров А. Н., Мальцев П. П.** МЭМС высокого уровня — возможный путь развития МЭМС в России. . . . . 28

**Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е.** Повышение временной стабильности датчиков давлений на основе тонкопленочных нано- и микроэлектромеханических систем . . . . . 31

**Джашитов В. Э., Панкратов В. М.** Суперминиатюрный микромеханический датчик инерциальной информации в условиях переменных и постоянных механических воздействий . . . . . 39

### СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ

**Адамов Ю. Ф., Горшкова Н. М., Сибгатуллин А. Г., Сомов О. А.** Адаптивная коррекция параметров функциональных блоков в системах на кристалле . . . . 44

**НОВОСТИ МНСТ** . . . . . 51

**Contents** . . . . . 55

Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайтах журнала (<http://novtex.ru/nmst/>) и научной электронной библиотеки (<http://elibrary.ru>). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на сайте журнала: с 1999 г. по 2003 г. в разделе "ПОИСК СТАТЕЙ", а с 2004 г. — в разделе "АРХИВ".

### ПОДПИСКА:

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

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

УДК 534.134:534.17

**С. Н. Шевцов**, д-р техн. наук, зав. лаб.,  
Южный Научный центр РАН,  
e-mail: aeroengdstu@list.ru,

**В. А. Акопьян**, канд. техн. наук, вед. научн. сотр.,  
НИИ механики и прикладной математики  
им. И. И. Воровича ЮФУ,  
e-mail: akop@math.rsu.ru,

**А. А. Панич**, канд. техн. наук, зав. лаб.,  
НКТБ "Пьезоприбор" ЮФУ,  
e-mail: rett@rcu.ru,

**И. А. Паринов**, д-р техн. наук, зав. лаб.,  
НИИ механики и прикладной математики  
им. И. И. Воровича ЮФУ,  
e-mail: ppr@math.rsu.ru,

**И. Г. Самощенко**, начальник КБ ОАО  
"Роствертол",  
e-mail: sam\_ig@mail.ru

## ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ПЬЕЗОАКТУАТОРНОГО ГАШЕНИЯ ВИБРАЦИЙ КОМПОЗИТНОЙ ЛОПАСТИ ВЕРТОЛЕТА

Поступила в редакцию 09.03.11

*Выполнено сравнительное исследование эффективности подавления изгибных колебаний композитной балки, моделирующей лонжерон лопасти вертолета, с помощью одно- и двухслойных пьезоэлектрических пластин. Определены условия оптимального расположения и размеров пьезоактуаторных пластин на демпфируемой конструкции для подавления конкретной моды изгибных колебаний, а также условия эффективного подавления колебаний пьезопреобразователями, работающими в пассивном режиме.*

**Ключевые слова:** лопасть вертолета, подавление вибраций, пьезопреобразователь, устойчивость системы управления, моды колебаний

### Введение

В последние годы значительные усилия исследователей были направлены на разработку вертолетов нового поколения с адаптивным управлением лопастями [1—4]. Неотъемлемым элементом технологии активного контроля и управления динамикой лопастей является система сенсинга/ак-

тивации, осуществляемая группой пьезопреобразователей (ПП), установленных на управляемой гибкой композитной конструкции. Эти устройства предназначены для снижения уровня вибраций лопасти и всей конструкции вертолета.

Анализ ранних инженерных решений конструкций активной лопасти вертолета приведен в обзорах авторов настоящей статьи [5—7]. В частности, в ряде работ показано, что рациональный выбор числа и местоположения пьезоэлектрических актуаторов является важнейшим условием эффективного управления колебаниями конструкции. Аналогично этому для получения удовлетворительного отношения сигнал/шум системы адаптивного управления выбор расположения сенсоров должен обеспечить максимальный выходной сигнал на интересующих модах колебаний.

В более поздних работах (см., например [8]), где рассмотрены некоторые подходы к оптимизации схемы расположения актуаторов с учетом минимизации их общего числа, показано, что конечно-элементный анализ, используемый в комбинации с генетическими алгоритмами, представляет собой наиболее эффективный метод для определения оптимального расположения сенсоров и актуаторов.

Для активного подавления вибраций композитных конструкций чаще всего используют два типа пластинчатых ПП: однослойные преобразователи (униморфы) и двухслойные (биморфы). В некоторых работах [9, 10] представлено систематическое исследование пьезоэлектрических биморфов, наклеенных на поверхность композитной пластины и служащих для подавления изгибных деформаций, вызванных внешними нестационарными нагрузками. Однако до настоящего времени отсутствует обоснованное заключение о том, какой же из двух типов преобразователей более эффективен в адаптивных системах и в каких условиях.

При активном подавлении вибраций целью управления является уменьшение амплитуд вибрационных смещений точек конструкции. В работе [11] исследована эффективность использования нейросетевого контроллера в системе адаптивного управления, однако чаще всего используют следующие типы контроллеров:

- с пропорциональным управлением (П);

- с управлением с обратной связью по интегралу от разбаланса (И);
- с управлением по производной от разбаланса (Д);
- с комбинированным управлением (ПИД) [12, 13].

При компьютерной реализации ПИД-алгоритм управления в дискретном времени формулируется как функция управляющего сигнала, определяемая на предшествующем отрезке времени в зависимости от сигнала ошибки, его интеграла и производной по времени, а также периода сэмплирования системы аналого-цифрового преобразования. Качество управления определяется такими факторами, как устойчивость, малая статистическая ошибка управления и минимальный период стабилизации. Скорость сэмплирования ограничена производительностью цифрового оборудования, особенно аналого-цифрового (А/Д) и цифроаналогового (D/A) преобразования. В частности, верхняя граница частотной полосы системы должна превосходить как минимум в 30 раз подавляемые частоты вибраций. В работе [14] была также установлена необходимость использования цифровых или аналоговых фильтров нижних частот в цепи обратной связи для исключения самовозбуждения на высоких частотах. Это нежелательное явление наблюдалось экспериментально и авторами данной работы [6].

Силовые ПП управляются высокими электрическими потенциалами, передаваемыми от мощных усилителей (так называемых пьезодрайверов) через вращающуюся втулку винта, что весьма сложно обеспечить конструктивно. Сложность решения этой проблемы заставила некоторых авторов [15, 16] предложить концепцию пассивного пьезоэлектрического демпфирования, не требующего внешних источников энергии, сложной электроники и контактных устройств. Пассивное демпфирование (*passive shunt damping* — PSD), которое изучалось применительно к различным конструкциям (от сравнительно простых балочных до пространственных стержневых), в ряде случаев приводило к удовлетворительным результатам. Использование PSD-метода реализуется путем подключения пассивной электрической нагрузки к электродам мощного ПП, установленного на управляемой конструкции.

Все указанные выше работы рассматривают задачу гармонического анализа, т. е. определения амплитудно-частотной характеристики конструкции, оснащенной активными или пассивными ПП. Такой подход позволяет получить частотные характеристики в замкнутой форме, но он неэффективен для анализа переходных динамических процессов в конструкции, подверженной действию нестационарных аэродинамических нагрузок. Представленная работа исследует перечень перечисленных проблем, используя в комплексе аналитический метод, конечно-элементный подход и экспериментальные исследования на уменьшенной модели композитного лонжерона лопасти вертолета.

## Объект и содержание исследования

Используя в качестве объекта исследования модель лопасти вертолета в виде композитной трубы прямоугольного поперечного сечения, продемонстрируем методику рационального выбора и размещения пьезоэлектрических актуаторов для подавления вибраций, вызванных силами аэроупругого происхождения. В серии численных экспериментов, выполненных методом конечных элементов, мы сравниваем эффективность использования биморфных и униморфных пластинчатых актуаторов, работающих в режиме  $d_{31}$ , для подавления изгибных колебаний. Для ПП обоих типов выполняется сравнение статического смещения конца консольно закрепленной модели лонжерона.

При исследовании системы адаптивного управления мы ограничиваемся анализом устойчивости достаточно простого ПИД-контроллера, сосредоточив внимание на показателях эффективности системы, обусловленных динамикой конструкции.

В заключение рассматривается эффективность схемы подавления низкочастотных вибраций пассивными пьезоэлектрическими пластинами, нагруженными на активно-емкостный импеданс.

## Биморфный и униморфный актуаторы изгиба

Численные эксперименты, описанные ниже, выполняли на модельной композитной трубе прямоугольного сечения, заземленной на левом конце (рис. 1). Исследовали различные схемы расположения актуаторных пластин, две из которых показаны на рис. 2: одна для биморфных ПП, и вторая — для униморфных. Материальные константы

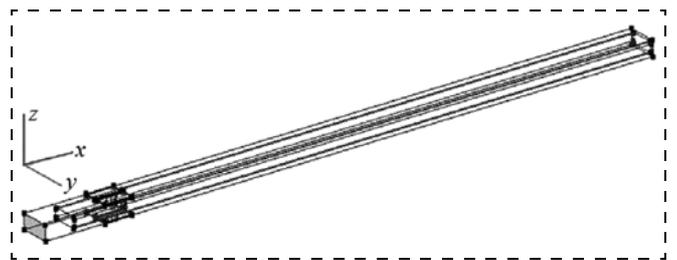


Рис. 1. Упрощенная конечно-элементная модель трубы прямоугольного сечения с установленными пьезопластинами

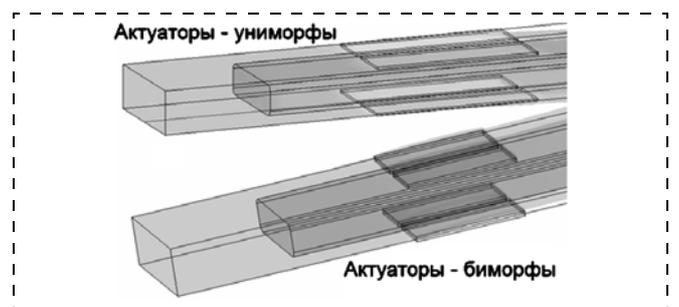
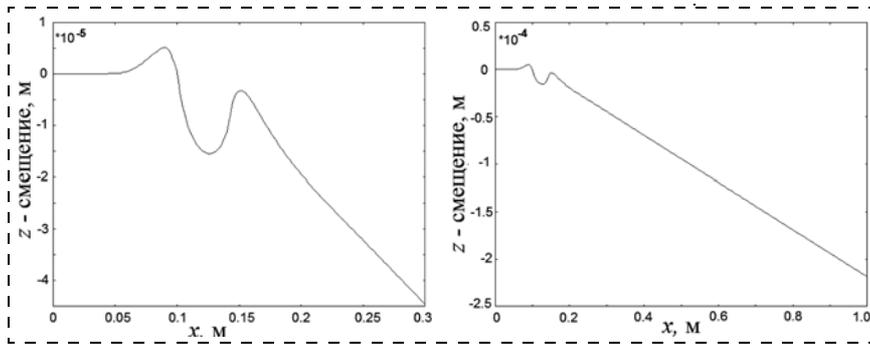
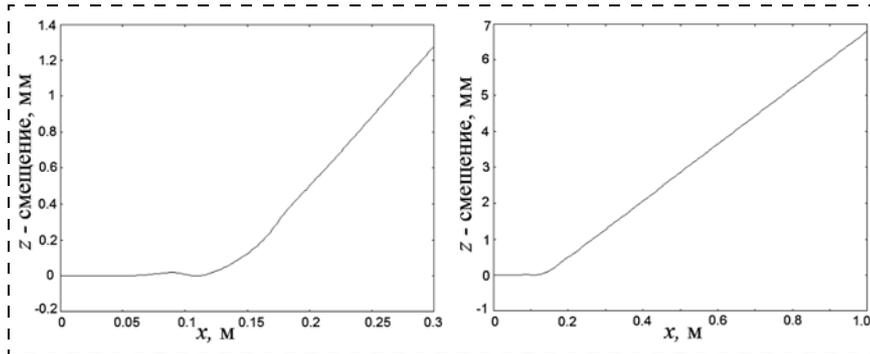


Рис. 2. Схема установки униморфных (вверху) и биморфных (внизу) актуаторов на поверхности трубы



**Рис. 3. Смещения точек стенки модели, возникающие от действия пьезоэлектрического биморфа:**

*a* — в зоне установки биморфа; *б* — по длине балки



**Рис. 4. Поле статических смещений стенок трубы, вызванное действием двух пар пьезоэлектрических униморфов:**

*a* — вблизи размещения актуатора; *б* — вдоль трубы

пьезопластин размерами  $1 \times 20 \times 45$  мм принимались соответствующими керамике PZT-5Н. Направление поляризации совпадало с нормалью к большей плоскости (с осью  $z$ ).

Численные эксперименты выполняли на основе полной системы уравнений электроупругости. Рис. 3 представляет поле смещений точек стенки трубы, вызванное действием пьезоэлектрического биморфа. Четыре двухслойные пластины устанавливали на противоположных стенках на расстоянии 100 мм от заземленного торца. Каждый из двух слоев биморфа создавал продольную силу около 800 Н, причем направление сил в слоях было противоположно, что приводило к локальному изгибу стенок пластины. На рис. 3 видно, что стенки трубы непосредственно под наклеенным биморфом имеют максимальные деформации изгиба, однако смещение конца трубы составляет всего 0,2 мм. Это смещение противоположно по знаку тому, которое должно быть при действии того же биморфа на однородную балку сплошного сечения. Этот нежелательный эффект ранее не отмечался при изучении адаптивных трубчатых конструкций [17].

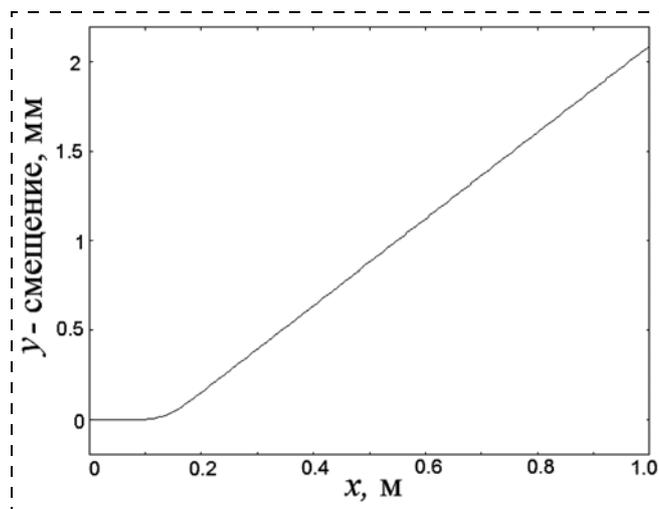
Конечно-элементное моделирование двух пар униморфных актуаторов при том же значении управляющего потенциала выявило совершенно отличную от рассмотренной картину распределения смещений — смещение свободного конца трубы составило более 7 мм (рис. 4). Этот результат убедительно доказывает более высокую эффектив-

ность применения униморфных актуаторов для создания и компенсации деформаций изгиба.

Приведенные результаты относятся к рассмотренной конструкции с присущими ей размерами и физико-механическими свойствами материалов. Однако очевидно, что изменения размеров элементов адаптивной системы могут изменить рассматриваемую ситуацию лишь количественно. Поэтому рассматриваемые ниже модели и конструкции используют только униморфные пьезопластины. В частности, схема, представленная на рис. 2, может использоваться для создания изгиба трубы в плоскости наибольшей жесткости при подаче потенциала противоположного знака на электроды ПП, установленные на одной стенке трубы. В качестве иллюстрации на рис. 5 представлено поле смещений точек на оси трубы при подаче на соответствующие пластины потенциалов той же величины, что и в предыдущих примерах. Смещение конца трубы весьма значительно и составляет 2 мм. Очевидно, асимметрия сечения трубы, которая наблюдается в реальных авиационных конструкциях, в том числе в исследуемом модельном лонжероне, может быть скомпенсирована некоторой подстройкой значений действующих потенциалов.

Подводя итог, можно утверждать, что использование пьезоактуаторов-униморфов для создания деформаций изгиба в конструкциях, имеющих трубчатую форму, предпочтительно. Более того, установка двух пар таких актуаторов на противо-

позитивных пластинах той же величины, что и в предыдущих примерах. Смещение конца трубы весьма значительно и составляет 2 мм. Очевидно, асимметрия сечения трубы, которая наблюдается в реальных авиационных конструкциях, в том числе в исследуемом модельном лонжероне, может быть скомпенсирована некоторой подстройкой значений действующих потенциалов.



**Рис. 5. Распределение смещений вдоль длины трубы при ее изгибе в плоскости наибольшей жесткости с помощью двух пар пьезоэлектрических униморфов**

положных стенках трубы позволяет реализовать деформации изгиба во взаимно перпендикулярных плоскостях. Однако в этом случае необходимо независимое управление четырьмя пьезопластинами по четырем отдельным каналам.

**Балка с активными пьезоактуаторами. Модальный и нестационарный анализ**

Целью представленного ниже этапа исследований было выявление наблюдаемости динамического состояния вибрирующей балки с помощью датчиков деформации, управляемости этим состоянием, а также устойчивости контура аналогового управления, существенно зависящей от динамических свойств вибрирующей конструкции. Схема модели, изображенная на рис. 6, содержит консольную балку с установленными на ней двумя ПП и двумя датчиками деформаций — тензомерами, сигнал которых обрабатывается аналоговой системой управления.

При конечно-элементном моделировании активного аналогового демпфирования электрические потенциалы  $V_1, V_2$  на управляемых актуаторах вычислялись из уравнения обратной связи:

$$V_i = k_s \epsilon_x + k_v \dot{\epsilon}_x; \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

где деформации  $\epsilon_x = 0,5(\epsilon_x^{(1)} + \epsilon_x^{(2)})$  и их скорости  $\dot{\epsilon}_x = 0,5(\dot{\epsilon}_x^{(1)} + \dot{\epsilon}_x^{(2)})$  определялись путем интегрирования в окрестности точек РТ<sub>1</sub>, РТ<sub>2</sub> на поверхности балки возле пьезопластин и арифметически усреднялись. Процесс активного демпфирования исследовали при вариации коэффициентов обратной связи  $k_s, k_v$ . Численными экспериментами установлена весьма слабая обусловленность процесса демпфирования величиной коэффициента  $k_s$ , что может быть объяснено относительно малыми размерами пьезопластин. Наоборот, увеличение коэффициента  $k_v$  существенно повышает конструк-

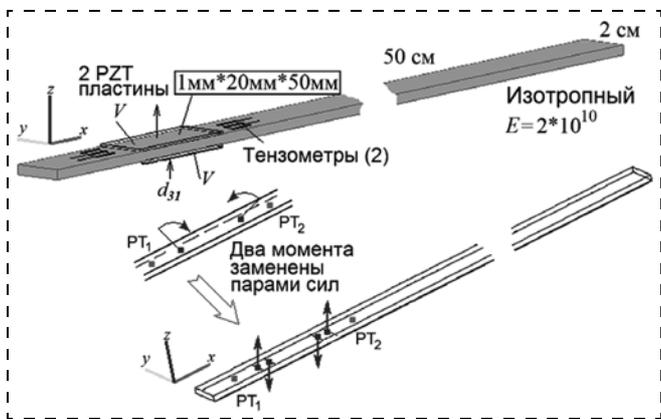


Рис. 6. Структура модели консольной балки с парой пьезоактуаторов и двумя датчиками деформации

тивное демпфирование, к сожалению, ухудшая устойчивость системы управления, а при достижении коэффициентом  $k_v$  некоторого порогового значения вызывает самовозбуждение на соседних ближайших собственных частотах балки. Для выявления причин этого нежелательного явления было выполнено аналитическое исследование системы, представленной на рис. 6, в рамках модели балки Эйлера—Бернулли.

Известно, что действие унимоρφных пьезоэлектрических пластин на балку эквивалентно двум изгибающим моментам [15, 18, 19]. Заменяя эти два момента двумя парами сил, приложенными в точках  $x_1, x_2$ , получим уравнение балки в виде

$$YJ \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} + c_a \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} + \theta V(t) [\delta(x - x_1 + \epsilon) - \delta(x - x_1 - \epsilon) - \delta(x - x_2 + \epsilon) + \delta(x - x_2 - \epsilon)] = F(t) \delta(x - x_b), \quad (2)$$

где  $Y, \rho$  — модуль Юнга и плотность материала балки соответственно;  $J$  — момент инерции;  $S$  — площадь сечения балки;  $c_a$  — коэффициент акустического демпфирования;  $\epsilon$  — половина расстояния между силами пары;  $\theta$  — параметр электромеханической связи;  $F(t)$  — возбуждающая сила, приложенная в точке  $x_b$ , а потенциал обратной связи  $V(t)$  пропорционален деформации и ее скорости в точках  $x_3, x_4$ :

$$V(t) = k_s [w''(x_3, t) + w''(x_4, t)] + k_v \left[ \frac{\partial w''(x_3, t)}{\partial t} + \frac{\partial w''(x_4, t)}{\partial t} \right]. \quad (3)$$

Разделяя переменные по схеме

$$w(x, t) = \sum_j T_j(t) \phi_j(x), \quad (4)$$

где  $\phi_j(x)$  — собственные функции задачи, а  $T_j(t)$  — модальный отклик на  $j$ -й собственной форме, после умножения на  $\phi_n(x)$ , интегрирования по длине балки  $[0; l]$  и использования условия ортогональности

$$\int_0^l \phi_j(x) \phi_n(x) dx = \delta_{jn}, \quad (5)$$

получим бесконечную систему уравнений для модальных откликов  $T_n$ :

$$\ddot{T}_n + \frac{c_a}{\rho S} \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} \dot{T}_n + \frac{YJ}{\rho S} \left( \frac{\lambda_n}{l} \right)^4 T_n + \frac{\theta V(t)}{\rho S} \times \{ \phi_n(x_1 - \epsilon) - \phi_n(x_1 + \epsilon) - \phi_n(x_2 - \epsilon) + \phi_n(x_2 + \epsilon) \} = F(t) \phi_n(x_b), \quad (6)$$

где  $\lambda_n$  — собственные значения задачи, соответствующие модальным откликам  $T_n$ .

Из формул (3) и (5) потенциал обратной связи получим в виде бесконечной суммы модальных откликов с весами, зависящими от кривизны балки в точках измерения деформаций:

$$V(t) = \sum_j (k_s T_j + k_v \dot{T}_j) [\phi_j''(x_3) + \phi_j''(x_4)]. \quad (7)$$

Уравнения (6) и (7) содержат члены, определяющие наблюдаемость динамического состояния балки

$$[\phi_j''(x_3) + \phi_j''(x_4)] \quad (8)$$

и управляемость

$$\{\phi_n(x_1 - \varepsilon) - \phi_n(x_1 + \varepsilon) - \phi_n(x_2 - \varepsilon) + \phi_n(x_2 + \varepsilon)\}. \quad (9)$$

Отметим, что, если знак кривизны балки изменяется в точках наблюдения  $x_3, x_4$ , знак множителя  $[\phi_j''(x_3) + \phi_j''(x_4)]$  определен. Следовательно, демпфируемая мода колебаний не должна менять знак кривизны между точками наблюдения, а расстояние между этими точками не должно быть больше половины длины волны демпфируемой моды.

Кроме того, выражение (9) можно с точностью до постоянного множителя трактовать как конечную разность второго порядка  $n$ -й собственной функции. Поэтому для эффективного подавления колебаний на частоте  $n$ -й моды знак выражения (9) не должен меняться на длине пьезопластины. Это накладывает строгие ограничения на продольные размеры; и расположение пьезопластин, длина и расположение которых должны быть такими, чтобы модуль выражения (9) для подавляемой моды был максимальным.

Однако, к сожалению, выполнение этих условий не гарантирует удовлетворительной управляемости процесса демпфирования. Так, уравнение (6) содержит бесконечный ряд (7), зависящий от всех форм колебаний, поэтому амплитуды некоторых мод могут в процессе демпфирования усиливаться.

Проиллюстрируем этот факт на примере балки, совершающей свободные колебания. В качестве начальных условий примем, что балка неподвижна и изогнута по форме, повторяющей вторую собственную функцию. В отсутствие внешних сил и обратной связи колебания балки будут совершаться на второй собственной частоте, затухая экспоненциально. Все уравнения системы (6), кроме второго, будут иметь тождественно нулевые решения.

Если же коэффициент  $\theta V(t)$  отличен от нуля, ситуация изменится. В ряде (7) оставим первые три члена, соответствующие 1-й, 2-й и 3-й модам. Структура полученной системы уравнений показывает, что в присутствии обратной связи эти моды будут взаимодействовать. Действительно, на первой временной диаграмме (рис. 7) наблюдается про-

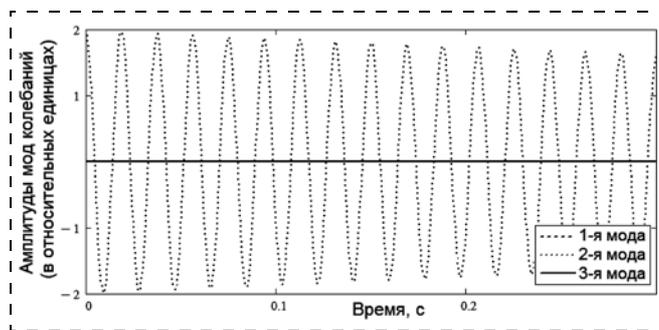


Рис. 7. Временные диаграммы амплитуд трех первых мод колебаний балки (обратная связь отсутствует)

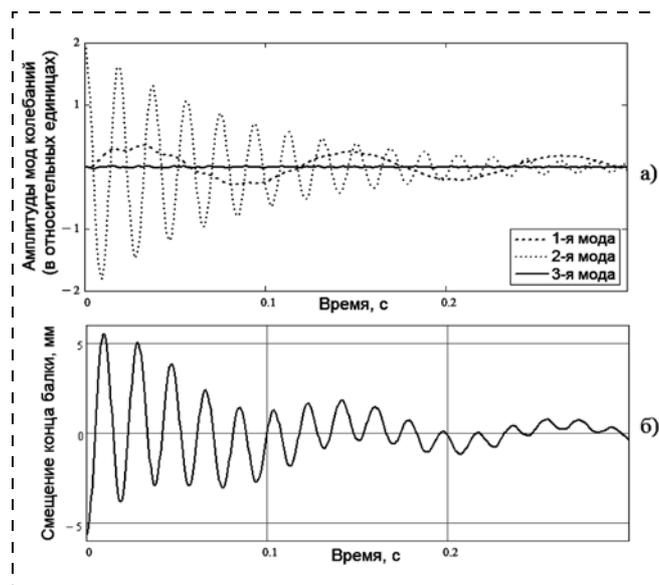


Рис. 8. Временные диаграммы изменения трех первых мод колебаний балки (а) и смещения конца балки (б) (промежуточная глубина обратной связи)

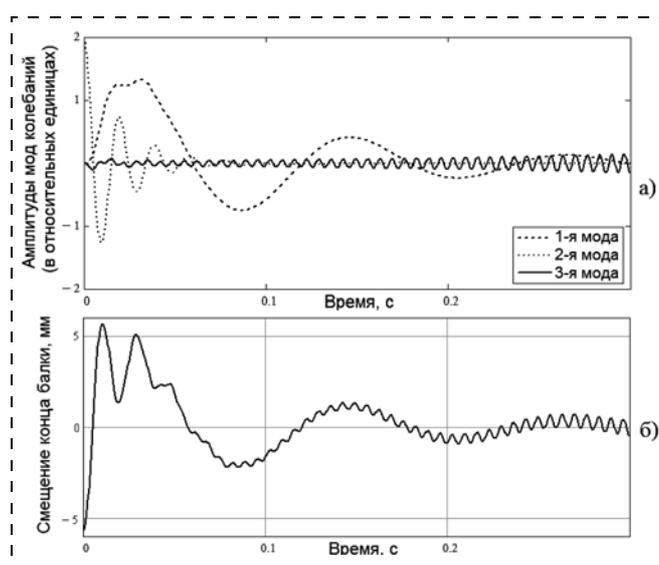


Рис. 9. Временные диаграммы изменения трех первых мод колебаний балки (а) и смещения конца балки (б) (увеличенная глубина обратной связи приводит к самовозбуждению)

цесс демпфирования, обусловленный только вязкостью окружающего воздуха. Колебания на 2-й моде гармонические, 2-я и 3-я моды не возбуждаются.

После включения обратной связи наблюдается интенсивное демпфирование второй моды и зарождение колебаний на 1-й и 3-й модах (рис. 8). При дальнейшем увеличении глубины обратной связи амплитуды колебаний на 1-й и 3-й модах нарастают (рис. 9), причем на 3-й моде наблюдается самовозбуждение. Это и есть ситуация потери устойчивости контура управления.

Для устранения этого явления предлагаются строгий выбор размеров и мест размещения пластин в соответствии с соображениями, приведенными при анализе выражений (8), (9), и фильтрация в требуемой полосе частот. Из изложенного следует, что эффективность управления такой распределенной механической системой полностью зависит от ее динамических свойств, и никакие искусственные средства, включая нейронные сети, не могут эффективно устранить явление потери устойчивости при неудачном выборе размеров и расположения активных пьезопластин.

### Балка с пассивными пьезоактуаторами. Нестационарный анализ

Ранее в работе авторов [7] были представлены результаты исследования частотных характеристик поглощения энергии колебаний гармонически возбуждаемой пьезопластиной, электрически нагруженной на активно-емкостной импеданс. При этом было установлено, что эффективность демпфирования увеличивается с ростом частоты от нескольких герц до нескольких килогерц и может быть повышена при подстройке импеданса нагрузки.

В настоящей работе пассивный режим подавления колебаний балки исследовали с помощью метода конечных элементов на основе полной системы уравнений анизотропной электроупругости. Структура модели соответствовала рис. 6, где были удалены тензометры, а проводящие плоскости пьезопластин были подключены к активным сопротивлениям. Выполнялся нестационарный анализ изгибных колебаний, вызванных импульсным силовым воздействием, приложенным к свободному концу консоли. Электрические потенциалы  $V_1$ ,  $V_2$  верхней и нижней пьезопластин (режим  $d_{31}$ ), вычисляли на каждом временном шаге в результате решения уравнения

$$V_i = R \int_{\Sigma} (J_i ds), \quad i = 1, 2, \quad (10)$$

где  $R$  — активный импеданс нагрузки, и поверхностный интеграл выражает ток в нагрузке через плотности тока  $J_i$ , нормальные к электропроводным поверхностям пластин  $\Sigma$ . Вычислялись также

значения рассеиваемой электрической энергии

$$\sum_{i=1,2} V_i^2 / R \text{ и энергии упругой деформации балки.}$$

Результаты нестационарного анализа представлены на рис. 10, где хорошо видна зависимость скорости снижения амплитуды колебаний балки на второй собственной частоте ~30 Гц от активного импеданса — подавление вибраций наиболее эффективно, когда внутренний импеданс ПП близок по величине импедансу нагрузки.

Таким образом, при импульсных внешних воздействиях пассивное включение пьезопластин оказывает некоторое демпфирующее воздействие на высших гармониках, но в силу того, что собственные частоты конструкции очень низкие, эффективность демпфирования невелика. Важно отметить, что рекомендации относительно размеров и расположения пьезопластин, приведенные при обсуждении выражения (9), сохраняют силу и при работе в пассивном режиме.

Результаты двух последних разделов приводят к следующим выводам.

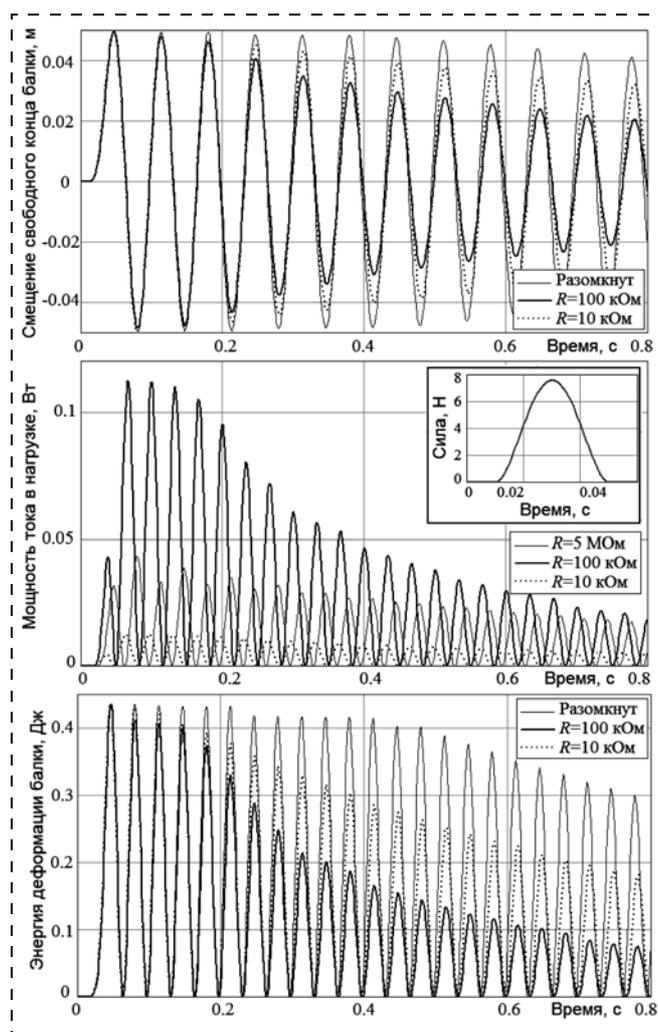


Рис. 10. Временная диаграмма вибраций возбуждаемой импульсной силой балки с двумя пассивными пластинчатыми ПП (на врезке дан график импульсной возбуждающей силы)

Активное демпфирование более эффективно для подавления стационарных монохромных колебаний балки. Коэффициент обратной связи  $k_v$  (пропорциональный скорости деформации) оказывает существенное влияние на интенсивность демпфирования, увеличивая локально диссипативные свойства материала. При подавлении колебаний на одной из собственных частот могут возникать колебания на других собственных частотах. При больших значениях  $k_v$  возможно возникновение неустойчивости и автоколебаний в контуре управления.

Пассивное демпфирование неэффективно для подавления низкочастотных колебаний. Эффективность увеличивается с ростом частоты. Необходима настройка параметров нагрузки ПП для сдвига диапазона частот эффективного демпфирования в область более низких частот.

Результаты сравнительного исследования активного и пассивного режимов работы ПП позволили предложить комплексный подход, предполагающий одновременное использование силовых ПП, работающих в активном режиме в низкочастотном диапазоне, и пассивных ПП, демпфирующих высокочастотные колебания.

## Выводы

- ♦ В результате сравнительного анализа эффективности биморфных и равномерных пьезопластин для возбуждения деформаций сдвига и кручения трубчатых конструкций установлена предпочтительность применения униморфных ПП.
- ♦ Предложена методика рационального выбора размеров и расположения силовых ПП, обеспечивающая эффективное управление с помощью аналогового ПД регулятора.
- ♦ Областью эффективного применения пассивного режима работы силовых ПП является высокочастотный диапазон механических колебаний, границы которого можно изменять, варьируя характеристики импеданса электрической нагрузки. При импульсном возбуждении широкого спектра колебаний пассивные ПП демпфируют преимущественно высшие гармоники.
- ♦ Предложено одновременное использование силовых ПП, работающих в активном режиме в нижнем диапазоне частот, и пассивных ПП, демпфирующих высокочастотные изгибно-крутильные колебания, одновременно исключая возможность самовозбуждения контура управления на высоких частотах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 10-08-00093а, № 10-08-000136а, № 10-08-13300-РТ\_оми), а также Госконтракта Минобрнауки РФ № П-201 (НК-751П) от 22.04.2010.

1. Sater J. M., Leisieux G., Martin C. A. Smarter Transition for Smart Technologies // Aerospace America. 2006. N 6. P. 18–21.
2. Rodgers J. P., Hagood N. W., Weems D. B. Design and manufacture an integral twist-actuated rotor blade // Proc. 38th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Forum, Kissimmee, Florida, 1997. P. 18.
3. Lee T., Chopra I. Design Issues of High-Stroke, On-Blade Piezostack Actuator for a Helicopter Rotor with Trailing-Edge Flaps // J. Intelligent Material Systems and Structures. 2000. N 11. P. 328–342.
4. Derham R., Weems D., Mathew M. B., Bussom R. The Design Evolution of an Active Materials Rotor // Proc. AHS 57th Annual Forum, May 9–11, San Francisco. 2001. P. 30–47.
5. Shevtsov S., Soloviev A., Bragin S. Structural Optimization of Distributed Actuation System for Improve an Efficiency of Smart Composite Spar Vibration Damping // Proc. 4th Int. Conf. on Noise and Vibration Engineering — ISMA 2008, Leuven, Belgium. 2008. P. 360–374.
6. Акопян В. А., Панич А. А., Рожков Е. В. и др. Измерительно-информационный комплекс для моделирования и демпфирования колебаний элементов летательных аппаратов // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 11 (112). С. 7–13.
7. Shevtsov S. N., Akopyan V. A. Active and Passive Vibration Control of Aircraft Composite Structures Using Power Piezoelectric Patch-Liked Actuators // Piezoceramic Materials and Devices / Ivan A. Parinov (Ed.). N.-Y.: Nova Science Publishers. 2010. P. 285–323.
8. Ghasemi-Nejhad M. N., Russ R., Pourjalai S. Manufacturing and Testing of Active Composite Panels with Embedded Piezoelectric Sensors and Actuators // J. Intelligent Material Systems and Structures. 2005. N 16. P. 319–333.
9. Beckert W., Pfundtner G. Analysis of the deformational behaviour of a bimorph configuration with piezoelectric actuation // Smart. Materials and Structures. 2002. V. 11, N 4. P. 599–609.
10. Lee S. et al. Piezoelectric Actuator-Sensor Analysis using a Three-Dimensional Assumed Strain Solid Element // J. Intelligent Material Systems and Structures. 2004. N 15. P. 329–337.
11. Liu V.-T., Huang H.-C., Lin C.-L., Jian Z.-J. Neural Net-based Modeling and Control of a Micro-positioning Platform Using Piezoelectric Actuators // J. Vibration and Control. 2007. Vol. 13. P. 309–326.
12. Sethi V., Song G. Pole-Placement Vibration Control of a Flexible Composite I-beam using Piezoceramic Sensors and Actuators // J. Thermoplastic Composite Materials. 2006. N 19. P. 293–308.
13. Suhariyono A., Goo N. S., Park H. C. Use of Lightweight Piezo-composite Actuators to Suppress the Free Vibration of an Aluminum Beam // J. Intelligent Material Systems and Structures. 2008. N 19. P. 101–112.
14. Badel A., Qiu J., Sebald G. Self-sensing High Speed Controller for Piezoelectric Actuator // J. Intelligent Material Systems and Structures. 2008. N 19. P. 395–405.
15. Erturk A., Inman D. J. Piezoelectric shunt damping for chatter suppression in machining processes // Proc. Int. Conf. on Noise and Vibration Engineering (ISMA 2008), Leuven, Belgium, 2008. P. 193–206.
16. Coppotelli G., Agneni A., Balis Crema L. Vibration Reduction of a Rotorcraft UAV Using PZT Patches // Proc. Int. Conf. on Noise and Vibration Engineering (ISMA 2008), Leuven, Belgium, 2008. P. 157–168.
17. Librescu L., Song O. Thin-Walled Composite Beams. Theory and Applications. N.-Y.: Springer. 2006. 594 p.
18. Glaz B., Friedmann P. P., Liu L. Vibration Reduction and Performance Enhancement of Helicopter Rotors Using an Active / Passive Approach // Proc 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conf., 7–10 April 2008, Schaumburg, IL. P. 18.
19. Alhazza K. A., Majeed M. A. Free Vibrations Stability Analysis and Control of a Cantilever Beam with Multiple Time Delay State Feedback // Proc. on the 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Conf. Schaumburg, IL, 2008. P. 10.

УДК 699:338.26; 669.001.18

**Н. А. Кульчицкий**, д-р техн. наук, проф.,  
**А. А. Мельников**, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
Московский государственный институт  
радиотехники, электроники и автоматики  
(технический университет, г. Москва),  
e-mail: n.kulchitsky@gmail.com,  
a.melnikov@mirea.ru

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА CdTe, ZnTe, Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te И ПРИБОРОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Поступила в редакцию 24.03.2011

*Обзор посвящен мировому производству CdTe, ZnTe и CdZnTe, получивших бурное развитие за последние годы. Рассмотрено современное состояние, дан анализ тенденций развития мировых рынков, обзор производителей рассматриваемых соединений, состояние российского рынка, а также современное состояние производства приборов на основе этих соединений.*

**Ключевые слова:** теллурид кадмия, твердый раствор теллурида цинка—кадмия, получение кристаллов, детекторы, спрос, предложение

### Свойства теллуридов кадмия, цинка и области их применения

**Теллурид кадмия.** CdTe является представителем класса широкозонных полупроводниковых материалов A<sub>2</sub>B<sub>6</sub>. CdTe синтезируют сплавлением компонентов в инертной атмосфере, кристаллы выращивают направленной кристаллизацией из расплава. Среди направлений использования — создание детекторов ионизирующих излучений — рентгеновского и γ-излучения (применяемых в медицине, системах безопасности и пр.). Детекторы на основе CdTe гораздо эффективнее, чем детекторы на основе Ge или Si, что обуславливает меньший продольный размер спектрометров высокоэнергетических излучений. Гамма-телескопы позволяют получать рентгеновские и гамма-изображения неба с высоким угловым разрешением и с высокой чувствительностью. Позиционно-чувствительные детекторы телескопа состоят из десятков тысяч полупроводниковых элементов на основе монокристаллического CdTe.

С 2008 г. растет применение теллурида кадмия при создании тонкопленочных фотоэлектропреобразователей (ФЭП).

Теллурид кадмия нашел применение в ИК-оптике, имея самый широкий рабочий диапазон волн в инфракрасной области. Теллурид кадмия используется как подложка фильтра в области волн 12...25 мкм. У него практически идеальная ширина запрещенной зоны (1,44 эВ) для видимой и ближней инфракрасной области спектра и очень высокая способность к поглощению излучения.

CdTe широко применяется в лазерных затворах (*Q-switch*), используемых в CO<sub>2</sub>-лазерах.

**Теллурид цинка.** Теллурид цинка ZnTe, в зависимости от способа получения, представляет собой либо серый порошок, либо красные кристаллы. ZnTe синтезируют сплавлением компонентов в инертной атмосфере или при нагревании смеси ZnO с Te и щавелевой кислотой. Монокристаллы выращивают направленной кристаллизацией из расплава или вытягиванием из расплава методом Чохральского. Используют также осаждение из газовой фазы — путем возгонки, взаимодействием паров компонентов или транспортными реакциями.

**Твердый раствор теллурида цинка—кадмия.** Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te был получен уже почти 40 лет назад. С тех пор интерес к данному материалу только возрастает. Это объясняется гибкой вариативностью свойств, которая характеризует Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te ( $x = 0,04...0,1$ ). Одним из главных преимуществ детекторных элементов из CdZnTe является возможность функционирования при комнатной температуре, в то время как для детекторов на основе Ge требуется охлаждение жидким азотом. Наилучшее энергетическое разрешение детекторов, например производства компании *eV Products*, составляет 0,5 % на линии 60 кэВ. Также к преимуществам теллурида цинка—кадмия по сравнению с CdTe относится более высокое удельное сопротивление. Это позволяет увеличить напряженность поля и снизить время сбора заряда или уменьшить темновой ток, который является основным источником электронного шума и отвечает за снижение энергетического разрешения прибора. Детекторы на основе теллурида цинка—кадмия работают при комнатной температуре и могут обрабатывать более  $2 \cdot 10^6$  фотонов в секунду на 1 мм<sup>2</sup>. Уникальная комбинация спектро-

скопии и очень высокой скорости счета при комнатной температуре делает CdZnTe идеальным материалом для детектора ядерных излучений.

В качестве подложечного материала CdZnTe используется для создания ИК фотоприемников, работающих в спектральных диапазонах 1,0...2,5 мкм, 3...5 мкм и 8...14 мкм (так называемых "окнах прозрачности" атмосферы). В настоящее время производится более 80 тысяч различных детекторов в год на базе эпитаксиальных слоев твердых растворов  $Cd_xHg_{1-x}Te$  (КРТ) на монокристаллических подложках CdZnTe.

При выращивании кристаллов состава  $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$  появляющаяся "блочность", возникающие дислокации и прочие структурные несовершенства ограничивают возможности изготовления детекторов ядерных излучений. Кристаллы состава  $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$  удается получать гораздо больших размеров, чем  $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$ . Например, компания *BAE Systems* изготавливает монокристаллические подложки размером 8 × 6 см. Помимо проблем выращивания монокристаллических заготовок большого размера, другой проблемой является сложность обработки для получения чувствительных элементов детектора. Вследствие высокой хрупкости материала отбраковка на этом этапе может превышать 70%. Ввиду достаточно высокой стоимости CdZnTe — до 2 \$США за 1 мм<sup>3</sup> (по сравнению, например, с высокоомным Si стоимостью в 20 \$США за 1 см<sup>3</sup>) внедрение материала в практические приложения идет сравнительно медленно.

В настоящее время коммерческим является CdZnTe-детектор размерами 2 × 2 × 2 см, лабораторным достижением является монокристалл с размерами 4 × 4 × 6 см. При этом надо отметить, что необходимы кристаллы высокого структурного совершенства, поскольку на неоднородностях практически всех видов происходит захват носителей заряда, что сопровождается "засвечиванием" картины.

## Технологии изготовления

**Выращивание объемных кристаллов.** На рынке существуют несколько технологий, отличающихся как стоимостью и продолжительностью технологического процесса, так и особенностями свойств получаемых кристаллов [1—3].

Исторически первой коммерческой технологией выращивания монокристаллов теллуридов цинка—кадмия является метод вертикальной направленной

кристаллизации (метод Бриджмена) под высоким давлением инертного газа (HPVB — *high-pressure vertical Bridgman*). Этот метод, разработанный в НИИ монокристаллов (г. Харьков, Украина), широко используется в настоящее время компанией *eV Products* (США). С использованием данного метода получают большую часть производимых в мире кристаллов CdZnTe. Данный метод используют фирмы *Saint-Gobain Crystals* (США) и *Eurorad* (Франция). Однако используемое высокое давление обуславливает структурное несовершенство, возникающее в процессе роста кристалла. Появляющиеся дефекты развиваются в процессе роста кристалла, и получаемая заготовка имеет блочную структуру. Выращенный блочный образец материала заданной стехиометрии "разбирается" на блоки монокристаллов, которые затем подвергаются резке на пластины, шлифовке и полировке. Таким образом, получаются заготовки, которые используются для изготовления чувствительных элементов детекторов.

Другой технологией получения монокристаллов твердых растворов CdZnTe является тот же метод Бриджмена в модификации с низким давлением (*Bridgman LP*). Таким способом удается получать кристаллы более высокого качества. Данную технологию отработали фирмы *Orbotech* (Израиль), *YinneTech* (США), *Letti* (Франция). Также используются следующие методы выращивания кристаллов  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ : метод зонной плавки (*HZM — horizontal zone melting*) фирмы *5NPlus, Redlen*, Канада, метод выращивания из паровой фазы (*CVD — chemical vapor deposition*) *Kromek*, Великобритания, метод движущегося растворителя — *TNM — Acrorad* (Япония), который позволяет использовать более низкие температуры при выращивании, что положительно сказывается на структурном совершенстве и чистоте кристаллов.

В России для получения кристаллов твердых растворов  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  используют метод выращивания из паровой фазы (НИИ материаловедения, Зеленоград), метод Бриджмена и метод движущегося растворителя (Гиредмет, Москва), ИФТТ РАН (Черноголовка) в разновидности HPVZM — *high-pressure vertical zone melting*, Институт кристаллографии РАН (Москва). На Украине: метод Бриджмена — НИИ монокристаллов (г. Харьков).

Используемые методы выращивания кристаллов CdZnTe и получаемые результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Методы выращивания кристаллов и их характеристики

Характеристики	CdTe : Cl		Cd <sub>1-x</sub> Zn <sub>x</sub> Te	CdZnTe : In	CdZnTe : In
	Вертикальный Бриджмена	Зонной плавки	Бриджмена под высоким давлением	Горизонтальный Бриджмена	Модифицированный вертикальный Бриджмена
Диаметр кристалла, мм	>50	50—76	100—140	85	76
Удельное сопротивление, Ом · см	10 <sup>9</sup>	10 <sup>9</sup>	>10 <sup>10</sup>	10 <sup>9</sup>	>10 <sup>10</sup>

Таблица 2

## Сравнительные размеры кристаллов CdTe и CdZnTe

Производители	Материал	Диаметр/размеры
<i>Eurorad</i> , Франция	CdTe, CdZnTe	50 мм
<i>Acrorad</i> , Япония	CdTe	50...75 мм
<i>Orbotech</i> , Израиль	CdZnTe	40 × 40 мм
<i>Ynnel Tech</i> , США	CdZnTe	50...75 мм
<i>Redlen</i> , Канада	CdZnTe	50 мм
<i>eV Products</i> , США	CdZnTe, CdTe	140 мм
Гиредмет, Россия	CdZnTe, CdTe	45...100 мм

Одним из основных параметров, характеризующих пригодность материала для использования в качестве детекторов ионизирующего излучения, является произведение подвижности на время жизни носителей ( $\mu\tau$ ). В настоящее время  $\mu\tau$  превышает  $1 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{В}$  для электронов и  $1 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{В}$  для дырок. Так, образцы производства Гиредмета (Москва) имеют  $\mu\tau$  для электронов  $(0,5...1) \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{В}$ ;  $\mu\tau$  для дырок —  $10^{-4}...10^{-5} \text{ см}^2/\text{В}$ .

Типичные размеры кристаллов CdTe и CdZnTe приведены в табл. 2.

**Получение тонких пленок.** Технологии получения тонких пленок на основе CdTe активно развиваются с 2007—2008 г. в области солнечной энергетики. Будучи прямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны 1,45 эВ и коэффициентом оптического поглощения  $>5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ , CdTe является перспективным материалом для солнечной энергетики. Достаточно слоя 5...10 мкм для эффективного преобразования солнечной энергии, что позволяет значительно сократить расход материала и уменьшить затраты на производство ФЭП. Применяемые методы получения тонкопленочных ФЭП на основе CdTe представлены в табл. 3.

Самая крупная компания на 2010 г. по производству CdTe-солнечных элементов — *First Solar* (США) применяет модифицированный метод CSS (*closed space sublimation*) с движущейся подложкой (HRVTD — *high rate vapor transport deposition*). В качестве подложки используется стекло.

Также представляют интерес новые разработки. Например, многоканальный метод физического переноса из паровой фазы на подложку GaAs. С помощью данного метода были получены монокристаллические элементы для изготовления высокопрецизионных сенсоров.

Таблица 3

## Методы производства тонкопленочных ФЭП на основе CdTe

Технология	Компания
Сублимация в замкнутом объеме (CSS)	<i>First Solar, Antec Solar</i>
Электроосаждение	<i>BP Solar</i>
Трафаретная печать	<i>Matsushita</i>

## Производители

Производителей условно можно разбить на три группы:

1) производители широкой номенклатуры различных материалов: *MaTeck GmbH, MTI Corporation*;

2) компании, специализирующиеся на производстве особо чистых материалов: *5NPlus*;

3) компании, узкоспециализирующиеся на технологиях производства CdTe, ZnTe и CdZnTe: *Eurorad, Imarad, Kromek, eV Products, Acrorad*.

Для первой группы компаний характерно наличие широкой линейки производимых материалов, в которой халькогениды металлов занимают небольшую часть. Для данных компаний халькогениды металлов являются скорее перспективными рынками, нежели текущим источником прибыли.

Вторая группа тесно связана с рудодобывающими компаниями и несет низкие издержки при производстве исходных материалов.

Третья группа компаний узко специализируется на производстве CdZnTe и CdTe и в своем большинстве они создали новые технологии роста таких кристаллов. В данной группе явно прослеживается направление на разработку собственного оборудования и комплектующих для уже существующих технологий. В ближайшее время (5—7 лет) следует ожидать консолидации производителей оборудования, материалов и дистрибьюторов.

Стоит отметить, что большая часть компаний получили свое развитие в рамках сотрудничества с государственными структурами (табл. 4).

## Характеристики рынков

## Детекторы инфракрасного излучения

Объем мирового рынка в натуральном и денежном выражении. ИК детекторы покрывают широкий круг применений, которые относятся к оборонному сектору, промышленному и коммерческому

Таблица 4

## Основные производители

Страна	Компания	CdTe	Cd <sub>1-x</sub> Zn <sub>x</sub> Te	ZnTe	CdS/CdSe
США	<i>eV Products</i>	+	+	+	
	<i>Cerac</i>	+		+	+
	<i>MTI Corporation</i>	+	+	+	+
Канада	<i>5NPlus</i>	+	+	+	+
	<i>Redlen</i>		+		
Англия	<i>Kromek</i>	+	+		
Израиль	<i>Imarad</i>		+		
Япония	<i>Acrorad</i>	+			
	<i>Nikko Materials</i>	+	+	+	
Франция	<i>Eurorad</i>	+	+		
Германия	<i>MaTeck GMBH</i>	+	+	+	+

секторам и используются в устройствах ночного видения и тепловидения. Спрос со стороны оборонного сектора составляет порядка 70% от общего спроса на данные устройства. В настоящий момент наблюдается значительное увеличение спроса на приборы среднего и дальнего ИК диапазонов. В устройствах, функционирующих в среднем ИК диапазоне, наибольшая доля оптических элементов изготавливается из селенида цинка (ZnSe), германия (Ge), твердых растворов теллуридов кадмия ртути ( $Cd_xHg_{1-x}Te$ ) и сульфида цинка (ZnS). Использование оптических элементов из теллурида кадмия (CdTe) существует в относительно незначительных масштабах.

**Динамика и тенденции рынка.** Общий объем рынка ИК детекторов в стоимостном выражении составляет около 1,25 млрд \$ США, показывая прирост на 15 % ежегодно. По прогнозам, до 2015 года рынок продолжит расти примерно теми же темпами. Внутри общего рынка ИК детекторов, сектор КРТ детекторов составляет порядка 180 тыс. детекторов в товарном выражении и 570 млн \$ США — в стоимостном.

Объем монокристаллов теллуридов цинка—кадмия для производства детекторов из CdHgTe составляет около 190 млн \$ США в год в денежном выражении и порядка тонны монокристаллических образцов в год — в натуральном выражении (рис. 1). Средняя цена подложечного материала составляет  $\sim 100\$/\text{см}^2$  для подложек площадью около  $10\text{ см}^2$ .

Стоимость  $1\text{ см}^2$  крупных подложек может быть в несколько раз больше.

Рост средней стоимости монокристаллических подложек обусловлен увеличением спроса на рын-

ке детекторов на матричные широкоформатные элементы, требующие соответствующих подложек.

Наибольший прирост ожидается в сегменте тепловидения для применений в пожарных службах, в секторах машиностроения и автомобилестроения [3—5].

ИК детекторы производятся компаниями *DRS*, *Sofradir*, *Boeing North America*, а также многочисленными оптическими предприятиями в Европе, США, России и Китае на основе материалов, поставляемых указанными выше производителями.

Доминирующее положение на рынке ИК детекторов занимают *Boeing North America* (США), *DRS Technologies* (США), *Raytheon* (США), *Sofradir* (Франция), *ULIS* (Франция) и *BAE Systems* (Великобритания).

Компания *Rockwell* (часть *Boeing North America*) специализируется на производстве детекторов как для дальнего ИК диапазона (свыше 10 мкм), так и для ближнего (0,6...5 мкм). Крупнейшим проектом компании является обсерватория в Мауна Кеа, Гавайи.

Одним из лидеров на рынке ИК детекторов является компания *Sofradir*, специализирующаяся на ИК детекторах ближнего диапазона излучения. В основном компания занимается производством детекторов на основе CdHgTe/CdZnTe. В 2008 году заключен контракт на 6,7 млн евро между *Sofradir* и производителем спутников и космического оборудования *Astrium SAS*. Контракт касается разработки спутника *Sentinel-2*, на борту которого предполагается разместить систему приборов наблюдения Земли. *Sofradir* участвует в проекте как производитель ИК детекторов ближнего диапазона излучения 1,3...2,3 мкм для мультиспектральных устройств.

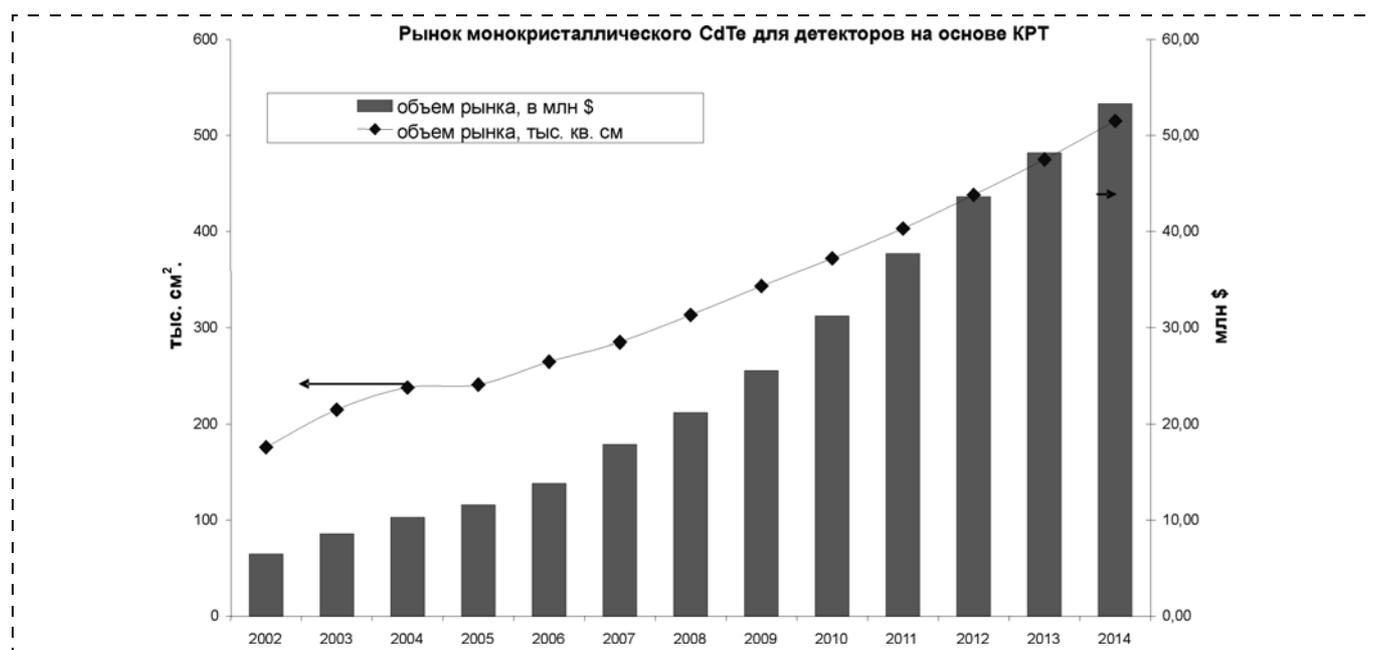


Рис. 1. Объем рынка монокристаллического CdTe для детекторов инфракрасного излучения

Компания *DRS* (США) является поставщиком для американской армии технологии SADA II с (480 × 6)-пиксельной системой, функционирующей в дальнем ИК диапазоне для систем наведения ракет. Для подобного применения компания предлагает матрицу 640 × 480 пикселей, также функционирующую в дальнем ИК диапазоне.

Основными покупателями ИК детекторов на основе КРТ являются: *Thales, Sagem, Selex, Thales Alenia Space, ESA (European Space Agency)* и *FLIR Systems*, а также оборонная промышленность различных стран. В России среди основных заказчиков — ИКИ РАН, ПИЯФ РАН.

### Солнечная энергетика

Известно, что в долгосрочной перспективе (до 2100 г.) в развитых странах предполагается использовать энергию Солнца (~60 % общего производства энергии), которая потеснит традиционные источники: газ, нефть, уголь. Пока совокупная мощность всех произведенных к 2010 г. в мире батарей для преобразования солнечной энергии составляет около 20 ГВт, из них в 2009 г. установлено 6,43 ГВт [9]. К 2013 году ожидается рост производства, по разным оценкам, 16...25 ГВт в год, а суммарный оборот отрасли достигнет 100 млрд долл. США.

Как отмечалось, по своим характеристикам CdTe является перспективным материалом для производства ФЭП. Развитие технологий, позволяющих выращивать пленки со скоростью более 1 мкм/мин, способствует росту производства ФЭП на основе CdTe. Сегодня в мире производится солнечных батарей на теллуриде кадмия мощности порядка 720 МВт/год, что в 14 раз больше выпуска в 2003 г. — 25 МВт. Предполагается, что к 2012 г. общая мощность производимых солнечных батарей на основе CdTe будет 1,5 ГВт, что составит 6% общего рынка. Компания *First Solar* (США) развернула к началу 2010 г. производственные мощности свыше 1 ГВт/год.

Таблица 5  
Сравнение характеристик ФЭП на основе Si, a-Si, CdTe и CIS

Характеристики	Si	CdTe	CIS	a-Si
Макс. КПД, % (лабораторные образцы, начало 2010 г.)	24,7	16,5	19,5	10,4
КПД промышленного образца, % (на начало 2010 г.)	22,7	10,7	13,4	10,1
Самоокупаемость, лет	2—4	<1	<1	1—2

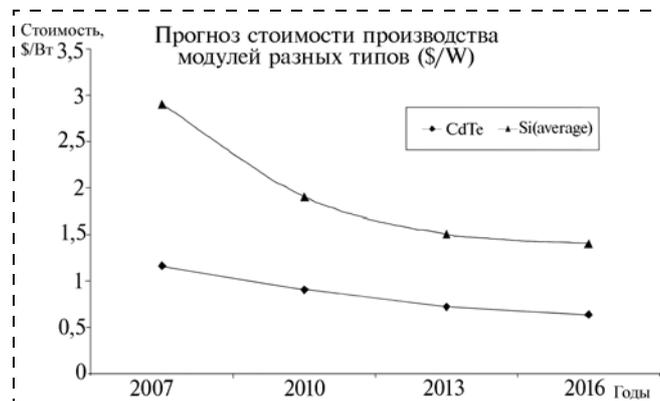


Рис. 2. Прогноз снижения стоимости производства ФЭП по разным технологиям. В качестве сырья для сублимации в методе CSS может использоваться как порошок или гранулы (3...5 мкм), так и спрессованные "таблетки" CdTe. Основным требованием к материалу является его чистота (5—6 N)

В табл. 5 представлено сравнение по ряду параметров модулей, производящихся на сегодняшний день.

В силу невысокой стоимости фотоэлектротрансформации на основе CdTe составляют серьезную конкуренцию кремниевым пластинам, несмотря на меньший КПД. Прогноз снижения стоимости производства ФЭП приведен на рис. 2.

Варьируемая ширина запрещенной зоны (1,45...2,26 эВ) определяет перспективность твердых растворов  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  в качестве поглощающих слоев в ФЭП. В недавних работах было показано, что эффективность ФЭП на основе данного материала доходит до 25 %.

**Объем рынка в натуральном и денежном выражении.** На сегодняшний день рынок поликристаллической крошки из теллурида кадмия для распыления в процессе производства ФЭП на основе CdTe составляет чуть больше 45 млн \$ США (табл. 6). После наступления кризиса в 2008 г. прогнозы роста производства ФЭП, а соответственно и потребности в CdTe на 2010 год и последующие годы, понижены с 49 до 26 % в год. По мере выхода индустрии солнечных батарей из кризиса, ориентировочно в 2011—2012 гг. рост продолжится на докризисном уровне (рис. 3).

**Основные производители.** В 2010 г. теллурид кадмия производился следующими компаниями: *Asarco, Umicore, Amalgamet, 5NPlus, American Elements* и *LTS Chemicals*.

Производители ФЭП на основе CdTe следующие: *First Solar* (США), *Calyxo* (Германия), *Primestar Solar, AVA Solar, Sunovia, Solar EPIR Technologies, Xunlight 26* (все — США).

Таблица 6

Цена высокочистого порошка CdTe

Годы	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Цена CdTe, \$/кг	183	155	205	193	220	231	240	261	268	286

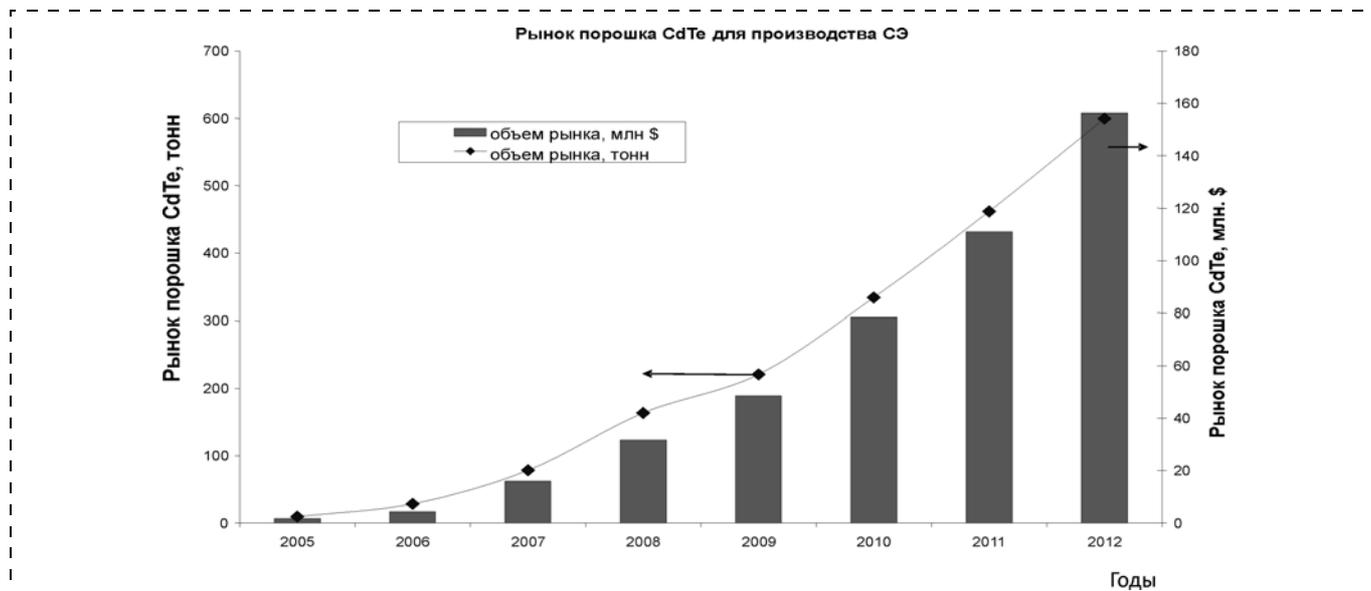


Рис. 3. Объем рынка порошка CdTe (чистота 5N, крупность <200 мкм) для производства ФЭП

*First Solar* основана в 1999 г., производство налажено в 2002 г. *First Solar* имеет производство в Огайо (США), открыла в 2009 г. филиалы в Малайзии и Германии. *First Solar* имеет долгосрочные (2008—2012 гг.) контракты в США на поставку солнечных элементов 3,4 ГВт, контракт в Германии на поставку модулей мощностью 40 МВт, подписан меморандум с правительством КНР на строительство солнечных станций общей мощностью до 2 ГВт.

*Calyxo GmbH* (Германия) основана в 2005 г. (на 100 % дочернее предприятие компании *Q-Cells*). В 2007 г. компания начала производство по технологии американской фирмы *Solar Fields*, в результате были произведены электрические модули мощностью 8 МВт. В 2007 г. произошло слияние компаний *Solar Fields* и *Calyxo*. В 2010 г. планируется расширить предприятие для производства модулей мощностью 60 МВт.

*Xunlight 26 Solar* (США) является дочерним предприятием корпорации *Xunlight*. Создана в 2008 г. для разработки солнечных батарей на основе CdTe и других соединений группы II—VI.

*AVA Solar* (США) основана в 2007 г. Технология солнечных батарей *AVA Solar* разработана в Колорадском государственном университете при поддержке Агентства по возобновляемым источникам энергии (NREL). Пробный выпуск батарей был в 2008 г. В 2009 г. установлено оборудование для производства батарей 200 МВт. КПД ФЭП планируется на уровне 11—13 %, что выше КПД батарей *First Solar* (9—11 %).

Компании *Sunovia* и *EPIR Technologies* придерживаются мнения, что можно использовать сразу несколько традиционных полупроводников (CdTe, ZnTe, Si) в одном модуле. Данная технология может повысить эффективность до 32 %. Пробный

выпуск ФЭП (10 МВт) компания *Sunovia* планирует в 2011 г. Производственная мощность компании составляет 100 МВт.

Компания *EPIR Technologies* заявила о создании солнечной батареи, которая работает с эффективностью свыше 26 %. Компания планирует добиться эффективности свыше 30 % в результате использования монокристаллического CdTe в сочетании с кремнием, так как потолок эффективности CdTe в монокристаллической форме гораздо выше и составляет 24 % [8—11].

На начало 2010 г. минимальную на рынке цену имеют батареи производства *First Solar* — стоимость 1 Вт составляет 0,98 \$ США. В случае роста производства тонкопленочных ФЭП цена производимой энергии может снизиться еще больше за счет эффекта масштаба. К 2015 г., увеличивая объем и эффективность производства, *First Solar* планирует выйти на уровень цены 0,7\$/Вт. Однако КПД данных батарей меньше по сравнению с другими технологиями, а производство энергии остается экономически выгодным благодаря сравнительно низкой стоимости сырья. Негативным фактором является также токсичность теллурида кадмия. Поэтому некоторые компании, например *Schott AG*, отказываются от применения теллурида кадмия в производстве. Однако проблема представляется решаемой при организации переработки отслуживших свой срок батарей и использовании новых способов производства исходных компонентов.

### Детекторы рентгеновского излучения, счетчики гамма- и альфа-частиц

На сегодняшний день в мире существует развитая индустрия детекторов ионизирующих излучений (альфа- и бета-частиц, рентгеновского и гамма-излучения, нейтронов, протонов). Объем рынка радиационных детекторов в 2008 г. превысил 300 млн \$ США.

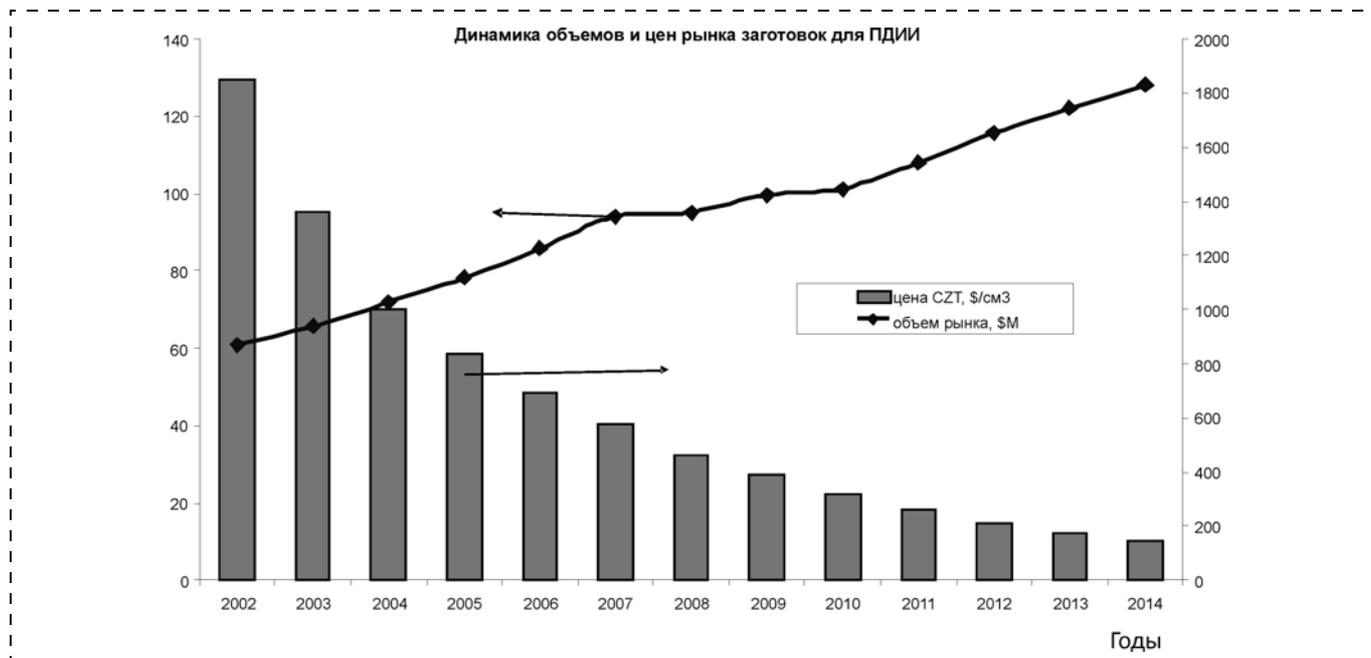


Рис. 4. Рынок монокристаллических заготовок CZT (в млн \$ США) для производства ПДИИ, 2002—2014 гг.

Полупроводниковые детекторы ионизирующих излучений (ПДИИ) на основе германия, кремния, теллурида кадмия и ряда других полупроводниковых материалов позволяют быстро и эффективно проводить анализ соответствующего излучения. Для гамма-излучения по ряду параметров (ширина запрещенной зоны, эффективность регистрации, объем детектора, диапазон детектируемого излучения, диапазон рабочей температуры) наиболее подходят CdZnTe и CdTe. CdZnTe более тяжелый материал по сравнению с Si и Ge, используется для поглощения более высоких энергий. При наибольшей из трех материалов ширине запрещенной зоны CdZnTe имеет лучшую способность к поглощению рентгеновского и  $\gamma$ -излучения при высокоэнергетическом разрешении. Мировой объем рынка кристаллов  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  составляет ~100 млн \$ США.

Основными потребителями детекторных систем являются:

- медицинское оборудование (рентгеновские аппараты и томографы);
- системы безопасности (портовые, авиационные и железнодорожные терминалы, системы контроля доступа на охраняемые объекты);
- мобильные досмотровые системы; системы неразрушающего контроля (строительство, машиностроение и т. д.).

Крупнейшими производителями  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  (CdTe) являются такие компании, как *eV Product* (подразделение корпорации II-VI, США), *Acrorad* (Япония), *Digirad*, *CEA Leti*, *Redlen*, *Orbotech*, *Europad*, *Imarad*, *Umicore*.

Развитие и прогноз рынка детекторных элементов на основе монокристаллического  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  на период с 2002 по 2014 г. приведен на рис. 4.

В настоящее время средняя цена монокристаллов CdZnTe детекторного качества составляет около 2 тыс. \$ за 1 см<sup>3</sup> [9, 10].

#### Техника терагерцового диапазона

Освоение THz-технологий только начинается и в течение ближайших 10—15 лет ожидается значительный рост производства. Применение THz-устройств может значительно возрасти за счет рынков телекоммуникации, медицины, микроскопии, оборонного сектора и обеспечения безопасности объектов. В число кристаллических материалов, используемых в THz-устройствах, входит ZnTe и др.

Одним из наиболее крупных рынков, на который может войти оборудование THz-диапазона, является рынок телекоммуникаций. Рынок THz-изображения оценивается в 20 млрд \$ США.

Терагерцовые устройства контроля, мониторинга и диагностики имеют преимущества над аналогичными приборами, работающими в инфракрасном, радиоволновом и ультразвуковом диапазоне. Замена рентгеновского оборудования на безвредную терагерцовую технику значительно повысит эффективность и качество проводимых исследований. Терагерцовое излучение может найти применение там, где необходим непрерывный мониторинг живых объектов, например при томографических исследованиях, в постоянно работающих системах безопасности объектов.

Прогноз рынка ZnTe на период по 2014 г. приведен на рис. 5.

Уровень цен на теллурид цинка, приведенный на рис. 4, представляет собой усредненный показатель по рынку за 1 мм<sup>3</sup> (для заготовок 10 × 10 × 1 мм) [8—10].

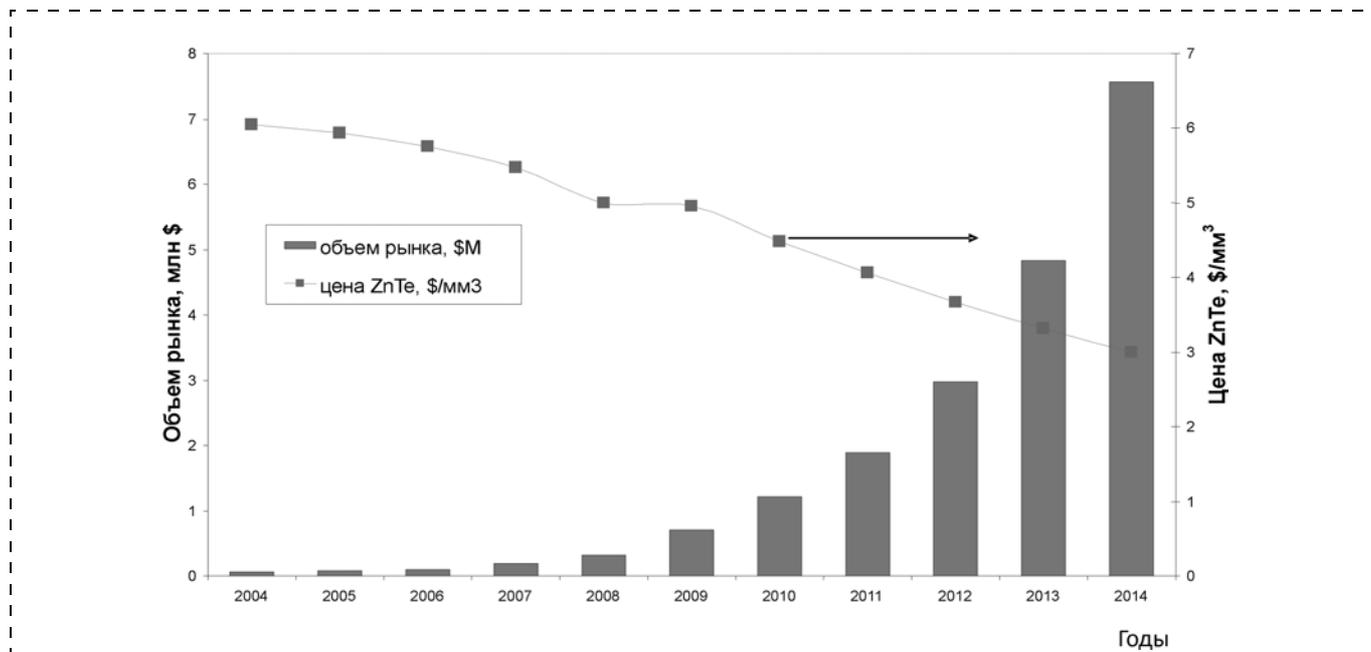


Рис. 5. Динамика рынка ZnTe для терагерцевых применений

### Заключение

Лимитирующим фактором для развития рассмотренных областей в посткризисный период станет производство теллура (кадмий является несколько более доступным материалом), поэтому существует опасность роста цен на теллур. Данные опасения основаны на опыте прошлых лет, когда за период с 2003 по 2008 г. цена за 1 кг теллура выросла с 20 до 260 \$ США. Также следует помнить, что сегодня рынок теллура является одним из самых маленьких промышленных рынков металлов — до 600 тонн/год. Например, производители ФЭП на основе CdTe будут крайне нуждаться в теллуре уже после того, как объем этого рынка вырастет до мощности свыше 3—4 ГВт/год (а это очень немного для амбициозных задач солнечной энергетики). Для производства такого количества модулей потребуется теллура 300—400 тонн/год, т. е. более половины всего добываемого сейчас теллура.

Замедление вследствие кризиса темпов роста рудной базы для извлечения теллура, с одной стороны, и рост потребности в теллуре, с другой стороны, могут вызвать рост цен на теллур и, в конечном счете, отразиться на стоимости соединений и приборов.

*Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Фе-*

*дерации в рамках федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 годы.*

### Список литературы

1. US Geological Survey Publications. URL: <http://minerals.usgs.gov>.
2. Historical Statistics for Mineral Commodities in the United States: Open File Report OF-01-006. Vers. 6.4.2003.
3. Кульчицкий Н. А., Наумов А. В. Обзор мировых рынков кадмия, теллура и соединений на их основе // Цветная металлургия. 2010. № 2. С. 31—44.
4. Prasada Rao K., Hussain O. Md., Reddy K. T. R., Reddy P. S., Uthana S., Naidu B. S., Reddy Jayarama P. Characterization of Two-source Evaporated Cadmium Zinc Telluride Thin Films // Optical Materials. 1996. N 5. P. 63—68.
5. Chu T. L., Chu S. S., Ferekides C., Britt J. Films and Junctions of Cadmium Zinc Telluride // Journal of Applied Physics 71 (1992) 5635—5640.
6. Szeles C., Cameron S. E., Ndap L.-O., Reed M. D. Advantages in the High-pressure Crystal Technology of Semi-insulating CdZnTe for Radiation detector Application // V SPIE Conference of Hard X-Ray, Gamma-Ray and neutron Detector Physics. San Diego, 2003. P. 203—233.
7. Ojebuoboh F. Selenium and Tellurium from Copper refinery Slimes and their Changing Applications // World of Metallurgy-ERZMETALL. 2008. Vol. 61, N 1. P. 255—261.
8. Fthenakis V. M. Life cycle impact of Cadmium in CdTe PV production // Renewable and Sustainable Energy reviews. 2004. N 8. P. 303—334.
9. Solar photovoltaic market grew 6 %, says Solarbuzz. URL: <http://www.pv-tech.org/lib/8476> 15.03.2010.
10. DOE-I Final Report, YINNEL. 2008. April 28. URL: <http://www.evmicroelectronics.com>

**Л. П. Хромова**, канд. техн. наук, президент НПЦ "ИНОР", г. Королев МО,  
**В. Ф. Коростелев**, д-р техн. наук, проф., зав. каф., Владимирский государственный университет,  
 e-mail: giess300@mail.ru

## ФОРМИРОВАНИЕ КВАЗИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР В УСЛОВИЯХ НАЛОЖЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Поступила в редакцию 03.02.11

*Приведены результаты металлографических и рентгенофрактологических исследований опытных образцов, полученных литьем с наложением давления до начала кристаллизации. Установлено, что давление может быть использовано для формирования квазикристаллических структур с более высокими упругими свойствами.*

**Ключевые слова:** икосаэдрическая симметрия, термодинамическая устойчивость, дальний порядок, базовый элемент, наложение давления, избыточные фазы, повышение упругих свойств

Известно, что квазикристаллы представляют собой класс твердых тел, которые могут обладать осями симметрии 5-го, 7-го и более высоких порядков. При этом наблюдается особый тип дальнего порядка, называемый "квазикристаллическим". Дальний некристаллический ориентационный порядок был обнаружен Шехтманом при изучении алюминий-марганцевых сплавов. На электронограммах имелись четкие рефлексы, а их расположение подтверждало икосаэдрическую точечную группу симметрии, несовместимую с трансляционной симметрией. Расположение рефлексов было квазипериодичным с расстоянием

$$d_n = d_n - 1\tau, \quad (1)$$

где  $\tau$  — иррациональное число, равное  $(1 + \sqrt{5})/2$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$

Данное открытие дало толчок в проведении работ, направленных на создание сплавов с уникальными свойствами за счет заполнения структуры сплава объектами, обладающими дальним порядком и произвольной симметрией (рис. 1).

Необходимо отметить, что был достигнут существенный прогресс как в области разработки новых материалов, так и методов их получения. Однако важной проблемой остается вопрос о термодинамической устойчивости, а именно, при каких скоростях охлаждения из расплава

будет образовываться квазикристаллическая фаза, будет ли она более устойчивой, т. е. иметь меньшую энергию по сравнению с кристаллическим аналогом при данных условиях температуры, состава, давления, сколь долго она существует и не перейдет ли при изменении внешних условий в кристаллическую фазу.

Первые открытые квазикристаллические икосаэдрические сплавы алюминия с марганцем можно было получить лишь путем быстрого охлаждения с определенной скоростью из жидкого состояния (при более высокой скорости охлаждения получались аморфные фазы) либо другими столь же экзотическими методами.

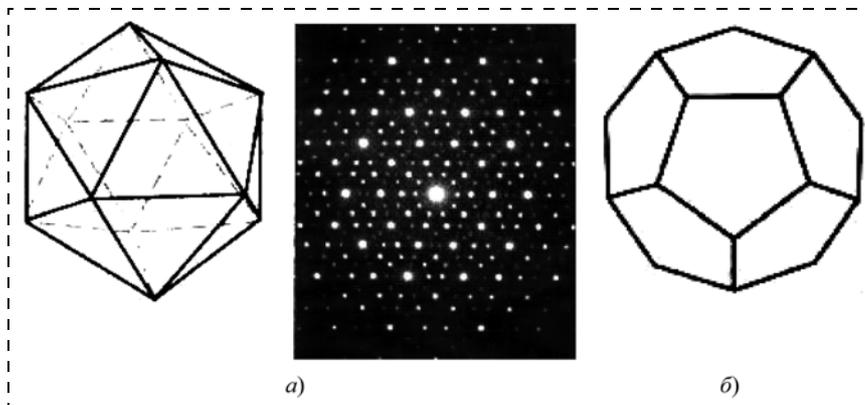
Одним из наиболее распространенных методов получения метастабильных и стабильных квазикристаллических фаз является быстрая закалка расплава со скоростью охлаждения порядка  $10^6$  К/с.

Увенчались успехом метод выращивания квазикристаллов из расплава по методу Чохральского, квазикристаллы были обнаружены и при обработке сплавов лазером. Для получения метастабильных и стабильных квазикристаллических фаз в сплавах применяется и метод механического сплавления, а также метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

При этом в сплавах обнаруживались зерна в форме додекаэдра — симметричного тела с 12 гранями в форме правильных пятиугольников (поэтому эту фигуру нередко называют пентагон-додекаэдр). Более того, икосаэдрической симметрии соответствовало не только зерно, имевшее размер порядка сотен микрометров, но и расположение атомов на более элементарном структурном уровне.

Одними из наиболее популярных и широко исследуемых систем, в которых наблюдается образование квазикристаллических структур, являются композиции на основе алюминия (сплавы системы алюминий — переходный металл (Ni, Co, Fe, Cu, Mn)).

Анализ данных показал, что при определении кристалла в данном случае вместо элементарной



**Рис. 1.** Характер рентгеновской дифракционной картины квазикристалла:  
 а — икосаэдр (слева) и рентгеновская дифракционная картинка квазикристалла;  
 б — додекаэдр

ячейки, повторяющейся в пространстве строго периодическим образом, ключевым понятием становится дальний порядок. Локальная структура определяется уже не только ближайшими соседями, но и более удаленными частицами.

Согласно современным представлениям была разработана модель получения кристаллической структуры квазикристалла. В основе этой модели лежит понятие "базового элемента".

В сплаве системы Al—Mn, согласно этой модели, внутренний икосаэдр из атомов алюминия окружен внешним икосаэдром из атомов марганца. Икосаэдры связаны октаэдрами из атомов марганца. В "базовом элементе" имеется 42 атома алюминия и 12 атомов марганца. В процессе затвердевания происходит формирование "базовых элементов", которые быстро соединяются между собой жесткими октаэдрическими "мостиками". Базовая ячейка состоит из центрального икосаэдра из атомов алюминия, окруженного вторым икосаэдром, вдвое большим, из атомов марганца, на сторонах которого помещены икосадожекаэдры из атомов алюминия. В промежутках между ячейками расположены дополнительные атомы алюминия. Ячейки связаны между собой октаэдрическими мостиками, которые соединяют треугольники из марганца в одной ячейке с треугольниками в соседних ячейках. Напомним, что гранями икосаэдра являются равносторонние треугольники. Чтобы образовался октаэдрический мостик из марганца, необходимо чтобы два таких треугольника (по одному в каждой ячейке) приблизились достаточно близко друг к другу и выстроились параллельно. В результате такого физического процесса и образуется квазикристаллическая структура с "икосаэдрической" симметрией. На рис. 2 можно четко видеть ряд пятиугольников, указывающих на пятикратную симметрию икосаэдра.

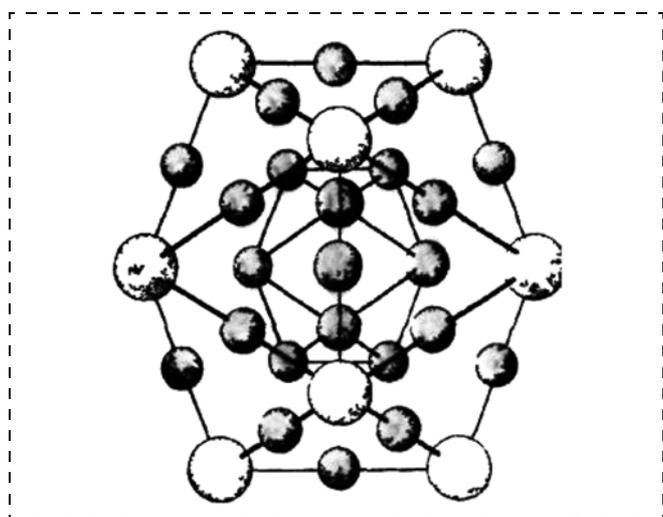


Рис. 2. Квазикристалл Al—Mn.  
Светлые кружки — атомы марганца, темные — алюминия

Наложение давления на расплавленный металл переводит его в состояние, удаленное от равновесного, влияет на упругие межатомные взаимодействия, сжимая атомы металла. При этом объемы пространства, которые неизбежно присутствуют в структурных элементах жидкого состояния, уменьшаются. Установлено [1], что сжимаемость, т. е. относительное уменьшение объема, может достигать 12...13 %.

Цель данного исследования — экспериментально подтвердить возможность получения квазикристаллов при кристаллизации сплавов в условиях наложения давления.

Образцы сплавов были приготовлены плавкой исходных металлических компонентов в индукционной печи в графитовом тигле с последующей кристаллизацией слитков в условиях наложения давления.

Закристаллизовавшиеся слитки имели диаметр 80 мм и длину 150 мм. Эксперименты проводили в условиях наложения давления 400 МПа при температуре 850 °С. В качестве объектов исследования выбраны составы хорошо известных стабильных квазикристаллических фаз на основе алюминия. Состав исследуемых сплавов приведен в табл. 1.

Полученные сплавы исследовали с помощью рентгенодифрактометрического анализа, сканирующей и фрактографической микроскопии. Рентгенограммы снимали на установке D8 ADVANCE фирмы BRUKER в монохроматизированном  $\text{CuK}\alpha$ -излучении. В процессе исследования был изучен фазовый состав и измерен параметр решетки  $a$  (по отражению (422) с точностью  $10^{-4}$  нм).

Образцы для исследований изготавливали в виде порошков и в виде электрополированных шлифов с соответствующим обозначением в названии образцов. Фазовый анализ выполнен с помощью программы EVA и международного банка данных о межплоскостных расстояниях кристаллических фаз PDF 2 (2006 г.). Микроскопические исследования проводили на микроскопе JEM-2000 FX-II фирмы JEOL.

Структура сплава плавки № 4 представлена на рис. 3. Видно, что имеются участки с выделившейся эвтектоидной фазой  $\text{Al}_2\text{Cu}$ , между фрагментом которой располагаются мелкодисперсные квазикристаллические фазы ( $\text{Al}_{181}\text{Mn}$  19,  $\text{Al}_{178}\text{Mn}$  22 и т. п.).

Таблица 1

Состав исследуемых сплавов

№ плавки	Содержание элементов, % масс.						
	Al	Mn	Cu	Zn	Ti	Fe	Mg
4	Осн.	8,43	6,70	0,09	0,14	0,55	0,02
110	Осн.	20,3	0,12	0,01	0,14	0,54	—

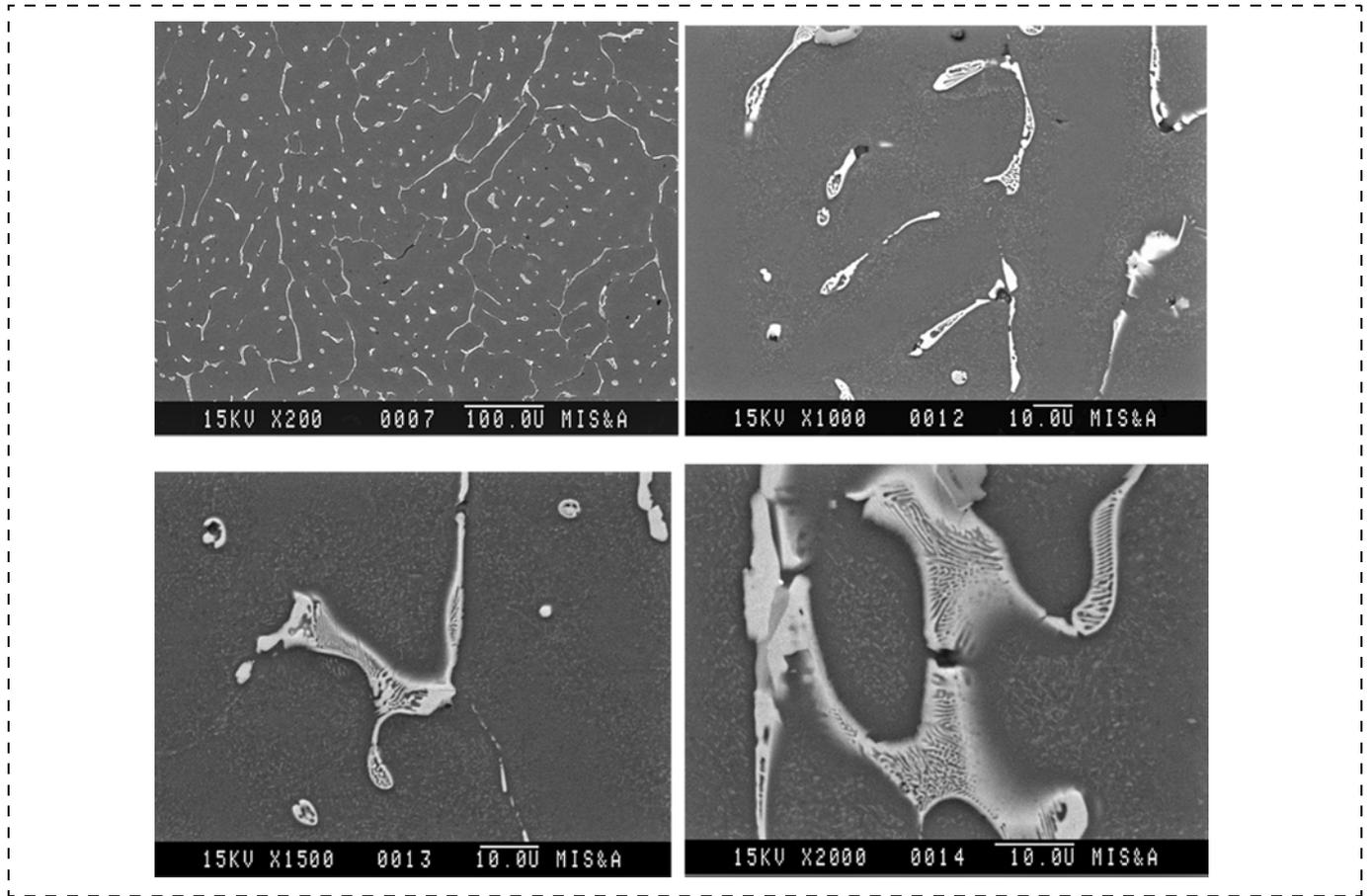


Рис. 3. Микроструктура сплава Al—Cu—Mn (плавка № 4) при разном уровне увеличения

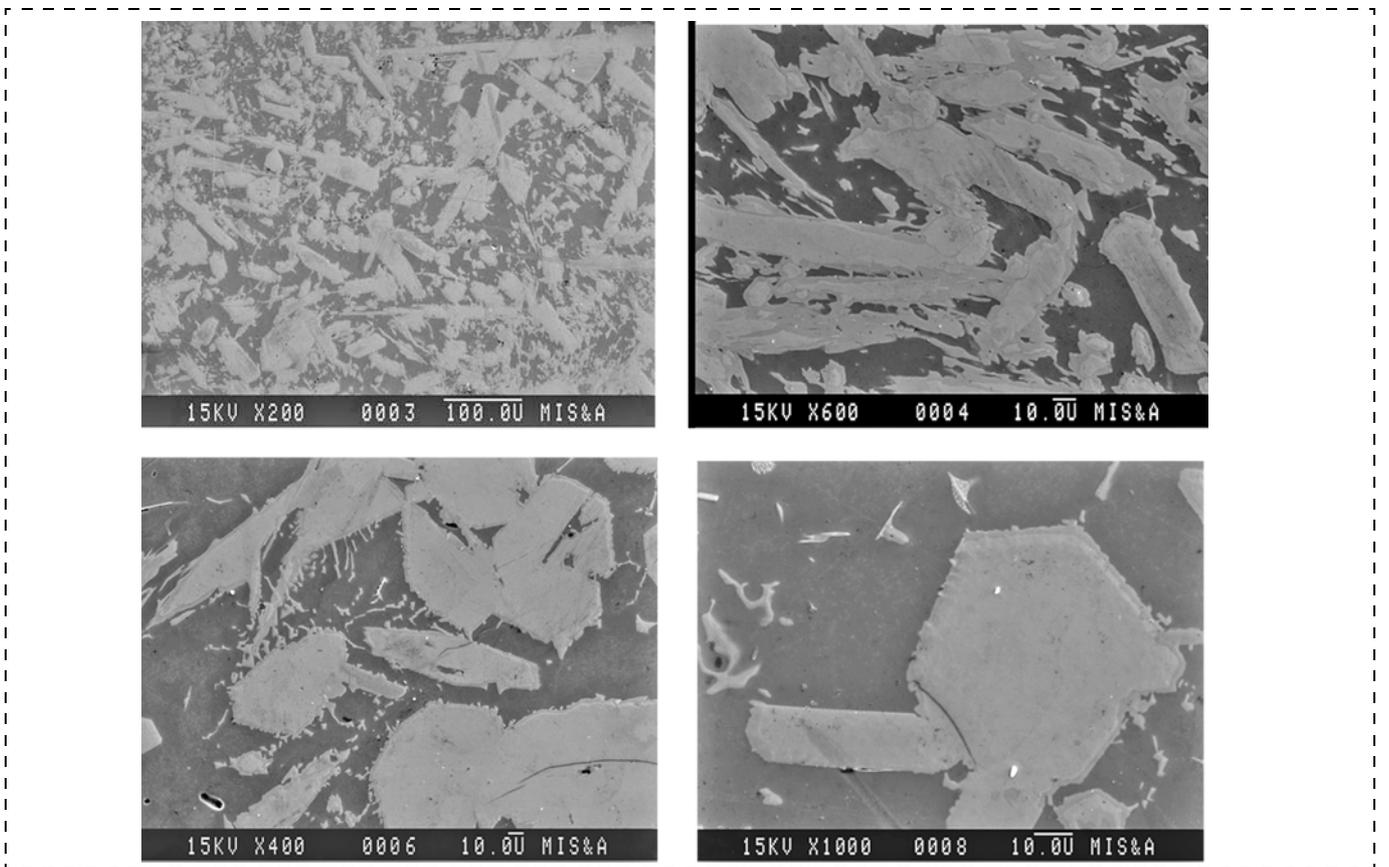


Рис. 4. Микроструктура сплава Al—Mn (плавка 110) при разном уровне увеличения

Механические свойства опытных образцов

Состав сплава	Твердость по Виккерсу, HV	Модуль Юнга E, ГПа	Упругое восстановление R, %
Al—6,7 Cu—8,4 Mn — традиц.	99 ± 10	71,9	6,7
Al—6,7 Cu—8,4 Mn (ЛНД)	145 ± 10	94,5	9,2
Al—0,12 Cu—20 Mn (ЛНД)	360 ± 10	122,46	31,9

Структура сплава плавки № 110 резко отличается от предыдущей. Она представляет собой твердый раствор, в котором наблюдаются ограненные вытянутые кристаллы (рис. 4).

На рентгенограммах образцов рефлексы металлов несколько уширены, но их положение и относительные интенсивности хорошо согласуются с табличными рентгеновскими данными (рис. 5, 6, см. третью сторону обложки).

Из анализа рентгенограмм и сравнения полученных данных с литературными данными следует, что кристаллизация сплавов под давлением приводит к образованию стабильных декагональных квазикристаллических фаз. Причем для первого состава присутствуют только рефлексы Al181Mn 19, Al178Mn 22, Al186Mn 14, а для второго состава — еще и Al16Mn, Al177Mn 23, а также фазы Al19Cu11,5 Al14Cu9. Кроме этого, уменьшается параметр кристаллической решетки.

Проведенные электронно-микроскопические исследования показали, что декагональные кристаллы имеют вид вытянутых декапризм, длина которых составляет 300...400 мкм, а диаметр 30...40 мкм (рис. 7).

Таким образом, полученные экспериментальные данные показывают, что в сплавах, которые кристаллизовались в условиях наложения давления 400 МПа образуются стабильные квазикристаллы.

Очевидно, что данный способ может быть использован и при получении сплавов на основе железа, никеля, меди и т. д. Как отмечалось в работах [1, 2], наложение давления на жидкий металл приводит к возникновению упругих сил отталкивания, а так как давление при кристаллизации остается постоянным, то атомы в кристаллической решетке стремятся выстроиться в определенном порядке. В результате происходит сближение ок-

таэдрических мостиков из марганца. Размеры атомов и средние расстояния между ними в конденсированном состоянии (жидкости и твердые тела) — это величина одного порядка, равная приблизительно 0,3 нм. Изменение параметра решетки, наблюдаемое в исследуемых сплавах, показывает, что произошло образование новых связей между атомами с образованием определенного дальнего порядка. Хотя изменения происходят на наноуровне, но их вклад в свойства полученных материалов значителен.

Особенно сильное влияние наблюдается при измерении упругих свойств, что еще раз подтверждает об изменении условий межатомных взаимодействий в сплавах, полученных литьем с наложением давления (ЛНД), в сравнении со сплавами, полученными традиционным способом.

Данные по упругим характеристикам приведены в табл. 2.

Достоверность и обоснованность повышения свойств наноструктурированных сплавов Al—Mn и Al—Cu—Mn подтверждается сравнением со свойствами сплава того же состава, изготовленного по традиционной технологии.

## Выводы

♦ Формирование нанокристаллических структур в условиях объемного сжатия связано с необходимостью выполнения определенным образом спланированных экспериментов. Для того чтобы определить оптимальное сочетание переменных параметров (состав, температура, давление, время по критерию достижения требуемого уровня свойств), необходимо установить частные зависимости с варьированием одним, двумя и более параметрами при фиксированных значениях других параметров.

Значительный интерес представляют зависимости, устанавливающие связь между давлением и свойствами чистых металлов (Al, Cu, Fe, Ni и др.), а также двойных, тройных и более сложных по составу сплавов.

♦ На примере сплавов систем Al—Mn и Al—Cu—Mn видно, что в условиях наложения давления межатомные взаимодействия приводят к изменению ближнего и дальнего порядка в располо-

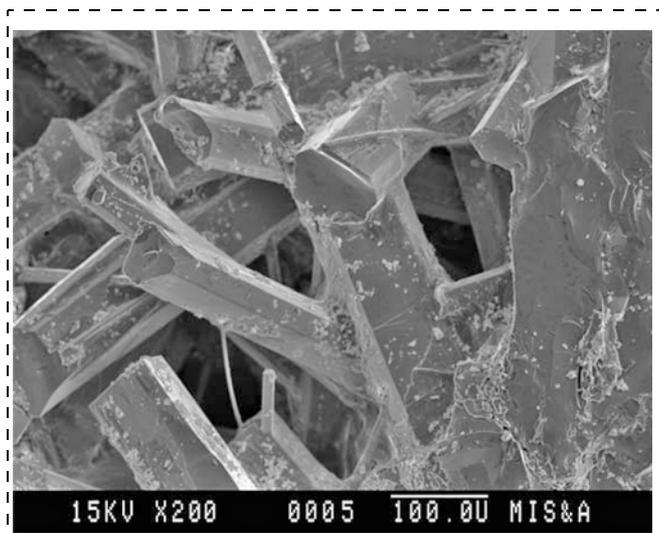


Рис. 7. Микрофотография декагональных квазикристаллов состава Al181Mn 19

жении атомов, к формированию декагональных кристаллов, имеющих вид вытянутых декапризм.

Полученные результаты дополняют представления о влиянии давления, высказанные в работах [1, 2]. На дилатограммах и кривых изменения теплоемкости зафиксированы характерные пики, причина появления которых на основании исследований изменения наноструктуры в зависимости от режимов термовременной обработки связана с выделением из пересыщенного твердого раствора избыточных фаз.

♦ Сплавы, полученные по технологии ЛНД, имеют более высокие упругие свойства и твердость по сравнению со сплавами, полученными по традиционной технологии.

#### Список литературы

1. Коростелев В. Ф., Хромова Л. П., Рассказчиков А. Н. Управление процессом кристаллизации сплава В95 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 8. С. 18–24.
2. Коростелев В. Ф., Хромова Л. П. Исследование межатомных взаимодействий с использованием данных об изменениях физико-механических свойств сплавов // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 2. С. 8–13.

УДК 621.3.088.23

**Е. А. Печерская**, д-р техн. наук, доц.,  
e-mail: peal@list.ru,  
**А. М. Метальников**, канд. техн. наук, доц.,  
зам. зав. каф.,  
e-mail: micro@pnzgu.ru,  
**А. В. Бобошко**, аспирант,  
e-mail: lestagros@gmail.com,  
ГОУ ВПО "Пензенский государственный  
университет

## СТРУКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРОВ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

*Поступила в редакцию 17.02.2011*

*Приведена обобщенная структура многоагентной системы поддержки исследований материалов нанотехнологии на примере сегнетоэлектриков. Рассмотрено информационное наполнение многоцелевых банков знаний, служащее для обработки данных и принятия решений в процессах исследований.*

**Ключевые слова:** сегнетоэлектрик, модель, интеллектуальная система, метод измерений, погрешность, принятие решений

### Введение

При проведении инновационных исследований сегнетоэлектрических материалов, применяемых в изделиях микро- и наносистемной техники, важна проработка методов принятия управленческого решения (выбор метода измерений, моделирования, обработки информации) по причине высокой стоимости применяемых методов и оборудования, а также требований высокой точности результатов измерений. Решению этой проблемы способствуют центры коллективного пользования оборудованием и технологиями в области нанотехнологии, а также государственный учет результатов научных

исследований, выполняемых за счет средств федерального бюджета, который регламентируется документами [1, 2]. Государственный учет результатов интеллектуальной деятельности включает в себя описание объекта учета с указанием индивидуальных особенностей, позволяющих однозначно его идентифицировать и отличить от других объектов учета, и внесение данных об объекте учета в единый реестр. Указанный учет призван не допустить дублирование отдельных этапов различных НИР в рамках региона (страны в целом) и в конечном итоге снизить риск низкой эффективности НИР как по техническим (в научном аспекте вероятно утрата новизны исследований), так и по экономическим показателям, что может негативно сказаться на целевом выделении средств для развития высокотехнологичных отраслей. Данные учета могут использоваться при составлении аналитического обзора методов принятия решений в ситуациях, аналогичных анализируемой задаче.

Помимо существующего учета результатов интеллектуальной деятельности в рамках Программы развития нанотехнологии в Российской Федерации до 2015 года (далее Программа) предусмотрено создание национальной нанотехнологической сети (ННС), которая призвана обеспечить автоматизированный информационный обмен между участниками ННС и профильными системами, оперирующими первичной и производной технологической, аналитической, экономической и бизнес-информацией, а также интеграцию с разрабатываемой в рамках Программы системой обеспечения информационной безопасности ННС.

С учетом изложенного представляется актуальным создание системы интеллектуальной поддержки исследований материалов, структура которой рассмотрена в данной статье на примере сегнетоэлектриков. Она способствует решению задач по созданию ННС в части разработки единых развиваемых форматов моделей данных и метаданных, а также прикладных процессов накопления и

обновления первичных и производных информационных ресурсов различных баз данных ННС, включая формирование баз знаний.

### Структура интеллектуальной системы исследования сегнетоэлектриков

Разработка системного подхода к исследованию свойств материалов, применяемых в изделиях наноэлектроники, позволяет решать задачи, обеспечивающие создание единой методики исследования перспективных материалов и измерения их свойств с заданной точностью. С учетом большого числа наименований материалов согласно их классификациям эффективное исследование возможно при создании многоагентной системы интеллектуальной поддержки. Ее цель — повышение эффективности исследований посредством использования разработанных на основе системного анализа процесса исследования материалов ряда алгоритмов принятия решений в подсистемах [3]: материалов; экспериментального исследования; теоретического исследования; элементной базы изделий микро- и наносистемной техники. Под интеллектуальным агентом здесь подразумевается система, функционирующая в пределах условно выделенной структурной единицы (научной лаборатории, подразделения, кафедры, института и т. д.), где проводятся НИР по проблемной области. Фактически для пользователя системы интеллектуальный агент представляет собой приложение, которое включает в себя базы данных и многоцелевые банки знаний, созданные с применением средств моделирования и построения хранилищ данных, а также интеллектуальные средства поддержки принятия решений для осуществления запросов и построения отчетов.

Каждый интеллектуальный агент содержит:

- совокупность совместимых программных средств по обработке информации, поступающей от подсистемы материалов, подсистем экспериментального исследования и моделирования [3];
- ряд баз данных (БД), баз знаний (БЗ), объединенных в многоцелевой банк знаний: по исследуемым объектам (сегнетоэлектрическим материалам), применяемым моделям, методам и средствам экспериментального исследования, методам теоретического исследования, элементам (компонентам) изделий микро- и наносистемной техники.

Проблемам создания информационных ресурсов, предназначенных для поддержки полного цикла обработки информации в профессиональной, научной и образовательной деятельности посвящен ряд работ [4—6]. Для обеспечения процесса принятия согласованного решения комплекса задач некоторой предметной области известны информационные системы, например БТЗ [7], НМКВ [8]. Такие системы часто называют специализированными банками, или фабриками знаний.

Они объединяют все необходимые источники информации и содержат набор совместимых программных средств, предназначенных для решения ряда прикладных задач. Однако эти системы замыкаются на своих предметных областях, вследствие чего оказываются не способными взаимодействовать друг с другом для решения задач, возникающих на стыке научных направлений. Например, работы [9, 10] посвящены созданию компьютерной информационной системы на базе инструментальных средств Delphi, интегрирующей комплекс знаний смежных предметных областей: физики, техники, технологии — необходимых для квалифицированной разработки приборов оптико-электронных приборов.

В работе [3] показано, что интегрированные информационные системы, такие как КА2 [11], OBSERVER [12], объединяют распределенные и разнородные информационные ресурсы различных предметных областей. Однако целью их создания является выполнение лишь прикладных запросов пользователей к этим информационным ресурсам, а задача поддержки полного цикла обработки информации не рассматривается. Поэтому их программные средства не учитывают специфики работы инженеров знаний, экспертов и специалистов предметных областей.

Ниже рассмотрена структура предлагаемой системы. Многоцелевой банк знаний (МБЗ) представляет собой информационный ресурс в виде совокупности специализированных банков знаний (СБЗ) для поддержки научных исследований, образовательной и практической деятельности в области исследования сегнетоэлектрических материалов. В составе МБЗ можно выделить:

- подсистему администрирования;
- подсистему программного наполнения;
- подсистему информационного наполнения.

Номенклатура СБЗ и БД, входящих в состав информационного наполнения МБЗ, изображена на рис. 1, где не отражены оболочка информацион-



Рис. 1. Структура информационного наполнения многоцелевых банков знаний интеллектуальных агентов. СИ — средства измерения

ного наполнения, подсистема программного наполнения, подсистема администрирования банка знаний.

Соответственно подразумевается взаимодействие информационного наполнения с перечисленными подсистемами в пределах каждого интеллектуального агента. На рис. 1 также отмечены подсистемы, к которым относятся базы знаний и данных согласно информационно-логической модели, подробно рассмотренной в работе [3]. Базы знаний индивидуальны для интеллектуальных агентов, поскольку они свидетельствуют о научно-исследовательских работах, проводимых в различных структурных подразделениях. Базы данных стандартизированных средств измерений, измерительных компонентов и их стоимости, база данных компонентов микро- и наносистемной техники на основе сегнетоэлектриков являются общими для различных интеллектуальных агентов и имеют к банку данных одинаковый уровень доступа.

В ряде случаев возможно создание многоцелевого банка знаний, также единого для всех интеллектуальных агентов, в этом случае интеллектуальные агенты имеют уникальные подсистемы программного наполнения, которые идентифицируют их научно-исследовательскую деятельность в области сегнетоэлектриков. Если какие-либо интеллектуальные агенты имеют одинаковые по содержанию подсистемы информационного и программного наполнения, то подлежит анализу целесообразность их функционирования как самостоятельных структурных подразделений, для чего могут применяться экспертные методы принятия решений, например метод решающих матриц [13].

Подсистема программного наполнения служит для обработки информации и решения задач управления научно-исследовательской работой в соответствии с техническим заданием НИР по исследованию сегнетоэлектрических материалов. Она реализует абстрактные взаимосвязи между подсистемами процесса исследования сегнетоэлектриков для изделий микро- и наносистемной техники в зависимости от поставленной задачи:

- анализа свойства материалов, включая получение количественных характеристик;
- синтеза материалов с заданными характеристиками.

Разработанные алгоритмы позволяют осуществить решение ряда задач.

1. Построение графовой модели сегнетоэлектрика (рис. 2) в целях выбора оптимальной совокупности функциональных зависимостей, отвечающих критерию максимальной информативности при минимальном числе составляющих [12]. Вершины ориентированного графа отображают параметры (напряженность электрического поля  $E$ , поляризованность  $P$ , температуру  $T$ , механическое напряжение  $x$ , механическую деформацию  $X$ ).

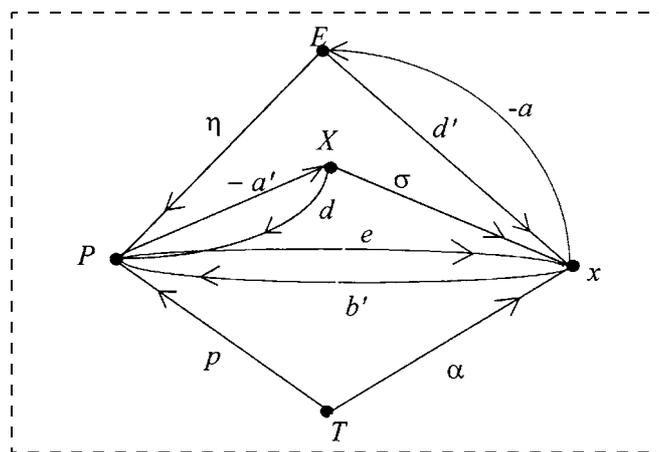


Рис. 2. Модель сегнетоэлектрика в виде ориентированного графа

Дуги направлены от интенсивного параметра к экстенсивному и характеризуют диэлектрические свойства сегнетоэлектрика ( $\eta$  — диэлектрическая восприимчивость,  $-a$  — константа пьезоэлектрического напряжения,  $d'$  — постоянная пьезоэлектрического эффекта,  $\sigma$  — коэффициент упругости,  $e$  — коэффициент пьезоэлектрического напряжения,  $b'$  — коэффициент обратного пьезоэлектрического напряжения,  $\alpha$  — коэффициент теплового расширения,  $p$  — пьезоэлектрический коэффициент,  $d$  — коэффициент пьезоэлектрической деформации,  $-a'$  — коэффициент обратной пьезоэлектрической деформации).

Приложение к модели теории графов позволило разработать методику выбора оптимальной по сформулированному выше критерию совокупности функциональных зависимостей физического объекта, множество свойств которого выражается косвенно посредством параметров. Апробация методики на сегнетоэлектриках позволила установить, что в общем случае для исключения информационной избыточности оптимально измерять зависимости  $P(X)$ ,  $P(E)$ ,  $P(T)$ ,  $x(E)$  для материалов с невыраженными пьезоэлектрическими свойствами необходимо и достаточно измерение функций  $P(E)$  и  $P(T)$ .

2. На основе эквивалентной электрической модели сегнетоэлектрика расчет погрешностей, обусловленных влиянием сопротивления и емкости контактов сегнетоэлектрического образца, а также методических погрешностей, вызванных невозможностью фиксации точных значений параметров в условиях эксперимента [15].

3. Принятие управленческого решения по выбору метода и средств измерений по технико-экономическим требованиям. Предложенные методы и средства измерений диэлектрических параметров сегнетоэлектриков, основанные на модификациях метода Сойлера—Тауэра, отражении импульсного сигнала генератора от выхода коаксиального кабеля с нагрузкой в виде конденсатора с исследуемым

сегнетоэлектриком, систематизированы в работах [14, 16]. Оптимальный метод и средства измерений для заданных условий выбирают в соответствии с алгоритмами принятия решений, основанными на применении теории нечетких множеств, методов векторной оптимизации, критериев среднего выигрыша и максиминного [17, 18].

4. Обработка информации в подсистеме экспериментального исследования сегнетоэлектриков. Данная задача включает в себя оценивание погрешностей измерения и моделирования функциональных зависимостей параметров сегнетоэлектриков [14] и установление фазового состояния сегнетоэлектрика и оценивание адекватности принятого решения [19].

5. Обработка информации в подсистеме теоретического исследования сегнетоэлектриков [12], которая подразумевает моделирование полевых зависимостей параметров сегнетоэлектриков (методом Прейзаха); моделирование температурных зависимостей между свойствами сегнетоэлектриков (основанное на термодинамической теории) [20]; моделирование вольт-фарадных характеристик в зависимости от толщины сегнетоэлектрических тонких пленок [21].

## Заключение

Предложена структура информационного наполнения многоцелевых банков знаний интеллектуальной системы по исследованию электрофизических параметров сегнетоэлектриков, которая охватывает фундаментальные и прикладные исследования указанной предметной области. Предлагаемая многоагентная система интеллектуальной поддержки позволяет решать следующие задачи:

- обеспечение информационной поддержки при проведении обзорных исследований по предметным областям;
- обработка информации и принятие решения в процессе исследований;
- анализ технико-экономических показателей НИР, в частности, эффективности деятельности структурных подразделений по исследованию сегнетоэлектриков, а также в перспективе — в целом состояния указанных исследований по отрасли.

## Список литературы

1. **Постановление** Правительства РФ от 4 мая 2005 г. № 284 "О государственном учете результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ гражданского назначения".
2. **Постановление** Правительства РФ от 26.02.2002 г. № 131 "О государственном учете результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ военного, специального и двойного назначения".

3. **Аверин И. А., Печерская Е. А., Соловьев В. А.** Исследование электрофизических свойств сегнетоэлектриков: системные связи и закономерности. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2009. 136 с.

4. **Орлов В. А., Клещев А. С.** Компьютерные банки знаний. Многоцелевой банк знаний // Информационные технологии. 2006. № 2. С. 2—8.

5. **Титоренко Г. А.** Информационные технологии управления. М.: Юнити, 2007. 439 с.

6. **Люгер Дж. Ф.** Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем, 4-е изд. М.: Издательский дом "Вильямс", 2005. 864 с.

7. **Мухин А. В., Спиридонов О. В.** Концепция построения и структура банка знаний для технологического проектирования и управления производством // Портал автоматизированных систем управления технологическими процессами. URL: <http://asutp.hl.ru/st2h.shtml>

8. **Sterling W.** The National Medical Knowledge Bank // Proc. of the 24th VLDB Conference. New York City. 1998.

9. **Колдаев И. М., Смирнова З. П.** Автоматизированная информационная система для комплексного применения знаний оптико-электроники // Матер. IX Междунар. конф.-выставки "Информационные технологии в образовании", 9—12 ноября 1999, Москва. Ч. II. М.: МИФИ, 1999. С. 313—315.

10. **Колдаев И. М.** Комплексное представление знаний приборостроения для автоматизированной информационной системы // Матер. III Междунар. научно-практ. конф. "Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права", книга "Информатика". М.: МГАПИ, 2000. С. 63—67.

11. **Staab S. and Maedche A.** Knowledge portals — ontologies at work // AI Magazine. Summer 2001. Vol. 21 (2). P. 63—75.

12. **Mena E., Kashyap V., Sheth A., Illarramendi A.** Observer: an approach for query processing in global information systems based on interoperation across pre-existing ontologies // Cooperative Information Systems, 1996. Proceedings., First IFCIS International Conference, 19—21 Jun. 1996. P. 14—25.

13. **Системный анализ и принятие решений:** Словарь-справочник: учеб. пособие для вузов / Под ред. В. Н. Волковой, В. Н. Козлова. М.: Высш. шк. 2004. 616 с.

14. **Печерская Е. А.** Методы и средства исследования активных диэлектриков для микроиндустрии: системный подход. Пенза: Информационно-издательский центр ПензГУ, 2008. 130 с.

15. **Печерская Е. А.** Метрологические аспекты исследования активных диэлектриков для микро- и микроиндустрии // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 7. С. 41—45.

16. **Печерская Е. А.** Применение метода Сойера—Тауэра и его модификаций для измерения электрических параметров сегнетоэлектриков // Измерительная техника. 2007. № 10. С. 54—58.

17. **Печерская Е. А.** Модификация метода векторной оптимизации выбора оптимальной альтернативы // Методы создания, исследования микро-, наносистем и экономические аспекты микро-, нанoeлектроники: сб. трудов II научно-технической конференции. Пенза, 2009. С. 241—244.

18. **Печерская Е. А.** Модификация критерия среднего выигрыша для выбора оптимальной измерительной установки // Математическое и компьютерное моделирование естественнонаучных и социальных проблем: сб. статей III Междунар. науч.-техн. конф. молодых специалистов, аспирантов и студентов. Пенза, 2009. С. 88—91.

19. **Печерская Е. А.** Классификационные модели фазового состояния сегнетоэлектриков // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 6. С. 16—19.

20. **Печерская Е. А.** Моделирование температурных зависимостей параметров сегнетоэлектриков с фазовым переходом второго рода // Порядок, беспорядок и свойства оксидов: сб. статей XI Международного, междисциплинарного симпозиума. Ростов-на-Дону. 2008. Ч. 2. С. 48—50.

21. **Берман Л. С.** Моделирование вольт-фарадных характеристик сегнетоэлектрика // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. Вып. 12. С. 1436—1439.

Г. В. Козлов, ст. науч. сотр.,  
 З. Х. Афшагова, ассистент,  
 А. Х. Маламатов, д-р техн. наук, проф.,  
 Кабардино-Балкарский государственный  
 университет, г. Нальчик,  
 e-mail: i\_dolbin@mail.ru

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НАНОКОМПОЗИТОВ ПОЛИЭТИЛЕН/КАРБОНАТ КАЛЬЦИЯ

Поступила в редакцию 08.02.2011

*Показано, что увеличение степени кристалличности для нанокomпозитов полиэтилен/карбонат кальция обусловлено повышением статистической гибкости цепей полимерной матрицы. Последний эффект является результатом изменения структуры нанокomпозита при введении нанонаполнителя.*

**Ключевые слова:** нанокomпозит, полиэтилен, карбонат кальция, кристаллизация, гибкость полимерной цепи

### Введение

В настоящее время хорошо известны достаточно сильные и разнообразные изменения кристаллической структуры полимеров, происходящие при введении в них разного рода наполнителей [1]. Как правило, эти изменения описываются в рамках кристаллической морфологии полимеров. Однако в последнее время разработана фрактальная модель, которая учитывает всю сложность структуры полимеров. Предполагается, что изменения происходят не только на надмолекулярном уровне, но и на молекулярном и топологическом уровнях структуры [2]. Одновременно нужно учитывать, что вариация морфологии кристаллической фазы влечет за собой изменения структуры некристаллических областей [3]. Введение в аморфно-кристаллический полимер дисперсных наполнителей (нанонаполнителей), как правило, приводит к увеличению степени кристалличности полимерной матрицы, поскольку частицы наполнителя служат зародышеобразователями (нуклеаторами) процесса кристаллизации. Такой эффект наблюдался в нанокomпозитах полиэтилен высокой плотности/карбонат кальция (ПЭВП/СаСО<sub>3</sub>) [4, 5]. Поэтому целью настоящей работы является исследование эффективности частиц СаСО<sub>3</sub> в качестве зародышеобразователя на примере нанокomпозитов ПЭВП/СаСО<sub>3</sub>.

### Эксперимент

Исходные данные приняты согласно результатам работ [4, 5]. В качестве матричного полимера использован ПЭВП со среднечисловой и средневесовой молекулярной массой  $1,46 \cdot 10^4$  и  $5,50 \cdot 10^4$ , соответственно. В качестве наполнителя использован порошкообразный СаСО<sub>3</sub>, имеющий размер частиц 1200 и 50...60 нм. Содержание СаСО<sub>3</sub> составляло 5, 10 и 20 масс % [4, 5].

Смешивание ПЭВП и СаСО<sub>3</sub> выполнено на экструдере *Brabender* при температуре 453 К в течение 15 мин при частоте вращения шнека 70 об/мин. Для повышения уровня адгезии полимерная матрица — наполнитель порошкообразный СаСО<sub>3</sub> обрабатывался стеариновой кислотой при содержании последней 8 масс %.

Образцы для испытаний ПЭВП и нанокomпозитов на его основе получены инъекционным литьем при температуре 450...461 К. Испытания на растяжения выполнены на компьютеризированном приборе для испытаний MTS 210 при температуре 293 К и скорости деформации  $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  [4].

Степень кристалличности  $K$  нанокomпозитов ПЭВП/СаСО<sub>3</sub> определена методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) при скорости нагрева 10 К/мин [5].

Для определения эффективности зародышеобразования  $N$  (нуклеации) частицами СаСО<sub>3</sub> использована методика, основанная на применении обычных циклов охлаждения ДСК. Значение  $N$  определено согласно уравнению [4]

$$N = 100 \frac{T_{\text{ка}} - T_{\text{к}}}{T_{\text{к}}^{\text{max}} - T_{\text{к}}}, \quad \%, \quad (1)$$

где  $T_{\text{ка}}$  — температура пика кристаллизации полимера с нуклеатором, т. е. нанокomпозита;  $T_{\text{к}}$  — температура кристаллизации ПЭВП;  $T_{\text{к}}^{\text{max}}$  — оптимальная температура самонуклеации.

### Результаты и обсуждение

Как показали результаты работ [4, 5], введение в ПЭВП как микро-, так и наночастиц СаСО<sub>3</sub> приводит к одновременному увеличению и степени кристалличности  $K$  ( $K = 0,43...0,67$ ), и эффективности нуклеации  $N$  ( $N = 35...52 \%$ ). Отметим, что микрочастицы СаСО<sub>3</sub> диаметром 1200 нм дают более высокие значения  $N$  ( $N = 44...52 \%$ ), а наночастицы СаСО<sub>3</sub> диаметром 50...60 нм дают более высокую степень кристалличности. Определить об-

щую физическую основу этих изменений параметров  $K$  и  $N$  можно в рамках модели [2], согласно которой величина  $K$  зависит от гибкости полимерной цепи и определяется следующим образом:

$$K = 0,32 C_{\infty}^{1/3}, \quad (2)$$

где  $C_{\infty}$  — характеристическое отношение, которое служит показателем статистической гибкости полимерной цепи [6].

Изменение параметра  $C_{\infty}$  при введении в ПЭВП частиц  $\text{CaCO}_3$  можно оценить следующим образом. Для этой цели необходимо рассчитать фрактальную (хаусдорфову) размерность  $d_f$  структуры нанокompозитов, что можно сделать согласно уравнению [7]

$$d_f = (d - 1)(1 + \nu), \quad (3)$$

где  $d$  — размерность евклидова пространства, в котором рассматривается фрактал (очевидно, в нашем случае  $d = 3$ );  $\nu$  — коэффициент Пуассона, оцениваемый по результатам механических испытаний с помощью соотношения [8]

$$\frac{\sigma_T}{E_H} = \frac{1 - 2\nu}{6(1 + \nu)}, \quad (4)$$

где  $\sigma_T$  — предел текучести;  $E_H$  — модуль упругости нанокompозита.

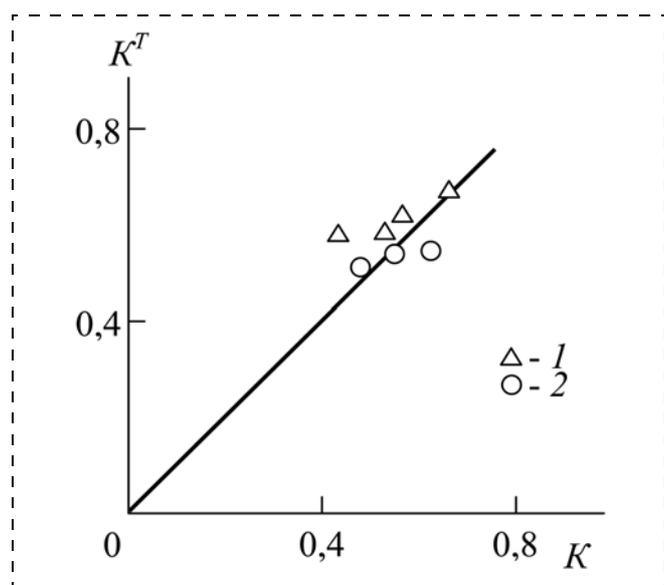


Рис. 1. Сравнение экспериментальных  $K$  и рассчитанных согласно уравнению (2)  $K^T$  значений степени кристалличности для нанокompозитов ПЭВП/ $\text{CaCO}_3$  с размером частиц 1200 нм (1) и 50–60 нм (2)

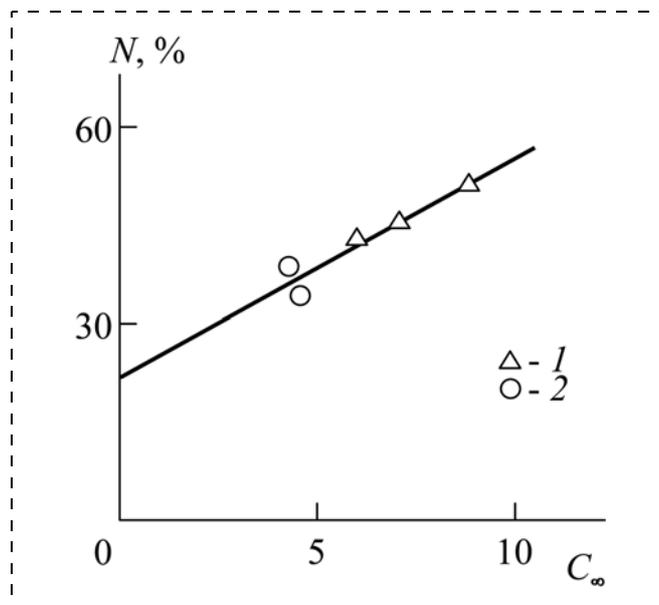


Рис. 2. Зависимость эффективности нуклеации  $N$  от характеристического отношения  $C_{\infty}$  для нанокompозитов ПЭВП/ $\text{CaCO}_3$  с размером частиц 1200 нм (1) и 50–60 нм (2)

Затем можно рассчитать величину  $C_{\infty}$  с помощью следующего уравнения [9]:

$$C_{\infty} = \frac{2d_f}{d(d-1)(d-d_f)} + \frac{4}{3}. \quad (5)$$

Сравнение экспериментальных  $K$  и рассчитанных согласно уравнению (2)  $K^T$  значений степени кристалличности приведено на рис. 1. Как можно видеть, получено достаточно хорошее соответствие теории и эксперимента (среднее расхождение  $K$  и  $K^T$  составляет 10 %). Таким образом, приведенные выше результаты демонстрируют, что изменение степени кристалличности вызвано вариацией гибкости цепи полимерной матрицы, обусловленной введением дисперсного наполнителя (нанонаполнителя).

На рис. 2 приведена зависимость эффективности нуклеации  $N$  от значения характеристического отношения  $C_{\infty}$  для исследуемых нанокompозитов ПЭВП/ $\text{CaCO}_3$ . Как можно видеть, получена линейная корреляция  $N(C_{\infty})$ , которую можно аппроксимировать следующим эмпирическим уравнением:

$$N = 21 + 3,5 C_{\infty}, \% \quad (6)$$

Рассмотрим два предельных случая зависимости  $N(C_{\infty})$ , которые можно получить экстраполяцией указанной зависимости к  $C_{\infty} = 0$  и

$N = 100\%$ . Значение  $C_\infty$  согласно уравнению (5) не может быть равным нулю (для этого размерность  $d_f$  должна быть отрицательной, что не имеет физического смысла) и при  $d_f = 0$  ее минимальное значение составляет  $4/3$ . Таким образом, из графика рис. 2 следует, что минимальное значение эффективности нуклеации для  $\text{CaCO}_3$ , модифицированного стеариновой кислотой, в матрице ПЭВП составляет  $\sim 26\%$ . Согласно определению [10], выражение для величины  $C_\infty$  можно записать следующим образом:

$$C_\infty = \frac{\langle R_g^2 \rangle}{n \langle l_0^2 \rangle}, \quad (7)$$

где  $\langle R_g^2 \rangle$  — радиус инерции молекулы;  $n$  и  $\langle l_0 \rangle$  — число и средняя длина скелетной связи молекулы, соответственно.

Условие  $d_f = 0$  при  $d = 3$  справедливо для точечного объекта [11]. Это означает, что в уравнении (7)  $n = 1$  и тогда  $C_\infty = \langle R_g^2 \rangle / \langle l_0^2 \rangle$ , где  $l_0 = 1,54 \text{ \AA}$  для полиэтиленов [12]. При минимальном значении  $C_\infty = 4/3$  и  $l_0 = 1,54 \text{ \AA}$  значение  $R_g = 1,778 \text{ \AA}$  или диаметр такой низкомолекулярной частицы будет равен  $\sim 3,56 \text{ \AA}$ , что является типичным размером для такого вида частиц.

Согласно уравнению (6), при  $N = 100\%$  величина  $C_\infty = 22,6$  и тогда расчет по уравнению (5) даст соответствующую указанному значению  $C_\infty$  величину  $d_f = 2,954$ . Это значение  $d_f$  практически точно соответствует максимальной для реальных твердых тел, т. е. для идеальных каучуков, фрактальной размерности  $d_f = 2,95$  [7]. Следовательно, уравнение (6) включает весь структурный диапазон для полимерных материалов — от низкомолекулярных частиц (например мономеров) до идеальных каучуков ( $d_f = 0 \dots 2,95$ ).

## Выводы

Таким образом, результаты настоящего сообщения показали, что увеличение степени кристалличности нанокompозитов ПЭВП/ $\text{CaCO}_3$  независимо от размера частиц дисперсного наполнителя обусловлено повышением статистической гибкости полимерной цепи по сравнению с исходным матричным полимером. Указанное изменение молекулярных характеристик вызвано вариацией структуры нанокompозита вследствие введения наполнителя. Эффективность нуклеации частицами  $\text{CaCO}_3$  для ПЭВП варьируется в пределах  $26 \dots 100\%$ , зависит также от гибкости полимерной цепи и охватывает весь возможный структурный диапазон полимерных материалов.

## Список литературы

1. Соломко В. П. Наполненные кристаллизующиеся полимеры. Киев: Наукова думка, 1980. 264 с.
2. Алоев В. З., Козлов Г. В. Физика ориентационных явлений в полимерных материалах. Нальчик: Полиграфсервис и Т, 2002. 288 с.
3. Козлов Г. В., Заиков Г. Е. Механизмы формирования локального порядка в структуре аморфного состояния полимеров // Известия КБНЦ РАН. 2003. № 1 (9). С. 54—57.
4. Tanniru M., Misra R. D. K. On enhanced impact strength of calcium carbonate-reinforced high density polyethylene composites // Mater. Sci. Engng. 2005. V. 405A, N 1. P. 178—193.
5. Deshmane C., Yuan Q., Misra R. D. K. On the fracture characteristics of impact tested high density polyethylene-calcium carbonate nanocomposites // Mater. Sci. Engng. 2007. V. 452—453A, N 3. P. 592—601.
6. Будтов В. П. Физическая химия растворов полимеров. СПб.: Химия, 1992. 384 с.
7. Баланкин А. С. Синергетика деформируемого тела. М.: Изд-во Министерства Обороны СССР, 1991. 404 с.
8. Козлов Г. В., Сандитов Д. С. Ангармонические эффекты и физико-механические свойства полимеров. Новосибирск: Наука, 1994. 261 с.
9. Kozlov G. V., Zaikov G. E. Structure of the Polymer Amorphous State. Utrecht-Boston: Brill Academic Publishers, 2004. 465 p.
10. Wu S. Chain structure and entanglement // J. Polymer Sci.: Part B: Polymer Phys. 1989. V. 27, N 4. P. 723—741.
11. Федер Ф. Фракталы. М.: Мир, 1991. 256 с.
12. Aharoni S. M. On entanglements of flexible and rodlike polymers // Macromolecules. 1983. V. 16, N 9. P. 1722—1728.

УДК 621.38

**В. В. Аравин,**

Войсковая часть 35533,

**В. Д. Вернер,** д-р физ.-мат. наук, проф.,

**А. Н. Сауров,** чл.-корр. РАН,

НПК "Технологический центр" МИЭТ,

e-mail: V. Verner@tcen.ru,

**П. П. Мальцев,** д-р техн. наук, проф., директор,  
ИСВЧПЭ РАН

## МЭМС ВЫСОКОГО УРОВНЯ — ВОЗМОЖНЫЙ ПУТЬ РАЗВИТИЯ МЭМС В РОССИИ

*Поступила в редакцию 18.02.2011*

*На основе анализа тенденций развития МЭМС предлагается использование концепции МЭМС высокого уровня как ведущего направления разработок и производства МЭМС в России.*

**Ключевые слова:** МЭМС, производство, интегральные схемы

Производство технических изделий разделено на две группы: массовое производство и малосерийное (штучное) производство. Следующая градация связана с отраслевым признаком основных изделий производства (авиация, автотранспорт, вычислительная техника и т. д.). В микроэлектронике, как отрасли, поставляющей комплектующие изделия для других отраслей, эта градация была дополнена такими понятиями, как интегральные схемы (ИС) широкого применения и заказные ИС. Заказные ИС предназначены для применений, определенных заранее заказчиком. Преодолеть последнее ограничение позволили так называемые полузаказные ИС, которые окончательно специализируются непосредственно самим заказчиком аппаратно или программно. Это дает возможность существенно увеличить серийность производства, снизить цену ИС.

Любая специализация удорожает изделие, но вносит дополнительные характеристики относительно серийной продукции и, следовательно, дает дополнительные преимущества изготовителю относительно конкурентов. Ситуация особенно обостряется при тенденции монополизации массового производства. Именно такая ситуация создалась в настоящее время в микроэлектронной промыш-

ленности вследствие существенного удорожания производственных мощностей и НИОКР, обеспечивающих производство новых поколений КМОП ИС. Это направление развития электроники обычно называют "Больше Мура" [1].

Неизбежный подход этого направления к пределам классической электроники привел к формированию двух других направлений: "После КМОП" и "Больше чем Мур". Если содержание первого выражается в исследовании различных новых типов приборов, то второе связано с возможностью дополнить достижения микроэлектроники другими типами изделий, расширяющими возможности их применений. Одним из таких типов изделий служат МЭМС. Если первоначально главным элементом МЭМС был электромеханический элемент, то в результате развития он во все большей степени интегрируется с микроэлектронными элементами ИС и поэтому действительно становится одним из направлений развития микроэлектроники.

Вместе с тем, уже достаточно давно сложился самостоятельный рынок МЭМС и на нем проходят процессы, аналогичные процессам на рынке ИС, т. е. концентрация производства отдельных типов массовых МЭМС в рамках небольшого числа фирм. Эти процессы ускоряются при объединении фирм в отдельные альянсы. Движущей силой на рынке массовых МЭМС, как и ИС, является цена, низкое значение которой часто служит препятствием выхода на рынок новой малой фирме. Теоретически такая возможность выхода существует ввиду наличия в областях ИС и МЭМС системы обслуживания "fabless" и "fab". Однако практически проще первоначально рассчитывать на одного потребителя или их небольшую группу. В этом случае характеристики предлагаемого изделия должны отличаться от характеристик массового изделия, т. е. речь идет об аналогии с заказными ИС. Для таких МЭМС в англоязычной литературе используются два термина: "For high performance MEMS applications" и "High-value MEMS". Мы пытаемся объединить их русским термином: "МЭМС высокого уровня (МЭМС-ВУ)". В качестве примеров, поясняющих содержание терминов, обычно приводят области применения таких МЭМС (аэрокосмическая индустрия, медицина и т. д.). Хотя МЭМС может быть датчиком или актюатором, для дальнейшего рассмотрения ограничимся датчиками.

Большинство датчиков предназначено не для однократного действия (как акселерометр подушки безопасности), а для ряда последовательных измерений, т. е. мониторинга изменений внешнего воздействия. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать датчик, как часть системы мониторинга. Косвенным образом МЭМС-ВУ можно определить как МЭМС, технические характеристики которой повышают параметры однотипного МЭМС массового применения. В перечень признаков-характеристик могут быть включены:

- условия среды применения (температура, давление, влажность, состав и природа среды и т. д.);
- повышенная точность контроля измеряемых параметров;

- более высокая надежность и время эксплуатации;
- более низкое энергопотребление, возможность восполнения энергии;
- наличие самотестирования, коррекции или дублирования в течение срока эксплуатации;
- возможности включения в различные сетевые структуры;
- для беспроводных систем частоты и дистанции связи, возможности самоорганизации или изменения конфигурации сети.

Улучшенные характеристики могут быть достигнуты непосредственно на уровне чувствительного элемента или функциональных блоков сенсорной электроники (рис. 1) или блоков беспроводной передачи сигнала (рис. 2), или аппаратного



Рис. 1. Функциональные блоки датчика

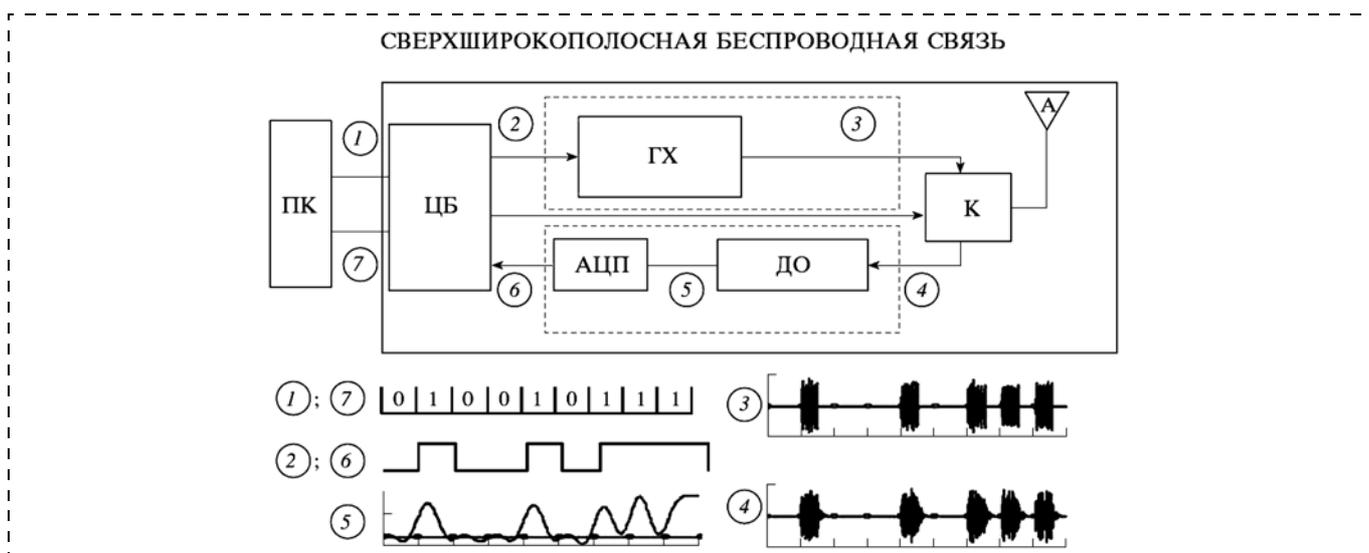


Рис. 2. Структура прямохаотического приемопередатчика (ППП) и фрагменты сигнала в различных точках системы:

1, 7 — на входе и выходе цифровой платы ППП, соединенной с персональным компьютером (ПК); 2, 6 — на выходе и входе цифрового блока (ЦБ), управляющего генератором хаоса (ГХ), ключом (К) и принимающего сигнал от аналого-цифрового преобразователя (АЦП); 3 — сигнал, излучаемый в эфир (поток хаотических радиоимпульсов) через антенну (А); 4 — поток хаотических радиоимпульсов, принимаемый из эфира; 5 — огибающая потока хаотических радиоимпульсов на выходе детектора огибающей (ДО) [2]

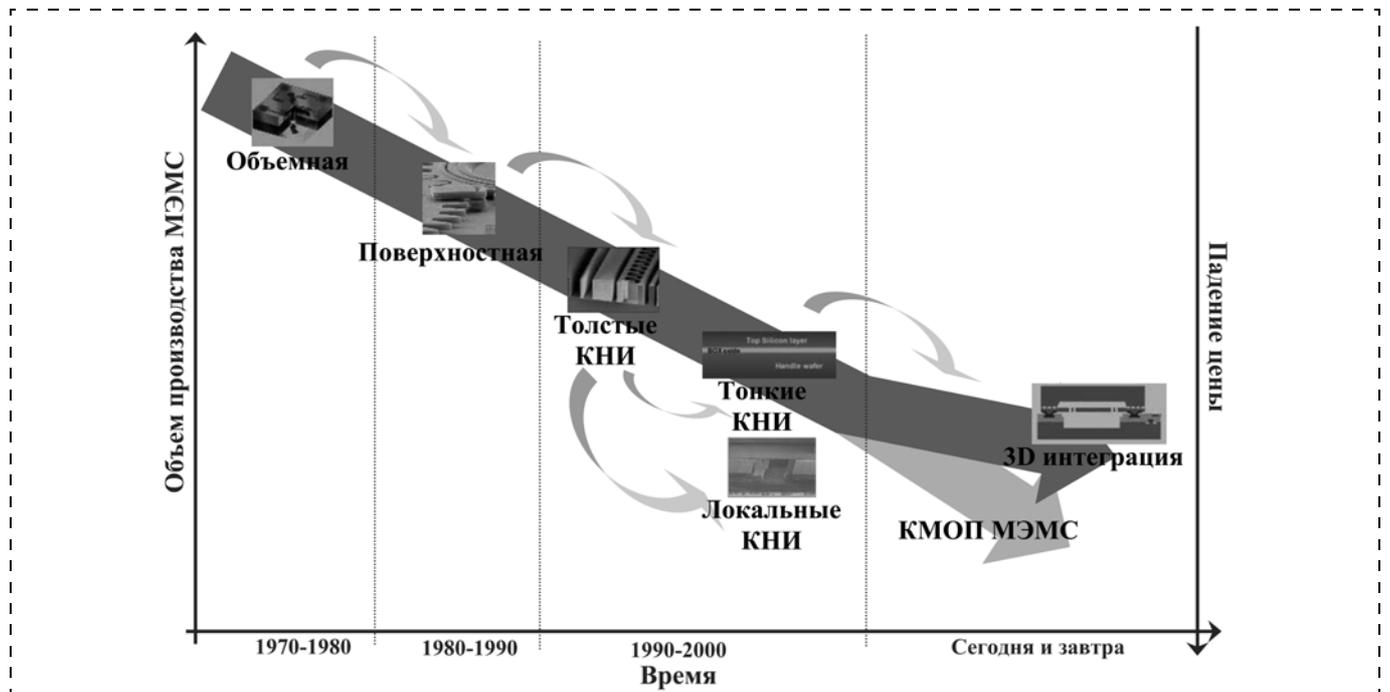


Рис. 3. Четыре ступени эволюции производства МЭМС [4]

и программного обеспечения сетевых структур [3]. Приведенная на рис. 2 функциональная схема приемопередатчика, разработанного сотрудниками ИРЭ РАН, в определенной мере может служить примером нестандартного решения в области БПС-МЭМС, которое было использовано для мониторинга состояния такого ответственного инженерного сооружения как кровля большой площади (в данном случае арены конькобежного центра в Крылатском).

И конечно возможности улучшения характеристик как технических, так и экономических дает само производство МЭМС [4] (рис. 3). Таким образом, уже организация мониторинговой системы дает возможности широкого выбора различных технических решений, отличающихся от базовых решений на основе массовых МЭМС.

Кроме того, следует отметить разработанный в Санкт-Петербургском ГЭТУ коммутатор для СВЧ АФАР на основе МЭМС, который позволяет коммутировать приемные и передающие тракты АФАР с минимальным потреблением энергии (буквально микроватты). Особенно это важно при коммутации приемопередающих СВЧ модулей с встроенными антеннами на кристалле (системы-на-кристалле), разработанными ИСВЧПЭ РАН.

Еще большие возможности выбора дают области применения МЭМС-ВУ. Перечислим некоторые из них.

1. Организм человека: медицинский мониторинг изменений и коррекции психофизического состояния человека, спортивный и бытовой контроль состояния, обеспечение условий экстремальной деятельности человека, включая военные и подобные типы деятельности.

2. Технические объекты высокой стоимости в малодоступной среде (космос, подводные, подземные и т. д.).

3. Природные и технические объекты долговременного функционирования, влияющего на жизнедеятельность окружающих людей (лесные массивы, водохранилища, объекты производства и передачи энергии, промышленные и транспортные сооружения, жилые дома и т. п.).

Уникальность МЭМС-ВУ сама по себе не может служить главной характеристикой (подкованная блоха не лучше обычной), гораздо большее значение имеют обеспечение и доказательство высокого уровня предлагаемых МЭМС. Таким образом, на передний план выходят методы контроля технологии производства и достоверность измерения функциональных параметров. Эти сложные задачи в определенной мере снимаются малым числом требуемых изделий, т. е. отсутствием необходимости в автоматизированном контрольно-измерительном оборудовании. Все измерения можно делать и "вручную".

Все изложенное выше можно считать обширным вступлением к следующему тезису.

Реально существующее отставание в производстве массовых ИС и МЭМС может быть компенсировано в рамках направления "Больше чем Мур", благодаря возможности создания уникальных МЭМС-ВУ на существующей в России технологической базе производства ИС и МЭМС. Дополнительные возможности даст включение в чувствительные элементы МЭМС-ВУ наноконструкций (УНТ, графена, нанопроволок и т. д.). Естественно, что предложения по созданию новых МЭМС-ВУ

должны базироваться на уже существующем опыте работы в области разработки элементов или конструкций МЭМС. Их уровень может быть оценен сравнением предлагаемых характеристик МЭМС с уже известными из литературы или рекламных материалов фирм. Общую ситуацию можно оценить на основе выпусков аналитических обзоров по данному направлению МЭМС, например обзора Yole Developpement [4].

#### Список литературы

1. ENIAC. URL: <http://www.eniac.eu>.
2. Дмитриев А. С., Ефремова Е. В., Клецков А. В., Кузьмин Л. В., Лактюшкин А. М., Юрков В. В. Сверхполосная беспроводная связь и сенсорные сети // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53, № 10. С. 1278—1289.
3. Резнев А. А., Вернер В. Д. Тенденции развития МЭМС. М.: ООО Амиант. 2010. С. 160—171.
4. Yole Developpement. Trend in MEMS Manufacturing & Packaging // URL: <http://www.yole.fr/>.

УДК 531.787.084.2:629.735

**Е. М. Белозубов**, д-р техн. наук, нач. группы,  
**Н. Е. Белозубова**, аспирант, инженер,  
ОАО "Научно-исследовательский институт  
физических измерений", г. Пенза,  
e-mail: info@niifi.ru

## ПОВЫШЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ НАНО- И МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Поступила в редакцию 24.02.2011

*Рассмотрена временная стабильность датчиков давления на основе тонкопленочных нано- и микросистем (НиМЭМС), выработаны условия и критерии временной стабильности. Предложен структурно-факторный метод повышения временной стабильности НиМЭМС. Экспериментально подтверждена адекватность предложенных условий и критериев временной стабильности НиМЭМС.*

**Ключевые слова:** тонкопленочные нано- и микроэлектромеханические системы (НиМЭМС), временная стабильность, температура, деформация, критерий

Тонкопленочные тензорезисторные датчики давления (ТТДД) представляют собой гетерогенные структуры, использующие в качестве чувствительных элементов тонкопленочные нано- и микроэлектромеханические системы (НиМЭМС) [1]. Характерной особенностью ТТДД является сочетание очень высокой стойкости к воздействию дестабилизирующих внешних факторов с долговременной стабильностью технических характеристик. Срок сохраняемости технических характеристик ТТДД, разработанных и изготавливаемых ОАО "НИИФИ", в настоящее время достигает 15 лет и более. Создание систем мониторинга, контроля и диагностики состояния современных, перспективных технически сложных объектов настоятельно требует дальнейшего повышения временной ста-

бильности датчиков давления на основе тонкопленочных НиМЭМС. Как правило, это требование вызвано необходимостью длительной (более 20 лет) работы технически сложных объектов без дополнительных проверок средств измерения давлений.

В первую очередь рассмотрим возможные направления совершенствования структур тонкопленочных НиМЭМС, необходимые для повышения временной стабильности начальных и номинальных выходных сигналов датчиков давлений. Вследствие многочисленных известных преимуществ тонкопленочных НиМЭМС датчиков давлений с мостовой измерительной схемой и четырьмя рабочими тензорезисторами будем рассматривать только такие НиМЭМС. Причем на данном этапе не будем обращать внимание на многочисленные топологические решения, используемые для оптимального преобразования деформаций упругих элементов датчиков от воздействия измеряемого давления в изменение сопротивления тензорезисторов. Отметим только наиболее общие элементы тонкопленочных тензорезисторов, используемые при создании НиМЭМС. Анализ известных решений показал, что к таким элементам, в случае использования непрерывных тонкопленочных тензорезисторов [2], можно отнести следующие тонкопленочные элементы (рис. 1): диэлектрический 1, тензорезистивный 2; адгезионный 3; контактный 4.

Назначение перечисленных элементов ясно из их названия. К элементам тонкопленочных тензорезисторов, влияющих на стабильность, необходи-

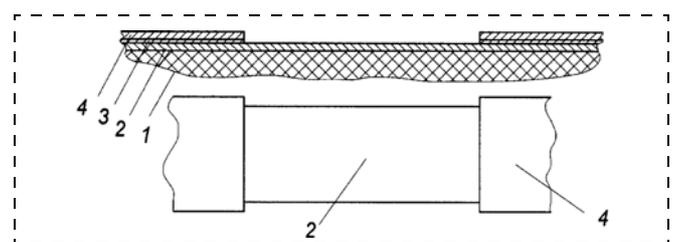


Рис. 1. Элементы тонкопленочного тензорезистора НиМЭМС

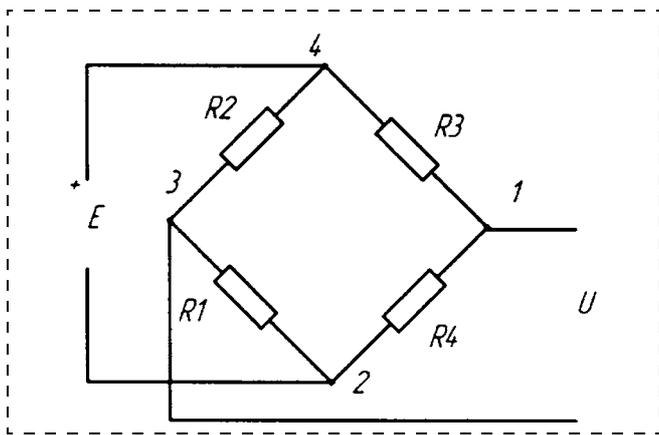


Рис. 2. Мостовая измерительная схема НМЭМС

мо отнести также и тонкопленочные проводящие элементы. На рис. 1 соотношения между толщинами тонкопленочных элементов и клины травления не изображены. Проводящие элементы тензорезисторов соединены последовательно с контактными элементами и используются для соединения тензорезисторов в мостовую измерительную схему и со схемой питания и преобразования сигнала. С точки зрения повышения стабильности мы будем рассматривать только проводящие элементы, находящиеся в областях от контактных элементов до узлов мостовой измерительной схемы. Как правило, эти узлы совпадают с местами присоединения выводных проводников, соединяющих мостовую схему со схемой питания и преобразования сигнала. При выполнении НМЭМС в виде мостовой измерительной схемы с четырьмя рабочими тензорезисторами, как это изображено на рис. 2, при отсутствии элементов термокомпенсации выходной сигнал НМЭМС в стационарном температурном режиме будет равен

$$U = E \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right),$$

где  $E$  — напряжение питания мостовой измерительной схемы;  $R_1, R_2, R_3, R_4$  — сопротивления тензорезисторов  $R_1, R_2, R_3, R_4$  соответственно.

Проведя необходимые преобразования, получим

$$U = E(R_2R_4 - R_1R_3)[(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)]^{-1}. \quad (1)$$

Определим условие временной стабильности НМЭМС в виде

$$U(\tau + \Delta\tau) = U(\tau), \quad (2)$$

где  $U(\tau + \Delta\tau)$  — начальный выходной сигнал в момент времени  $(\tau + \Delta\tau)$ ;  $U(\tau)$  — начальный выходной сигнал в момент времени  $\tau$ ;  $\Delta\tau$  — любой интервал времени в пределах срока службы датчика.

После подстановки в выражение (2) выражения (1) и обеспечения необходимой стабильности источника питания  $E(\tau + \Delta\tau) = E(\tau)$ , получим условие стабильности НМЭМС в развернутом виде:

$$[R_2(\tau + \Delta\tau)R_4(\tau + \Delta\tau) - R_1(\tau + \Delta\tau)R_3(\tau + \Delta\tau)] \times \{ [R_1(\tau + \Delta\tau)] + R_2(\tau + \Delta\tau) [R_3(\tau + \Delta\tau) + R_4(\tau + \Delta\tau)] \}^{-1} = [R_2(\tau)R_4(\tau) - R_1(\tau)R_3(\tau)] \times \{ [R_1(\tau) + R_2(\tau) [R_3(\tau) + R_4(\tau)] \}^{-1}. \quad (3)$$

Анализ полученного условия (3) показывает, что его с точки зрения математики можно обеспечить при бесчисленном множестве сочетаний сопротивлений тензорезисторов и их функциональных зависимостей от времени. В то же время, любые сочетания в случае неравенства сопротивлений различных тензорезисторов мостовой схемы НМЭМС потребуют для выполнения условий стабильности различных взаимосвязанных и точных функциональных зависимостей сопротивлений тензорезисторов от времени. Аналогично любые сочетания в случае различия функциональных зависимостей тензорезисторов от времени потребуют для выполнения условий стабильности различных и взаимосвязанных сопротивлений тензорезисторов их функциональных зависимостей от времени. Учитывая, что такие функциональные зависимости очень трудно реализуемы, с точки зрения практической реализуемости оптимальными являются частные условия стабильности в виде равенства сопротивлений тензорезисторов в начальный момент времени и одинаковые функциональные зависимости этих сопротивлений от времени, т. е.

$$R_1(\tau) = R_2(\tau) = R_3(\tau) = R_4(\tau) = R(\tau); \quad (4)$$

$$R_1(\tau + \Delta\tau) = R_2(\tau + \Delta\tau) = R_3(\tau + \Delta\tau) = R_4(\tau + \Delta\tau) = R(\tau + \Delta\tau), \quad (5)$$

где  $R(\tau), R(\tau + \Delta\tau)$  — сопротивления тензорезисторов в различные моменты времени вне зависимости от номера тензорезистора в мостовой схеме.

Тогда можно записать соотношения (4), (5) в сокращенном виде:

$$R_j(\tau) = R(\tau), R_j(\tau + \Delta\tau) = R(\tau + \Delta\tau). \quad (6)$$

В результате анализа взаимосвязи тонкопленочных элементов тензорезистора (см. рис. 1) и с учетом работ [3—5] можно определить сопротивление  $j$ -го тонкопленочного тензорезистора в момент времени  $\tau$  и  $(\tau + \Delta\tau)$  соответственно:

$$R_j(\tau) = R_{Pj}(\tau) + 2R_{PAj}(\tau) + 2R_{Aj}(\tau) + 2R_{AKj}(\tau) + 2R_{Kj}(\tau) + 2R_{KPj}(\tau) + 2R_{Pj}(\tau); \quad (7)$$

$$R_j(\tau + \Delta\tau) = R_{Pj}(\tau + \Delta\tau) + 2R_{PAj}(\tau + \Delta\tau) + 2R_{Aj}(\tau + \Delta\tau) + 2R_{AKj}(\tau + \Delta\tau) + 2R_{Kj}(\tau + \Delta\tau) + 2R_{KPj}(\tau + \Delta\tau) + 2R_{Pj}(\tau + \Delta\tau), \quad (8)$$

где  $R_{Pj}$ ,  $R_{Aj}$ ,  $R_{Kj}$ ,  $R_{Пj}$  — соответственно сопротивление тензорезистивного, адгезионного, контактного, проводящего элемента  $j$ -го тензорезистора;  $R_{PAj}$ ,  $R_{AKj}$ ,  $R_{KPj}$  — соответственно сопротивление переходов элементов тензорезистивный—адгезионный, адгезионный—контактный, контактный—проводящий  $j$ -го тензорезистора.

Разработаны различные модели расчета сопротивлений элементов тонкопленочных резисторов [3—5], позволяющие определять эти сопротивления с достаточной точностью в зависимости от размеров элементов. В самом общем случае сопротивление каждого элемента тонкопленочного тензорезистора полностью определяется удельным поверхностным сопротивлением, эффективной длиной и эффективной шириной элемента или перехода. Причем экспериментальные исследования долговременного влияния внешних воздействующих факторов на ТГДД показали, что в наибольшей степени на параметры, определяющие сопротивление тензорезисторов, влияют деформация, температура и время. Поэтому можно в соответствии с выражениями (7), (8) представить математические модели сопротивлений тонкопленочных тензорезисторов в виде следующих выражений:

$$R_j(\tau) = \rho_{PJ}(\varepsilon_{PJ}, T_{PJ}, \tau) l_{PJ}(\varepsilon_{PJ}, T_{PJ}, \tau) [b_{PJ}(\varepsilon_{PJ}, T_{PJ}, \tau)]^{-1} + 2\rho_{PAj}(\varepsilon_{PAj}, T_{PAj}, \tau) l_{PAj}(\varepsilon_{PAj}, T_{PAj}, \tau) \times [b_{PAj}(\varepsilon_{PAj}, T_{PAj}, \tau)]^{-1} + 2\rho_{AJ}(\varepsilon_{AJ}, T_{AJ}, \tau) l_{AJ} \times (\varepsilon_{AJ}, T_{AJ}, \tau) [b_{AJ}(\varepsilon_{AJ}, T_{AJ}, \tau)]^{-1} + 2\rho_{AKj}(\varepsilon_{AKj}, T_{AKj}, \tau) l_{AKj}(\varepsilon_{AKj}, T_{AKj}, \tau) \times [b_{AKj}(\varepsilon_{AKj}, T_{AKj}, \tau)]^{-1} + 2\rho_{Kj}(\varepsilon_{Kj}, T_{Kj}, \tau) l_{Kj} \times (\varepsilon_{Kj}, T_{Kj}, \tau) [b_{Kj}(\varepsilon_{Kj}, T_{Kj}, \tau)]^{-1} + 2\rho_{KPj}(\varepsilon_{KPj}, T_{KPj}, \tau) l_{KPj}(\varepsilon_{KPj}, T_{KPj}, \tau) \times [b_{KPj}(\varepsilon_{KPj}, T_{KPj}, \tau)]^{-1} + 2\rho_{Пj}(\varepsilon_{Пj}, T_{Пj}, \tau) l_{Пj} \times (\varepsilon_{Пj}, T_{Пj}, \tau) [b_{Пj}(\varepsilon_{Пj}, T_{Пj}, \tau)]^{-1}; \quad (9)$$

$$R(\tau + \Delta\tau) = \rho_{PJ}(\varepsilon_{PJ}, T_{PJ}, \tau + \Delta\tau) l_{PJ}(\varepsilon_{PJ}, T_{PJ}, \tau + \Delta\tau) \times [b_{PJ}(\varepsilon_{PJ}, T_{PJ}, \tau + \Delta\tau)]^{-1} + 2\rho_{PAj}(\varepsilon_{PAj}, T_{PAj}, \tau + \Delta\tau) \times l_{PAj}(\varepsilon_{PAj}, T_{PAj}, \tau + \Delta\tau) [b_{PAj}(\varepsilon_{PAj}, T_{PAj}, \tau + \Delta\tau)]^{-1} + 2\rho_{AJ}(\varepsilon_{AJ}, T_{AJ}, \tau + \Delta\tau) l_{AJ}(\varepsilon_{AJ}, T_{AJ}, \tau + \Delta\tau) \times [b_{AJ}(\varepsilon_{AJ}, T_{AJ}, \tau + \Delta\tau)]^{-1} + 2\rho_{AKj}(\varepsilon_{AKj}, T_{AKj}, \tau + \Delta\tau) l_{AKj}(\varepsilon_{AKj}, T_{AKj}, \tau + \Delta\tau) \times [b_{AKj}(\varepsilon_{AKj}, T_{AKj}, \tau + \Delta\tau)]^{-1} + 2\rho_{Kj}(\varepsilon_{Kj}, T_{Kj}, \tau + \Delta\tau) l_{Kj}(\varepsilon_{Kj}, T_{Kj}, \tau + \Delta\tau) \times [b_{Kj}(\varepsilon_{Kj}, T_{Kj}, \tau + \Delta\tau)]^{-1} + 2\rho_{KPj}(\varepsilon_{KPj}, T_{KPj}, \tau + \Delta\tau) \times l_{KPj}(\varepsilon_{KPj}, T_{KPj}, \tau + \Delta\tau) [b_{KPj}(\varepsilon_{KPj}, T_{KPj}, \tau + \Delta\tau)]^{-1} + 2\rho_{Пj}(\varepsilon_{Пj}, T_{Пj}, \tau + \Delta\tau) l_{Пj}(\varepsilon_{Пj}, T_{Пj}, \tau) \times [b_{Пj}(\varepsilon_{Пj}, T_{Пj}, \tau)]^{-1}, \quad (10)$$

где  $\rho_{PJ}$ ,  $\rho_{PAj}$ ,  $\rho_{AJ}$ ,  $\rho_{AKj}$ ,  $\rho_{Kj}$ ,  $\rho_{Пj}$ ,  $\rho_{KPj}$  — эффективное удельное поверхностное сопротивление соответствующих элементов и переходов;  $l_{PJ}$ ,  $l_{PAj}$ ,

$l_{AJ}$ ,  $l_{AKj}$ ,  $l_{Kj}$ ,  $l_{KPj}$ ,  $l_{Пj}$  — эффективная длина соответствующих элементов и переходов;  $b_{PJ}$ ,  $b_{PAj}$ ,  $b_{AJ}$ ,  $b_{AKj}$ ,  $b_{Kj}$ ,  $b_{KPj}$ ,  $b_{Пj}$  — эффективная ширина соответствующих элементов и переходов  $j$ -го тензорезистора;  $\varepsilon_{PJ}$ ,  $\varepsilon_{PAj}$ ,  $\varepsilon_{AJ}$ ,  $\varepsilon_{AKj}$ ,  $\varepsilon_{Kj}$ ,  $\varepsilon_{KPj}$ ,  $\varepsilon_{Пj}$  — относительная деформация, воздействующая на соответствующие элементы и переходы;  $T_{PJ}$ ,  $T_{PAj}$ ,  $T_{AJ}$ ,  $T_{AKj}$ ,  $T_{Kj}$ ,  $T_{KPj}$ ,  $T_{Пj}$  — температура, воздействующая на соответствующие элементы и переходы;  $j = 1, 2, 3, 4$  — номер тензорезистора в мостовой схеме.

Тогда расширенные частные условия стабильности НиМЭМС можно представить в виде

$$\rho_{PJ}(\varepsilon_{PJ}, T_{PJ}, \tau) l_{PJ}(\varepsilon_{PJ}, T_{PJ}, \tau) [b_{PJ}(\varepsilon_{PJ}, T_{PJ}, \tau)]^{-1} + 2\rho_{PAj}(\varepsilon_{PAj}, T_{PAj}, \tau) l_{PAj}(\varepsilon_{PAj}, T_{PAj}, \tau) \times [b_{PAj}(\varepsilon_{PAj}, T_{PAj}, \tau)]^{-1} + 2\rho_{AJ}(\varepsilon_{AJ}, T_{AJ}, \tau) l_{AJ} \times (\varepsilon_{AJ}, T_{AJ}, \tau) [b_{AJ}(\varepsilon_{AJ}, T_{AJ}, \tau)]^{-1} + 2\rho_{AKj}(\varepsilon_{AKj}, T_{AKj}, \tau) l_{AKj}(\varepsilon_{AKj}, T_{AKj}, \tau) \times [b_{AKj}(\varepsilon_{AKj}, T_{AKj}, \tau)]^{-1} + 2\rho_{Kj}(\varepsilon_{Kj}, T_{Kj}, \tau) l_{Kj} \times (\varepsilon_{Kj}, T_{Kj}, \tau) [b_{Kj}(\varepsilon_{Kj}, T_{Kj}, \tau)]^{-1} + 2\rho_{KPj}(\varepsilon_{KPj}, T_{KPj}, \tau) l_{KPj}(\varepsilon_{KPj}, T_{KPj}, \tau) \times [b_{KPj}(\varepsilon_{KPj}, T_{KPj}, \tau)]^{-1} + 2\rho_{Пj}(\varepsilon_{Пj}, T_{Пj}, \tau) l_{Пj} \times (\varepsilon_{Пj}, T_{Пj}, \tau) [b_{Пj}(\varepsilon_{Пj}, T_{Пj}, \tau)]^{-1} = R(\tau); \quad (11)$$

$$\rho_{PJ}(\varepsilon_{PJ}, T_{PJ}, \tau + \Delta\tau) l_{PJ}(\varepsilon_{PJ}, T_{PJ}, \tau + \Delta\tau) \times [b_{PJ}(\varepsilon_{PJ}, T_{PJ}, \tau + \Delta\tau)]^{-1} + 2\rho_{PAj}(\varepsilon_{PAj}, T_{PAj}, \tau + \Delta\tau) l_{PAj}(\varepsilon_{PAj}, T_{PAj}, \tau + \Delta\tau) \times [b_{PAj}(\varepsilon_{PAj}, T_{PAj}, \tau + \Delta\tau)]^{-1} + 2\rho_{AJ}(\varepsilon_{AJ}, T_{AJ}, \tau + \Delta\tau) l_{AJ}(\varepsilon_{AJ}, T_{AJ}, \tau + \Delta\tau) \times [b_{AJ}(\varepsilon_{AJ}, T_{AJ}, \tau + \Delta\tau)]^{-1} + 2\rho_{AKj}(\varepsilon_{AKj}, T_{AKj}, \tau + \Delta\tau) l_{AKj}(\varepsilon_{AKj}, T_{AKj}, \tau + \Delta\tau) \times [b_{AKj}(\varepsilon_{AKj}, T_{AKj}, \tau + \Delta\tau)]^{-1} + 2\rho_{Kj}(\varepsilon_{Kj}, T_{Kj}, \tau + \Delta\tau) l_{Kj}(\varepsilon_{Kj}, T_{Kj}, \tau + \Delta\tau) \times [b_{Kj}(\varepsilon_{Kj}, T_{Kj}, \tau + \Delta\tau)]^{-1} + 2\rho_{KPj}(\varepsilon_{KPj}, T_{KPj}, \tau + \Delta\tau) l_{KPj}(\varepsilon_{KPj}, T_{KPj}, \tau + \Delta\tau) \times [b_{KPj}(\varepsilon_{KPj}, T_{KPj}, \tau + \Delta\tau)]^{-1} + 2\rho_{Пj}(\varepsilon_{Пj}, T_{Пj}, \tau + \Delta\tau) l_{Пj}(\varepsilon_{Пj}, T_{Пj}, \tau) \times [b_{Пj}(\varepsilon_{Пj}, T_{Пj}, \tau)]^{-1} = R(\tau + \Delta\tau). \quad (12)$$

Полученные расширенные частные условия стабильности (11) и (12) могут выполняться при бесчисленном множестве сочетаний сопротивлений элементов тензорезисторов и их функциональных зависимостей от деформаций, температуры и времени. По аналогии с предыдущими рассуждениями любые сочетания в случае неравенства сопротивлений элементов тензорезисторов мостовой схемы НиМЭМС и неидентичности их функциональных зависимостей от воздействующих факторов потребуют для выполнения расширенных частных условий стабильности различных

взаимосвязанных и точных функциональных зависимостей сопротивлений тензорезисторов. Учитывая, что такие функциональные зависимости очень трудно реализуемы, можно записать частные условия стабильности НиМЭМС в виде

$$\begin{aligned} \rho_{Pj} &= \rho_P, \varepsilon_{Pj} = \varepsilon_P, T_{Pj} = T_P, l_{Pj} = l_P, b_{Pj} = b_P, \\ \rho_{PAj} &= \rho_{PA}, \varepsilon_{PAj} = \varepsilon_{PA}, T_{PAj} = T_{PA}, l_{PAj} = l_{PA}, \\ b_{PAj} &= b_{PA}, \rho_{AJ} = \rho_A, \varepsilon_{AJ} = \varepsilon_A, T_{AJ} = T_A, l_{AJ} = l_A, \\ b_{AJ} &= b_A, \rho_{AKj} = \rho_{AK}, \varepsilon_{AKj} = \varepsilon_{AK}, T_{AKj} = T_{AK}, \\ l_{AKj} &= l_{AK}, b_{AKj} = b_{AK}, \rho_{Kj} = \rho_K, \varepsilon_{Kj} = \varepsilon_K, \\ T_{Kj} &= T_K, l_{Kj} = l_K, b_{Kj} = b_K, \rho_{KPj} = \rho_{KP}, \\ \varepsilon_{KPj} &= \varepsilon_{KP}, T_{KPj} = T_{KP}, l_{KPj} = l_{KP}, b_{KPj} = b_{KP}, \\ \rho_{Pj} &= \rho_P, \varepsilon_{Pj} = \varepsilon_P, T_{Pj} = T_P, l_{Pj} = l_P, b_{Pj} = b_P. \end{aligned} \quad (13)$$

Если условно принять, что изготовление датчиков заканчивается в момент времени  $\tau$ , а эксплуатация — в момент времени  $(\tau + \Delta\tau)$ , то соотношения (11) и (13) являются условиями обеспечения стабильности при воздействии внешних факторов во время изготовления, а соотношения (12) и (13) — при воздействии внешних факторов во время эксплуатации. Таким образом, в результате нового подхода, который можно назвать структурно-факторным подходом, можно сформулировать структурно-факторные условия стабильности тонкопленочных НиМЭМС в виде необходимости обеспечения идентичности структур тонкопленочных тензорезисторов, размеров и характеристик их элементов, а также идентичности деформаций и температур, воздействующих на эти элементы при изготовлении и эксплуатации. На основании полученных структурно-факторных условий стабильности можно сформулировать структурно-факторный метод обеспечения стабильности тонкопленочных НиМЭМС, заключающийся в обеспечении идентичности структур тонкопленочных тензорезисторов, размеров и характеристик их элементов, а также идентичности деформаций и температур, воздействующих на эти элементы при изготовлении и эксплуатации.

Выполнение условий (13) должно обеспечиваться при учете всех воздействующих деформаций и температур. При изготовлении на элементы тензорезисторов воздействуют деформации, вызванные измеряемыми давлениями (например, при баростабилизации, контрольных, приемочных и приемосдаточных испытаниях), а также термдеформации при различных термических обработках, например при термостабилизации. В условиях эксплуатации на элементы тензорезисторов действуют деформации от измеряемых давлений при использовании датчика по назначению, термдеформации при воздействии температур измеряемой и окружающей среды, деформации от воздействия виброускорений, ударов и других механических, климатических факторов. При изготовлении и эксплуатации на элементы тензорезисторов действуют

температуры измеряемой и окружающей среды, температуры, вызванные виброускорениями и ударами, воздействующими непосредственно на упругие элементы или на другие элементы датчиков, например кабельную перемычку.

Определим требования к стабильности тензорезисторов, необходимые для обеспечения заданной стабильности мостовой измерительной схемы. Характерной особенностью ТТДД является работа при малых уровнях относительных изменений сопротивлений тензорезисторов от измеряемого давления. Как известно, выходной сигнал с мостовой измерительной схемы при малых значениях относительных изменений сопротивлений тензорезисторов мостовой измерительной схемы от воздействия номинального измеряемого давления и равенстве номинальных значений сопротивлений тензорезисторов можно определить по соотношению

$$U = 0,25E \sum_{j=1}^4 [-\varepsilon(R_1) + \varepsilon(R_2) - \varepsilon(R_3) + \varepsilon(R_4)],$$

где  $\varepsilon(R_1)$ ,  $\varepsilon(R_2)$ ,  $\varepsilon(R_3)$ ,  $\varepsilon(R_4)$  — относительное изменение сопротивления соответствующего тензорезистора мостовой измерительной схемы от воздействия номинального измеряемого давления.

Мостовые измерительные схемы с наибольшим эффектом используются при равенстве относительных изменений сопротивлений прилежащих плеч мостовой измерительной схемы по абсолютной величине и противоположных по знаку:  $\varepsilon(R_1) = -\varepsilon(R_2) = \varepsilon(R_3) = -\varepsilon(R_4)$  или  $\varepsilon(R_j) = |\varepsilon(R)|$ . Тогда выражение для выходного сигнала можно представить в виде  $U = E\varepsilon(R)$ . Для исключения влияния напряжения питания разделим обе части полученного выражения на напряжение питания, в результате чего получим, что приведенное значение выходного сигнала равно относительному изменению сопротивления тензорезистора мостовой измерительной схемы от воздействия номинального измеряемого давления  $UE^{-1} = \varepsilon(R)$ . Тогда нестабильность приведенного значения выходного сигнала будет равна нестабильности относительного изменения сопротивления тензорезистора мостовой схемы НиМЭМС  $\delta(UE^{-1}) = \delta[\varepsilon(R)]$  или  $\delta[\varepsilon(R)] = \delta(UE^{-1})$ . После преобразования последнего выражения с учетом того, что  $\varepsilon(R) = \Delta RR^{-1}$ , получим допустимое абсолютное изменение сопротивления тензорезистора для обеспечения допустимой нестабильности приведенного значения выходного сигнала НиМЭМС в виде  $\Delta R = R\delta(UE^{-1})$ . Отсюда относительное изменение сопротивления тонкопленочного тензорезистора будет равно  $\Delta RR^{-1} = \delta(UE^{-1})$ . Полученное соотношение устанавливает связь стабильностей тонкопленочной НиМЭМС и тензорезистора. Расписывая  $\Delta RR^{-1}$  через размеры и проведя необходимые преобразования, получим  $\Delta l/l$

$l = \delta(UE^{-1})$ . Это соотношение устанавливает связь стабильностей тонкопленочной НиМЭМС и размеров тензорезистора.

Рассмотрим возможность использования в качестве критерия стабильности НиМЭМС температурных коэффициентов сопротивления тензорезисторов. Несмотря на различие механизмов изменения сопротивлений тензорезисторов при воздействии температур и деформаций, аналитические выражения для этих воздействий аналогичны, т. е.

$$U = 0,25E \sum_{j=1}^4 R_j \alpha_j \Delta T_j,$$

где  $\alpha_j$  — температурный коэффициент сопротивления  $j$ -го тензорезистора мостовой измерительной схемы.

Тогда с учетом того, что в соответствии с условиями (13)  $R_j = R$ ,  $\Delta T_j = \Delta T$ , критерием стабильности тонкопленочных НиМЭМС является равенство температурных коэффициентов сопротивления тензорезисторов мостовой измерительной схемы  $\alpha_j = \alpha$  при условии равенства сопротивлений этих тензорезисторов и равенства изменений температур, воздействующих на эти тензорезисторы. Поэтому в развитие тезиса о максимальной стабильности тензорезисторов с минимальными температурными коэффициентами сопротивлений [5] можно сказать, что критерием стабильности тонкопленочных НиМЭМС является минимальная разность температурных коэффициентов сопротивлений тонкопленочных тензорезисторов мостовой схемы.

Так как выполнение условий  $R_j = R$ ,  $\Delta T_j = \Delta T$ ,  $\alpha_j = \alpha$  по определению однозначно характеризует аддитивная температурная погрешность НиМЭМС (или приведенное значение коэффициента функции влияния температуры на начальный выходной сигнал), интегральным критерием, учитывающим температурный аспект структурно-факторных условий стабильности, является аддитивная температурная погрешность НиМЭМС.

Непосредственно из структурно-факторных условий стабильности следует также, что критерием стабильности тонкопленочных НиМЭМС является минимальная нелинейность функции преобразования давления в выходной сигнал. Действительно, как известно, минимальная нелинейность функции преобразования давления в выходной сигнал обеспечивается при идентичности структур тонкопленочных тензорезисторов, размеров и характеристик их элементов, а также идентичности деформаций, воздействующих на эти элементы. Таким образом, условия обеспечения минималь-

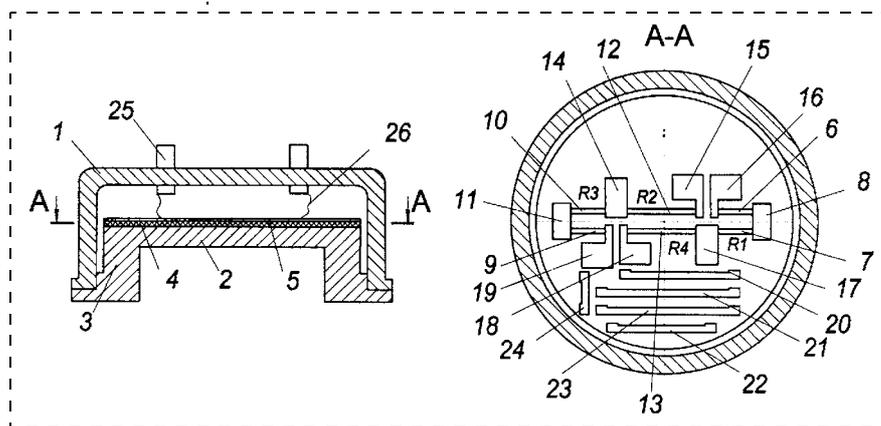


Рис. 3. Тонкопленочная НиМЭМС для датчиков давления первого поколения

ной нелинейности функции преобразования давления в выходной сигнал совпадают со структурно-факторными условиями стабильности тонкопленочных НиМЭМС, т. е. нелинейность является критерием стабильности НиМЭМС. Причем нелинейность характеризует деформационный аспект структурно-факторных условий стабильности. Так как мультипликативная температурная погрешность (или приведенное значение коэффициента функции влияния температуры на чувствительность) НиМЭМС учитывает влияние температуры и деформаций от измеряемого давления и температуры, то эта погрешность может служить интегральным критерием стабильности НиМЭМС, характеризующим температурный и деформационный аспекты структурно-факторных условий стабильности.

Рассмотрим в какой степени соответствуют условиям и критериям временной стабильности датчики давления на основе тонкопленочных НиМЭМС первого поколения, разработанные ранее без учета этих условий и критериев. Типичная НиМЭМС первого поколения изображена на рис. 3. Она содержит корпус 1, круглую мембрану 2 с периферийным основанием 3, по которому мембрана закреплена в корпусе. На планарной поверхности мембраны методами тонкопленочной технологии нанесена диэлектрическая пленка 4, на которой сформирована тонкопленочная тензоструктура 5, содержащая тензорезисторы  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$ ,  $R4$ , содержащие тензорезистивные, адгезионные и контактные элементы. Особенностью рассматриваемой топологии является выполнение тензорезистора  $R1$  в виде тензорезистивных полос 6 и 7, соединенных тонкопленочной перемычкой 8 с малым удельным поверхностным сопротивлением, а тензорезистора  $R3$  в виде тензорезистивных полос 9 и 10, соединенных тонкопленочной перемычкой 11 с малым удельным поверхностным сопротивлением. При этом тензорезисторы  $R2$ ,  $R4$  выполнены в виде тензорезистивных полос 12 и 13 соответственно. Тонкопленочные перемычки 14–19 с малым удельным поверхностным сопротивлением объе-

диняют тензорезисторы в мостовую измерительную схему и одновременно выполняют роль контактных площадок, предназначенных для подачи напряжения питания и съема выходного сигнала.

Тонкопленочные перемычки 20–24 с малым удельным поверхностным сопротивлением предназначены для уменьшения аддитивной температурной погрешности путем включения некоторого набора из этих перемычек, определенного при настройке НиМЭМС. Гермоводы 25 с помощью выводных проводников 26 соединены с контактными площадками 14–19.

В результате анализа НиМЭМС, изображенной на рис. 3, определена степень ее соответствия частным условиям стабильности НиМЭМС (13) в виде

$$\begin{aligned} \rho_{Pj} &= \rho_P, \varepsilon_{Pj} \neq \varepsilon_P, T_{Pj} \neq T_P, l_{Pj} = l_P, b_{Pj} = b_P, \\ \rho_{PAj} &= \rho_{PA}, \varepsilon_{PAj} \neq \varepsilon_{PA}, T_{PAj} \neq T_{PA}, l_{PAj} \neq l_{PA}, \\ b_{PAj} &\neq b_{PA}, \rho_{Aj} = \rho_A, \varepsilon_{Aj} \neq \varepsilon_A, T_{Aj} \neq T_A, l_{Aj} \neq l_A, \\ b_{Aj} &\neq b_A, \rho_{AKj} = \rho_{KA}, \varepsilon_{AKj} \neq \varepsilon_{AK}, T_{AKj} \neq T_{AK}, \\ l_{AKj} &\neq l_{AK}, b_{AKj} \neq b_{AK}, \rho_{Kj} = \rho_K, \varepsilon_{Kj} \neq \varepsilon_K, \\ T_{Kj} &\neq T_K, l_{Kj} \neq l_K, b_{Kj} \neq b_K, \rho_{KPj} = \rho_{KP}, \\ \varepsilon_{KPj} &\neq \varepsilon_{KP}, T_{KPj} \neq T_{KP}, l_{KPj} \neq l_{KP}, b_{KPj} \neq b_{KP}, \\ \rho_{Пj} &= \rho_{П}, \varepsilon_{Пj} \neq \varepsilon_{П}, T_{Пj} \neq T_{П}, l_{Пj} \neq l_{П}, \\ b_{Пj} &\neq b_{П}. \end{aligned} \quad (14)$$

Разные значения деформаций элементов тензорезисторов вызваны тем, что тензорезисторы  $R1$ ,  $R3$  и их элементы размещены на периферии мембраны, где деформации от измеряемого давления, как это изображено на рис. 4, по абсолютной величине в 2 раза больше аналогичных деформаций в центре мембраны, где расположены тензорезисторы  $R2$ ,  $R4$ . Кроме того, деформации, вызванные механическими воздействиями в зонах размещения  $R1$ ,  $R3$ , также отличаются от деформаций в зонах размещения  $R2$ ,  $R4$ . Отличия геометрических характеристик вызваны составным выполнением тензорезисторов  $R1$ ,  $R3$ .

Разные значения температур элементов тензорезисторов  $R1$ ,  $R3$  и  $R2$ ,  $R4$  в стационарном температурном режиме также вызваны различным расстоянием их зон размещения от опорного основа-

ния, что приводит к разным условиям охлаждения от нагрева током питания тензорезисторов  $R1$ ,  $R3$  и  $R2$ ,  $R4$ . При воздействии нестационарной температуры измеряемой среды температура и термодформации тензорезисторов  $R1$ ,  $R3$  и  $R2$ ,  $R4$  отличаются во время всего нестационарного процесса (рис. 4).

Соответственно критерии стабильности тонкопленочной НиМЭМС для датчиков давления первого поколения имеют следующие значения: нелинейность градуировочной характеристики не более 2 % от номинального выходного сигнала; разница значений температурных коэффициентов сопротивлений тензорезисторов не более  $5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ; приведенное значение коэффициента функции влияния температуры на начальный выходной сигнал не более  $2 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ; приведенное значение коэффициента функции влияния температуры на чувствительность не более  $5 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Допускаемое изменение начального выходного сигнала тонкопленочного датчика первого поколения составляет  $\pm 8 \%$  от номинального выходного сигнала за 15 лет эксплуатации, допускаемое изменение номинального выходного сигнала —  $\pm 2 \%$  за 15 лет эксплуатации.

Теперь рассмотрим степень соответствия условиям и критериям временной стабильности датчиков давления на основе тонкопленочных НиМЭМС нового поколения ДАВ 085. НиМЭМС этого датчика (рис. 5) содержит штуцер 1, соединенный с корпусом 2 и связанный через кольцо 3 с мембраной 4, выполненной с центральным 5 и периферийным 6 утолщениями [6]. Две идентичных по форме и размерам пары тензорезисторов: 7 и 8 соответственно — первый и второй тензорезисторы первой пары; 9 и 10 соответственно — первый и второй тензорезисторы второй пары соединены в мостовую схему. Первые тензорезисторы в каждой паре — 7 и 9 размещены в зоне положительных деформаций, а вторые — 8 и 10 — в зоне отрицательных деформаций мембраны. По три контактные площадки 11 находятся в каждой паре тензорезисторов. Центральное утолщение 5 выполнено с выточкой 12, а периферийное утолще-

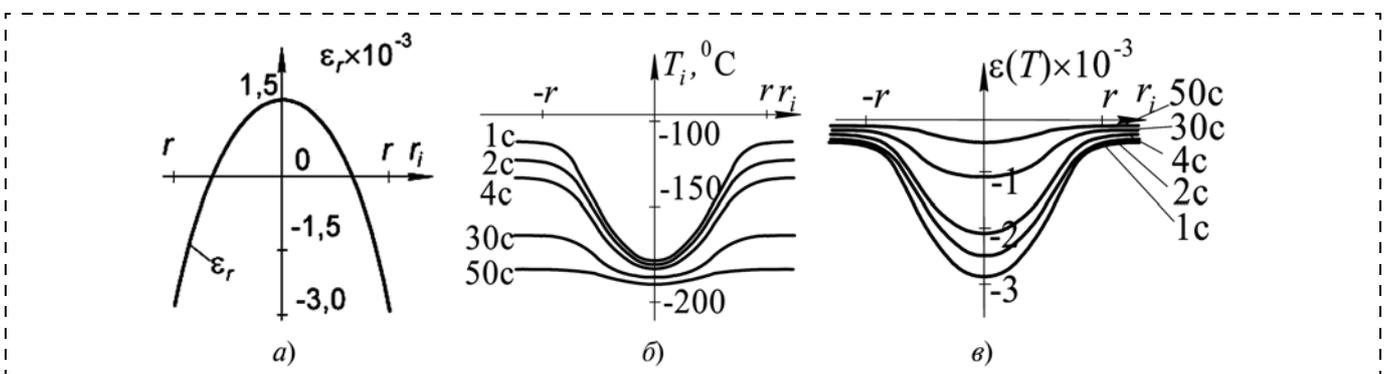


Рис. 4. Распределение деформаций от измеряемого давления (а), температуры (б) и температурных деформаций (в) по радиусу мембраны в различные моменты времени при воздействии жидкого азота на НиМЭМС

ние 6 — с наружной поверхностью 13, сужающейся по мере сопряжения с кольцом.

Тензорезисторы 7–10 частично размещены на поверхности центрального 5 и периферийного 6 утолщений, прилегающей к поверхности тонкой части мембраны 4. Выточка 12, утолщения 5, 6 и кольцо 3 в областях, подвергающихся деформациям от измеряемого давления, плавно сопрягаются с другими прилегающими поверхностями по элементам тортовых поверхностей 14. Тензорезисторы 7–10 выполнены с расширенными участками 15,

размещенными на центральном 5 и периферийном 6 утолщениях в зоне воздействия минимальных деформаций от измеряемого давления.

Тонкопленочные тензорезисторы в областях, подвергающихся деформациям от измеряемого давления, выполнены в виде идентичных прямоугольных полос для обеспечения идентичности их характеристик: сопротивлений, температурной и временной стабильности. Вследствие выполнения перемычек, соединяющих контактные площадки 11, в виде выводных проводников, имеющих значительно меньшие и одинаковые сопротивления, также повышается временная стабильность. Кроме того, вследствие уменьшенных сопротивлений перемычек, меньших значений температурных коэффициентов сопротивлений и временных флуктуаций выводных проводников по сравнению с тонкопленочными перемычками, системно повышается стабильность и технологичность датчика.

Измеряемое давление воздействует на внутренние поверхности штуцера 1, кольца 3 и мембраны 4. В результате этого на планарной поверхности мембраны возникают деформации, которые воспринимаются тензорезисторами 7–10. Изменение сопротивлений тензорезисторов преобразуется мостовой схемой в выходное напряжение, снимаемое с контактных площадок 11. В связи с частичным размещением тензорезисторов на поверхности центрального 5 и периферийного 6 утолщений, прилегающей к поверхности тонкой части мембраны, т. е. в зоне максимальных деформаций от измеряемого давления, чувствительность НиМЭМС по сравнению с известными решениями увеличивается. Кроме того, такое расположение повышает надежность и стойкость к воздействию широкого диапазона стационарных температур, вследствие улучшения условий теплоотвода рассеиваемой мощности. Выполнение расширенных участков тензорезисторов приводит к еще большему увеличению чувствительности в связи с размещением большей части тензорезисторов в зоне воздействия наибольших деформаций от измеряемого давления при одновременном повышении надежности и тех-

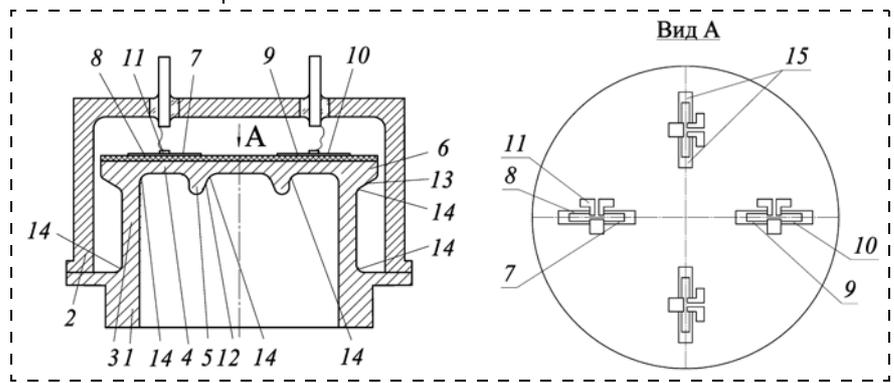


Рис. 5. НиМЭМС датчика давления нового поколения ДАВ 085

нологичности за счет повышения площади тензорезисторов и точности их изготовления. В связи с выполнением выточки центрального утолщения 5 и наружной поверхности периферийного утолщения в виде элементов сферической и тортовой поверхностей стабильность в широком диапазоне стационарных температур возрастает вследствие исключения концентраторов напряжений [6]. При воздействии нестационарной температуры измеряемой среды, вследствие оптимальных соотношений размеров центрального и периферийного утолщений, температуры в зонах размещения тензорезисторов достаточно близки.

Для выравнивания температурных напряжений тензорезисторов обеспечиваются одинаковые тепловые условия за счет выравнивания теплопередачи от каждого тензорезистора во внешнюю среду. Равенство тепловых условий тензорезисторов, расположенных симметрично центру мембраны (тензорезисторы сжатия отдельно и тензорезисторы растяжения отдельно), обеспечивается симметричностью упругого элемента и зон размещения тензорезисторов. Кроме того, выравнивание температурных условий тензорезисторов сжатия и растяжения между собой достигается равенством теплоизлучающих поверхностей тензорезисторов (то есть идентичностью площадей тензорезисторов, их конфигурации и размеров) и экспериментально подобранными размерами и конфигурациями жесткого центра и конического утолщения.

В результате анализа НиМЭМС, изображенной на рис. 5, определена степень ее соответствия частным условиям стабильности НиМЭМС (13) в виде

$$\begin{aligned}
 \rho_{Pj} &= \rho_P, \quad \varepsilon_{Pj} \approx \varepsilon_P, \quad T_{Pj} \approx T_P, \quad l_{Pj} = l_P, \\
 b_{Pj} &= b_P, \quad \rho_{PAj} = \rho_{PA}, \quad \varepsilon_{PAj} \approx \varepsilon_{PA}, \quad T_{PAj} \approx T_{PA}, \\
 l_{PAj} &= l_{PA}, \quad b_{PAj} = b_{PA}, \quad \rho_{AJ} = \rho_A, \quad \varepsilon_{Aj} \approx \varepsilon_A, \quad T_{Aj} = T_A, \\
 l_{Aj} &= l_A, \quad b_{Aj} = b_A, \quad \rho_{AKj} = \rho_{KA}, \quad \varepsilon_{AKj} \approx \varepsilon_{AK}, \\
 T_{AKj} &\approx T_{AK}, \quad l_{AKj} = l_{AK}, \quad b_{AKj} = b_{AK}, \quad \rho_{Kj} = \rho_K, \\
 \varepsilon_{Kj} &\approx \varepsilon_K, \quad T_{Kj} \approx T_K, \quad l_{Kj} \approx l_K, \quad b_{Kj} = b_K, \quad \rho_{KPj} = \rho_{KP}, \\
 \varepsilon_{KPj} &= \varepsilon_{KP}, \quad T_{KPj} \approx T_{KP}, \quad l_{KPj} = l_{KP}, \quad b_{KPj} = b_{KP}, \\
 \rho_{Pj} &= \rho_{Pj}, \quad \varepsilon_{Pj} \approx \varepsilon_{Pj}, \quad T_{Pj} \approx T_{Pj}, \quad l_{Pj} = l_{Pj}, \\
 b_{Pj} &= b_{Pj}.
 \end{aligned} \tag{15}$$

Критерии стабильности тонкопленочной НиМЭМС для датчиков давления нового поколе-

ния имеют следующие значения: нелинейность градуировочной характеристики не более 0,375 % от номинального выходного сигнала, разница значений температурных коэффициентов сопротивлений тензорезисторов не более  $3 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ; приведенное значение коэффициента функции влияния температуры на начальный выходной сигнал не более  $1 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ; приведенное значение коэффициента функции влияния температуры на чувствительность не более  $1 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Допускаемое изменение начального выходного сигнала тонкопленочного датчика ДАВ 085 составляет  $\pm 1 \%$  от номинального выходного сигнала за 15 лет эксплуатации в температурном диапазоне от  $-60$  до  $+165 \text{ }^\circ\text{C}$ , допускаемое изменение номинального выходного сигнала —  $\pm 1 \%$  за 15 лет эксплуатации. Сравнивая значения допускаемых изменений начальных и номинальных выходных сигналов датчика ДАВ 085 и датчика первого поколения, видим, что суммарная стабильность датчика ДАВ 085 в 5 раз выше стабильности датчика первого поколения. При этом стабильность датчиков достаточно хорошо коррелирует с критериями стабильности, выработанными при структурно-факторном подходе повышения стабильности НиМЭМС. Конечно, этот подход предполагает дальнейшее совершенствование наноструктур всех элементов тензорезисторов. Например, использование высокоориентированных механически ненапряженных бездефектных нанопленок карбида кремния, созданных в ИПМаш РАН [7]; применение нового принципа создания НЭМС, основанного на управляемом изменении расстояния между пленками, разработанного ИФХЭ РАН [7]; использование механически прочных массивов углеродных нанотрубок [8]. Надо обратить дополнительное внимание на значение структурных дефектов и на влияние полей упругих напряжений, особенно в пограничных областях отдельных элементов, где может наблюдаться отступление от

закона Холла—Петча. При этом следует учитывать, что точечные дефекты вакансионного и междуузельного типов могут существенно изменять свойства отдельных элементов. [9]. В связи с этим представляется перспективным использование в качестве материалов элементов тензорезисторов аморфно-нанокристаллических композитов [10].

#### Список литературы

1. Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е. Тонкопленочные тензорезисторные датчики давления — изделия нано- и микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 12. С. 49—51.
2. Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е., Васильев В. А. Тонкопленочные микромеханические системы и датчики на их основе // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 2. С. 33—39.
3. Спириин В. Г. Контактное сопротивление тонкопленочного резистора // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 10. С. 56—60.
3. Спириин В. Г. Анализ технологических погрешностей тонкопленочного резистора // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 9. С. 42—45.
4. Спириин В. Г. Математическая модель тонкопленочного резистора // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 5. С. 38—40.
5. Смолин В. К. Тонкопленочные резистивные элементы первичных преобразователей датчиков // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 9. С. 16—23.
6. Белозубов Е. М. Патент РФ № 2082124. Датчик давления. Оpubл. 20.06.97. Бюл. № 17.
7. Раткин Л. С. Новые разработки Российской академии наук в сфере нанотехнологий // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 4. С. 2—36.
8. Утенкова С. Б., Мальцев П. П. О механической прочности массивов углеродных нанотрубок // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 6. С. 6—10.
9. Гаврилов С. А., Герасименко Н. Н., Рыгалин Б. Н., Тимошенков С. П. Наноинженерия — воплощение нанотехнологии в реальной продукции // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 12. — С. 3—7.
10. Солнцев К. А. ИМЕТ РАН: Развитие работ в области наноматериалов и нанотехнологий // Нанотехнологии. Экология. Производство. 2010. № 2 (4). С. 39—41.

## Информация

**С 3 по 7 октября 2011 года Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) под эгидой Российской Академии наук проводит 4-ю международную конференцию "Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости" (ФПС. 11). Конференция пройдет в пансионате "Звенигородский" РАН**

Четвертая конференция "Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости" юбилейная — она приурочена сразу к трем выдающимся событиям. Во-первых, в 2011 г. мировое научное сообщество отмечает 100-летие со дня открытия явления сверхпроводимости голландским физиком Хейке Камерлинг-Оннесом и его сотрудниками. Во-вторых, в этом же году исполняется 25 лет с момента обнаружения Йоханнесом Беднорцем и Карлом Мюллером явления сверхпроводимости, происходящего при гораздо более высоких температурах в керамических материалах на основе оксидов меди, — открытия, положившего начало новой эре в исследовании этого явления.

И, наконец, в октябре 2011 г. отмечается 95-я годовщина со дня рождения выдающегося российского физика, лауреата Нобелевской премии (2003), академика Виталия Лазаревича Гинзбурга, внесшего выдающийся вклад в развитие теории этого явления, и ставшего одним из пионеров высокотемпературной сверхпроводимости, а также вдохновителем и организатором исследований в этой области.

Цель конференции — обмен научной информацией между участниками и обсуждение фундаментальных проблем в области высокотемпературной сверхпроводимости. Программа мероприятия предусматривает 4 секции:

- Секция М. Механизмы высокотемпературной сверхпроводимости
- Секция Р. Физические свойства ВТСП-материалов и структур
- Секция N. Новые сверхпроводники и родственные материалы
- Секция А. Применения

**Подробнее о конференции, а также правилах и условиях участия в ней, можно узнать на официальном сайте мероприятия <http://fps11.lebedev.ru>.**

**В. Э. Джашинов**, д-р техн. наук, проф., зав. лаб.,  
**В. М. Панкратов**, д-р техн. наук, проф., зам.  
 директора по науке,  
 Институт проблем точной механики и управления  
 РАН, г. Саратов,  
 e-mail: iptmuran@san.ru

## СУПЕРМИНИАТЮРНЫЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ИНЕРЦИАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННЫХ И ПОСТОЯННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Поступила в редакцию 24.03.2011

*Построены математические модели, разработано поддерживающее программное обеспечение и изучено влияние постоянных и вибрационных, поступательных и угловых ускорений на функционирование суперминиатюрного (объем < 0,2 мм<sup>3</sup>) микромеханического датчика инерциальной информации. Получены качественные и количественные оценки такого влияния на выходные характеристики датчика, выявлены наиболее неблагоприятные механические воздействия и их сочетания. Полученные данные позволят создать суперминиатюрный микромеханический гироскоп с заданными свойствами.*

**Ключевые слова:** суперминиатюрный микромеханический датчик инерциальной информации, уравнения движения, переменные вибрационные и постоянные механические воздействия, математические модели

### Введение

В статье [1] рассмотрены теоретические основы разработки суперминиатюрного микромеханического датчика инерциальной информации. Получены уравнения движения датчика на произвольно движущемся основании, предложены возможные конструктивные варианты его упругого подвеса, здесь же получены первичные оценки эффективности работы датчика с учетом температурных и технологических погрешностей.

Настоящая работа продолжает начатые исследования. В реальных условиях на функционирование датчика оказывают влияние постоянные и вибрационные, поступательные и угловые ускорения. Эти факторы в лучшем случае приводят к погрешностям прибора, а в худшем могут привести и к функциональному отказам.

Изучение с помощью построенных математических моделей влияния перечисленных факторов на точность, надежность и, в конечном итоге, на эффективность функционирования суперминиатюрного микромеханического датчика инерциальной информации (одноосного микромеханического

гироскопа, сокращенно СММГ) — *главная цель* настоящего исследования.

Кинематическая схема и возможные конструктивные схемы суперминиатюрного "простого" микромеханического гироскопа без дополнительных рамок с поступательными малыми движениями чувствительного элемента (ЧЭ) представлена на рис. 1 (см. четвертую сторону обложки).

Конструкция осциллятора содержит ЧЭ 1, который крепится к корпусу 2 с помощью двух упругих элементов 5, 6 (двухсторонний симметричный подвес) или одного упругого элемента (консольный подвес). Наиболее простые формы упругих элементов подвеса — прямолинейные стержни квадратного поперечного сечения, но могут быть и криволинейные формы элементов. Наиболее простая форма ЧЭ — это куб.

*Принцип действия* такого "простого" датчика инерциальной информации следующий. На противоположных гранях ЧЭ и корпусе располагаются микроэлектромеханические (МЭМС) структуры для возбуждения первичных колебаний по оси  $x$  заданной амплитуды и частоты и для съема выходной информации — вторичных колебаний по оси  $y$ , обусловленных кориолисовыми силами инерции при наличии измеряемой угловой скорости  $\Omega$ .

### Математические модели для исследования влияния на СММГ постоянных и переменных, поступательных и угловых ускорений

Уравнения движения "идеального" (без погрешностей) датчика на произвольно движущемся основании имеют вид [1]

$$\ddot{y} + \frac{\mu}{m} \dot{y} + (c/m - \Omega^2 - \Omega_x^2)y + 2\Omega\dot{x} + (\Omega_x\Omega_y + \dot{\Omega})x - \Omega_x V_z + \Omega V_x + \dot{V}_y = 0; \quad (1)$$

$$\ddot{x} + \frac{\mu}{m} \dot{x} + (c/m - \Omega^2 - \Omega_y^2)x - 2\Omega\dot{y} + (\Omega_x\Omega_y - \dot{\Omega})y + \Omega_y V_z - \Omega V_y + \dot{V}_x = F \cos pt, \quad (2)$$

где  $x(t)$ ,  $y(t)$  — координаты ЧЭ, соответствующие первичным и вторичным колебаниям;  $F$ ,  $p$  — амплитуда и частота вынуждающей силы, обеспечивающей заданные первичные колебания по оси  $x$ ;  $m$ ,  $\mu$ ,  $c$  — масса ЧЭ, коэффициенты демпфирования и жесткости подвеса;  $\Omega(t) = \Omega_z(t)$  — измеряемая составляющая угловой скорости объекта, на котором установлен датчик;  $\Omega_x(t)$ ,  $\Omega_y(t)$  — перекрестные составляющие угловой скорости объекта;  $V_x(t)$ ,  $V_y(t)$ ,  $V_z(t)$  — составляющие вектора скорости объекта.

Уравнения движения "идеального" (без погрешностей) датчика на "идеально" движущемся (име-

ется только измеряемая угловая скорость  $\Omega = \text{const}$ ) основании [1] имеют вид

$$\ddot{y} + \frac{\mu}{m} \dot{y} + (c/m - \Omega^2)y + 2\Omega\dot{x} = 0; \quad (3)$$

$$\ddot{x} + \frac{\mu}{m} \dot{x} + (c/m - \Omega^2)x - 2\Omega\dot{y} = F \cos pt. \quad (4)$$

Полагаем, что поступательное и угловое движение основания описывается соотношениями, включающими в себя постоянные и переменные составляющие по всем осям  $x, y, z$ :

$$V_{x(y, z)}(t) = V_{x0(y0, z0)} + B_{x(y, z)}t + A_{x(y, z)} \sin(q_{x(y, z)}t); \quad (5)$$

$$\dot{V}_{x(y, z)}(t) = W_{x(y, z)}(t) = B_{x(y, z)} + A_{x(y, z)}q_{x(y, z)} \cos(q_{x(y, z)}t); \quad (6)$$

$$\Omega_{x(y, z)}(t) = \Omega_{x0(y0, z0)} + E_{x(y, z)}t + D_{x(y, z)} \sin(r_{x(y, z)}t); \quad (7)$$

$$\dot{\Omega}_{x(y, z)}(t) = \varepsilon_{x(y, z)} = E_{x(y, z)} + D_{x(y, z)}r_{x(y, z)} \cos(r_{x(y, z)}t), \quad (8)$$

где  $V_{x0(y0, z0)}, B_{x(y, z)}, A_{x(y, z)}, \Omega_{x0(y0, z0)}, E_{x(y, z)}, D_{x(y, z)}$  — коэффициенты, определяющие постоянные и переменные законы изменения поступательных и угловых скоростей основания;  $q_{x(y, z)}, r_{x(y, z)}$  — частоты гармонических поступательных и угловых движений основания.

При представлениях (5)—(8) действующие на датчик постоянные и переменные поступательные и угловые скорости и ускорения запишутся в общем виде:

$$W(t) = W_0 + W_1 \cos(\omega_w t), \\ V(t) = W_0 t + (W_1/\omega_w) \sin(\omega_w t), \quad (9)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 \cos(\omega_\varepsilon t), \\ \Omega(t) = \varepsilon_0 t + (\varepsilon_1/\omega_\varepsilon) \sin(\omega_\varepsilon t),$$

где  $W_0, W_1, \varepsilon_0, \varepsilon_1$  — коэффициенты, определяющие постоянные и переменные законы изменения поступательных и угловых ускорений основания;  $\omega_w, \omega_\varepsilon$  — частоты гармонических поступательных и угловых движений основания.

Уравнения и соотношения (1)—(9) представляют собой математические модели для анализа влияния на СММГ постоянных и переменных, поступательных и угловых ускорений.

Для увеличения чувствительности датчик настраивается на резонанс. Собственные частоты гироскопа определяются [2—5] из характеристического уравнения, соответствующего системе (3),

(4), и квадраты этих частот при отсутствии демпфирования  $\mu = 0$  имеют вид:

$$k^2 = c/m + \Omega^2 \pm 2\Omega \sqrt{c/m}. \quad (10)$$

Собственные частоты зависят от измеряемой угловой скорости  $\Omega$ , но в реальных условиях  $\Omega^2 \ll c/m$ , поэтому при резонансной настройке можно полагать  $k^2 = c/m = p^2$ . Для моделирования примем, как исходные, следующие характеристики СММГ:

$$m = 10^{-8} \text{ кг}, p = 10^3 \text{ Гц}, \\ F = 1,256 \cdot 10^{-7} \text{ Н}, \mu = 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{с/м}.$$

Принятые данные обеспечивают при резонансной настройке  $k^2 = c/m = p^2$  амплитуду первичных колебаний по оси  $x$  на уровне  $A_x = 20$  мкм и при измеряемой угловой скорости  $\Omega = 1 \text{ с}^{-1}$  амплитуду вторичных колебаний по оси  $y$  на уровне  $A_y = 0,4$  мкм. В "идеальном" датчике с изменением  $\Omega$  должна пропорционально изменяться амплитуда вторичных колебаний  $A_y$ , которую будем считать номинальной  $A_{y\text{ном}}$ .

Диапазоны изменения параметров постоянных и переменных воздействий (9) примем следующие [2, 3]:

- постоянные поступательные и угловые ускорения, амплитуды поступательных и угловых вибраций  $W_0, W_1 = (0 \dots 100)g, \varepsilon_0, \varepsilon_1 = (0 \dots 1000)c^{-2}$ ;
- частоты поступательных и угловых вибраций  $\omega_w, \omega_\varepsilon = (0,005 \dots 0,1)p$ .

Для численного интегрирования уравнений движения (1)—(4) с учетом уравнений движения основания (5)—(9) датчика и принятыми исходными данными разработан программный комплекс СММГ1, основные диалоговые окна которого показаны на рис. 2 (см. четвертую сторону обложки).

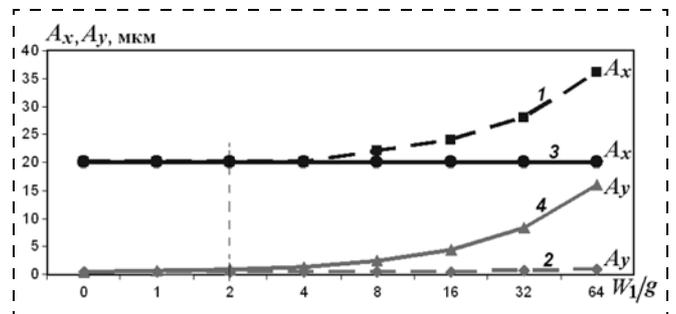


Рис. 3. Влияние амплитуды  $W_1/g$  поступательных вибраций частоты  $\omega_w = 0,005p$  на амплитуды первичных  $A_x$  и вторичных  $A_y$  колебаний СММГ при измерении постоянной угловой скорости  $\Omega = 1 \text{ с}^{-1}$ :

1, 2 — вибрации по оси  $x$  первичных колебаний; 3, 4 — вибрации по оси  $y$  вторичных колебаний

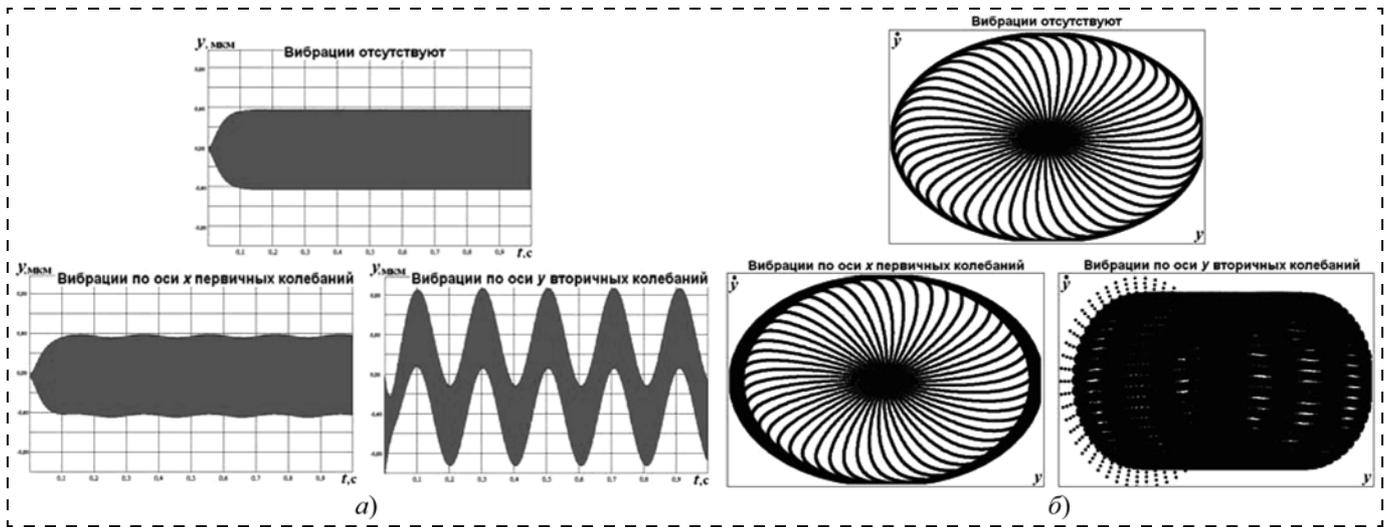


Рис. 4. Влияние поступательных вибраций амплитуды  $W_1 = 2g$  и частоты  $\omega_w = 0,005p$  на выходной сигнал СММГ (а) и фазовые портреты (б) при измерении постоянной угловой скорости  $\Omega = 1 \text{ c}^{-1}$

### Поступательные вибрации

По результатам компьютерных экспериментов с помощью программного комплекса SMMG1 на рис. 3, 4 построены зависимости, отражающие влияние поступательных вибраций основания датчика на его характеристики.

Выявлено, что наибольшее влияние оказывают поступательные вибрации  $\dot{V}_y$  по оси  $y$  вторичных колебаний. Влияние носит нелинейный характер, начиная с амплитуд вибраций  $W_1 > 4g$ . Эти вибрации вызывают значительные искажения и отклонения амплитуды выходного сигнала от номинального вида и значений. Полученный результат объясняется тем, что составляющая ускорения  $\dot{V}_y$  непосредственно входит в информационное уравнение (1) вторичных колебаний и оказывает существенное воздействие на выходные характеристики СММГ.

Поступательные вибрации  $\dot{V}_x$  по оси  $x$  первичных колебаний оказывают меньшее влияние на выходные характеристики датчика. Но при достаточно больших амплитудах вибраций  $W_1 > 8g$  происходят изменения первичных колебаний, приводящие к искажениям вторичных (информационных) колебаний гироскопа. Компьютерные эксперименты с уве-

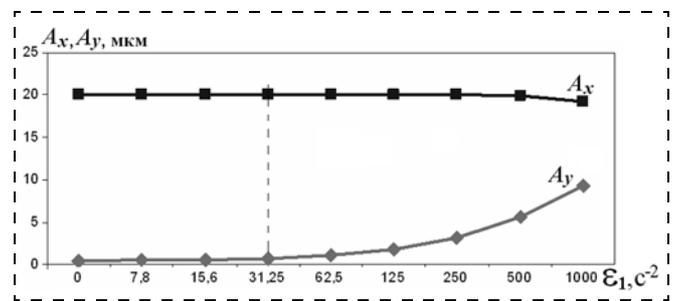


Рис. 5. Влияние амплитуды  $\epsilon_1$  угловых вибраций по оси  $z$  частоты  $\omega_\epsilon = 0,005p$  на амплитуды первичны  $A_x$  и вторичных  $A_y$  колебаний СММГ при измерении постоянной угловой скорости  $\Omega = 1 \text{ c}^{-1}$

личенной частотой  $\omega_w$  поступательных вибраций до  $\omega_w = 0,1p$  привели к таким же результатам.

### Угловые вибрации

По результатам компьютерных экспериментов с помощью программного комплекса SMMG1 на рис. 5, 6 построены зависимости, отражающие влияние угловых вибраций датчика по оси  $z$  (измеряемой угловой скорости  $\Omega$ ) на его характеристики.

Выявлено, что наибольшее влияние оказывают угловые вибрации по оси  $z$  измеряемой угловой

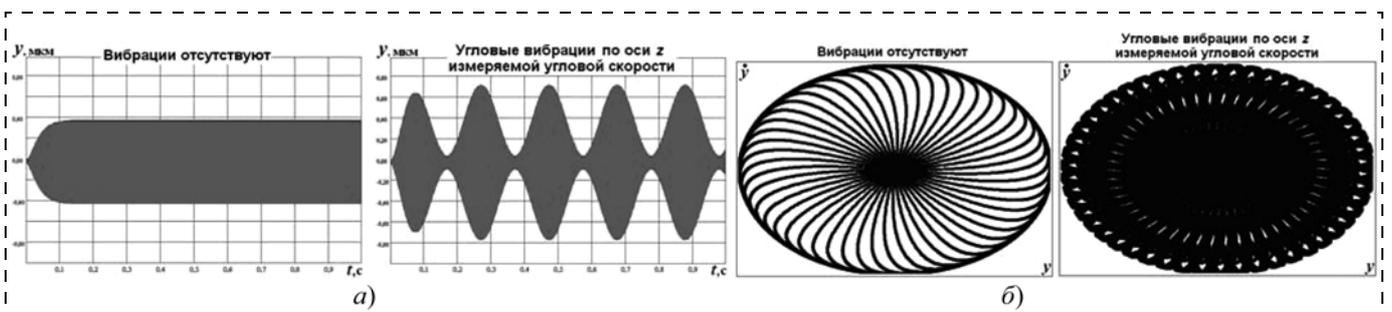


Рис. 6. Влияние угловых вибраций амплитуды  $\epsilon_1 = 31,25 \text{ c}^{-2}$  и частоты  $\omega_\epsilon = 0,005p$  на выходной сигнал СММГ (а) и фазовые портреты (б) при измерении постоянной угловой скорости  $\Omega = 1 \text{ c}^{-1}$

скорости  $\Omega$ . Влияние носит нелинейный характер, начиная с амплитуд вибраций  $\varepsilon_1 > 31,25 \text{ c}^{-2}$ . Эти вибрации вызывают значительные искажения и отклонения амплитуды выходного сигнала от номинального вида и значений. Полученный результат объясняется тем, что составляющая углового ускорения  $\dot{\Omega}$  непосредственно входит в информационное уравнение (1) вторичных колебаний и оказывает существенное воздействие на выходные характеристики СММГ.

Угловые вибрации по другим осям  $x, y$  мало влияют на выходные характеристики датчика. С увеличением частоты угловых вибраций по оси  $z$  до величин  $\omega_\varepsilon = 0,1\rho$  уменьшается влияние этих угловых вибраций на выходные характеристики СММГ.

### Совместное действие поступательных и угловых вибраций

Важное значение имеет анализ одновременного воздействия поступательных и угловых вибраций и выявления степени влияния входящих в уравнения (1), (2) слагаемых  $\Omega V_y, \Omega V_x, \Omega_x V_z, \Omega_y V_z$ , обуславливающих перекрестные движения основания датчика.

Полагая постоянные составляющие ускорений  $W_0 = 0, \varepsilon_0 = 0$  в выражениях (9) и частоты поступательных и угловых вибраций одинаковыми

$\omega_w = \omega_\varepsilon = \omega$ , представим эти слагаемые в обобщенном виде:

$$\begin{aligned} V_{x(y, z)} \Omega_{x(y, z)} &= \frac{W_1 \varepsilon_1}{\omega^2} \sin^2 \omega t = \\ &= \frac{W_1 \varepsilon_1}{\omega^2} \left( \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

По результатам компьютерных экспериментов с помощью программного комплекса SMMG1 на рис. 7, 8 построены зависимости, отражающие влияние совместных поступательных и угловых вибраций датчика, представленных в виде (11) на его характеристики.

Выявлено, что наибольшее влияние на выходные характеристики СММГ оказывают совместные поступательные и угловые вибрации, обусловленные составляющими  $\Omega_z V_y$  и  $\Omega_z V_x$ .

Меньшее влияние оказывают совместные вибрации, обусловленные составляющей  $\Omega_x V_z$ . Практически не влияют на выходные характеристики СММГ совместные вибрации, обусловленные составляющей  $\Omega_y V_z$ .

Влияние совместных вибраций проявляется в искажении вида выходного сигнала, изменениях его амплитуды и появлении постоянных смещений во вторичных колебаниях по оси  $y$  в соответствии с полученной теоретической формулой (11).

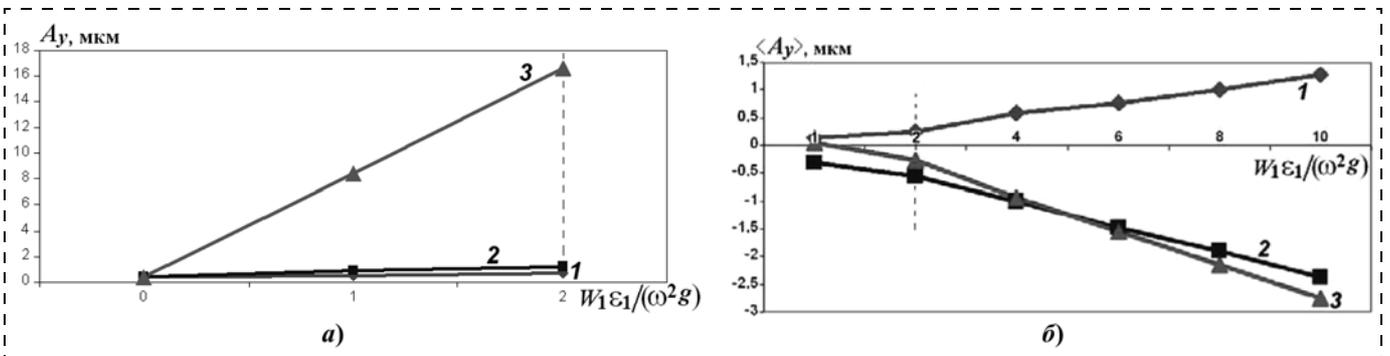


Рис. 7. Влияние амплитуды  $W_1 \varepsilon_1 / (\omega^2 g)$  совместных поступательных и угловых вибраций частоты  $\omega = 0,005\rho$  на амплитуду  $A_y$  вторичных колебаний СММГ и постоянное смещение  $\langle A_y \rangle$  при измерении постоянной угловой скорости  $\Omega = 1 \text{ c}^{-1}$ :

1 – совместное воздействие вибраций  $\Omega_x V_z$ ; 2 –  $\Omega_z V_x$ ; 3 –  $\Omega_z V_y$

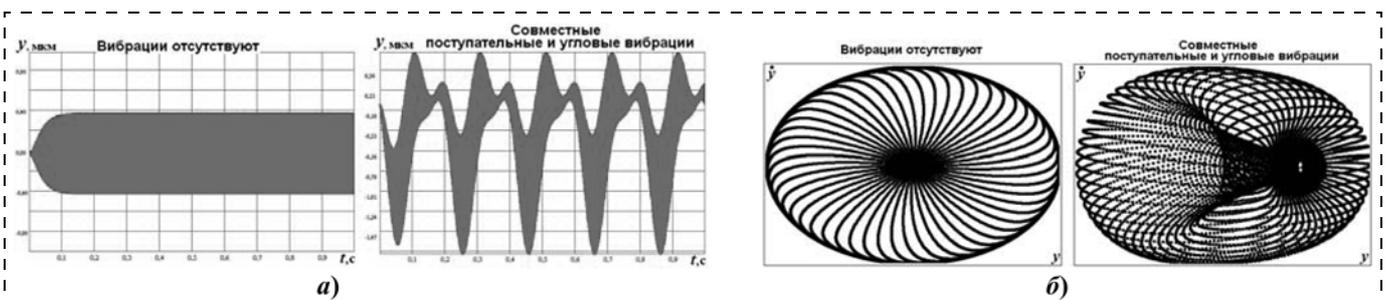


Рис. 8. Влияние совместных поступательных и угловых вибраций  $\Omega_z V_x$  амплитуды  $W_1 \varepsilon_1 / (\omega^2 g) = 2$  и частоты  $\omega_\varepsilon = 0,005\rho$  на выходной сигнал СММГ (a) и фазовые портреты (b) при измерении постоянной угловой скорости  $\Omega = 1 \text{ c}^{-1}$

## Постоянные поступательные и угловые ускорения

При измерении постоянной угловой скорости  $\Omega = \text{const}$  в результате действия поступательных постоянных ускорений  $W_0 = \dot{V}_x = \text{const}$  в канале первичных колебаний появляется постоянное смещение по оси  $x$ , а в канале вторичных колебаний возникает постоянный уход по информационной координате  $y$ .

В результате действия поступательных постоянных ускорений  $W_0 = \dot{V}_y = \text{const}$  в канале вторичных колебаний появляется постоянное смещение по оси  $y$  и уменьшается амплитуда вторичных колебаний, а в канале первичных колебаний возникает постоянный уход по координате  $x$ .

Полученные результаты полностью соответствуют уравнениям движения (1), (2) датчика на подвижном основании.

При измерении постоянной угловой скорости  $\Omega = \text{const}$  действие постоянных угловых ускорений  $\epsilon_0 = \text{const}$  в каналах первичных ( $x$ ) и вторичных ( $y$ ) колебаний приводит к росту с течением времени угловых скоростей  $\Omega_x = \epsilon_0 t$  и  $\Omega_y = \epsilon_0 t$ . Это, в соответствии с уравнениями движения (1), (2), вызывает нарушения резонансной настройки датчика (составляющие  $\Omega_x^2$ ,  $\Omega_y^2$ ) и усиление влияния перекрестных угловых скоростей (составляющие  $\Omega_x \Omega_y$ ).

Действие постоянного углового ускорения  $\epsilon_0 = \dot{\Omega}_z = \text{const}$  по оси  $z$  измеряемой угловой скорости приводит к изменениям кориолисовых сил инерции, нарушениям резонансной настройки и другим возмущениям уравнений (1), (2), и его влияние еще более значимо, чем действие постоянных угловых ускорений по другим осям.

В целом, постоянные угловые ускорения вызывают уменьшение с течением времени амплитуд первичных и вторичных колебаний СММГ.

## Заключение

- Построены математические модели, разработано поддерживающее алгоритмическое и программное обеспечение и изучено влияние постоянных и вибрационных, поступательных и угловых ускорений на функционирование суперминиатюрного (объем  $< 0,2 \text{ мм}^3$ ) микромеханического датчика инерциальной информации.

- Получены качественные и количественные оценки такого влияния на выходные характеристики датчика.

Выявлено, что наибольшее влияние на выходные характеристики датчика оказывают поступательные вибрации  $\dot{V}_y$  по оси  $y$  вторичных колебаний. Среди угловых ускорений наибольшее влияние оказывают угловые вибрации по оси  $z$  измеряемой угловой скорости  $\Omega$ . При совместном действии поступательных и угловых переменных ускорений наибольшее влияние на выходные характеристики СММГ оказывают совместные поступательные и угловые вибрации, обусловленные составляющими  $\Omega_z V_y$  и  $\Omega_z V_x$ . Постоянные поступательные  $\dot{V}_x = \text{const}$  и  $\dot{V}_y = \text{const}$  и угловые ускорения относительно осей  $x$ ,  $y$  и особенно относительно оси  $z$  значительно влияют на выходные характеристики СММГ.

- В целом, на суперминиатюрный микромеханический гироскоп, представляющий собой динамическую колебательную систему с распределенными параметрами, вибрации и постоянные действующие ускорения оказывают *значительное влияние*, и необходимо принятие специальных мер по обеспечению инвариантности датчика к этим воздействиям.

Полученные данные и принятые меры позволят создать суперминиатюрный микромеханический гироскоп с заданными свойствами.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ по проекту 10-08-00119а.*

## Список литературы

1. Джашитов В. Э., Панкратов В. М., Барулина М. А. Теоретические основы разработки и создания суперминиатюрного микромеханического многофункционального датчика инерциальной информации // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 5 (118). С. 46–54.
2. Распов В. Я. Микромеханические приборы: учебное пос. 2-е издание, перераб. и доп. Тула: Гриф и К, 2004. 476 с.
3. Пешехонов В. Г., Несенюк Л. П., Грязин Д. Г., Некрасов Я. А., Евстифеев М. И., Блажнов Б. А., Аксененко В. Д. Инерциальные модули на микромеханических датчиках. Разработка и результаты испытаний // Юбилейная XV С.-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам. С.-Петербург, ЦНИИ "Электроприбор", 2008. С. 9–15.
4. Джашитов В. Э., Панкратов В. М. Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий / Под общей ред. акад. РАН В. Г. Пешехонова. С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2005. 404 с.
5. Бидерман В. Л. Теория механических колебаний: учебник для вузов. М.: Высш. школа, 1980. 408 с.

УДК 621.382

**Ю. Ф. Адамов**, д-р техн. наук, проф.,  
зав. сектором,  
**Н. М. Горшкова**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,  
**А. Г. Сибатуллин**, канд. техн. наук, научн. сотр.,  
**О. А. Сомов**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,  
Учреждение Российской академии наук  
Институт проблем проектирования в  
микроэлектронике РАН,  
e-mail: adamov@ippm.ru

## АДАПТИВНАЯ КОРРЕКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ В СИСТЕМАХ НА КРИСТАЛЛЕ

*Поступила в редакцию 14.03.2011*

*Методы адаптивной коррекции функциональных блоков позволяют уменьшить зависимость их выходных параметров от технологического разброса параметров транзисторов, подавить инжекцию электронов в подложку при переключении мощных токовых ключей, снизить перекрестные помехи в линиях связи.*

**Ключевые слова:** адаптивная коррекция параметров, технологический разброс параметров, инжекция электронов в подложку, перекрестные помехи

### Введение

Современные системы на кристалле (СнК) используют все более сложные алгоритмы обработки сигналов и более высокие частоты. Изготавливают СнК по типовым КМОП-технологическим процессам. С уменьшением размеров элементов КМОП БИС повышаются их быстродействие, уровень перекрестных помех и технологический разброс параметров. Напряжение питания при этом снижается. Для уменьшения влияния помех и искажений сигналов в СнК необходимо корректировать параметры функциональных блоков на всех этапах обработки сигнала [1, 2]. Кроме того, коррекции параметров не могут быть выполнены однократно. Режимы и условия работы меняются, и коррекции необходимо проводить периодически. Известно много технических решений для коррекции сигналов в сложнофункциональных (СФ) бло-

ках, основанных на применении аналоговых функциональных узлов. Однако универсальные решения, не зависящие от конкретного технологического процесса, условий применения и состава СнК, можно реализовать только с использованием цифровых методов. В статье приведены примеры универсальных адаптивных методов коррекции помех и искажений сигналов в СФ-блоках.

### Учет технологического разброса

Важнейшая проблема аналоговой микросхемотехники — это увеличение технологического разброса параметров элементов с уменьшением их размеров. Пара КМОП-транзисторов с длинами затворов  $\sim 0,18$  мкм имеет случайное смещение  $\sigma(V_{\text{пор}}) = 2 \dots 4$  мВ.

Случайное смещение увеличивается с уменьшением размеров КМОП-транзисторов, а динамический диапазон входного сигнала уменьшается. Вследствие низкого усиления субмикронных КМОП-транзисторов смещения всех транзисторов компаратора накапливаются, что может привести к общему приведенному ко входу напряжению смещения нуля компаратора, равному нескольким десяткам милливольт.

Технологические вариации обычно называют несоответствием элементов. Они зависят от размеров элементов. Разработчик может лишь использовать размеры (ширину и длину) элементов электрической схемы для уменьшения разброса параметров [1, 2]. Зависимость разброса параметров элементов от их размеров и положения на кристалле описывается соотношением Пелгрона:

$$\sigma^2(\Delta P) = \frac{A_p^2}{WL} + S_p^2 D^2, \quad (1)$$

где  $\sigma^2(\Delta P)$  — дисперсия разности параметров ( $\Delta P$ ) двух одинаковых транзисторов (или других элементов). Она зависит от расстояния между ними  $D$  и их активной площади  $WL$ , где  $W$  и  $L$  — длина и ширина канала.  $A_p$  и  $S_p$  — параметры, определяемые экспериментально на основе измеренных значений разброса. Действие параметра  $S_p$  на несоответствие транзисторов можно исключить топологически. Главный параметр в формуле (1) — это  $A_p$ .

**Усредненные значения коэффициентов Пелгрма для различных КМОП-технологических процессов**

Минимальный размер элементов, мкм	Тип транзисторов	$A_{V_{пор}}$ , мВ · мкм	$A_{I_{нас}}$ , мкА · мкм
1,0	<i>n</i> МОП <i>p</i> МОП	13 23	2,5 3,2
0,7	<i>n</i> МОП <i>p</i> МОП	13 22	2,0 2,8
0,5	<i>n</i> МОП <i>p</i> МОП	12 13	1,6 2,3
0,35	<i>n</i> МОП <i>p</i> МОП	9 9	1,9 2,3
0,25	<i>n</i> МОП <i>p</i> МОП	7 6	1,9 1,9
0,18	<i>n</i> МОП <i>p</i> МОП	5 5	1,0 1,0

Производство КМОП-микросхем в значительной степени унифицировано. Параметры несоответствия у разных производителей отличаются незначительно, что подтверждается в ряде публикаций и нашими исследованиями. Для качественной оценки разброса параметров КМОП-транзисторов с длиной затвора 0,18 мкм можно использовать следующие приближения в формуле Пелгрма:

$$\sigma(V_{пор}) = \frac{5[\text{мВ} \cdot \text{мкм}]}{\sqrt{WL}}; \quad (2)$$

$$\sigma(I_{нас}) = \frac{1,0[\text{мкА} \cdot \text{мкм}]}{\sqrt{WL}}. \quad (3)$$

В таблице приведены усредненные значения коэффициентов для различных КМОП-технологических процессов.

Из таблицы видно, что КМОП-технологические процессы с меньшими минимальными размерами имеют меньшие абсолютные значения разброса параметров. Использование транзисторов с равными размерами в технологиях с различными минимальными размерами приводит к меньшему разбросу параметров в технологии с меньшими размерами. Однако для транзисторов с минимальными размерами в обеих технологиях большой разброс параметров будут иметь транзисторы, выполненные по технологии с меньшими размерами. Таким образом, для достижения минимального влияния разброса параметров элементов на характеристики аналоговых блоков целесообразно использовать технологические процессы с меньшими допустимыми размерами элементов. Также необходимо использовать транзисторы не минимальных размеров.

Аналоговые методы коррекции разброса параметров элементов и искажений увеличивают число

элементов, которые влияют на разброс выходных параметров блока. Переход на другую технологию потребует полного изменения электрической схемы, ее параметров и создание новой топологии. Универсальные решения достигаются только цифровыми методами. Цифровые блоки коррекции легко воспроизводятся автоматизированными средствами проектирования при переходе на другую технологию с другими технологическими нормами, практически не подвержены помехам в цепях питания и подложке. Дополнительным преимуществом цифровых методов коррекции является более простая адаптация алгоритмов коррекции для конкретных применений.

### Коррекция смещения нуля в компараторах

Предложен новый способ коррекции смещения нуля компараторов [3, 4]. Как известно ошибки, вносимые каждым элементом схемы, можно "привести ко входу", т. е. предположить, что общую суммарную ошибку (в нашем случае — напряжение смещения нуля) создают только два транзистора входной дифференциальной пары, а все остальные элементы схемы — идеальные. Тогда, добавив ко входу такое же напряжение, но с противоположным знаком, эту ошибку можно устранить.

Обратимся к рис. 1 и следующим формулам:

$$I_3 = I_7 + I_9 - I_1; \quad I_4 = I_8 + I_{10} - I_2. \quad (4)$$

Если потенциалы на затворах входных транзисторов  $T_1$  и  $T_2$  одинаковы и находятся в рабочей зоне компаратора, то вследствие действия "приведенного ко входу" напряжения смещения значения токов  $I_1$  и  $I_2$  будут разными.

Описываемый принцип коррекции основан на нахождении такого отношения токов  $I_9$  и  $I_{10}$ , при котором независимо от попарного неравенства токов  $I_1$  и  $I_2$ ,  $I_7$  и  $I_8$  переключение выхода компаратора в логический ноль или единицу было бы равновероятным. По своему действию это эквивалентно приложению ко входу компаратора существующего напряжения смещения, но с противоположным знаком. Далее это напряжение и токи  $I_9$  и  $I_{10}$  будем называть корректирующими. При этом диапазон "исправляемого" напряжения смещения нуля определяется отношением суммы корректирующих токов  $I_9$  и  $I_{10}$  к сумме постоянных токов  $I_7$  и  $I_8$ . Источником токов  $I_9$  и  $I_{10}$  является цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) с суммированием взвешенных токов. Отношение токов  $I_9$  и  $I_{10}$ , а значит, и знак, и значение корректирующего напряжения зависят от значения входного кода ЦАП. Число разрядов ЦАП при заданном диапазоне регулирования определяет значение остаточного напряжения смещения.

Структурная схема аналого-цифрового преобразователя (АЦП) прямого преобразования с таким принципом коррекции представлена на рис. 2 [4]. Ее особенностью является то, что каждый компа-

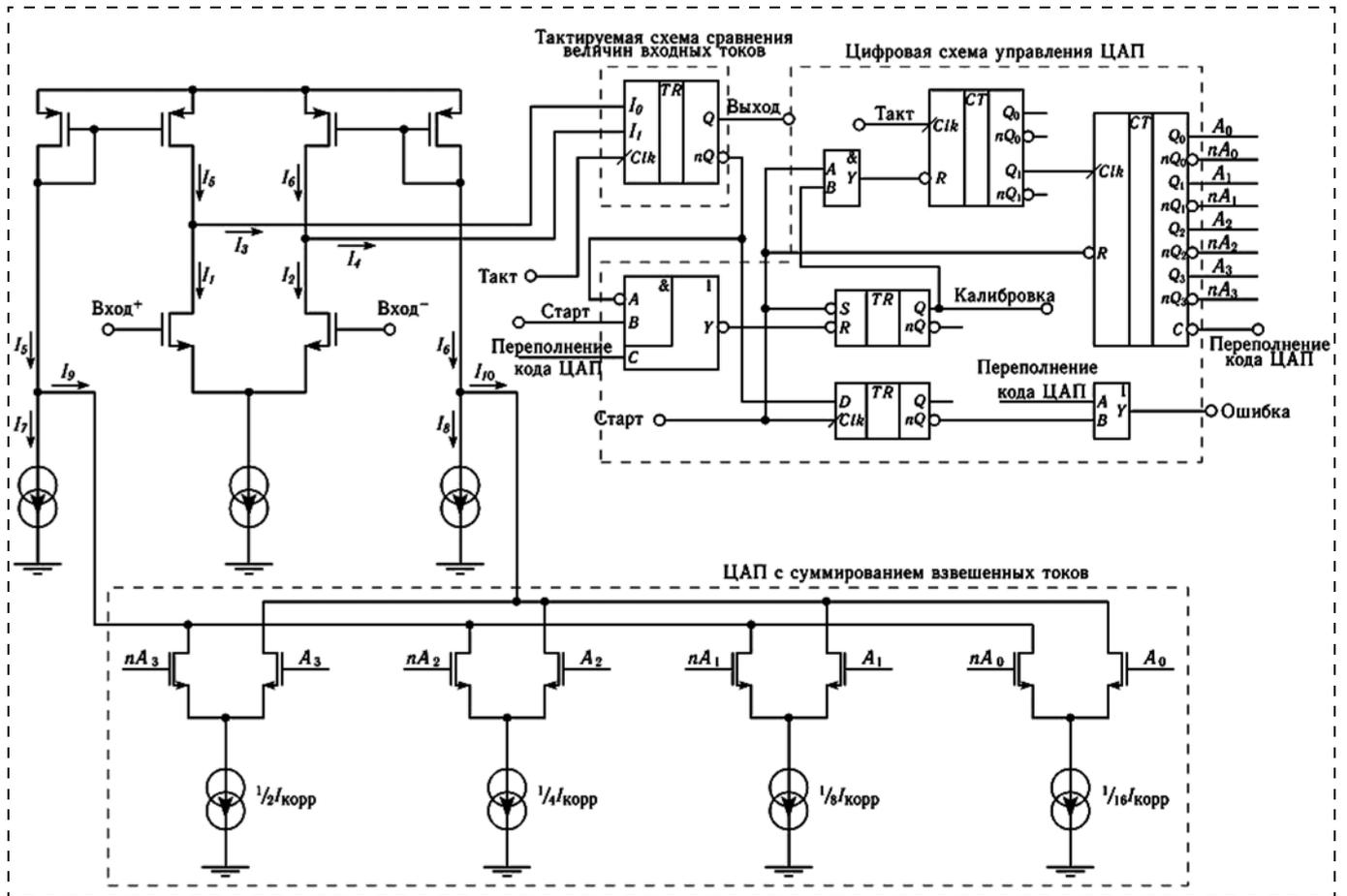


Рис. 1. Схема компаратора с блоком коррекции

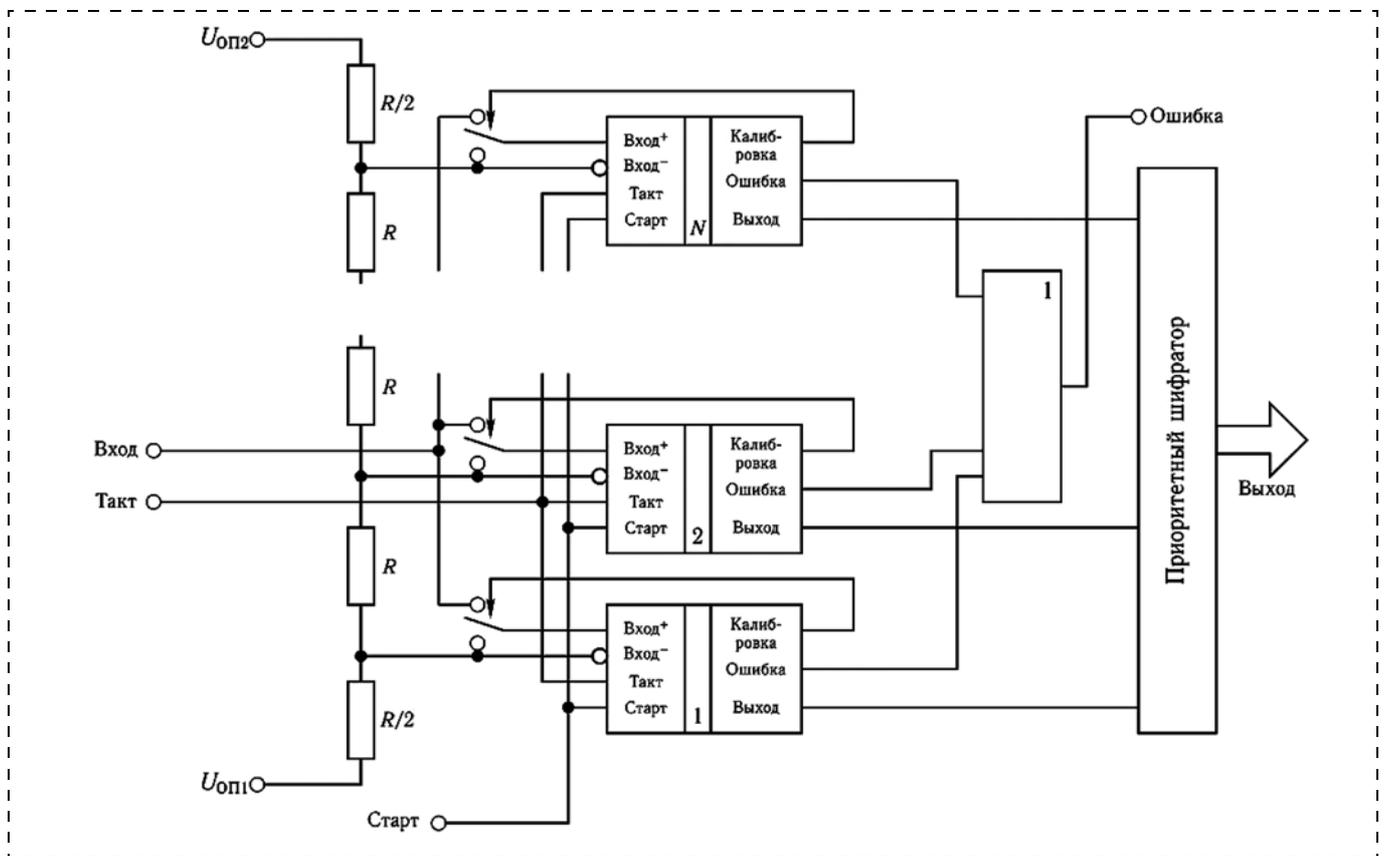


Рис. 2. АЦП прямого преобразования с коррекцией

ратор корректируется для своего входного опорного напряжения. Это в какой-то мере компенсирует ошибку, возникающую вследствие конечности ослабления синфазного сигнала во входном дифференциальном каскаде.

Коррекция напряжения смещения нуля компараторов происходит следующим образом. При переходе АЦП в режим коррекции между входами каждого компаратора "прикладывается" отрицательное корректирующее напряжение, которое постепенно изменяется к положительному. Процесс коррекции прекращается после того, как выход компаратора переключится в логическую единицу. Входы компаратора переключаются в нормальный режим работы. По принципу действия данного метода после завершения коррекции всегда будет присутствовать остаточное положительное напряжение смещения. Его значение хотя и имеет один знак, носит случайный характер. Это значение не превышает единицы шага квантования корректирующего напряжения. Для характеристики АЦП это соответствует сдвигу в одном направлении границ интервалов квантования.

Рассмотренный метод коррекции напряжения смещения нуля компаратора имеет ряд существенных достоинств. Главным из них является возможность использования в предварительном усилителе компаратора транзисторов с минимальными технологически доступными размерами при его исполнении по базовому КМОП-техпроцессу. Это позволяет достичь значительно большего быстродействия, чем для компаратора с таким же напряжением смещения нуля за счет применения транзисторов с "большими" размерами. Благодаря обратной связи с цифрового выхода компаратора, коррекции подвергаются все части схемы при действующих помехах. Во время работы АЦП для устранения погрешностей, возникающих от изменения температуры и воздействия других дестабилизирующих факторов, коррекцию можно проводить периодически по требованию управляющего устройства. Несмотря на то, что такой компаратор имеет дополнительно схему коррекции, его общие размеры могут быть меньше размеров компаратора, имеющего подобное напряжение смещения нуля, без коррекции, но с использованием "больших" транзисторов. К достоинствам также следует отнести упрощенный контроль образцов после производства. Достаточно после

включения питания подать на блок АЦП от управляющего блока сигналы *Такт* и *Старт*, если установился сигнал *Ошибка*, значит существующее напряжение смещения выходит за диапазон коррекции и данный образец можно считать браком. Недостатком является наличие некорректируемого остаточного напряжения смещения.

Одна из областей применения рассмотренного метода коррекции напряжения смещения нуля компаратора — быстродействующие АЦП параллельного преобразования в составе устройств класса СпК, выполненных по базовому КМОП-технологическому маршруту. Например, при моделировании 8-разрядного АЦП для 0,18 мкм технологического процесса было достигнуто максимальное значение для частоты преобразования 600 МГц.

По сигналу *Старт* устанавливаются исходные значения кода  $A[3:0]$  и  $nA[3:0]$ , сигналы *Переполнение кода ЦАП* и *Калибровка* (рис. 3). При этом

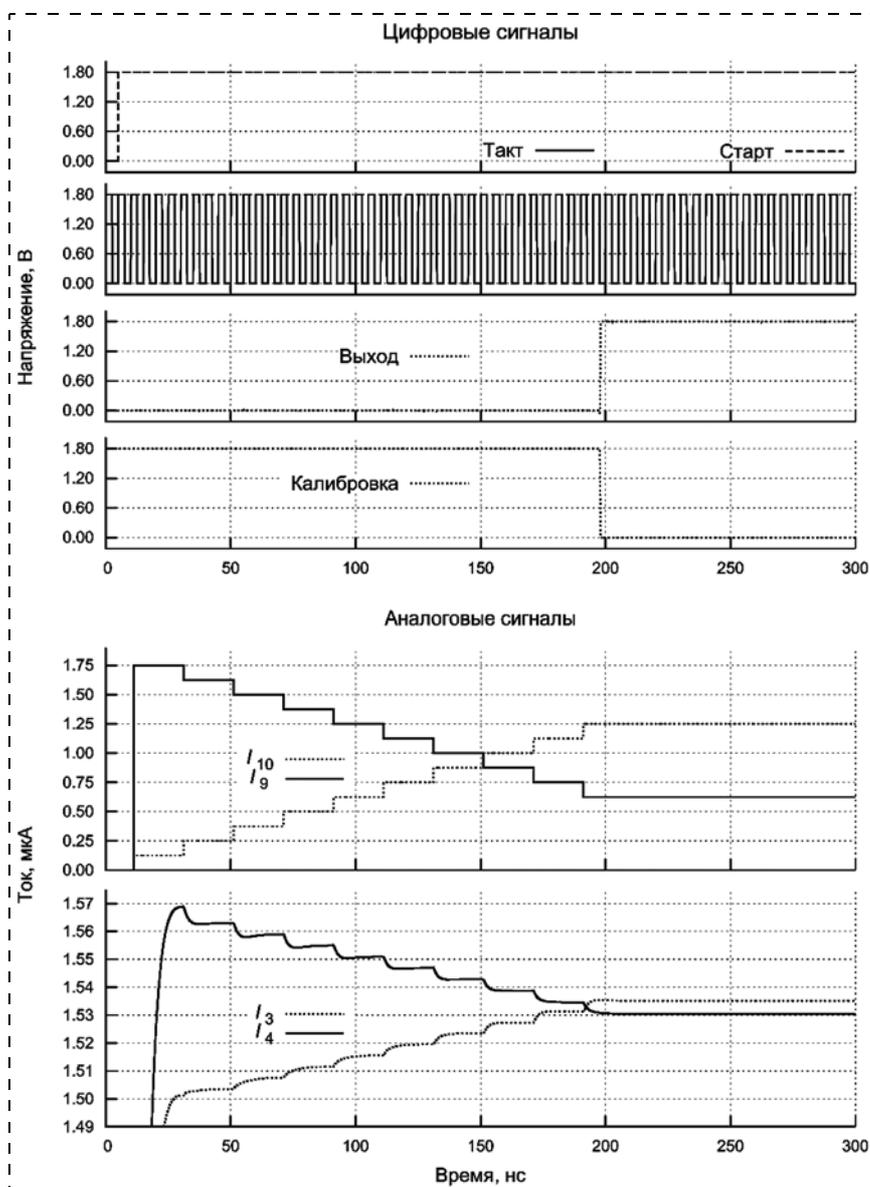


Рис. 3. Процесс коррекции компаратора. Токи  $I_9$ ,  $I_{10}$  — корректирующие токи на выходе ЦАП, токи  $I_3$ ,  $I_4$  — выходные токи входного каскада (см. рис. 1)

ток  $I_9$  будет максимальным, а ток  $I_{10}$  равным нулю, что эквивалентно приложению максимального отрицательного корректирующего напряжения между входами компаратора. Если после снятия сигнала *Старт* сигнал *Выход* компаратора находится в состоянии логического нуля, то существующее "приведенное ко входу" положительное напряжение смещения нуля не превышает по модулю значения максимального отрицательного корректирующего напряжения. Иначе вырабатывается сигнал *Ошибка* и процесс коррекции прекращается. При условии, что ошибки нет, значение кода  $A[3:0]$  увеличивается на единицу и, соответственно, отрицательное корректирующее напряжение уменьшится на один свой квант. Если за четыре периода сигнала *Такт* сигнал *Выход* компаратора не переключился в состояние логической единицы, то процесс увеличения значения кода  $A[3:0]$  повторяется. Четыре периода сигнала *Такт* необходимы для окончания переходных процессов в ЦАП и исключения влияния метастабильных состояний. Таким образом, корректирующее напряжение квантованно изменяется от максимально возможного отрицательного к максимально возможному положительному значению. Если исходное "приведенное ко входу" напряжение смещения нуля компаратора лежит внутри корректируемого диапазона, то как только корректирующее напряжение превысит его, сигнал *Выход* компаратора переключится в логическую единицу и процесс коррекции прекратится. Установка сигнала *Переполнение кода* ЦАП означает, что исходное "приведенное ко входу" отрицательное напряжение смещения нуля компаратора превышает по модулю значение максимального положительного корректирующего напряжения. В этом случае вырабатывается сигнал *Ошибка* и процесс коррекции также прекращается.

#### Выходной формирователь без инжекции в подложку

Кроме технологического разброса параметров элементов значительные искажения в характеристике аналоговых СФ-блоков вносят помехи, вызванные инжекцией неосновных носителей в подложку. Распространение инжектированных электронов по подложке может достигать нескольких миллиметров. Инжектированные электроны от выходных формирователей наблюдались экспери-

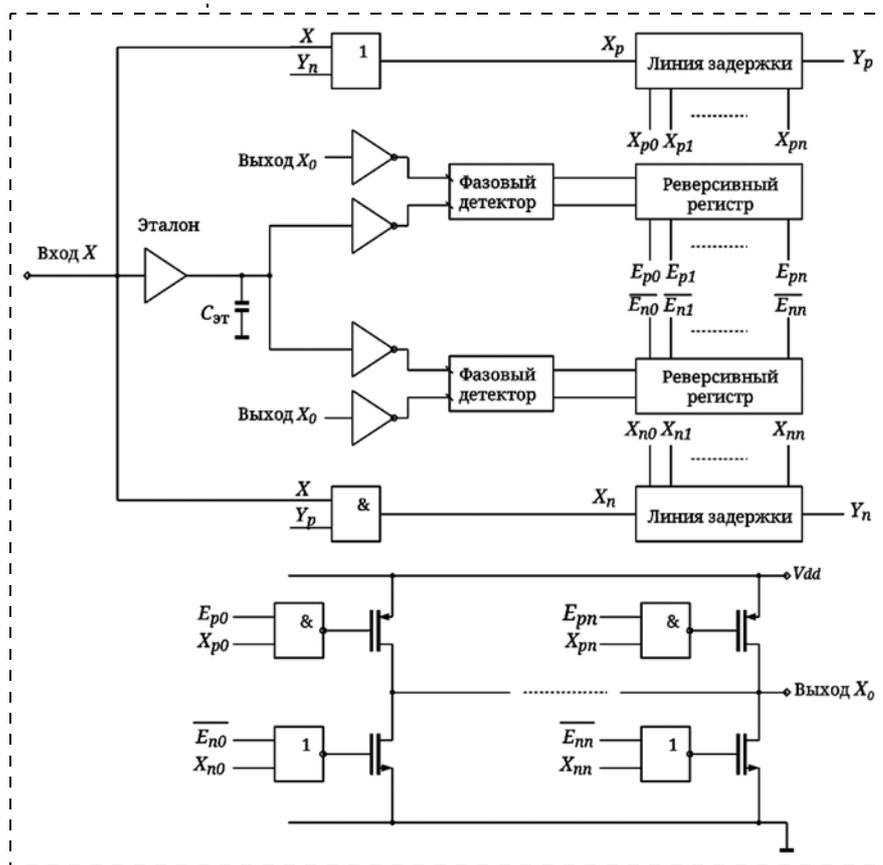


Рис. 4. Формирователь выходных сигналов с адаптивным подавлением инжекции в подложку

ментально в виде яркого светящегося пятна диаметром около 1 мм на микросхеме матричного фотоприемника. В данной работе предложен новый способ подавления инжекции электронов в подложку в схеме адаптивного формирователя выходных сигналов.

Известные схемы формирователей выходных сигналов обеспечивают только равную длительность фронтов и срезов сигналов независимо от емкости нагрузки [5, 6]. На рис. 4 представлена схема адаптивного формирователя выходных сигналов. Адаптивный формирователь с управляемой нагрузочной способностью обеспечивает одинаковые фронты и срезы выходных сигналов в широком диапазоне нагрузочной емкости. Управление только нагрузочной способностью не обеспечивает отсутствие инжекции электронов. Отсутствие инжекции определяется следующим соотношением:

$$\frac{dI_{\text{ВЫХ}}}{dt} L_{\text{внеш}} < U_{p-n} = 0,5 \text{ В}, \quad (5)$$

где  $L_{\text{внеш}}$  — индуктивность в цепях питания;  $U_{p-n}$  — напряжение  $p-n$ -перехода. Таким образом, необходимо дополнительное управление скоростью изменения выходного тока формирователя. Поэтому в схему формирователя добавлены линии задержки, обеспечивающие последовательное переключение секций выходных транзисторов. Скорость

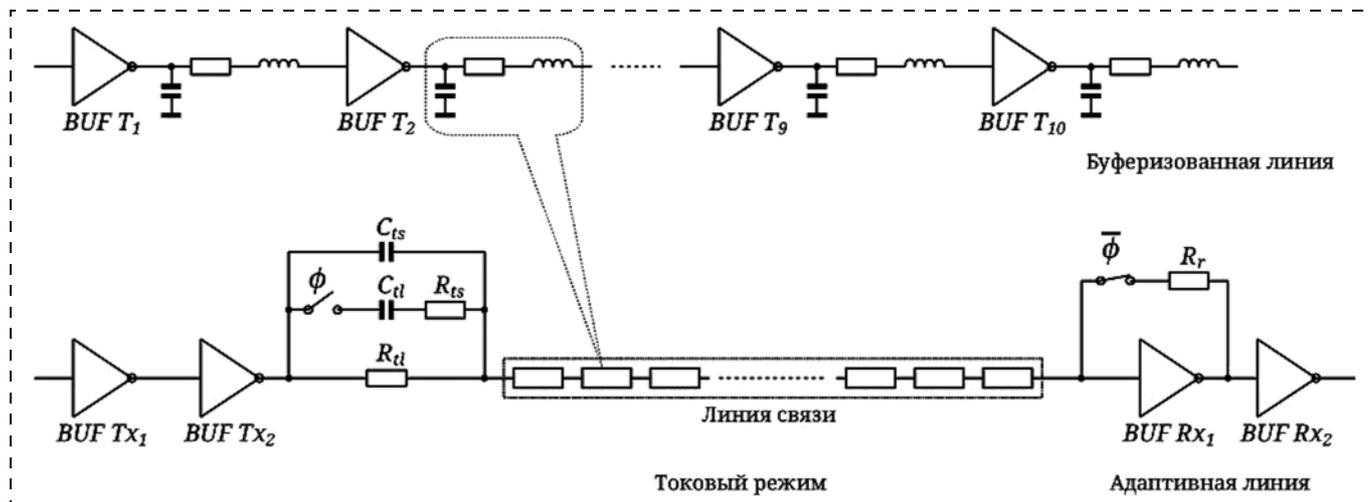


Рис. 5. Линии связи:

типовое буферизованное решение с равномерным расположением буферов BUF по всей линии и адаптивное с переключением токового и потенциального режимов работы. Сигналы  $\phi$  и  $\bar{\phi}$  — сигналы коммутации ключей

изменения тока в выходной цепи формирователя определяется размерами транзисторов в одной секции и минимальным значением задержки в линии, а максимальный выходной ток — числом подключенных секций выходных транзисторов. В схеме присутствует опорный элемент, формирующий эталонный фронт (срез), включающий эталонный драйвер с наименьшей нагрузочной способностью и эталонную емкость нагрузки ( $C_{эТ}$ ). Такой же выходной фронт (срез) схеме необходимо сформировать независимо от внешней нагрузки на выходе  $X_0$ . Эталонная емкость необходима для калибровки системы и ее значение определяется техническими требованиями к передаваемому сигналу. Формирователь состоит из двух равных частей, каждая из которых вырабатывает управляющие сигналы для формирования фронтов или срезов соответственно. Сигналы для управления длительностью фронта (среза) определяются блоком фазового детектора и реверсивного регистра путем сравнения эталонного сигнала и сигнала с выхода формирователя. Скорость нарастания выходного тока определяется числом активных секций выходных каскадов. Для формирования сигналов разрешения включения каскада используются линии задержки отдельно для управления  $p$ - и  $n$ -канальными транзисторами. Дополнительные логические элементы обеспечивают поочередное включение групп  $p$ - и  $n$ -канальных транзисторов.

Условием равенства длительности фронтов (срезов) сигнала является постоянство производной напряжения по времени заранее заданной постоянной величине  $K$ . Таким образом, значение константы  $K$  определяется значением эталонной емкости  $C_{эТ}$ . Выходной ток  $I_{\text{вых}}$  должен быть оп-

тимизирован до минимального возможного значения, определяемого нагрузочной емкостью  $C_{\text{нагр}}$ :

$$I_{\text{вых}} \rightarrow \min f(C_{\text{нагр}}). \quad (6)$$

Необходимым условием для устойчивой работы схемы формирователя выходных сигналов является условие того, что длительность фронта (среза) должна превышать общую задержку в линии задержки не менее, чем в 2 раза.

### Перекрестные помехи в линиях связи

В структуре микросхемы помеха в линии связи определяется влиянием близлежащих проводников. Основной вклад вносят помехи от проводников в том же слое металлизации, т. е.  $C_{\text{в}} \ll C_{\text{пар}}$ ,  $C_{\text{н}} \ll C_{\text{пар}}$ . Следовательно, для помехи в линии связи имеет место соотношение

$$U_{\text{пом}} = \frac{2 C_{\text{пар}} \Delta U_{\text{л.п}} \frac{2}{3} R_{\text{пар}}}{t_{\text{фр}}}, \quad (7)$$

где  $C_{\text{в}}$  и  $C_{\text{н}}$  — выходная и входная (нагрузочная) емкости логического элемента;  $C_{\text{пар}}$  и  $R_{\text{пар}}$  — эффективные паразитные емкость и сопротивление;  $\Delta U_{\text{л.п}}$  — логический перепад сигнала;  $t_{\text{фр}}$  — длительность фронта сигнала.

Для сигнала с  $\Delta U_{\text{л.п}} = 1,8$  В и длительностью фронта  $t_{\text{фр}} = 50$  пс в линии длиной  $l = 2$  мм оценочное значение перекрестной помехи достигает  $U_{\text{пом}} = 1$  В. На рис. 5 приведено типовое решение с повторяющимися буферами, расположенными на равном расстоянии, и предложенное новое решение.

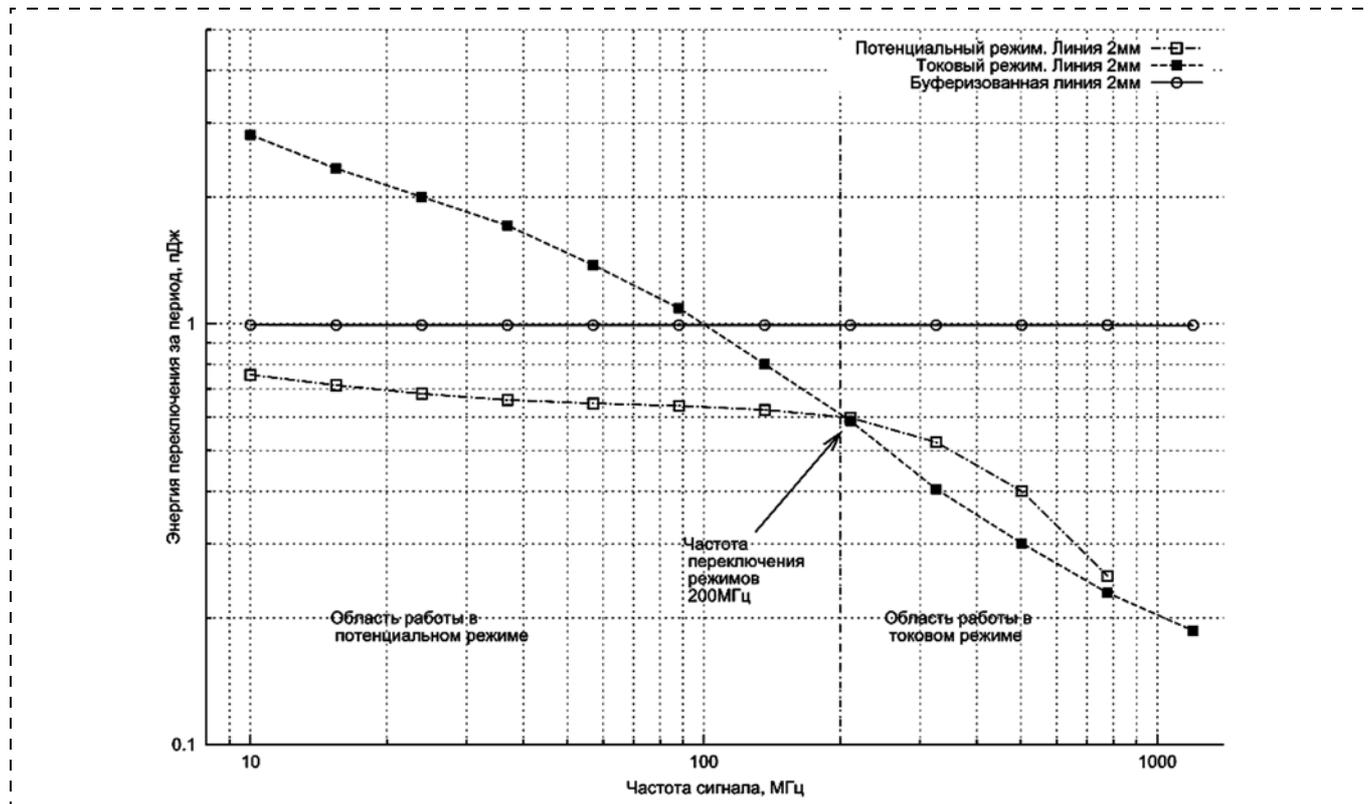


Рис. 6. Графики зависимости энергии переключения для буферизованной линии и линии с адаптивным управлением

### Повторитель сигнала с переключением режимов

Предложенное решение реализует переключенные режимы передачи сигнала на определенной частоте. На низких частотах повторитель использует потенциальный режим с ограничением тока, на высоких частотах — токовый режим передачи. Для низких частот потенциальный режим эффективнее, так как отсутствует постоянная составляющая тока. На высоких частотах в потенциальном режиме происходит значительное искажение сигнала [6]. Использование потенциального режима на высоких частотах невозможно. Помехоустойчивость токового режима на высоких частотах определяется 10-кратным уменьшением логического перепада. Универсальной точкой переключения режимов для различных длин линий связи при их ширине 0,22 мкм выбрана частота сигнала 200 МГц. Возможно также использование для разных длин линий различной, более актуальной в каждом конкретном случае, частоты изменения режима. На рис. 6 приведены графики зависимости энергии переключения за такт для различных режимов работы схемы с переключением режимов и типовой буферизованной схемы.

### Заключение

Цифровой метод компенсации смещения напряжения нуля компараторов позволяет повысить быстродействие и точность функциональных блоков.

Подавление инъекции неосновных носителей в подложку в схеме адаптивного выходного формирователя сигналов снижает искажения сигналов в микромощных аналоговых блоках.

Снижение перекрестных помех в линиях связи достигается путем переключения потенциального и токового режимов работы формирователя на различных частотах сигналов.

### Список литературы

1. Адамов Ю. Ф., Губин Я. С., Сибатуллин А. Г., Сомов О. А. Аналоговые блоки в системах на кристалле // Электроника НТБ. 2004. № 8. С. 48—51.
2. Адамов Ю. Ф., Губин Я. С., Сибатуллин А. Г., Сомов О. А. Аналоговые блоки в системах на кристалле (Продолжение) // Электроника НТБ. 2005. № 1. С. 70—73.
3. Зайцев А. А., Сибатуллин А. Г. Метод коррекции напряжения смещения нуля компаратора для быстродействующего АЦП // 48-я Научная конференция МФТИ. М.: МФТИ, 2005. С. 140.
4. Зайцев А. А., Сибатуллин А. Г., Горшкова Н. М., Губин Я. С. Способ калибровки напряжения смещения нуля компаратора аналого-цифрового преобразователя и устройство для его осуществления / Пат. РФ № 2301427; заявл. 29.12.2005; опубл. 20.06.2007; Бюл. № 17. 9 с.
5. Сибатуллин А. Г., Губин Я. С. Аналоговый интерфейс для систем отображения информации на основе ЖК панелей // Электросвязь. 2006. № 4. С. 36—38.
6. Сибатуллин А. Г. Снижение влияния технологических вариаций и помех на искажения сигнала в быстродействующих встраиваемых АЦП для систем на кристалле // IV Всероссийская научно-техническая конференция "Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем—2010". Сб. трудов / Под общ. ред. акад. РАН А. Л. Стемповского. 2010.

## Новая схема обработки сигнала для бесконтактного обнаружения движения

Представлено описание новой электронной схемы для определения скорости и направления движения шарового манипулятора посредством использования бесконтактного механизма обнаружения движения. Шаровой манипулятор включает шарик и два электромагнита, изготовленные из магнитной коррозионно-стойкой стали. Электромагниты, расположенные перпендикулярно друг другу, записывают магнитную информацию на поверхность шарика.

В электронной схеме используются датчики Холла, которые действуют как считывающие головки для поиска и считывания магнитной информации с намагниченной поверхности шарика. Сигналы, генерируемые датчиками Холла, затем обрабатываются логической и аналоговой схемами для преобразования движения шарика в составляющие по осям  $X$  и  $Y$  положения курсора на экране. Новая схема обеспечивает обнаружение движения даже в жестких условиях окружающей среды и, следовательно, преодолевает ограничения, накладываемые существующими шаровыми манипуляторами.

**Ali A., Potter D. K.** A novel signal processing circuit for contactless motion detection // *Sensor and Actuators A: Physical*. February 2002. Vol. 157. Is. 2. P. 173—177.

## Продвижение в разработке антенных решеток на базе сверхпроводниковых квантовых интерференционных приборов

Фирма Nypress Inc., разработчик цифровых радиочастотных изделий, достигла важного этапа в разработке антенных решеток на базе сверхпроводниковых квантовых интерференционных приборов (SQUID). Фирма вышла на третью фазу инновационного процесса исследований, получив новый контракт по линии малого бизнеса на сумму 3 млн долл. На этой фазе фирма будет сотрудничать с U. S. Navy Space and Naval Warfare Systems

Center Pacific (SSC Pacific) в плане создания антенны для радиотехнической разведки (SIGINT) в высоком динамическом диапазоне. Ставится задача успешного выполнения научно-исследовательской работы и изготовления опытного образца. Переход на третью фазу был поддержан Navy Transition Assistance Program (TAP), которая оказала поддержку в сфере коммерческой деятельности и рынка.

**Howard C.** Nypres transitions SQUID array technology for HDR antenna applications to SBIR Phase 3 contract. URL: <http://mae.articles.printthis.clickability.com>

## Разработка спектральных ИК датчиков на базе углеродной нанотрубки

Установлено, что углеродные нанотрубки являются одним из многообещающих материалов для создания наноэлектронных приборов и датчиков ввиду их уникальных электрических характеристик. Была выполнена разработка спектрального датчика с использованием одной углеродной нанотрубки (CNT) и продемонстрированы его характеристики. Обсуждается технология создания CNT с высоким выходом годных и изготовление их для цели спектрального ИК обнаружения. Представлено описание изготовления и экспериментальные результаты спектральных датчиков на базе CNT. Результаты показывают, что спектральные датчики на базе CNT способны считывать сигналы в ближнем и среднем ИК диапазонах при комнатной температуре.

**Lai K. W. C.** et al. Development of carbon nanotube based spectrum infrared sensors // *Nanotechnology Materials and Devices Conference*. 2—5 June 2009. P. 130—135.

## Реализация CNT ИК детекторов с использованием барьеров Шоттки и полевых транзисторов на базе $p-n$ -переходов

Было продемонстрировано, что барьеры Шоттки на углеродных нанотрубках (CNT) и фотогальванических фотодиодах на базе  $p-n$ -переходов способны обнаруживать инфракрасные сигналы.

Было исследовано изменение фототока посредством модулирования областей обеднения за счет электростатического легирования затвора полевого транзистора с использованием углеродной нанотрубки (CNTFET). Показано, что фототок от диодов Шоттки между Au и CNT может быть доведен до максимума посредством приложения среднего отрицательного затворного напряжения. Формируются два обратно соединенных  $p-n$ -перехода с соответствующим положительным напряжением на затворе. В результате темновой ток подавляется приблизительно на три порядка и усиливается фототок, приводя к высокому значению on/off фототока напряжения разомкнутой цепи  $\sim 0,1$  В. Экспериментальные результаты показали, что использование CNTFET с электростатическим легированием может улучшить характеристики 1 D фотодиодов. ИК фотодетектор на базе CNTFET может обладать значительным потенциалом для будущей нанооптоэлектроники.

**Chen H.** et al. CNT infrared detectors using Schottky barriers and  $p-n$  junctions based FETs // Nanotechnology Materials and Devices Conference. 2–5 June 2009. P. 91–95.

## Нанолитография с использованием сканирующего зонда

Сообщается о новом методе литографии, основанном на использовании сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) и nanoimprint-литографии (нанолитографии).

Экспериментальная установка состоит из атомно-силового микроскопа (АСМ), работающего с использованием ПО, специально разработанного для этой цели. В частности, это ПО позволяет применить заранее подготовленную внешнюю нагрузку в заданный период времени при одновременном управлении в реальном времени относительным расстоянием между наконечником и образцом, а также вертикальным и горизонтальным усилием во время процесса формирования рельефа (embossing).

Дополнительно были использованы наконечники АСМ, обработанные сфокусированным ионным лучом для того, чтобы создать инструменты нужной формы. Могут быть также использованы антиприлипающие слои для функционирования наконечников, если необходимо исследовать влияние различных видов обработки в процессах вдавливания и деформовки (de-molding).

Литографические возможности данной установки были продемонстрированы на образце полистирола с рисунком, полученным с использованием нанолитографии, где минимальные размеры были получены при различных значениях вертикальной нагрузки с увеличивающимися интервалами и на термопластичной полимерной пленке при imprint-процессе, управляемом в реальном времени.

**Dinelli F.** et al. Scanning probe nanoimprint lithography // Nanotechnology, 19 February 2010. Is. 7. 6 p.

## Наноразмерные малощумящие датчики, основанные на совмещенных сетях с использованием углеродных нанотрубок

Наноразмерные датчики, основанные на сетях из одностенных углеродных нанотрубок (SWNT), считаются непрактичными ввиду нескольких фундаментальных ограничений, таких как плохая чувствительность и малое отношение сигнал/шум. Представлены стратегия преодоления указанных фундаментальных проблем и построение высокочувствительных, малощумящих наноразмерных датчиков просто посредством контроля структуры SWNT-сетей. Были подготовлены каналы наноразмерной ширины, основанные на совмещенных SWNT-сетях с использованием стратегии направленной сборки.

Существенным является то, что датчики на базе совмещенной сети с суженными каналами имеют даже более высокое значение отношения сигнал/шум, чем датчики с более широкими каналами. В качестве проверки концепции были продемонстрированы 100-нанометровые малощумящие датчики для обнаружения ионов ртути с пределом обнаружения  $\sim 1$  рМ, который превышает предел любых современных портативных систем обнаружения и находится ниже допустимого предела ионов ртути в питьевой воде, установленного большинством агентств по охране окружающей среды. Это была первая демонстрация 100-нанометровых малощумящих датчиков, основанных на SWNT-сетях. Учитывая увеличивающийся интерес к высокоплотным сенсорным матрицам для здравоохранения и охраны окружающей среды, рассматриваемая стратегия должна оказать значительное влияние на различные промышленные применения.

**Lee M.** et al. 100 nm scale low-noise sensors based on aligned carbon nanotube networks: overcoming the fundamental limitation of network-based sensors. Nanotechnology, 5 February 2010. Is. 5. 8 p.

## Энергонезависимая полупроводниковая память осуществляет революцию в хранении информации

Примеры инновационного развития техники:

- транзистор (1947 г.) не только заменил вакуумные лампы, он создал современный компьютер и электронную промышленность;

- гетеропереходный лазер (1963 г.) осуществил революцию в оптоэлектронной технологии, он создал оптоволоконную связь, компакт-диски и DVD;
- энергонезависимая полупроводниковая память (1967 г.) осуществила революцию в технологии хранения данных, она используется в мобильных телефонах, портативных компьютерах, цифровых камерах, MP3, карманных компьютерах, глобальной системе позиционирования и других применениях.

**Lu Ch.-Y., Lu K.** Nonvolatile semiconductor memory revolutionizing information storage // *IEEE Nanotechnology Magazine*. December 2009. Vol. 3. Is. 4. P. 4—9.

## Полупроводниковые нанопроволоки — платформа для наноэлектроники и нанотехнологии

Наноэлектроника демонстрирует перспективы революционных достижений во многих областях науки и техники, простираясь от электроники и вычислительной техники до биологии и медицины, тогда как реализация этих перспектив будет в значительной степени зависеть от рационального развития уникальных наноразмерных структур, чьи свойства и/или функции контролируются во время синтеза материалов. В данной статье описывается использование нанопроволоки как материала платформы. Во-первых, представлена краткая историческая перспектива появления нанопроволок как основного материала. Во-вторых, обсуждаются "химический" синтез, структурные характеристики на атомном уровне и свойства сложных модулированных нанопроволок с акцентом на структуры с радиальной и осевой модуляцией примеси и новых контролируемых структурных модуляций. Приводится описание этих функциональных нанопроволок как платформы для исследований фундаментальных свойств и пределов характеристик наноразмерных квантовых электронных и фотоэлектрических приборов на уровне одной нанопроволоки.

Далее обсуждается разработка активных интерфейсов между нанопроволочными наноэлектронными приборами и биологическими системами, включая электронное детектирование на уровне одиночной молекулы и мультиплексированную запись от отдельных ячеек через сложную биологическую ткань, такую как мозг. Кроме того, обсуждается разработка новых нанопроволочных зондов, которые используют уникальные синтетические возможности нанопроволочной платформы. Наконец, приведен критический взгляд на сделанный прогресс и научные проблемы, которые предстоит решать для реализации технологии в будущем.

**Lieber C. M.** Semiconductor nanowires: A platform for nanoscience and nanotechnology // 2010 3<sup>rd</sup> International Nanoelectronics Conference (INEC). 2010. P. 5—6.

## Ведущие развивающиеся технологии для автономных наносистем — наногенераторов и нанопьезотроники

Развивающиеся беспроводные наноприборы и наносистемы имеют исключительное значение для считывания в медицине, оборонной технике и даже в бытовой электронике. Источники питания обязательны для независимой, устойчивой, без хлопот по обслуживанию, непрерывной работы имплантированных биодатчиков, сверхчувствительных химических и биомолекулярных датчиков, нанороботов, микроэлектромеханических систем, дистанционных и мобильных датчиков среды, средств защиты государственной безопасности и даже портативных/носимых устройств бытовой электроники.

Очень желательно для беспроводных приборов и даже требуется для имплантируемых медицинских приборов быть автономными, т. е. без использования батарей. Это является ключевым этапом в направлении создания автономных наносистем.

Ближайшее будущее исследование заключается в интеграции многофункциональных наноприборов в наносистему таким образом, чтобы она могла функционировать как живые виды с возможностями считывания, контроля, связи и исполнения/реакции.

Наносистема состоит не только из наноприборов, но и источника нанопитания (или нанобатареи). Были рассмотрены несколько вариантов. В случае отдельных датчиков затруднительно обратиться к ним (например, на враждебной территории) или, если сенсорная сеть состоит из большого числа узлов, распределенных по большой географической территории, то нет возможности заменить батареи. Автономный источник энергии берет энергию из среды, поэтому очень желательно, чтобы не требовалось никакого обслуживания. Для того чтобы любая система была самодостаточной, необходимо получать энергию из окружающей среды и хранить эту захваченную энергию для последующего использования.

Целью нанотехнологии является построение автономных наносистем, которые характеризуются сверхмалыми размерами, суперчувствительностью, экстраординарной многофункциональностью и чрезвычайно малой потребляемой мощностью.

**Wang Zh. L.** Top emerging technologies for self-powered nanosystems: nanogenerators and nanopiezotronics // 2010 3<sup>rd</sup> International Nanoelectronics Conference (INEC). 2010. P. 63—64.

## Электронные и фотонные образцы приборов, основанные на смешанных полупроводниковых нанопроволоках

Представлено описание синтеза и легирования нескольких важных смешанных полупроводниковых 1D-наноматериалов *n*-типа и *p*-типа посредством метода химического осаждения из паровой фазы и наноэлектронные и нанофотонные приборные образцы, основанные на этих наноматериалах. Были изготовлены и исследованы различные наноэлектронные приборы, включая полевые транзисторы со структурой металл—изолятор—полупроводник, полевые транзисторы со структурой металл—полупроводник, логические вентили НЕ, ИЛИ—НЕ, И—НЕ, основанные на полевых транзисторах. Были изготовлены различные нанопроволочные (NB)/ $p^+$ —Si гетеропереходные электролюминесцентные приборы, а также CdS-нанопроволочные кольцевые полости и прямая CdS-нанопроволока со структурой резонатора Фабри—Перо для вывода света из кольцевой полости.

**Dal L.** et al. Electronics and photonics prototype devices based on compound semiconductor nanowires/nanobelts // 2010 3<sup>rd</sup> International Nanoelectronics Conference (INEC). 2010. P. 18—19.

## Полупроводниковые проволоки для преобразования энергии

Полупроводниковые нанопроволоки представляют собой важный класс наноструктурных базовых блоков для фотогальваники, а также для прямого преобразования солнечной энергии в топливную по причине их большой поверхностной площади, регулируемой запрещенной зоны и эф-

фективных транспорта и сбора заряда. В лабораторных условиях были использованы нанопроволоки и их гетероструктуры для накопления солнечной энергии. Кроме того, было обнаружено, что термопроводимость кремниевых нанопроволок может быть значительно уменьшена вследствие фононного рассеивания. Важно отметить, что машины, которые генерируют энергию, обычно работают с КПД лишь 30—40 %, выделяя в грубом приближении 15 ТВт в окружающую среду. Если потерянное тепло можно было бы рециркулировать, глобальный вклад был бы огромен. Кремниевая нанопроволочная термоэлектрическая технология может внести значительный вклад в альтернативное генерирование энергии.

**Yang P.** Semiconductor nanowire for energy conversion // 2010 3<sup>rd</sup> International Nanoelectronics Conference (INEC). 2010.

## Использование графена в СБИС

Ввиду своих замечательных физических свойств графен представляет собой один из наиболее важных развивающихся исследуемых материалов для реализации не только входных, но и выходных каскадов СБИС в последующее десятилетие. В статье обсуждается современное состояние технологии этого материала и некоторые проблемы, которые необходимо решить для реализации графеновых каналов и монтажных приборов для будущих БИС.

**Awano Yu.** Graphene for VLSI: FET and interconnect applications // IEEE International Electron Device Meeting. 7—9 Dec. 2009. P. 1—4.

*Составил В. А. Юдинцев,  
НПК "Технический центр", МИЭТ  
E-mail: vladimir.yudintsev@gmail.com*

- Shevtsov S. N., Akopyan, V. A., Panich A. A., Parinov I. A., Samochenko I. G.** *Optimization of Piezoelectric Vibration Damping for Composite Helicopter Rotor Blade* . . . . . 2  
 For composite beam that model a spar of helicopter rotor blade the comparative investigation of flexural vibration damping with unimorph and bimorph piezoelectric patches has been presented. The optimal constraints for location on the host structure and sizes of PZT actuators have been determined in order to suppress specific mode of flexural vibration. Finally, we derive the necessary conditions for effective vibration damping of host structure by shunted passive PZT transducers.  
**Keywords:** helicopter rotor blade, vibration suppression, piezoelectric transducer, stability of control, vibration modes
- Kulchitsky N. A., Melnikov A. A.** *Current State of the Production CdTe, ZnTe,  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  and Devices from these Materials* . . . . . 9  
 In the review it is considered world production CdTe, ZnTe and CdZnTe, received rapid development during the last years. The current state is considered, the analysis of development of the markets tendencies, the review of manufacturers of considered compounds, and also a condition of the Russian market is given.  
**Keywords:** cadmium telluride, solid solution zinc — cadmium telluride, production of crystals, detectors, demand, the offer
- Hromova L. P., Korostelev V. F.** *Formation of Quasicrystal Structures in the Conditions of Pressure Imposing* . . . . . 17  
 Results of metal-graphic and X-ray-fraction researches of the experimental models, received by molding with imposing of pressure prior to the beginning of crystallization are resented. It is established, that pressure can be used for formation of quasicrystal structures with higher elastic properties.  
**Keywords:** icosahedral symmetry, the thermodynamic stability, long-range order, a base element, the imposition of pressure, excess phase, increasing the elastic properties
- Pecherskaya Ye. A., Metalnikov A. M., Boboshko A. V.** *Structure of Intelligent System to Support of Ferroelectric's Parameters Research* . . . . . 21  
 The generalized structure of intellectual system to support nanotechnology research materials on the example of ferroelectrics is presented. The content of multi-purpose bank of knowledge, which is intended for data processing and decision making in the research process considered.  
**Keywords:** ferroelectric, model, intelligent system, method of measurement, accuracy, decision-making
- Kozlov G. V., Aphashagova Z. Kh., Malamatov A. Kh.** *The Crystallization Process Efficiency of Nanocomposites Polyethylene/Calcium Carbonate* . . . . . 25  
 It has been shown, that crystallinity degree increasing for nanocomposites polyethylene/calcium carbonate is due to polymer matrix chains statistical flexibility enhancement. The last effect is the result of nanocomposite structure change at nanofiller introduction.  
**Keywords:** nanocomposite, polyethylene, calcium carbonate, crystallization, polymer chain flexibility
- Aravin V. V., Verner V. D., Saurov A. N., Maltsev P. P.** *MEMS of High Level is Possible Way of the Development of MEMS in Russia* . . . . . 28  
 On the basis of the analysis of tendencies of the development of MEMS the use of MEMS conception of high level as fundamental direction of elaborations and production of MEMS in Russia is suggested.  
**Keywords:** MEMS, production, integral scheme
- Belozubov E. M., Belozubova N. E.** *Increasing to Time Stability of Sensors of Pressure on the Basis of Thin-Film Nano- and Microelectromechanical Systems* . . . . . 31  
 The time stability of sensors of pressure on the basis of thin-film nano- and microelectromechanical systems (NaMEMS) is considered, conditions and criterions of the time stability are worked out. Structured-factorial method of increasing to time stability of NaMEMS is offered. Adequacy of the offered conditions and criterions of the time stability of NaMEMS are confirmed experimentally.  
**Keywords:** thin-film nano- and microelectromechanical systems (NaMEMS), time stability, temperature, deformation, criterion

**Dzhashitov V. E., Pankratov V. M.** *The Superminiature Micromechanical Sensor of the Inertial Information in Conditions of Variables and Constant Mechanical Effects* . . . . . 39  
 Mathematical models are constructed, the supporting software is developed and influence of constant and vibration, translational and angular accelerations on functioning superminiature (a volume  $<0,2 \text{ mm}^3$ ) the micromechanical sensor of the inertial information is studied. Qualitative and quantitative estimations of such influence on output characteristics of the sensor are received. The most adverse mechanical effects and their combinations are revealed. Obtained data will allow to create the superminiature micromechanical gyro with the set properties.

**Keywords:** superminiature micromechanical the sensor of the inertial information, equations of motion, variables vibration and constant mechanical effects, mathematical models

**Adamov Yu. F., Gorshkova N. M., Sibagatullin A. G., Somov O. A.** *Adaptive Parameter Correction of Functional Units for SOC* . . . . . 44  
 Adaptive parameter correction techniques of the functional units allows to reduce their output parameters dependence from technology transistors mismatch, to eliminate electron injection into the substrate and to decrease crosstalks in interconnections.

**Keywords:** adaptive parameter correction, technology mismatch, electron injection into the substrate, crosstalks

**For foreign subscribers:**

*Journal of "NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE" (Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, ISSN 1813-8586)*

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

**Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(499) 269-5510.  
 E-mail: nmst@novtex.ru; <http://www.microsystems.ru>**

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Телефон редакции журнала **(499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru**  
 Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства  
 в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.  
 Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер *Т. Н. Погорелова*. Технический редактор *Е. М. Патрушева*. Корректор *Е. В. Комиссарова*

Сдано в набор 19.04.2011. Подписано в печать 18.05.2011. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
 Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,51. Заказ 374. Цена договорная

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