

## ЧИТАТЕЛЮ О ПИЛОТНОМ НОМЕРЕ

*Создание журнала "Микросистемная техника" — случай не совсем обычный, так как речь в нем пойдет о направлении науки и техники, находящемся еще в стадии становления. Поэтому значительное внимание в pilotном номере мы уделим обзорным материалам о состоянии микросистемной техники (МСТ) на сегодняшний день, ее важнейших направлениях, перспективах развития. Отдельные статьи конкретного характера позволят Вам составить представление о возможной направленности публикаций в последующих "регулярных" номерах.*

*Вашему вниманию предлагается рубрикация журнала,*

*которая отражает первые пробы систематизации основных проблем микросистемной техники. С признательностью примем Ваши замечания и предложения.*

*Следует сказать, что до сих пор не предпринимались попытки унификации и уточнения терминологии в области микросистемной техники. Часть ее заимствована из микроэлектроники, часть из машиноведческих и электротехнических дисциплин, не всегда проведены качественные и количественные границы между отдельными терминами. Этой проблеме также планируется уделить серьезное внимание на страницах журнала.*

***В первом полугодии 2000 года журнал будет выходить ежеквартально. Подписаться на него можно в отделениях связи (индекс по каталогу Роспечати 79493) или непосредственно в редакции (107076, Москва, Стромынский пер., 4, тел. (095) 269-5510, 269-5397).***

### РУБРИКИ ЖУРНАЛА "МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА"

Рубрика	Оrientировочное содержание публикации
Информационные технологии, конструирование и моделирование объектов МСТ	САПР объектов МСТ, моделирование объектов МСТ и их производства с учетом эффекта масштабирования
Материаловедческие и технологические основы МСТ	Традиционные и перспективные материалы и технологий для объектов МСТ, в том числе: <ul style="list-style-type: none"> <li>• материалы поверхностной и объектной микромеханики</li> <li>• адаптивные "умные" материалы</li> <li>• специальные технологии МСТ (LIGA-технологии, корпускулярно-лучевое микроформообразование, волоконная технология)</li> </ul>
Элементная база микросистемной техники	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Сенсоры и трансдьюсеры</li> <li>• Исполнительные устройства (микромеханизмы, микротурбины)</li> <li>• Источники энергии и движения (микродвигатели, <u>микротурбины</u>)</li> </ul>
Типы микросистем	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Микроэлектромеханические системы</li> <li>• Оптомеханические микросистемы</li> <li>• Биотехнические микросистемы</li> <li>• Микросистемы энергообеспечения</li> <li>• Технологические микросистемы</li> <li>• Мини- и микроборботехнические системы</li> </ul>
Применение объектов микросистемной техники	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Конструирование приборов и машин (макросистем) на основе элементной базы</li> <li>• Сборка макросистем на основе элементной базы МСТ</li> <li>• Испытания, сертификация и эксплуатация макросистем, созданных на основе МСТ</li> </ul>
Информация	Конференции, совещания, выставки, новости науки и техники, обзоры специальной литературы и т.п.

**Д.М. Климов**, акад. РАН, Институт проблем механики РАН,  
**А.А. Васильев**, Министерство науки и технологий РФ,  
**В.В. Лучинин**, д-р техн. наук доц. Центр микротехнологии и  
диагностики Санкт-Петербургского гос. электротехнического  
университета, **П.П. Мальцев**, д-р техн. наук проф., Секция  
прикладных проблем при Президиуме РАН

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ В ХХI ВЕКЕ

*Рассматриваются перспективы использования микросистемной техники, являющейся наиболее бурно развивающимся глобальным научно-техническим направлением.*

Микросистемная техника является в настоящее время одним из наиболее динамично развивающихся междисциплинарных научно-технических направлений, определяющим новую революцию в области систем, реализуемых на микроуровне. Строго говоря, **микросистемная техника (МСТ) - это научно-техническое направление, целью которого является создание в ограниченном объеме твердого тела или на его поверхности микросистем, представляющих собой упорядоченные композиции областей с заданным составом, структурой и геометрией, статическая или динамическая совокупность которых обеспечивает реализацию процессов генерации, преобразования, передачи энергии и движения в интеграции с процессами восприятия, обработки, трансляции и хранения информации при выполнении запрограммированных операций и действий в требуемых условиях эксплуатации с заданными функциональными, энергетическими, временными и надежностными показателями.** Микросистемы могут обеспечивать выполнение всех вышеперечисленных функций или части из них.

Примеры изделий МСТ, как ставших уже традиционными, так и перспективными приведены в табл. 1 и 2.

При этом отличительной особенностью микросистем нового поколения является необходимость обеспечения длительной их эксплуатации при переносе энергии заряда, информации не только в условиях стационарного твердого тела, но и когда объект (часть объекта) микросистемной техники или контактирующая с ним среда находятся во взаимной пространственно-временной динамике.

Наряду с этим переход на микроуровень требует при создании микросистем различного функционального назначения нового поколения учета факторов масшта-

**Структура и динамика рынка  
"традиционных" изделий микросистемной техники [2]**

Изделия	Объем рынка в 1996г.		Объем рынка в 2002г.	
	млн. штук	млн. долл.	млн. штук	млн. долл.
Головки для накопителей на жестких дисках	530	4500	1500	12000
Головки для струйных принтеров	100	4400	500	10000
Кардио-пейсмейкеры	0.2	1000	0.8	3700
«Ин-вирто» диагн. приборы	700	450	4000	2800
Слуховые аппараты	4	1150	7	2000
Датчики давления	115	600	309	1300
Химические сенсоры	100	300	400	800
Формирователи ИК-видеосигналов	0.01	220	0.4	800
Акселерометры	24	240	90	430
Гироскопы	6	150	30	360
Магниторезистивные сенсоры	15	20	60	60
Микроспектрометры	0.006	3	0,150	40
Всего:		13033		34290

**Структура и динамика рынка  
"перспективных" изделий микросистемной техники**

Изделия	Объем рынка в 1996г.		Объем рынка в 2002 г.	
	млн. штук	млн. долл.	млн. штук	млн. долл.
Системы подачи лекарственных сред	1	10	100	1 000
Оптические переключатели	1	50	40	1000
Лаборатория на чипе: ДНК, жидкостная хроматография высокого разрешения	0	0	100	1000
Магнитооптические головки	0.01	1	100	500
Проекционные световые затворы	01	10	1	ЭСО
Катушки индуктивности на чипе	20	10	600	100
Микрореле	-	0.1	50	100
Микроэлектродвигатели	0,1	5	2	80
Инклинометры (угломеры)	1	10	20	70
Впрыскивающие сопла	10	10	30	30
Сенсоры для предупреждения столкновения	0.01	05	2	20
Электронные насосы	0.001	0.1	0.05	5
Всего:	107		4200	

бирования, отражающих влияние геометрических размеров на свойства материалов, а также особенностей их интеграции в едином объеме с позиций кристаллохимической, термомеханической, электромагнитной, химической совместимостей, тепловой, электрической, механической стойкости, устойчивости к воздействию агрессивных сред и радиации, а также временной стабильности.

По аналогии с микроэлектроникой, воплотившей свой теоретический задел в первых интегральных микросхемах, созданных в 1958-1961 гг., в рамках реализации целевой функции - улучшения массогабаритных показателей, надежности, быстродействия, отношения функциональной сложности к стоимости - основным заказчиком и финансистом "ранних" объектов микросистемной техники (1975-1987 гг.) в виде микроэлектромеханических приборов (датчиков давления, акселерометров) являлся авиационно-космический комплекс. Появление на рынке потребления автомобилестроителей окончательно сформировало требования к характеристикам "классических" изделий микросистемной техники массо-габаритным показателям, стоимости, надежности, воспроизводимости, массовости, номенклатуре. Инициирующим фактором в развитии микросистемной техники стало появление так называемых микроэлектромеханических систем (английская аббревиатура MEMS - microelectromechanical systems), в которых гальванические связи находятся в тесном взаимодействии с механическими.

Можно выделить следующие стимулирующие факторы развития микросистемной техники как научно-технического направления:

- появление в 1982 г. статьи сотрудника фирмы IBM К. Петерсона [1], рассматривающей кремний не только как полупроводниковый, но и как конструкционный механический материал;
- разработка в конце 70-х годов на ряде фирм (Хоневелл, Кулите) промышленной технологии объемного жидкостного травления кремния для формирования мембран, струн, балок в датчиках давления, вибрации и ускорения;
- разработка в конце 70-х - начале 80-х годов в Центре ядерных исследований в Карлсруэ (Германия) технологии формирования объемных структур с использованием синхронного излучения, гальванического осаждения и прецизионного литья полимерами, получившей название LIGA- технология (LIGA - аббревиатура немецких слов *litographie* - литография, *galvanoformung* — гальваниообработка, *abformung* — прессование).

Наиболее яркими конструктивно-технологическими отличительными особенностями МСТ нового поколения являются:

- активное использование третьего измерения (3D-системы);

- интеграция электрических и оптических связей с механическими;
- интеграция физико-химических и технологических базисов микро- и биотехнологии;
- интеграция исполнительно-технологических и контрольно-диагностических процедур в микрообъемах и на поверхности твердого тела.

С середины 90-х годов в качестве наиболее часто используемого собирательного понятия для расширенного толкования направления, связанного с созданием микросистем, в англоязычной литературе применяют сокращение MST (microsystem technology), что дословно означает "технология микросистем". В России наибольшее распространение получил термин "микросистемная техника", который был в документе "Новые приоритеты науки и техники", утвержденном правительственной комиссией по научно-технической политике ("Российская газета", 8 августа 1996 г.).

Анализ мировой динамики развития MST (рис. 1), выполненный организацией NEXUS, являющейся органом Европейской Комиссии, представлен в работе [2]. Показано, что в 1996—2002 годах рынок изделий микросистемной техники будет расти в среднем на 18% в год и достигнет в 2002 г. 38 млрд. долл. При этом рынок новейших разработок в области микросистем, включая системы микроподачи жидкости и газа, аналитические ДНК-чипы, оптические микропереключатели и сетевые затворы, микродвигатели и реле, вырастет со 107 млн. долларов в 1996 г. до 4 млрд. 200 млн. долл. США (табл.1 и 2). Причем в отличие от начала 90-х годов лидирующие позиции на рынке займут периферийные устройства для объектов информационной техники и микросистемы биомедицинского назначения.



Рис. 1. Анализ динамики рынка объектов микросистемной техники NEXUS [2]

Таблица 3.  
Структура направления "Микросистемная техника"

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

Таблица 4

**Микросистемы для техники нового поколения**

Направления разработок	Назначение	
	общегражданское	специальное
Сенсоры и трансдьюсеры	Миниатюрные системы ориентации, навигации и управления	
	Автомобильный и ж/д транспорт	Аэрокосмические и ракетно-артиллерийские системы
	Акселерометры, миниатюрные автономные системы навигации, совмещенные с космическими GPS системами, модули контроля положения антенных фазированных решеток, системы катализации и индивидуального наведения.	
Миниатюрные управляемые радио- и оптоэлектронные компоненты, микропривод и микромашины	Миниатюрная управляемая элементная база	
	Гражданское приборостроение	Специальное приборостроение
	Миниатюрные управляемые конденсаторы, резисторы, зеркала, модуляторы, элементы микропривода, минитурбины, микродвигатели, микрогенераторы.	
Аналитико-технологические микросистемы	Миниатюрные аналитико-диагностические чипы и микрохимические реакторы	
	Биотехнология, медицина, нефтехимия, пищевая промышленность	Химическая защита, обнаружение, исследование и утилизация особо опасных веществ
Микро- и наноинструмент	Микро- и наноманипуляторы, микротехнологические устройства	
	Медицина, микробиология, наноэлектроника	Медицина, наноэлектронные системы специального назначения
Миниатюрные робототехнические системы	Миниатюрные автономные управляемые само движущиеся системы	
	Минироботы для диагностики в медицине, ядерной энергетике, химической промышленности	Минироботы для разведки и боевых действий

В табл. 3 приведена общая структура направления МСТ, а в табл. 4 - направления разработок и области применения СМТ нового поколения.

Обобщая современное состояние в области стимулов и факторов, способствующих развитию микросистемной техники, выделим:

- наличие научной и технологической культуры, сформировавшейся в период становления и развития микро- и оптоэлектроники;
- наличие базового оборудования, производственных мощностей и организационной инфраструктуры микроэлектронного производства, пригодных для реализации на них объектов микросистемной техники;
- активный рынок сенсорных систем различного функционального назначения и конструктивного исполнения;
- тенденции к интеграции процессов микро- и биотехнологии в рамках бионического "ренессанса" в области архитектуры, принципов функционирования и материалов;
- появление на рынке систем обработки информации и управления перспективного поколения интегральных схем с нейроподобной структурой, обеспечивающих новый уровень "интеллектуальных" возможностей и быстродействия микросистем при сохранении или улучшении прежних массогабаритных и энергетических показателей;

- перспективы нового активного рынка в области миниатюрных недорогих диагностических систем контроля за жизнедеятельностью человека на основе концепции экономической целесообразности массовой профилактики заболевания по отношению к их лечению;
- формирование рынка оборудования для технологий на микроуровне (помимо микроэлектронных) за счет широкого развития биотехнологии и ужесточения требований к работе с радиоактивными, токсичными, взрывоопасными веществами, что определяет переход на использование сверхмалых количеств веществ в ограниченных объемах.

Страны, которые в современных условиях фактически определяют научно-технический прогресс, используют по отношению к направлению "микросистемная техника" термины "критические технологии", тем самым придавая программам исследования и разработок статус "национальных", "приоритетных". К сожалению, из-за отсутствия целенаправленного финансирования разрыв между отечественной и мировой технологической культурой в области микросистемной техники стремительно нарастает. Отставание России сказывается уже на стратегических направлениях.

В настоящее время общепризнанно, что микросистемная техника имеет приоритетное значение для оборонной промышленности, обеспечения ядерной и эко-

логической безопасности государства, развития биотехнологии и медицинского обслуживания населения.

Создаваемая в рамках направления "микросистемная техника" продукция характеризуется:

- новизной;
- наукоемкостью,
- конкурентоспособностью;
- потенциальной инвестируемостью на этапе разработки;
- тиражируемостью, вплоть до массового производства;
- низкой материалоемкостью;
- низкой энергоемкостью,
- широким рынком потребления.

Эффект от реализации работ в области микросистемной техники определяется:

- созданием приборов и машин нового поколения с низкой материало- и энергоемкостью, обеспечивающих решение традиционных и ранее недоступных задач в условиях сокращения требуемых рабочих площадей, снижения экологической нагрузки на окружающую среду, повышения безопасности работы человека;
- использованием интегрально-групповых принципов производства, создающих предпосылку к снижению себестоимости продукции, которая становится доступной широкому кругу потребителей, включая сферы науки, образования, медицины, малого и среднего бизнеса;
- широким применением при создании технологических микросистем стандартного оборудования микроэлектронного производства, которое в настоящее время, в России, как правило, не востребовано по прямому назначению;
- возможностью реализации ранее недоступных про-

цессов в условиях микрообъектов и при использовании сверхмалых количеств веществ, что уменьшает затраты на стадии проведения исследований и снижает потребность в дорогостоящих материалах;

- высокой эффективностью аналитико-диагностических микросистем в условиях решения задач по профилактике заболеваний, т.е. сохранению "человеческого капитала".

Имеющиеся в России научно-технический и кадровый потенциалы, а также технологическая и аналитическая базы позволяют приступить к скоординированным действиям как в области научных исследований образовательного процесса, так и в сфере промышленного производства и использования (рис 2) объектов микросистемной техники. Примеры практической реализации объектов микросистемной техники на базе конкурентоспособной отечественной технологии, разработанной в Центре микротехнологии и диагностики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, приведены в статье [3].

Развитие микросистемной техники для научно-технического прогресса может иметь такие же последствия, какие оказало появление микроэлектроники на становление и современное состояние ведущих областей науки и техники.

#### Список литературы

1 Peterson K.E. // Proc/ IEEE. 1982. №70. P. 420-457.

2 NEXUS Market analysis for microsystems, 1996-2002 // MST News, 1998, № 3. P. 38-41.

3 Корляков А.В., Лучинин В.В., Мальцев П.П. Микроэлектромеханические структуры на основе композиции "карбид кремния- нитрид алюминия" // Микроэлектроника, 1999. №3. С. 201-212.

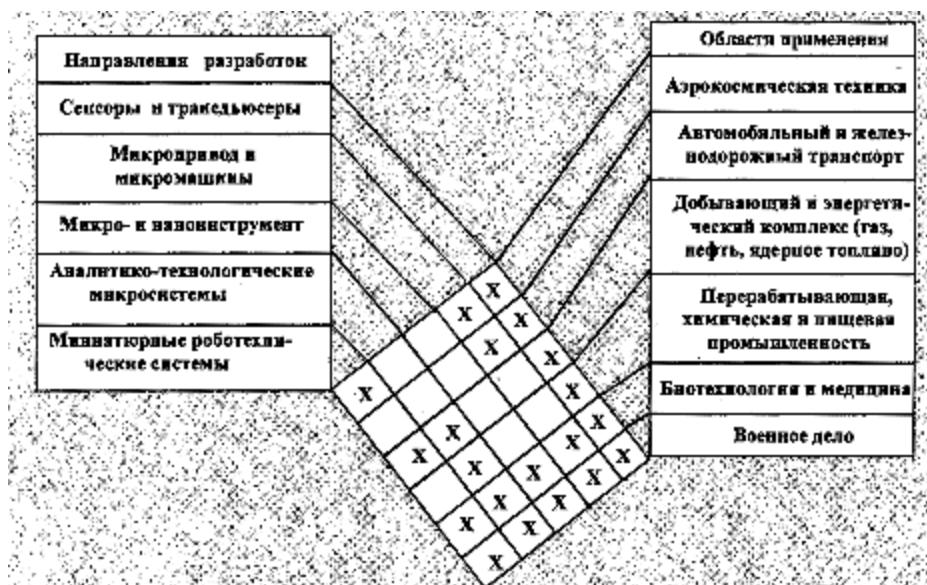


Рис. 2. Матрица "Разработка-применение" объектов микросистемной техники

УДК 621.3.049.77.002.5: 620.22

**В.В. Лучинин**, д-р техн. наук доц., **Ю.М. Таиров**, д-р техн. наук проф., Центр микротехнологии и диагностики Санкт-Петербургского гос. электротехнического университета, **А.А. Васильев**, Министерство науки и технологий РФ

## ОСОБЕННОСТИ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО БАЗИСА МИКРОСИСТЕМ

*Рассматриваются вопросы, связанные с созданием миниатюрных чувствительных, исполнительных и энергообеспечивающих систем, в основе функционирования которых лежит активное использование классических принципов механики, оптики, акустики, электротехники, теплотехники, химии и биологии, интегрируемых в конструктивные решения на микроуровне с широким использованием материаловедческой и технологической базы микро- и оптоэлектроники.*

Отметим, что при создании микросистем фактически выделяют две группы материалов:

- конструкционные (стекло, монокристаллический, поликристаллический, пористый кремний, диоксид и нитрид кремния, полиимид, вольфрам, никель, медь, золото, алмазо-подобный углерод), использующиеся для формирования:

- несущих конструкций;
- токоразводки;
- смазки.

- "активные умные" (никель/титан, пермалloy, кварц, окись цинка, пьезокерамика, материалы группы  $A^3B^5$ ,  $A^4B^6$ ), выполняющие за счет электростатических, электромеханических, пьезоэлектрических, магнитных, оптических явлений и эффекта памяти формы функции:

- источников движения;
- механизмов передачи движения;
- сенсорных и активирующих сред.

При создании микросистем различного функционального назначения на основе композиций разнородных материалов должны учитываться следующие параметры:

- кристаллохимическая совместимость;

- термомеханическая совместимость;

- тепловая стойкость (допустимая тепловая нагрузка, учитывающая температуру Дебая, точку Кюри, а для полупроводников и температуру перехода в состояние, когда концентрация собственных носителей заряда близка к примесной; способность вещества отдавать энергию в окружающую среду за счет теплопроводности, а при высоких температурах и за счет теплоизлучения);

- электрическая стойкость;
- механическая стойкость;
- механическая усталость.

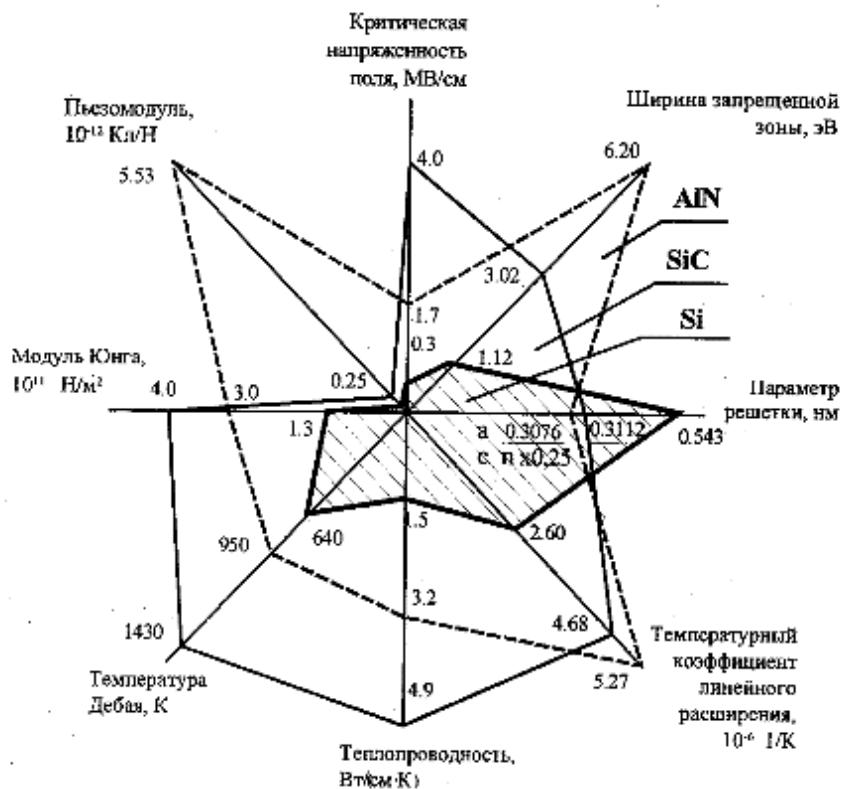
Мировой опыт изготовления MEMS (наиболее развитого направления в области микросистемной техники) основан на широком использовании кремния – дешевого и доступного материала. Однако ясно, что в ближайшие годы не произойдет реального скачка в сфере интеграции кремниевой микромеханики и технологии устройств обработки информации на кремнии (КМОП-схемы).

Поэтому наибольшее значение имеют гибридные системы, в которых наряду с кремнием и другими

полупроводниковыми материалами используются полимеры, керамика, металлы. В классической микроэлектромеханике, ориентированной на базовые кремниевые микротехнологии в настоящее время господствует структура "кремний на диоксиде кремния".

Учитывая тот факт, что микросистемы представляют собой сложные гетерогенные композиции, требующие сочетания совокупности разнородных материалов, и с учетом возможных особенностей их функционирования (высокие температуры, агрессивные среды, радиация), несомненный интерес в качестве базовой материаловедческой среды представляет композиция "карбид кремния на нитриде алюминия" [1]. Данная композиция (см. рисунок и таблицу) сочетает в себе два широкозонных материала, один из которых – нитрид алюминия – является ярко выраженным диэлектриком (6,2 эВ) и обладает хорошими пьезоэлектрическими свойствами, а другой – карбид кремния (3,0 эВ) – широкозонный полупроводник. Оба материала оптически активны, в том числе в ультрафиолетовой области спектра, имеют высокую теплопроводность и температуру Дебая, характеризующую стойкость материала к внешним воздействиям (термическим, химическим, радиационным).

Анализируя особенности развития технологического базиса микросистемной техники и, в частности, микроэлектромеханических систем, следует выделить один из основных факторов, определивших необходимость видоизменения классических технологических приемов микроэлектронного производства: толщина микромеханических элементов, в отличие от композиций классической микроэлектроники, может превосходить их минимальные размеры в плоскости, т.е. происходит формирование трехмерных структур – 3D-структур (D-dimension).



**Сравнение важнейших функциональных свойств кремния и композиции “карбид кремния - нитрид алюминия” как базиса микрэлектромеханических систем**

Таблица

**Важнейшие свойства Si, SiC, AlN**

Параметры	Материалы	Si	SiC	AlN
Теплопроводность, Вт / (см · К)	1,5	4,9	3,2	
Температурный коэффициент линейного расширения, 10 <sup>-6</sup> 1 / К	2,60	4,68	5,27	
Температура Дебая, К	640	1430	950	
Модуль Юнга, 10 <sup>11</sup> Н / м <sup>2</sup>	1,3	4,0	3,0	
Пьезомодуль, 10 <sup>-12</sup> Кл / Н	0	0,25	5,53	
Критическая напряженность поля, МВ / см	0,3	4,0	1,7	
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,12	3,02	6,20	
Параметр решетки, нм	0,543	0,312	a = 0,3076 c = n • 0.25	

В рамках технологии микросистем развиваются следующие технологические направления.

1. Групповая технология поверхности микромеханики на основе процессов тотального нанесения и избирательного удаления слоев.

2. Групповые технологии объемной микромеханики, реализуемые в виде:

- технологии глубинного объемного травления;

• LIGA-технологии (технологии матричного микрокопирования),

- волоконной технологии.

3. Технология индивидуального формообразования методами локального стимулирования роста (полимеризации), корпускулярно-лучевого и электростатического микропрофилирования, а также алмазного фрезерования.

Технологии объемной микромеханики позволяют активно развивать в конструкторско-технологическом плане третье измерение и поэтому по технологическим приемам и оборудованию они существенно отличаются от традиционных операций планарного процесса, известного из кремниевой технологии.

Осуществим краткий анализ современных групповых технологий поверхностной и объемной микромеханики, а также корпускулярно-лучевого формообразования.

### Технология поверхностной микромеханики

В классической микромеханике, ориентированной на базовые кремниевые микротехнологии, в настоящее время господствует так называемая поверхностная микротехнология с жертвенным слоем. В ее основе лежат два основных процесса: нанесение жертвенного, а затем и рабочего слоев и удаление через отверстие в рабочем слое жертвенного для

формирования объемных полостей между рабочим слоем и подложкой. В качестве основного материала наиболее распространена структура “кремний на диоксиде кремния”, где в качестве жертвенного слоя выступает диоксид кремния.

Последовательность технологических операций при реализации поверхностной микромеханики сводится, фактически, к известным последовательностям, используемым в планарной технологии:

- формирование слоя диоксида кремния на кремнии;
- нанесение на диоксид кремния слоя поликристаллического кремния;
- нанесение маскирующего слоя маски на поликристаллический кремний и проведение операций фотолитографической обработки для вскрытия окон в маске;
- травление поликристаллического кремния через маску для формирования окон для последующего избирательного удаления жертвенного слоя из диоксида кремния;
- избирательное травление диоксида кремния;
- промывка образовавшихся объемных полостей.

Совокупность данных технологических операций требует развития как процессов осаждения материалов, так и локального избирательного травления. Для получения результатов, связанных с устойчивостью формируемых композиций и возможными условиями их нанесения, особое значение приобретают такие параметры материалов рабочего и жертвенного слоев, как термомеханическая совместимость и механическая прочность. Данное обстоятельство не позволяет рассматривать классическую структуру “кремний на диоксиде кремния” как оптимальную. В настоящее время в технологии кремниевой “поверхностной” микромеханики в качестве жертвенных

слоев начинают использовать пористый кремний. Предпочтение по термомеханическим свойствам и устойчивости к воздействиям экстремальных факторов имеет композиция алмазоподобных материалов “карбид кремния - нитрид алюминия”, в которой карбид кремния является основным рабочим материалом (например, из карбида кремния изготавливается маятник микрогоскопа), а нитрид алюминия выполняет функцию жертвенного слоя или элементов несущей конструкции, обладающих изолирующими и пьезоэлектрическими свойствами.

## **Технология объемной микромеханики**

**Технология глубинного объемного травления.** Историческим базисом развития технологии глубинного объемного травления являются процессы, разработанные в 70-х годах при создании датчиков давления мембранныго типа. В основе их создания лежит так называемое ориентационно-чувствительное травление кремния в жидкостных травителях, преимущественно в растворе щелочей. Данный процесс при маскировании поверхности кремниевой пластины позволяет осуществлять формирование фактически трехмерных структур в объеме пластины, при этом глубина протрава может составлять до 300-400 мкм. В случае анизотропного травления используется технологическая операция, топологически и объемно согласующаяся с кристаллической структурой. Выбор топологии маски, ее ориентация относительно определенных кристаллографических направлений пластины, подвергаемой травлению, а также выбранные геометрические размеры окон определяют в конечном итоге объемные конфигурации, формируемые в материале. К сожалению, необходимость

выполнения кинетических условий травления ограничивает допустимое разнообразие поверхностных топологических фигур, поскольку их конфигурация определяет и объемный результат травления (наклон стенок, глубину травления). Последнее обстоятельство потребовало развития более простых методов получения сложных топологических фигур на различных подложках в условиях развитого третьего измерения, т.е. глубинного травления.

В настоящее время таким альтернативным вариантом глубинного травления подложек является технология, основанная на использовании в качестве подложек фотоситаллов. Фотоситалл - стеклокристаллический материал, получаемый путем искусственной кристаллизации стекла со светочувствительными добавками, например окислами цезия или олова. Фотоситалл обладает высокой механической и термической стойкостью. Под воздействием ультрафиолетового излучения возможно формирование в фотоситалле участков, отличающихся от неосвещенных растворимостью в жидкостных травителях.

Таким образом, экспонируя через фотошаблон фотоситалл, можно, как и на фоторезисте, задавать области с различными скоростями травления. Фотохимическая обработка позволяет получать детали любой формы и отверстия с пространственным разрешением на уровне десятка микрон. Сейчас данная технология развивается применительно к решению задач создания элементов микромеханических систем, не требующих высокого пространственного разрешения. Стоимость такой технологии не высока, и в России применяется как технология производства самого фотоситалла, так и технология его обработки, однако достаточно широкого применения они не получили.

**LIGA-технология.** Данная технология разработана в Центре ядерных исследований в Карлсруэ (Германия) в конце семидесятых - начале восьмидесятых годов.

Сущность процесса формирования объемных структур при этой технологии заключается в активном использовании рентгеновского излучения от синхротрона для получения глубоких с отвесными стенками топологических картин в полимерном материале (рентгенорезисте). Синхротронное излучение имеет сверхмалый угол расходимости пучка ( $0,006^\circ$ ), т.е. фактически формируется пучок параллельных лучей. Глубина проникновения излучения, источником которого являются высокоэнергетические электроны ( $E > 1$  ГэВ), движущиеся с релятивистскими скоростями, достигает единиц миллиметров. За счет локализации излучения в узком телесном угле яркость источников синхротронного излучения в  $10^6$  раз больше, чем у стандартных источников рентгеновского излучения, и плотность мощности достигает  $10^6$  Вт / см<sup>2</sup>, что определяет высокую эффективность экспонирования в условиях малых временных затрат.

После формирования в полимерном материале объемной структуры осуществляется операция электрохимического осаждения металла, например гальванического никеля, в образовавшуюся полость в полимере. Следующим этапом является удаление полимера с сохранением на поверхности субстрата объемного металла определенной топологии. Далее над металлической матрицей размещается штамповочная плита и через отверстие в ней вводится пластик. Металлический штамп удаляется для дальнейшего использования при получении других пресс-форм. Следующий этап характеризуется нанесением гальванического покрытия в ранее сформированную

пластиковую форму, после чего пластик вытравливается, освобождая объемную металлическую структуру.

Возможность многократного тиражирования за счет интегральных принципов обработки позволяет изготавливать объемные структуры высотой до 1 мм в количествах до 1000 шт. на одной пластине.

Основными недостатками данной технологии является необходимость использования уникальных источников синхротронного излучения и нетрадиционность технологии, связанной с гальванопластикой на микроуровне.

**Волоконная технология.** Несколько лет тому назад в России были инициированы работы в области использования стекловолоконной технологии для создания устройств микроэлектромеханики [2] со значительными размерами по третьему измерению.

Изделия из стекла с малым поперечным сечением в виде определенной микроструктуры и технология их изготовления известны достаточно давно (микроканальные пластины, рентгеношаблоны из стекловолокна, устройства волоконной оптики). Суть стекловолоконной технологии заключается в спекании пучка стеклянных волокон (полых или сплошных), различающихся избирательностью к травлению по отношению к растворителю, вытягивании этого пучка до требуемого поперечного размера, разрезании вытянутой части пучка на куски и вытравливании затем из куска растворимых волокон. Укладка волокон в пучок осуществляется таким образом, что нерастворимые волокна образуют в сечении пучка структуру (топологию) изготавливаемой микроструктуры в некотором масштабе.

Так как для изделий микромеханики характерно наличие отверстий и поверхностей различных

конфигураций, требуется подбор материалов и геометрии волокон. Данные процессы сборки пучка и его вытягивания не являются тривиальными, но позволяют изготавливать детали с минимальными поперечными размерами отверстий до 0,2 мкм при высоте (глубине, длине) от 100 мкм 1 см.

Особо следует отметить возможность изготовления деталей с винтообразными поверхностями путем скручивания вытянутого пучка вокруг его оси. Такие поверхности, как известно, характерны для винтов, червячных и косозубых колес и принципиально не могут быть реализованы с помощью LIGA-технологии.

Волоконная технология может быть отнесена к групповой технологии, так как однотипные изделия тиражируются в данном случае в составе одного волоконного пучка.

### Технология корпускулярно-лучевого формообразования

В настоящее время существуют два направления корпускулярно-лучевого формообразования: локально-стимулированный рост (осаждение или полимеризация) и локально-стимулированное прецизионное травление, в основе которых лежит воздействие на среду или материал концентрированного потока энергии (световые, электронные, ионные пучки) управляемого во времени и пространстве. Традиционной технологией формирования объемного рисунка в стекле, полимерах, керамике является обработка объекта остросфокусированным лазерным пучком (лазерное микрофрезирование).

Данный вид воздействия в зависимости от локально выделяемой

мощности ( $10^5$ — $10^9$  Вт/см $^2$ ), длительности и скважности воздействия, поглощающей способности обрабатываемого материала и его температуропроводности позволяет осуществлять как процессы модификации материалов, так и удаления за счет испарения. На пространственное разрешение наряду с особенностями фокусировки лазерного излучения влияют все ранее перечисленные параметры пучка, определяющие его энергетические и временные характеристики, а также физические свойства материала, подвергаемого воздействию. Изменение глубины фокуса наряду с вариацией ранее указанных параметров позволяет переходить от поверхностной к объемной микрообработке объектов.

В последнее время за рубежом применительно к решению задач формирования трехмерных микрообъектов интенсифицировались работы в области локального стимулированного роста 3D-структур сложной конфигурации (пружины, клапаны). Существует два основных направления получения объемных микрообъектов за счет лазерной стимуляции:

- лазерное осаждение из газовой фазы (LCVD) [3, 4, 5];
- фотостимулированная полимеризация [6].

Последний вариант получения объемных микрообъектов из полимеров назван *микростереолитографией*. Осаджение и полимеризация осуществляются слой за слоем и позволяют реализовать разнообразные трехмерные объекты размером до нескольких миллиметров с микронным разрешением.

Достоинствами лазерного формообразования являются:

- возможность реализации операций в открытых не вакуумных системах, что упрощает позиционирование и перемещение объекта;

- возможность работы не только с плоскими (планарными) объектами, но и с "заготовками" сложной формы;

- доступность формирования на объекте в едином технологическом цикле сложных топологоморфологических картин с изменяющимися геометрическими размерами в трех измерениях, приемлемым пространственным разрешением (единицы микрон) и глубиной обработки до нескольких миллиметров;

- возможность обеспечения высокой степени автоматизации обработки, гибкость процесса и перестраиваемость в реальном масштабе времени;

- возможность не только осуществлять локальное поверхностное или объемное нанесение или удаление материала, но и модификация его свойств, определяющее изменение физико-химических характеристик (например, структуры или фазовый состав, механическую прочность или растворимость).

В качестве недостатков метода лазерного формообразования можно отметить:

- невысокую производительность метода из-за индивидуального характера обработки;
- остаточные явления в материале из-за "паразитного" воздействия лазерного излучения в зоне обработки и необходимости рассеяния значительной энергии в малых объемах;
- относительно высокую сложность систем пространственного позиционирования пучка и объекта при необходимости иметь микронное пространственное разрешение и высокие скорости обработки;

- ограниченный срок службы дорогостоящих оптических систем при использовании высокоэнергетических воздействий.

Наряду с лазерным формообразованием возможно применение элек-

тронной, ионной и плазменной микрообработки. Однако особенности получения фокусировки и позиционирования данных видов воздействий, позволяющих обеспечить субмикронное разрешение, требуют использования вакуумных технологических систем, а также создают существенные ограничения по глубинам обработки в условиях проведения пространственно прецизионных операций.

\* \* \*

В заключение обратим внимание и на тот факт, что использование при создании микросистем групповых принципов производства создает предпосылку снижения себестоимости продукции, которая может быть доступна более широкому кругу потребителей в сфере науки, образования, здравоохранения, а также, безусловно, в промышленности, в том числе в условиях малых и средних фирм.

### Список литературы

1. Korlyakov A.V., Luchinin V.V. Transaction of 4<sup>th</sup> International Conference High Temperature electronics Conference. USA, Albuquerque. 1998, V.1. P.250-252.
2. Stepanov V., Suchoveev S. Transaction of International Workshop on Microrobots, Micro Machines and Systems. Germany, 1997. P.23-25.
3. Shiichta P.J. Laser Micromachining in a Reactive Atmosphere. NASA// Tech. Briefs, 1988. 12, 84.
4. Bloomstein T.M. and Ehrlich D.J. Laser-Chemical Three-Dimensional Writing for Microelectromechanics and Application to Standart-Cell Microfluidics // J.Vac. Sci. Technol. 1992. 10, 2671-2674.
5. Boman M., Westberg H., Johansson S. and Schweitz J.-A. Helical Microstructures Grown by Laser Assisted Chemical Vapour Deposition. Proceedings// IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'92), Travemunde, Germany, 1992. P.162-176.
6. Beluze L., Bertsch A., Renaud P. Proc/SPIE. 1999. V 3680. P.808 -817.

**А.В. Корляков**, канд физ.-мат. наук доц., **В.В. Лучинин**, д-р техн. наук доц., Центр микротехнологии и диагностики Санкт-Петербургского гос. электротехнического университета

## ПЕРСПЕКТИВНАЯ ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Проведен краткий анализ основных компонентов микросистемной техники: сенсоров и трансдьюсеров, аналитико-технологических микросистем, микроинструмента, микромашин.

Приступая к теме, отметим, что именно потребность в сенсорных элементах и ясная концепция их возможного развития послужили основным стимулирующим фактором для расширения исследований и развития производства объектов микросистемной техники.

**Сенсоры и трансдьюсеры.** Кратко основные этапы данной концепции "от сенсора к трансдьюсеру" могут быть сформулированы в виде следующих направлений деятельности:

- разработка и создание мультисенсоров, объединяющих совокупность чувствительных элементов – первичных преобразователей;
- разработка и создание интегрированных сенсоров, объединяющих чувствительный элемент и вторичный преобразователь, при условии их исполнения в рамках единой технологической системы;
- разработка и создание интегрированных сенсоров [1] с активной исполнительной обратной связью [см. рисунок *а*] на чувствительный элемент (например, электростатический подвес или возбуждение маятника, ротора в микроакселерометре или микрогироскопе);
- разработка и создание интегрированных сенсоров с аналитическими возможностями, т.е. с повышенной чувствительностью и (или) селективностью за счет использования нетрадиционных сенсорных сред, способов разделения и удержания пробы, методов регистрации и обработки информации.

Формулировка последнего направления фактически определила возникновение такого "куста" микросистемной техники, как микроаналитические системы, первым наиболее ярким представителем которого следует считать газовый микрохроматограф, созданный в конце се-

мидесятых годов с использованием элементов кремниевой техники (планарная конструкция с капиллярной колонкой, выполненной в виде спиральной канавки, вытравленной в пластине кремния).

**Аналитико-технологические микросистемы.** Одним из перспективных направлений создания и использования микросистем является разработка аналитико-технологических микросистем [2, 3], оперирующих со сверхмальыми объемами и количествами вещества, что позволяет повысить эффективность реализации процессов по энергетическим и временным параметрам, обеспечивает возможность работы с вредными и токсичными веществами, упрощает утилизацию отходов. Все это создает предпосылки к высокой экономической эффективности таких систем.

Для аналитико-технологических микросистем нового поколения характерны:

- блочно-модульная унификация технологических и контрольно-диагностических подсистем;
- полифункциональность и гибкость, определяющие многофункциональность продукции и многообразие решаемых классов задач в условиях различных потребителей (химия, биотехнология, медицина, приборостроение, машиностроение);
- интегрированность аналитических и технологических модулей в пределах одного рабочего места, определяющая возможность как разделения, так и концентрации различных видов воздействий в рабочей зоне;
- интеллектуальность микрооборудования, определяемая развитой системой контрольно-диагностических модулей и гибкой связью между аналитическими и технологическими модулями и подсистемами информационного и энергетического обеспечения;
- локальность и прецизионность воздействия, что позволяет работать со сверхмальыми объемами и количеством веществ, уменьшить энергетические затраты, повысить эффективность и скорость протекания процесса;
- экологичность, определяемая возможностью работы со сверхмальыми количествами вредных и токсичных веществ и простотой утилизации отходов;
- экономичность, определяемая групповыми принципами производства, используемыми при создании технологических микросистем, их низкой материальной и энергоемкостью, а также высокой эффективностью применения микротехнологических систем при работе со сверхмальыми количествами веществ.

Аналитико-технологические микросистемы [см. рисунок *б*] являются новым видом оборудования для работы со сверхмальыми количествами веществ неорганической и органической природы с высокой степенью локализации воздействий, дифференциацией и интеграцией

физико-химических процессов в условиях микрообъемов и магистралей, создаваемых методами микротехнологии твердого тела. В состав интегрированной кластерной технологической микросистемы ("роботизированного" технологического чипа) входят

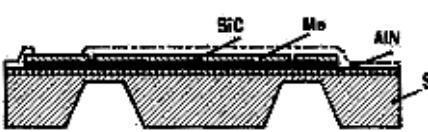
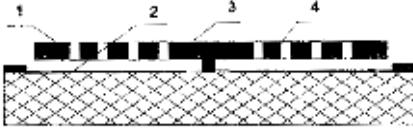
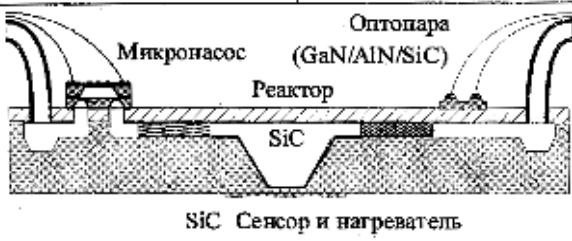
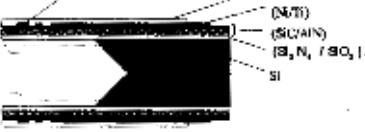
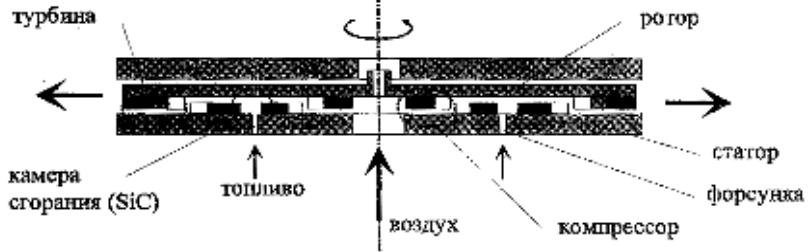
- технологические модули;
- контрольно-диагностические модули;
- модули хранения и утилизации;
- транспортные магистрали;
- подсистемы энергообеспечения;
- информационно-управляющие подсистемы.

Основными признаками кластерной микросистемы являются:

- номенклатура и характеристики технологических модулей;
- номенклатура и характеристики контрольно-диагностических модулей;

- номенклатура и характеристики транспортных магистралей;
- количество рабочих позиций и возможность их наращивания (открытость);
- структурно-компоновочные схемы и способ агрегатирования;
- взаимно-пространственное расположение модулей (линейное, радиальное, смешанная компоновка) и способ обеспечения межмодульных связей;
- принцип функционирования (последовательный, параллельный, параллельно-последовательный).

Магистрально-модульная система построения кластерного комплекса, унификация конструкции технологических, контрольно-диагностических модулей и транспортных магистралей, а также их дублирование и возможность внесения изменений в топологические связи между модулями на этапе проектирования (за счет заме-

Микросистемы	Схемы устройств	
<i>a. Сенсоры</i>	<b>Акселерометр</b> 	 1 - микрогироскоп (SiC); 2 - обкладка для снятия сигнала; 3 - электростатический привод; 4 - вибрирующая мембрана-ротор (SiC).
<i>b. Микрореактор</i>		<b>Оптоопара (GaN/AlN/SiC)</b> <b>Реактор</b> <b>SiC Сенсор и нагреватель</b>
<i>c. Микроинструмент</i>	<b>Микропинцет (SiC)</b> 	<b>Микродозатор</b> 
<i>d. Микротурбина</i>		

Практическая реализация объектов микросистемной техники

ны ограниченного числа шаблонов при проведении литографических операций) без радикального изменения технологии предопределяют внутреннюю гибкость кластерной аналитико-технологической микросистемы, что обеспечивает ее полифункциональность.

**Микроинструмент.** Микроинструмент представляет собой комплекс сменных технологических микромодулей для выполнения различного рода операций с высокой локальностью воздействий. Комплекс состоит из микроустройств [см. рисунок 6], обеспечивающих на микроуровнях захват, подачу и отсос, нагрев, препарирование, стимуляцию и сверхлокальную (вплоть до nanoуровня) диагностику. Это позволяет осуществлять операции дозирования, присоединения, удаления, модификации, измерения.

Фактически минимальная достаточность комплекта сменного микротехнологического инструмента, устанавливаемого в прецизионный микроманипулятор, определяется исходя из возможности локального проведения трех основных видов микроопераций: нанесения, удаления и модификации вещества. Для отдельных операций и специфических процессов возможно изменение базовых технологических микромодулей, оснащение их встроенными средствами контроля.

Базовый комплект микротехнологического инструмента способствует развитию индивидуальных микроопераций и микроманипулирования с объектами органической и неорганической природы, а также обеспечивает требуемую гибкость в работе технологических кластерных микросистем.

Обобщая представленную информацию о микросистемах, предназначенных для реализации технологических и аналитических операций на микроуровне в микрообъемах с использованием сверхмалых количеств рабочих веществ, отметим, что микросистемы технологического назначения являются одним из наиболее перспективных и "масштабных" направлений технологий, машин и производств будущего, ориентированных на "тонкие" и "точные" научно-технические процессы, определяющие научно-технический потенциал и обороноспособность государства.

Создание нового поколения аналитико-технологических микросистем и микроинструмента, предназначенных для работы на микроуровне с объектами неорганической и органической природы предусматривает:

- разработку новых принципов организации и функционирования аналитико-технологических микросистем с учетом возможности модификации конструкции и технологии их создания с целью обеспечения гибкости в отношении номенклатуры решаемых задач, т.е. гармо-

низации конструкторско-технологического единства и многофункциональности системы;

- освоение новых принципов конструирования технологических микросистем и микроинструмента с учетом эффектов масштабирования, определяемых миниатюризацией технологических и диагностических модулей, необходимостью прецизионного манипулирования микрообъектами, а также реализацией процессов в сверхмалых объемах с использованием ограниченных количеств веществ;

- широкое использование принципов и элементной базы микроэлектромеханики и микрооптики при создании аналитико-технологических микросистем и микроинструмента с учетом особенности интеграции в ограниченных объемах исполнительных и чувствительных элементов с электрическими, оптическими, механическими и магнитными связями;

- широкое использование классических конструктивных решений, применяемых при создании традиционных микрорадиоэлектронных компонентов, в конструкциях технологических, контрольно-диагностических модулей и особенно при конструировании подсистем информационного и энергетического обеспечения;

- освоение новой номенклатуры материалов с повышенной устойчивостью к внешним воздействиям при создании технологических микросистем и микроинструмента, работающих в условиях высокой пространственной и временной концентрации энергии при непосредственном контакте с рабочей средой, в том числе химически активной;

- модернизацию и адаптацию оборудования и основных процессов (преимущественно корпусулярных) классической технологии изделий микроэлектроники к решению задач создания аналитико-технологических микросистем и микроинструмента.

**Микромашины и мини-роботы.** Целенаправленные работы в области создания микродвигателей ведутся уже более десяти лет. Преимущественно это относится к электростатическим двигателям, что связано с особенностями конструкции, обусловленными техническими ограничениями в использовании третьего измерения. Создание эффективных электромагнитных двигателей стало возможным в связи с развитием "объемной" волоконной технологии, когда базовые элементы конструкции формируются за счет сборки стекловолоконного пакета, его последующего утоньшения путем вытягивания и, наконец, избирательного травления стекла с образованием полостей, которые при формировании обмоток двигателей заполняются металлом или выполняют фун-

кцию полости для микроротора. Обращает на себя внимание и тот факт, что в качестве источников движения в микросистемах используются не только электрические, но и пневматические элементы.

В последние годы выполнены уникальные работы в области микросистемной техники по проблемам автономных миниатюрных систем энергообеспечения и нетрадиционных движителей. Наибольший интерес в этой области представляют микротурбины – миниатюрные аналоги классических турбин, вращение которых обеспечивается за счет сжигания газов при высоких температурах, например водорода, что обеспечивает возможность генерации мощности до десятков ватт при размерах микромашины в несколько миллиметров. На рисунке 2 представлена техническая реализация ротора микротурбины методом сухого глубинного травления [4]. Наряду с этим для обеспечения "динамичного" и энергетически эффективного передвижения в пространстве ведутся активные работы по миниатюрным "плазменным" двигателям.

Особый интерес подобные разработки представляют для робототехнического направления. Мини-роботы, как правило, предназначены для эксплуатации в условиях, непосредственно не доступных человеку (живой организм, зоны с повышенными уровнями радиации и загрязнения ядовитыми веществами, взрывоопасные объекты). Следует, однако, особо отметить, что основным стимулирующим фактором развития миниатюрных робото-технических систем является возможность их применения для обеспечения безопасности и обороноспособности государства.

Объекты микросистемной техники, представленные на рисунке, разработаны с использованием конкурентоспособной отечественной технологии [5] в Центре микротехнологии и диагностики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета.

### Список литературы

1. Luchinin V.V., Korlyakov A.V. // Transaction of Indo-Russian Workshop on Micromechanical Systems. India, New Delhi. 1999. P. 1-16.
2. Sprangers D., Prak A., Leeuwis H. // MST News. 1997. № 22. P. 15-16.
3. Daniel J.H., Igbal S., Milington R.B. // Sensors and Actuators. A Physical. 1998. V.71. P. 81-88.
4. Luchinin V.V., Korlyakov A.V., Vasilev A.A. // Proc/SPIE. 1999. V3680. P. 783-791.
5. Корляков А.В., Лучинин В.В., Мальцев П.П. Микроэлектромеханические структуры на основе композиции "карбид кремния - нитрид алюминия" // Микроэлектроника - 1999, № 3. С. 201-212.

УДК 621.3.049.77.002.56

**В.А. Колясников**, канд. техн. наук, **Т.Я. Рахимбабаев**, РНЦ "Курчатовский институт", Курчатовский источник синхротронного излучения

## МИКРОЖИДКОСТНЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ LIGA-ТЕХНОЛОГИИ

*Рассматриваются микрожидкостные системы – миниатюрные устройства, предназначенные для проведения различных химических и физических процессов с малыми объемами жидкостей и газов. Дан анализ их преимуществ и недостатков, а также определены основные сферы их применения. В заключение приводится несколько примеров реализации микрожидкостных устройств, изготовленных с использованием LIGA-технологии.*

### Введение

За последние 20 лет был достигнут значительный прогресс в области миниатюризации различных механических структур. Эта тенденция привела к развитию существующих и появлению новых технологий. Первоначально эти технологии являлись развитием процессов, применявшимся в микроэлектронике. Со временем, воврав в себя ноу-хау микроэлектроники, точной механики и ряда других специфических технологий (таких как, например, LIGA), сформировалась совокупность технологических процессов, дающих возможность изготавливать различные элементы микромеханических устройств. Эта совокупность получила название микросистемной технологии. На основе таких процессов в настоящее время производится широкий спектр миниатюрных устройств различного применения с размерами элементов от нескольких микрометров до нескольких миллиметров. Такие устройства с элементами механики, включающие сенсоры, исполнительные элементы и источники энергии (часто с интегрированной системой управления) получили название микромеханических систем (устройств).

Микромеханические системы уже давно вышли из стен лабораторий и их можно встретить во всех сферах человеческой жизни. Области применения микросистем охватывают вычислительную технику и телекоммуникации, биологию, медицину, химию, мониторинг окружающей среды, автомобилестроение, космические иссле-

кцию полости для микроротора. Обращает на себя внимание и тот факт, что в качестве источников движения в микросистемах используются не только электрические, но и пневматические элементы.

В последние годы выполнены уникальные работы в области микросистемной техники по проблемам автономных миниатюрных систем энергообеспечения и нетрадиционных движителей. Наибольший интерес в этой области представляют микротурбины – миниатюрные аналоги классических турбин, вращение которых обеспечивается за счет сжигания газов при высоких температурах, например водорода, что обеспечивает возможность генерации мощности до десятков ватт при размерах микромашины в несколько миллиметров. На рисунке 2 представлена техническая реализация ротора микротурбины методом сухого глубинного травления [4]. Наряду с этим для обеспечения "динамичного" и энергетически эффективного передвижения в пространстве ведутся активные работы по миниатюрным "плазменным" двигателям.

Особый интерес подобные разработки представляют для робототехнического направления. Мини-роботы, как правило, предназначены для эксплуатации в условиях, непосредственно не доступных человеку (живой организм, зоны с повышенными уровнями радиации и загрязнения ядовитыми веществами, взрывоопасные объекты). Следует, однако, особо отметить, что основным стимулирующим фактором развития миниатюрных робото-технических систем является возможность их применения для обеспечения безопасности и обороноспособности государства.

Объекты микросистемной техники, представленные на рисунке, разработаны с использованием конкурентоспособной отечественной технологии [5] в Центре микротехнологии и диагностики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета.

### Список литературы

1. Luchinin V.V., Korlyakov A.V. // Transaction of Indo-Russian Workshop on Micromechanical Systems. India, New Delhi. 1999. P. 1-16.
2. Sprangers D., Prak A., Leeuwis H. // MST News. 1997. № 22. P. 15-16.
3. Daniel J.H., Igbal S., Milington R.B. // Sensors and Actuators. A Physical. 1998. V.71. P. 81-88.
4. Luchinin V.V., Korlyakov A.V., Vasilev A.A. // Proc/SPIE. 1999. V3680. P. 783-791.
5. Корляков А.В., Лучинин В.В., Мальцев П.П. Микроэлектромеханические структуры на основе композиции "карбид кремния - нитрид алюминия" // Микроэлектроника - 1999, № 3. С. 201-212.

УДК 621.3.049.77.002.56

**В.А. Колясников**, канд. техн. наук, **Т.Я. Рахимбабаев**, РНЦ "Курчатовский институт", Курчатовский источник синхротронного излучения

## МИКРОЖИДКОСТНЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ LIGA-ТЕХНОЛОГИИ

*Рассматриваются микрожидкостные системы – миниатюрные устройства, предназначенные для проведения различных химических и физических процессов с малыми объемами жидкостей и газов. Дан анализ их преимуществ и недостатков, а также определены основные сферы их применения. В заключение приводится несколько примеров реализации микрожидкостных устройств, изготовленных с использованием LIGA-технологии.*

### Введение

За последние 20 лет был достигнут значительный прогресс в области миниатюризации различных механических структур. Эта тенденция привела к развитию существующих и появлению новых технологий. Первоначально эти технологии являлись развитием процессов, применявшимся в микроэлектронике. Со временем, воврав в себя ноу-хау микроэлектроники, точной механики и ряда других специфических технологий (таких как, например, LIGA), сформировалась совокупность технологических процессов, дающих возможность изготавливать различные элементы микромеханических устройств. Эта совокупность получила название микросистемной технологии. На основе таких процессов в настоящее время производится широкий спектр миниатюрных устройств различного применения с размерами элементов от нескольких микрометров до нескольких миллиметров. Такие устройства с элементами механики, включающие сенсоры, исполнительные элементы и источники энергии (часто с интегрированной системой управления) получили название микромеханических систем (устройств).

Микромеханические системы уже давно вышли из стен лабораторий и их можно встретить во всех сферах человеческой жизни. Области применения микросистем охватывают вычислительную технику и телекоммуникации, биологию, медицину, химию, мониторинг окружающей среды, автомобилестроение, космические иссле-

дования, авиационные технологии и др. В настоящее время на рынке микромеханических устройств обращается по разным оценкам от 3 до 12 млрд. долл. в год и в ближайшие несколько лет ожидается рост объема инвестиций в несколько раз. Лидерами на рынке являются такие компании, как Analog Devices, EG&G, Lucas NovaSensor, Honeywell, Motorola, Redwood Microsystems, Texas Instruments, Sandia National Laboratories и др. Существует несколько факторов, сдерживающих стремительный рост применения микросистемной технологии. Во-первых, это отсутствие информации у потенциального потребителя о возможностях, предоставляемых данной технологией и ее доступности, что заставляет инженеров и разработчиков выбирать иногда более дорогие и менее надежные решения. Во-вторых, это разрыв между исследовательской, конструкторской разработкой микроизделия и его внедрением и массовым производством. На решение этих проблем за рубежом тратится много усилий. Поддержка развития микросистемной технологии за рубежом осуществляется на самом высоком уровне: в США это – N SF(National Science Foundation), APRA (Advanced Project Research Agency), NASA, национальные лаборатории США; в Европе наряду с национальными программами существуют проекты ЕС - NEXUS, MUST, распространение знаний в данной области ведется через Europractice, существуют десятки более мелких проектов; в Японии поддержка осуществляется непосредственно Министерством международной торговли и индустрии.

В чем же привлекательность микроустройств в целом? Рассмотрим наиболее общие преимущества микроизделий перед своими аналогами, изготовленными по обычной технологии.

- *Снижение цены* конечного изделия. Цена микроизделий, как правило, существенно ниже цены макроаналогов при сохранении или улучшении основных характеристик. Цена датчика ускорения для подушки безопасности автомобиля уменьшилась более чем в три раза, с началом поставок микроустройств.

- *Повышение надежности и повторяемости* характеристик для микроприборов. Микросистемные технологии изначально обладают высочайшими стандартами качества и хорошим потенциалом для массового производства.

- *Миниатюрность* приборов резко расширяет зону применимости микроприборов, что в совокупности с низкой ценой и высокой надежностью позволяет осуществлять полный контроль и управление различными сложными системами. В современных автомобилях интегрировано более десятка различных микроустройств (таких как сенсоры ускорения для подушек безопасности; датчики, регистрирующие угловую скорость вращения колеса для антиблокировочной и антипробуксовочной сис-

тем, и др. В 1998 г. более 80% автомобилей в Европе были оборудованы подушками безопасности), что позволило вывести их на новый уровень безопасности и эргономики. Таким образом, использование микроустройств позволяет получить новые качества в привычных продуктах. Существуют области деятельности, где миниатюрность, а также высокая точность являются абсолютно необходимым условием для решения определенного класса задач. Примером могут служить малоразрушающая хирургия, трансплантология и искусственные органы, оптоволоконные соединители, высокочастотные резонаторы для мобильной связи и др. Важнейшим следствием миниатюрности и совершенства конструкции микросистем является также снижение энергопотребления.

- *Мобильность* микроприборов имеет решающее значение во многих областях, таких как медицина, химия, аэрокосмическая промышленность, авиастроение и др. Современные микроаналитические системы для экспресс-анализа, приборы для коррекции слуха, микродозаторы для лекарств являются прекрасными примерами значительного прогресса в этом направлении, достигнутого с помощью микросистем. Другими словами, микросистемы переводят традиционные методы диагностики и измерений в разряд оперативных.

- Уменьшение размеров и массы прибора имеет и другой аспект: подобные механические устройства обладают меньшей инерционностью и более высокими рабочими частотами. Это позволяет строить более эффективные системы управления и контроля, достигать высоких показателей производительности. Примером является высочайшая производительность современных струйных принтеров, печатающие головки для которых изготовлены с использованием микросистемной технологии.

- Одним из важнейших направлений развития микросистем является дальнейшая интеграция схем управления и обработки данных в само микроустройство, что, наряду с надежностью, также повышает управляемость сложных систем. Кроме того, такие "разумные" приборы могут осуществлять самодиагностику и автокалибровку, что также повышает качество конечного продукта.

Наряду с этими общими соображениями в каждой конкретной области приложения микросистем существуют свои специфические преимущества и особенности применения.

Суммируя вышесказанное, можно отметить, что микросистемы, обладая рядом уникальных характеристик, способны в корне изменить окружающую нас действительность, делая нашу жизнь более удобной и безопасной микроустройства, заменяя существующие, часто привносят новое качество в привычные вещи. Ожидается, что микротехнология даст мощный толчок технологическому развитию и сформирует условия для появления новой волны технологических инноваций.

## Микрожидкостные системы

Номенклатура производимых в настоящее время микроустройств весьма разнородна (рис.1). Влияние на формирование ситуации на рынке микросистем оказывают не только рыночные и технологические факторы, но и исторически сложившиеся предпочтения. Так, на рынке США подавляющее большинство компаний производят микрокомпоненты на базе технологий микроэлектроники, в то время как европейские и японские фирмы в большей степени тяготеют к альтернативным технологиям, таким как LIGA, точная механика, различные варианты лазерной технологии. Исторически развитие микромеханических систем началось в автомобилестроении. И по сей день это один из основных потребителей микроустройств. Поэтому сейчас значительную долю рынка микросистем составляют датчики ускорения и давления, которые позднее стали применяться в аэрокосмической промышленности, робототехнике и других областях. В автомобилестроении эти датчики используются в системах безопасности автомобиля (упоминавшиеся подушки безопасности, АБС и антипробуксовочные системы), элементах активной подвески (например в Sitroen



Рис. 1. Доля от общего объема продаж различных типов микроустройств в 1996 г. и 2003 г. (прогноз) по данным System Planning Corporation

Xantia), системах контроля давления рабочей смеси и ее дозировки, датчиках давления шин и др.

Быстро развивающейся нишой рынка являются *оптические системы*. Примерами могут служить коннекторы для оптоволокон, прогрессивные технологии для компьютерных дисплеев, оптические спектрометры для различных применений и др.

И, наконец, одну из самых значительных и перспективных ниш на рынке микроустройств занимают *микрожидкостные системы*, на которых мы подробно остановимся, рассмотрим их специфику и несколько примеров конкретных микрожидкостных устройств.

Микрожидкостные системы являются важнейшей областью приложения микросистемной технологии. По данным корпорации System planning доля микрожидкостных устройств в общем объеме продаж микросистем в 1996 г. составляла 19%. В 2003 г. по прогнозу доля подобных устройств резко вырастет и достигнет 39%. При этом оборот в абсолютном выражении в этом секторе вырастет в 7-10 раз и на 2003 г. составит 4,5 млрд. долл. Если учесть, что часть датчиков давления тоже может быть отнесена к микрожидкостным системам, то результат будет еще более впечатляющим.

Под термином *микрожидкостная система* мы будем понимать миниатюрное устройство, изготовленное на основе микросистемной технологии и предназначенное для проведения различных химических и физических процессов с малыми объемами жидких реагентов. В иностранной литературе к таким системам относят также микроустройства, оперирующие с газами. При этом типичные размеры элементов микрожидкостной системы составляют от нескольких микрометров до нескольких миллиметров, а типичные потоки жидкости - от нескольких микролитров до десятков миллилитров в минуту.

Рассмотрим основные преимущества микрожидкостных систем перед их традиционными аналогами, специфичные для данной области микротехнологии.

- Микрожидкостные системы отличают очень *малые времена отклика*. Этот факт позволяет, например, быстро выводить продукт за зону реакции или изменять условия ее протекания (в частности, осуществлять быстрое, интенсивное охлаждение или нагрев, прерывать катализитические реакции и т.п.). Примером точного контроля над потоками жидкости могут служить печатающие головки современных струйных принтеров. Так, в головках принтеров фирмы Hewlett Packard объем элементарной порции красителя составляет около 10 пико-литров. В подобных устройствах фирмы Epson точное формирование рабочей капли осуществляется созданием разряжения в области сопла после выброса капли красителя, и все это при высочайшей скорости работы.
- Крайне низкие значения мертвых объемов, что по-

зволяет избегать потери в потоках реагентов и продуктов реакции. Это важно для работы с опасными или очень дорогими реагентами и позволяет получать точно определенное количество конечного продукта. Помимо малого количества отходов при химическом производстве, подобный подход позволяет получать продукты очень высокой степени чистоты. Иллюстрацией могут служить устройства для получения микропорций медицинских препаратов, а также для их точного дозирования. Возможность использования очень малых объемов реагентов для реакции очень важна (в частности, для различных анализаторов, где объем проб может быть ограничен) и, к тому же, это позволяет минимизировать расход индикаторных веществ, что кроме очевидных преимуществ сокращает время анализа. Примером реализации данной черты является быстрорастущий класс микроаналитических систем для различных видов анализа.

- Высокие значения отношения площади поверхности к объему жидкости, благодаря чему можно, во-первых, очень эффективно смешивать жидкие реагенты или обеспечивать большую площадь реакции с реагентом (катализатором) в твердом состоянии, во-вторых, улучшать теплопередачу для нагревания или охлаждения жидкости. Таким образом, появляется возможность эффективно контролировать температурный режим реакции, в частности, проводить реакции с большим тепловыделением.

- Переход к массовому химико-технологическому производству в случае микрореакторов, в отличие от макросистем, где, во-первых, переход от лабораторного к промышленному производству нередко вызывает сложнейшие технологические проблемы и, кроме того, надежность и безопасность производства иногда являются серьезной проблемой. Таким образом, в перспективе микрореакторные системы позволяют сократить срок внедрения того или иного промышленного химического процесса, так как отпадает необходимость в дополнительной разработке совершенствования нового технологического процесса, каким часто является крупномасштабное химическое производство, повысить общую надежность и устойчивость процесса (в случае выхода из строя одного из многих параллельных микрореакторов их можно заменить, не прерывая всего технологического цикла) и, наконец, повысить безопасность производства (аварии даже нескольких микрореакторов не являются критическими, вследствие малого объема задействованных реагентов). Дополнительным плюсом является снижение капитальных затрат на налаживание производства, ведь при массовом выпуске микрокомпоненты должны обладать низкой стоимостью.

Сложности, стоящие на пути продвижения микрореакторов, систем (наряду с общими для всех микро-

механических систем), имеют также и специфические черты. Так, существенное уменьшение размеров микрореакторов приводит не только к количественным, но и качественным изменениям. Это вызывает трудности с моделированием как механических (работа микронасосов и клапанов), так и химических микропроцессов. В настоящее время появились первые специализированные и адаптированные версии компьютерных программ, направленных на решение подобных инженерных и расчетных задач. Использование датчиков в таких системах затрудняется тем, что возникают проблемы с очисткой их поверхности, а это особенно критично для микрореакторов. Кроме того, необходимо защитить сенсоры от вредного воздействия окружающей среды (пыли, агрессивных компонентов и т.д.). При этом стоимость упаковки для микрореакторов составляет до 75% их стоимости из-за специфики конструкции для каждого конкретного устройства. Имеет место также проблема создания универсальных методик тестирования.

Среди основных элементов микрореакторов принято выделять микронасосы, клапаны (активные и пассивные) и вспомогательные элементы, такие как смесители, элементы ввода и вывода, теплообменники, каналы, датчики и др. В настоящее время в стадии разработки находится большое число насосов и клапанов различных конструкций и принципов действия, с движущимися механическими частями и без них.

Наиболее распространенная конструкция микронасоса включает в себя входной и выходной клапаны и рабочий объем с мембраной, приводимой в действие актуаторами с различными принципами действия. По принципу действия актуатора среди таких насосов различают электростатические, пьезоэлектрические, электромагнитные, биметаллические, пневматические, термические и др. На рис. 2 представлена типичная конструкция микронасоса термопневматического принципа действия, изготовленного с использованием LIGA-технологии. Конструкция содержит входной и выходной клапаны, пропускающие поток в одном направлении, и ти-

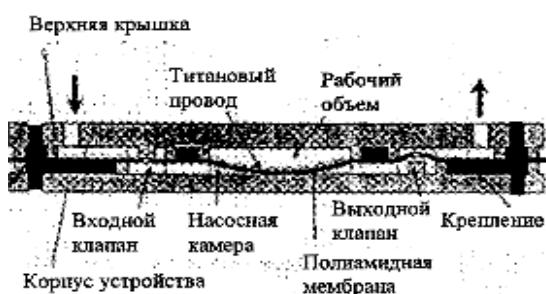


Рис. 2. Конструкция микронасоса  
Institut fur Mikrostrukturtechnik, Karlsruhe

тановый нагревательный элемент с расширительным объемом. Насос имеет производительность до 80 мл/мин. Кроме устройств мембранных типов широко используются насосы шестереночного типа (см. рис. 12). Из насосов с немеханическим принципом действия наиболее хорошо разработаны приборы с ультразвуковыми, электроосмотическими и электрогидродинамическими актуаторами. Активные клапаны имеют сходные с насосами конструкции и принципы действия. На рис. 3 представлена схема конструкции и фотография активного клапана, производимого компанией Redwood Microsystems на основе кремниевой технологии.

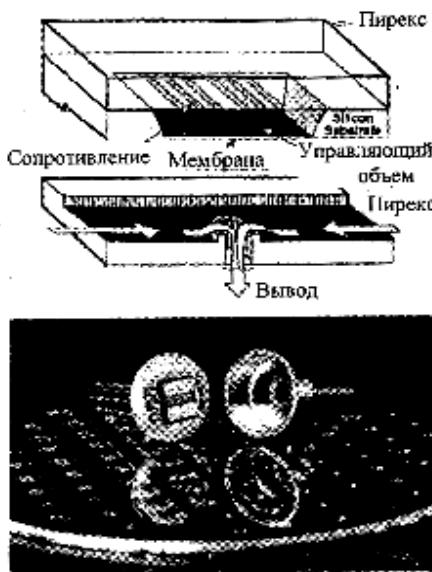


Рис. 3. Активный клапан фирмы Redwood Microsystems

Примеры приложения микрожидкостных систем весьма разнообразны. Исторически одним из первых устройств, содержащих микрожидкостные элементы, являлись головки для струйных принтеров. Головки для струйных принтеров представляют собой сложные устройства с соплами диаметром около 5 мкм, с различными типами насосов для выброса красителя (термовозгонка используется в головках фирмы Hewlett Packard, пьезонасосы использует фирма Epson). Со временем удалось резко снизить стоимость головки настолько, что сейчас, заменяя картридж в принтерах Hewlett Packard, мы заменяем и всю печатающую головку. Таким образом, этот продукт переходит в разряд массового и эта ниша рынка оценивается в 1,5 млрд. долл. в год.

Вторым по распространенности типом микрожидкостных систем являются в настоящее время устройства для измерения и регуляции потоков жидкости и газов (рис. 4). К области их применения относится автомобилестроение, где используются датчики давления для определе-

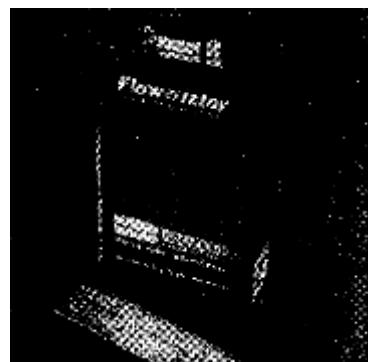


Рис. 4. Регулятор потоков жидкости  
Flowistor Redwood Microsystems

ния момента впуска, сопла для топливоподачи, контроль параметров масла и охлаждающей жидкости, давления в шинах.

Дальнейшим развитием подобных систем являются так называемые микроаналитические системы, которые содержат микронасосы, клапаны и анализирующие датчики. Эти системы используются для оперативного анализа различных образцов (рис. 5). Устройства, работая с малым количеством реагентов, имеют высокие скорости анализа и малое энергопотребление, обладают высочайшим потенциалом для различных применений. Основной сферой приложения этих устройств являются, прежде всего, медицина и мониторинг окружающей среды. Нельзя не упомянуть приборы медицинского применения, предназначенные для дозирования и введения лекарств, например, устройство для введения гинсулина при лечении диабета или специальные мелкодисперсные распылители для аэрозольных лекарств (рис. 6). В последнее время большая работа ведется в области разработки и внедрения большого класса микроустройств - теплообменников (рис. 7), испарителей жидкости (например горючего для автомобилей) или газовых абсорбентов, имеющих значительно более высокую эффективность по сравнению с макроаналогами.

Разработки в области микрожидкостных систем име-

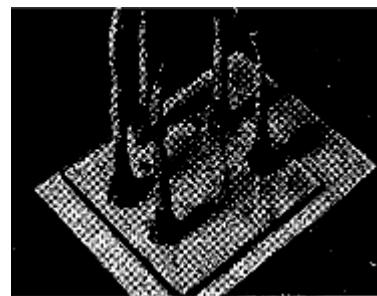


Рис. 5. Пример микроаналитической системы - прибор  
для микроканального электрофореза  
(Central Research Laboratories Ltd, Великобритания)



Рис. 6. Ингалятор с пьезонасосом. SAMLAB, Швейцария



Рис. 7 Микроканальный теплообменник  
(Northwest National Laboratories, США)

иуют впечатляющие достижения. Если 3-4 года назад, за редкими исключениями, о прототипах этих систем говорилось как о перспективных разработках, то сегодня ситуация изменилась. В последнее время большое число отдельных компонентов микросистем, таких как насосы различных конструкций, микросмесители, сенсоры, хорошо проработанных в технологическом плане в лабораториях, в ближайшее время могут быть реализованы в коммерческих интегрированных микроустройствах. Такие устройства представляют собой функционально завершенный блок, выполняющий все необходимые функции. Создание интегрированных устройств является одной из основных тенденций развития микроридкостной техники. Другой характерной особенностью, проявившейся в последнее время, стал тот факт, что движущей силой в развитии микроридкостных систем становится не технологии и изготовители микросистемной техники, а ее потенциальные потребители и, наконец, все более сильная конкуренция со стороны не кремниевых технологий. Приводит к появлению на рынке большого числа разработок, выполненных на основе альтернативных технологий (LIGA, лазерная LIGA, точная механика, волоконные технологии и др.). LIGA - от немецкого Lithographic, Galvanoformung und Abformung - является перспективным, быстроразвивающимся технологическим

процессом с высоким потенциалом для массового производства. Эта технология включает в себя несколько ступеней, представленных на рис. 8:

- 1) глубокую литографию, которая посредством облучения через маску, например синхротронным излучением, формирует изображение на резисте толщиной до нескольких миллиметров, с последующим травлением;
- 2) электродепозицию, когда протравленные на резисте структуры заполняются металлом. Полученный металлический образец может быть использован как конечное изделие, а может служить в качестве штампа;
- 3) штамповку или литье под давлением. При этом выбор материала для конечного продукта довольно широк.

LIGA технология обладает рядом существенных преимуществ перед альтернативными технологическими процессами и, прежде всего, кремниевой технологией микроридкостных систем. Это, во-первых, широкий выбор материалов, что может быть крайне важно для работы с агрессивными средами, высокими температурами и, наконец, позволит подобрать материал с необходимыми в каждом конкретном случае параметрами (жесткостью, теплопроводностью, биосовместимостью и т.д.). Кроме того, LIGA-технология позволяет получать структуры с высоким аспектным отношением, т.е. отношением высоты структуры к ее поперечным размерам. Для планарных технологий увеличение высоты структур является практически единственным способом еще больше увеличить поверхность интерфейса различных реагентов или площадь контакта с обслуживающими структурами, повышая эффективность смешивания или теплового контакта. Наконец, LIGA-технология позволяет получать структуры из прозрачного материала с очень высоким качеством поверхности, что дает возможность легко интегрировать оп-

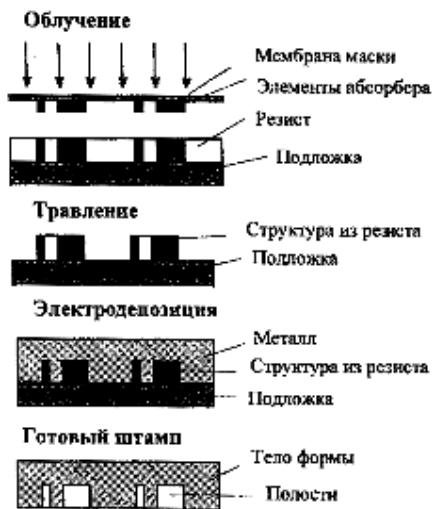


Рис. 8. Последовательность технологических этапов  
LIGA-технологии

тические элементы, которые широко применяются, например, для анализа веществ в микроаналитических системах.

#### Примеры реализации микрородкостных систем

Приведем несколько примеров микроструктур, изготовленных с применением LIGA-технологии. На рис 9 показан массив смесителей, полный размер каждого из которых не превышает 3 мм. Массив содержит 360 микроканалов на площади пятирублевой монеты. При этом характерные размеры канала могут быть от 30 до 200 мкм. Параллельная архитектура позволяет достичь довольно высокой производительности (до 5 л в час при давлении 0,12 МПа). Так как массив изготовлен по LIGA-технологии, то в зависимости от требований заказчика можно изготавливать подобный массив из различных материалов (пластиков, керамики, металлов).

На рис. 10 представлен пример теплообменника, изготовленного Sandia National Lab по заказу Lockheed Martin. Структуры получены с помощью глубокой рентгеновской литографии с последующей электродепозицией меди. Полный размер теплообменника составляет 43,18 x 58,44 мм, характерный размер структур достигает 23 мкм. Конструкция после сборки является вакуумно-плотной. Прибор демонстрирует такие преимущества LIGA-технологии, как оптимальный выбор материала (в данном случае была выбрана медь, как отвечающая требованиям вакуумной технологии и обладающая высокой теплопроводностью) и высокое аспектное отношение, увеличивающее площадь теплового контакта.

Институт микротехнологии (г. Майнц) разработал мембранный насос (рис. 11), при изготовлении которого был использован широкий спектр микросистемных технологий (LIGA, тонкопленочная технология, пластиковая микроштамповка и др.). Производительность насоса может контролироваться с высокой точностью и достигает 300 мл/мин. Материал, из которого он изготовлен, может обладать биологической совместимостью. Насос работает в импульсном режиме и имеет значи-

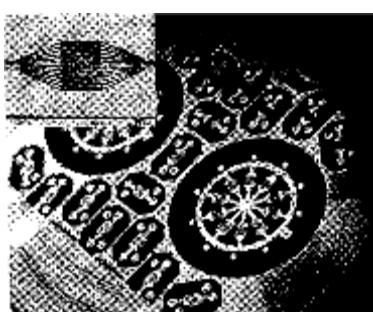


Рис. 9. Пример реализации массива микросмесителей.  
Institute for Mikrotechnik, Mainz

тельный ресурс ( $10^9$  циклов). Еще одним преимуществом этой конструкции является его способность к самозаполнению (создаваемое разряжение 350 гПа).

Насос другого типа - шестереночный - представлен на рис. 12. Он также изготовлен с применением LIGA-технологии. В качестве актуатора используется серийный двигатель с диаметром 3 мм. Конструкция может работать с высоковязкими жидкостями. Насос также самозаполняемый, с максимальной производительностью 2,5 мл/мин.

В заключение хочется отметить, что микросистемная техника уже доказала свою значимость. В ближайшие несколько лет ожидается резкий рост инвестиций в данную область. При этом микрородкостные устройства занимают значительную и одну из самых перспективных ниш на рынке микроприборов. Они обладают высочайшим потенциалом и способны внести революционный вклад в развитие таких направлений науки и техники как, медицина, автомобилестроение, авиационная и космическая промышленность, химическое производство и др.

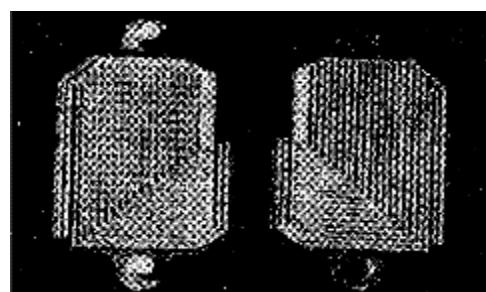


Рис. 10. Теплообменник



Рис. 11. Микронасос. Institute for Mikrotechnik, Mainz



Рис. 12. Шестереночный насос. MEMStek Products

УДК 621.3.049.77.002.5

**В.Л. Дятлов**, д-р. техн. наук. Институт математики СО РАН,  
**Э.Г. Косцов**, канд. физ.-мат. наук. Институт автоматики и электрометрии  
 СО РАН

## ВЫСОКОЭНЕРГОЕМКИЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

*Рассматривается принцип работы шаговых лепестковых микродвигателей, основанных на эффекте электростатического наката металлических пленок на поверхность сегнетоэлектрика. Такие микродвигатели, изготавливаемые с помощью микроэлектронной технологии, отличаются исключительно высокой энергоемкостью (свыше 0,3 - 1 Дж/м<sup>2</sup> при напряжениях 10 - 50 В) и прецизионностью перемещения (шаг от 10 A° до 100 мкм). Приводятся теоретические и экспериментальные данные, характеризующие энергетические и механические параметры таких микродвигателей.*

### Введение

Как известно, с технологией микроэлектроники связано исключительно успешное развитие электроники, когда при значительном уменьшении стоимости достигнуто и существенное увеличение функциональных возможностей изделий. В рамках этой технологии создано большое число новых технологических методик, которые можно использовать также в микромеханике и микроэлектромеханике. В свое время для развития микроэлектроники пришлось создавать дорогостоящую технологическую базу. Теперь же для развития микромеханики эта база уже практически создана, и планарные микродвигатели могут сыграть в микромеханике роль, подобную роли транзисторов в микроэлектронике.

Известно несколько направлений развития электрических микродвига-

телей, но не все они выдержат, в итоге, жесткую конкуренцию на применение в микромеханике. Очевидно, что таким направлением будет направление, в котором в пределах реальных физических эффектов и современной технологии будут удовлетворена совокупность требований к параметрам устройств микромеханики, и, в первую очередь, требования по высокой удельной энергоемкости.

В планарных электрических микродвигателях возможно получение мощностей порядка  $10^{-6}$ - $10^{-5}$  Вт и несколько более. Их наращивание до значений порядка 1 Вт допускается за счет объединения нескольких микродвигателей. Такие мощности имеют современные пьезоэлектрические, а также маломощные индуктивные двигатели, применяемые в современной точной механике. Наиболее перспективными в настоящее время считаются первые из них.

Можно ожидать, что планарные микродвигатели будут иметь более высокие параметры и характеристики по точности позиционирования, глубине регулирования и даже надежности, чем пьезоэлектрические двигатели. Основным ориентиром при выборе направления развития планарных электрических двигателей является достижение наиболее высоких электромеханических параметров и соотношений мощность/масса при низкой стоимости, которые достигаются за счет использования технологии микроэлектроники и создания унифицированных микромеханических микросхем.

Известны следующие типы планарных микродвигателей.

**ЭВПД** - электростатические воздушные планарные двигатели [1-5]. Основное отличие этих приборов от классических электростатических двигателей - малый зазор между статором и ротором, равный 1-2 мкм (в классических электростатических машинах он равен 1-2 мм). Малый зазор в межэлектродном пространстве определяет относительно высокую плотность "накачиваемой" в образец электрической энергии и, следовательно, эффективность двигателя. Разрабатываются ЭВПД вращательного движения и возвратно-поступательного движения. Ротор в первом случае расположен в подшипниках, во втором - скользит по направляющим. Можно обеспечить достаточно высокую надежность этих двигателей при указанных в литературе основных параметрах (для микродвигателя вращения с диаметром ротора 100 мкм): напряжение электропитания – 10 0В; скорость вращения ротора – 50000 об/мин; мощность –  $10^{-6}$  Вт. В ЭВПД трудно осуществить суммирование мощностей. Поэтому маловероятно, что они найдут применение в точной механике

широкого назначения. В технологии этих микродвигателей используются дорогостоящие операции: изготовление размеров деталей с точностью не ниже 0,1 мкм; глубокое прецизионное химическое травление и т.д.

**ПЭПД - пьезоэлектрические планарные двигатели** [6, 7]. Их конструкции подобны конструкциям классических пьезоэлектрических двигателей с керамическим элементом в виде консоли, один конец которой закреплен, а другой конец колеблется, совершая эллипсоидальное движение. В ПЭПД основной элемент изготавливается из пленочного конденсатора, в котором диэлектрическая пленка выполняется как из неорганических, так и из органических пьезоэлектриков, например из пленки ПВДФ (поливинилдевенилфторида). Изготовлены экспериментальные образцы ПЭПД в виде многослойных пленочных консолей. Такие двигатели могут быть использованы в микро- и электрооптике. Однако трудно найти способ эффективной передачи энергии движения консолей на подвижный ротор. Кроме того, эффективность электромеханического преобразования энергии в консолях ПЭПД низкая из-за малого значения коэффициента электромеханической связи в пленочных пьезоэлектриках.

**ЭТПД - электротепловые планарные двигатели** [8] – тонкопленочный аналог "биметаллических" устройств, используемых, например, в автоматах отключения электрических сетей. Подвижный элемент ЭТПД выполняется в виде трехслойной пленочной консоли из органических пленок с разными коэффициентами термического расширения, а средний слой – из металлической пленки (нагревательного элемента). Известны экспериментальные образцы ЭТПД в виде матриц многослойных пленоч-

ных электротепловых консолей. Основной практический интерес к этим микродвигателям связан с возможностью получения низких напряжений электропитания (ниже 10 В), но при значительных токах (5-50 мА). В то же время понятно, что энергетическая эффективность ЭТПД низкая (ниже 5%). В экспериментальных образцах ЭТПД электротепловые консоли передают движение на подвижную пластину-ротор благодаря тому, что касаются ее по плоскости под небольшим углом. Таким образом, передача энергии от статора (в виде матрицы электротепловых консолей, расположенной на неподвижной пластине) к пластине-ротору осуществляется достаточно неэффективно.

**ЭДПД – электростатические диэлектрические планарные двигатели** [9, 10]. В этих устройствах движение создается при электростатическом накате металлизированной органической пленки на поверхность металла или диэлектрика (слои  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) в зависимости от того, куда обращен слой металлизации. Основным элементом ЭДПД является пленочная петля (диаметр – несколько миллиметров) из металлизированной пленки полиэтилентерефталата. Характерная особенность ЭДПД – накопление объемного заряда в диэлектрике при каждом акте электростатического наката. Этот заряд формируется на глубоких энергетических центрах (ловушках), характерных для широкозонных некристаллических диэлектриков и препятствует повторному накату металлической пленки. Уменьшение влияния объемного заряда возможно за счет использования импульсов напряжения с более сложной формой – наполнения их более короткими импульсами с разной полярностью. Однако в этом случае значительно снижается энергетическая эффективность микродвигателя.

Ранее нами был разработан новый принцип электромеханического преобразования энергии, основанный на эффекте электростатического наката тонких металлических пленок (металлических лепестков) на поверхность сегнетоэлектрических пленок и были описаны микродвигатели, создаваемые методами технологии микроэлектроники и основанные на указанном принципе преобразования энергии [11, 12]. Отличие таких микродвигателей (электростатических сегнетоэлектрических планарных двигателей – ЭСПД) от электростатических микродвигателей с воздушным зазором между ротором и статором (он равен 1-3 мкм) связано с большим значением диэлектрической постоянной  $\epsilon$  сегнетоэлектрических пленок, что определяет возможность "накачки" в образец исключительно большой энергии (0,3-3 Дж/м<sup>2</sup> и более) при использовании низких рабочих напряжений.

Принципиальное отличие ЭСПД от ЭДПД (оба типа таких микроприборов можно назвать диэлектрическими микродвигателями) связано с уникальными свойствами сегнетоэлектриков:

- с большим значением диэлектрической постоянной  $\epsilon$ , которая превосходит значение  $\epsilon$  линейных диэлектриков на 2-3 порядка, что определяет возможность "накачки" в образец большой энергии и использования низких рабочих напряжений;
- с нелинейной зависимостью поляризации от напряженности электрического поля с выходом на участок насыщения, при этом коэрцитивные поля очень низкие – до  $(1-3) \cdot 10^4$  В/см;
- с существенно меньшей концентрацией центров захвата носителей заряда и меньшей их энергетической глубиной (следствие совершенной кристаллической структуры сегнетоэлектрика).

По сравнению с ЭДПД микро-

двигатели ЭСПД обладают еще и другими преимуществами: меньшими рабочими напряжениями, более высокой механической и электрической надежностью, простой системой управления, а также большей технологичностью.

Перечисленные выше свойства сегнетоэлектриков определяют более высокую эффективность электромеханического преобразования энергии при электростатическом накате, чем в ПЭПД при использовании обратного пьезоэлектрического эффекта. Электростатический накат металлических пленок (лепестков) дает возможность снизить межэлектродный зазор до минимальных значений, определяемых шероховатостью поверхностей металлической пленки и сегнетоэлектрика, на уровне  $30-100 \text{ \AA}$ . Перемещающийся по поверхности сегнетоэлектрика лепесток способен при изгибе передать движение подвижному внешнему объекту (пластине-ротору) и таким образом осуществить электромеханическое преобразование энергии. Скорость перемещения участка лепестка, накатывающегося на сегнетоэлектрик, определяется амплитудой напряжения, а накапливаемая энергия (преобразуемая в механическую энергию) - толщиной сегнетоэлектрической пленки и значением  $s$ . Оценки показывают, что давление в межэлектродном пространстве в момент касания двух поверхностей (начиная с расстояния между ними  $100 \text{ \AA}$  и менее) достигает значений  $10-15 \text{ МПа}$  и соответственно сила натяжения металлической пленки достигает значений  $300-500 \text{ Н}/\text{мм}^2$ .

### **Бесконтактный и контактный способы передачи энергии от статора к ротору в планарных двигателях**

Еще до появления планарных микродвигателей в электромеханике

были известны два способа передачи энергии от статора к ротору – контактный и бесконтактный.

В случае контактного способа передачи энергии от статора к ротору либо используются специальные элементы (фрикционная вставка в элемент пьезоэлектрического двигателя, ферромагнитная лента между статором и ротором в индуктивных волновых двигателях и т.д.), либо статор и ротор контактируют между собой за счет волновой деформации пьезоэлектрической керамики. В таких двигателях при использовании точных датчиков положения ротора достигается исключительно высокая точность его позиционирования. Вместе с тем в этих двигателях серьезной проблемой становится механическое изнашивание контактирующих элементов статора и ротора.

В ЭВПД используется бесконтактный, а в ПЭПД, ЭТПД, ЭДПД и ЭСПД - контактный способы передачи энергии. В первом случае ротор не касается поверхности статора, силовое сцепление ротора со статором осуществляется благодаря концентрации полей (электрического или магнитного) над зубцами ротора и статора. Преимущество обусловлено тем, что отсутствует изнашивание поверхностей ротора и статора. Основной недостаток - невысокая точность позиционирования (в шаговых двигателях), определяемая размерами зубцов ротора и статора. Высокой точности позиционирования можно достичь только при чрезвычайно малых размерах этих зубцов и при очень высокой точности их изготовления. Такое решение значительно усложняет технологию изготовления двигателя, существенно увеличивает его стоимость.

Известен контактный способ передачи энергии от статора к ротору с помощью электростатического наката. Простейшим примером такого на-

ката является перемещение металлического цилиндра под действием напряжения между ним и электродом, покрытым диэлектриком, в сторону электрода. Для того чтобы такое перемещение стало возможным при напряжениях не более  $200-250 \text{ В}$  (напряжение начала процесса разряда в газе), необходимо, чтобы расстояние между цилиндром и электродом было не более  $3 \text{ мкм}$ . Можно отметить, что по мере уменьшения этого расстояния сила притяжения между цилиндром и электродом увеличивается; она максимальна, когда указанное расстояние становится  $100 \text{ \AA}$  и меньше. Поскольку время действия этой силы очень мало и площадь контакта цилиндра с электродом в том месте, где напряженность поля максимальна, незначительна, то сила притяжения и, соответственно, работа наката также незначительны. Таким образом, электромеханическое преобразование энергии при движении металлического образца с фиксированной геометрической формой относительно электрода не является эффективным.

Большую протяженность взаимодействия двух проводящих плоскостей, сопровождающегося механическим перемещением одного из проводников, можно получить при накате проводящей жидкости по поверхности диэлектрика, отделяющего жидкость от электрода. Пример такого процесса – электроосмос. Однако возможность превращения такого наката в механическую работу ограничена – происходит только перемещение в пространстве массы тонкого слоя жидкости, поскольку в этом случае также отсутствует эффективный способ преобразования энергии.

Более эффективный способ имеет место при использовании гибких и тонких проводящих лент или металлических пленок (лепестков). Толщина этих пленок должна быть небольшой, такой, чтобы обеспечивался их

изгиб под действием электрического поля в момент электростатического наката на поверхность диэлектрика (сегнетоэлектрика). Тогда во время этого процесса площадь контакта лепестка с поверхностью диэлектрика возрастает, а небольшой зазор между двумя контактирующими поверхностями поддерживается в течение всего процесса наката. Перемещающаяся в пространстве металлическая пленка способна при изгибе передать движение внешнему объекту и таким образом осуществить электромеханическое преобразование энергии.

### Три стадии контактного способа передачи энергии от статора к ротору в диэлектрических микродвигателях

Движение ротора относительно поверхности статора складывается из нескольких стадий изменения состояния лепестка.

Перемещающийся под действием сил электростатики по поверхности сегнетоэлектрика лепесток способен при изгибе передать движение подвижному внешнему объекту (пластины-ротору) и таким образом осуществить электромеханическое преобразование энергии. Скорость перемещения участка лепестка, накатывающегося на сегнетоэлектрик, и накапливаемая энергия (преобразуемая в механическую энергию) определяются амплитудой напряжения, толщиной сегнетоэлектрической пленки  $d$  и значением  $\varepsilon$ .

Схематически принцип работы такого микродвигателя иллюстрирует рис. 1. Неподвижная пластина (статор) 1 представляет собой кремниевую подложку 7, на поверхность которой последовательно нанесен электрод 6, а затем сегнетоэлектрическая пленка 5. Подвижная пластина (ротор) 2, разделенная от статора зазором  $d$ , с синтезированными на ее по-

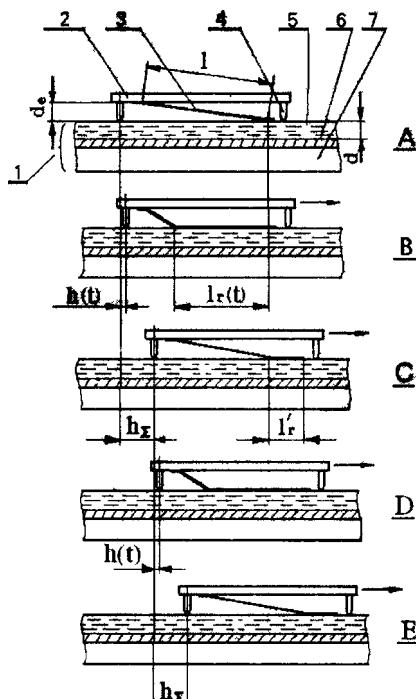


Рис.1

верхность металлическими лепестками 3 длиной  $l$  перемещается относительно статора по направляющим (по опорам) 4. При подаче импульса напряжения между лепестком 3, находящимся в исходном состоянии (A), и электродом 6 происходит электростатический накат части поверхности лепестка на поверхность сегнетоэлектрика (состояние B). Перемещающаяся в пространстве металлическая пленка изгибается, происходит ее натяжение и она передает движение пластине 2, осуществляя таким образом электромеханическое преобразование энергии. Длина наката  $l_r(t)$  возрастает во время действия импульса напряжения  $t_p$ , соответственно изменяется во времени и шаг  $h(t)$  перемещения ротора.

После прекращения действия импульса напряжения лепесток под действием упругих сил, возникающих при его изгибе, возвращается в исходное положение А (при одиночном импульсе напряжения) или переходит в новое положение С, харак-

терное для непрерывного движения ротора (при подаче на образец серии импульсов); при этом ротор продвигается по инерции на расстояние  $h_{\Sigma}$ . От длительности этого процесса (процесса отлипания лепестка от поверхности сегнетоэлектрика) зависит минимальный интервал времени между соседними импульсами напряжения, т.е. максимальная частота следования  $f$  этих импульсов и соответственно мощность, развиваемая микродвигателем. При подаче на образец второго импульса напряжения движущаяся пластина с лепестками делает еще один шаг и переходит в состояние Е. После окончания импульса происходит пролет ротора по инерции в состояние D (и изменение конфигурации лепестков, аналогичное позиции С). При поступлении третьего импульса и далее движение происходит аналогично: от позиции В к позиции С с соответствующим перемещением пластины 2.

Распластывание лепестка под действием электростатических сил начинается с момента касания поверхности лепестка и сегнетоэлектрика – процесса "захвата" лепестка, который определяет дальнейший характер "электронного при克莱ивания" лепестка к поверхности сегнетоэлектрика.

Процесс отлипания лепестка определяют силы, удерживающие концы лепестков у поверхности сегнетоэлектрика - адгезионные, гидродинамические, электростатические силы, связанные с остаточными электрическими зарядами в диэлектрике, точнее, с поверхностью неоднородностью распределения зарядов под площадью лепестка.

После прекращения действия импульса напряжения в распластанной части лепестков вблизи микронеровностей возникает противодействие упругих сил локально деформирован-

ных участков лепестков и трех указанных сил.

Как показывают исследования, роль адгезионных сил значительно меньше роли сил, связанных с остаточными электрическими зарядами. Площадь физического касания лепестков с диэлектриком много меньше видимой площади их касания, а адгезионные силы проявляют себя только при прямом контакте двух тел. Кроме того, не происходит абсолютно плотного касания двух поверхностей, воздушный зазор между ними составляет от 30 до 200  $\text{A}^\circ$  в зависимости от шероховатости поверхности диэлектрика.

Отметим, что три основные стадии работы контактных двигателей были характерны и для классических пьезоэлектрических двигателей (ПД). В ПД для осуществления функции "захват" используются внешние силы, прижимающие ротор к статору через контактный элемент. При небольшом числе контактных элементов (контактирующих участков поверхностей) на них концентрируется вся мощность ПД. Это приводит к быстрому изнашиванию контактных элементов и плохой воспроизводимости параметров двигателя. Конструкция ПД из-за использования внешних прижимных сил получается громоздкой. Но именно в ПД были получены лучшие значения точности позиционирования и глубины регулирования электрических емкостных двигателей.

### Электрическая надежность диэлектрических микродвигателей

В микроэлектронике обычно используется запас электрической прочности, при котором рабочая напряженность электрического поля не менее чем в 2 раза меньше напряжения пробоя диэлектрика. Нетрудно показать, что рабочие напряжения

диэлектрических микродвигателей не должны превышать 100 В. Такое ограничение соответствует также и особенностям их функционирования.

Анализ специфики работы рассматриваемых микродвигателей показывает, что для получения значения удельной работы  $a_R > 0,1 \text{ Дж}/\text{м}^2$  при напряжении источника питания  $U < 100 \text{ В}$  необходимо выполнение определенного соотношения между  $\varepsilon$  и  $d_i$ : для  $\varepsilon > 11$  параметр  $a_R$  имеет максимум при  $d_i / \varepsilon \approx 10^{-7} \text{ м}$ , и для заданного значения  $\varepsilon$  можно определить  $d_i^{onm}$  и напряженность электрического поля  $E^{onm}$ , а также  $a_R^{max}$ .

Недостатки диэлектрических микродвигателей с органическими пленками связаны не только с малыми значениями КПД, но и с малыми значениями  $\varepsilon$ . Поэтому в таких микродвигателях, например, при использовании полиэтилентерефта-латных пленок толщиной 3-4 мкм, удельная работа  $a_R$  имеет значение, большее 0,1 Дж/м<sup>2</sup> только при напряжениях питания  $U > 200 \text{ В}$ .

Оценки показывают, что работу  $a_R \approx 0,4 \text{ Дж}/\text{м}^2$  при напряжении  $U = 10 \div 30 \text{ В}$  можно получить в случае применения сегнетоэлектрических пленок с поляризацией насыщения, равной  $P_0 \approx 2 \cdot 10^{-2} \text{ Кл}/\text{м}^2$ , при этом начальное значение  $\varepsilon$  (при напряженности электрического поля равной нулю) должно быть порядка 1000 и выше.

Указанный выше критерий получения максимального значения  $a_R$  относится к диэлектрикам, которые не имеют пор, заполненных газом (воздухом). В случае газовых включений необходимо учитывать не только пробивные напряженности электрического поля, но и так называемые "частичные разряды", возникающие в заполненных газом порах и других газовых включениях. В диэлектрических микродвигателях в последний момент наката создается

искусственное газовое включение тех же геометрических масштабов - воздушный зазор-металл-диэлектрик. При напряжениях, превышающих напряжение порога начала частичных разрядов, в заполненных газом порах (полостях) происходит ионизация газа. В этих условиях наблюдается ускоренная деградация изоляции, она "стареет". Частичные разряды недопустимы в диэлектрических микродвигателях и в связи с накоплением в диэлектрике при таких разрядах больших электрических зарядов, снижающих эффективность наката. Поэтому рабочее напряжение должно быть существенно меньше напряжения начала частичных разрядов.

Можно определить запас по напряжению для диэлектрических микродвигателей, изготавливаемых на основе металлизированных лент из полиэтилентерефталата толщиной 3-4 мкм. При влажности 60% для этих диэлектриков напряжение начала частичных разрядов равно 280 В, а при влажности 20% - 300 В. Таким образом, в этом случае запас по напряжению практически отсутствует. Даже при таких высоких напряжениях работа электростатического наката ленточных микродвигателей мала: 0,075 Дж/м<sup>2</sup> при влажности 60% и 0,125 Дж/м<sup>2</sup> при влажности 20% .

Таким образом, при  $d_i = d_i^{opt}$  можно определить напряжение  $U$ , напряженность электрического поля  $E^{opt} = U / d_i^{opt}$  и работу электростатического наката  $a_R^{opt}$  для любых линейных диэлектриков при условии двойного запаса по электрической надежности.

В таблице представлены параметры  $\varepsilon$ ,  $U$ ,  $E_i^{opt}$ , и  $E_\varepsilon$  - напряженность электрического поля пробоя, характерные для различных диэлектриков.

Из таблицы можно сделать следующие выводы.

Неорганические оксиды дают удовлетворительные значения работы электростатического наката 0,30–0,44 Дж/м<sup>2</sup> при двойном запасе напряжения по частичным разрядам и запасе напряжения 3–15 по пробою; типичный сегнетоэлектрик BaTiO<sub>3</sub> имеет  $a_R^{onm} = 0,44$  Дж/м<sup>2</sup> при двойном запасе по частичным разрядам и запасе 7,8 по пробою; органические диэлектрики, такие как полиэтилентерефталат и полиимид, имеют  $a_R^{onm} = 0,27$  Дж/м<sup>2</sup> при двойном запасе напряжения по частичным разрядам, но практически не имеют запаса напряжения по пробою.

Исходя из критериев электрической надежности перспективными линейными диэлектриками для диэлектрических микродвигателей являются только диэлектрики с  $\epsilon > 11$  и с достаточно высокими значениями пробивной напряженности электрического поля, такие как Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ZrO<sub>2</sub>, а также сегнетоэлектрики, например титанат бария. Тонкие органические диэлектрики с малыми значениями  $\epsilon$  (полиэтилентерефталат, полиимид и т.д.) практически непригодны по надежности для применения в диэлектрических микродвигателях. Все сказанное касается только относительно высоковольтных диэлектрических микродвигателей ( $U \geq 100$  В). Для создания низковольтных диэлектри-

ческих микродвигателей необходимо обеспечить еще одно условие – зависимость поляризации от электрического поля диэлектриков должна быть нелинейной и иметь участок резкого насыщения поляризации.

### Механическая надежность диэлектрических микродвигателей

В диэлектрических микродвигателях с контактным способом электромеханического преобразования энергии механическая надежность контактного узла выступает на первый план. Для большинства практических задач (кроме устройств однократного применения) параметры надежности являются доминирующими по сравнению с другими характеристиками двигателя, например с его мощностью. Механическая надежность контактного узла диэлектрического двигателя определяется временем до наступления усталостного разрушения подвижных пленок, а также до такого истирания (изнашивания) поверхностей пленок и диэлектрика, при котором уже существенно изменяются основные параметры микродвигателя.

Механическая долговечность пленок при их циклической нагрузке зависит от величины этой нагрузки. Достаточно высокую долговечность при циклическом нагружении можно получить и при использовании

некоторых полимерных пленок, например, из полиэтилентерефталата, полиимида. Однако для указанных полимерных пленок напряжение предела усталости равно всего лишь 20 МПа. При рассмотрении возможностей микродвигателей ЭДПД и ЭТПД, использующих такие пленки, следует учитывать этот фактор. Кроме того, в указанных микродвигателях возникают и другие проблемы в связи с тем, что полимерные пленки подвергаются воздействию не только механических, но и электрических нагрузок, приводящих к ускоренному изнашиванию подвижных элементов. Особенно быстро в этом случае изнашиваются даже не сами полимерные пленки, а имеющиеся на них слои металлизации (Al) толщиной около 0,1 мкм.

Для ЭДПД и ЭСПД, у которых подвижные пленки в виде лепестков выполнены из металлов, характеристики надежности значительно выше. Усталостные свойства металлических пружин и пленок хорошо изучены. Возможно достижение достаточно большого времени до разрушения металлических пленок при их циклической нагрузке (исходя из требований их работы в течение 10–30 лет) при общепринятом условии, когда сумма напряжений изгиба и растяжения не превышает напряжения предела усталости. Предел усталости ряда металлических пленок равен

Таблица

Диэлектрик	$U_H$ , В	$\epsilon$	$E_i^{opt}$ , В/м	$E_e$ , В/м	$N$	$d_i^{opt}$	$a_R$ , Дж/м <sup>2</sup>
SiO <sub>2</sub>	82	4	$2 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^8$	4,0	0,4	0,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	90	6	$1,5 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^8$	4,7	0,6	0,36
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	100	25	$0,4 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	15	2,5	0,44
BaTiO <sub>3</sub>	100	230	$0,045 \cdot 10^8$	$0,35 \cdot 10^8$	7,8	22,5	0,44
Полтэтилентерефталат	78	3,2	$2,4 \cdot 10^8$	$(1-4) \cdot 10^8$	0,41-1,6	0,32	0,27

400-500 МПа. Поэтому конструкции контактных элементов электростатических диэлектрических планарных двигателей являются высокоэффективными в механическом отношении. В лепестковых двигателях интервалы времени, когда в них возникают максимальные растягивающие (основные) и изгибающие (вспомогательные) напряжения, разделены. При максимальной тяге практически действуют только одни растягивающие напряжения, а изгибающие напряжения начинают действовать только тогда, когда первые становятся минимальными.

### Математическое моделирование работы диэлектрических микродвигателей

Для анализа основных закономерностей функционирования лепестковых микродвигателей рассмотрим их математическую модель. Сегнетоэлектрик расположен на поверхности статора. При подаче на образец импульса напряжения с амплитудой  $V$  подвижная платформа совершает перемещение на один шаг  $H$  вследствие включения "электронного клея", электростатического наката лепестка, натяжения его и изгиба (рис.2). Начальная стадия движения – "захват" конца лепестка – происходит в первые моменты времени действия импульса напряжения, приложенного к лепестку и основанию.

Удельная работа электростатического наката  $a_R$ , (важнейшая характеристика микродвигателя) определяется как

$$a_R = k_0 C_0 V^2 / 2,$$

где  $C_0$  – удельная емкость;  $k_0$  – коэффициент, учитывающий неплотное прилегание лепестка к поверхности сегнетоэлектрика. Работа за время электростатического наката

$$A_R = a_R \cdot S_R,$$

где  $S_R = b l_r$  – площадь наката лепестка за время действия импульса напряжения,  $b$  – ширина лепестка,  $l_r$  – длина наката. Общая длина лепестка

$$L_0 = l_r + h + L,$$

где  $L$  – длина изогнутой части лепестка,  $h$  – расстояние ротор-статор.

Математическая модель двигателя основана на методе энергетического баланса. Баланс энергий двигателя имеет следующий вид:

$$A_R = \frac{M}{2} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 + \int_0^h F(x) dx + A_m,$$

где  $M$  – масса ротора,  $F$  – сила нагрузки двигателя (сила трения),  $A_m$  – механическая работа деформации лепестка.

Форма лепестка  $y(x)$  изогнутой части лепестка в первом приближении описывается кубической параболой с плавным касанием поверхности лепестка и сегнетоэлектрика:

$$y(x) = -\frac{3}{2} \cdot \left( \frac{d_e x}{L_0} \right) + 2 \cdot \left( \frac{d_e^3}{L_0^3} \right),$$

$$-L_0/2 \leq x \leq L_0/2, t < 0;$$

$$y(x) = -\frac{3}{2} \cdot \left( \frac{d_e x}{L} \right) + 2 \cdot \left( \frac{d_e^3}{L^3} \right),$$

$$-L/2 \leq x \leq L/2, 0 \leq t < t_0;$$

$$h = \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{L/2} \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 dx - \frac{1}{2} \int_{-L_0/2}^{L_0/2} \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 dx.$$

Сила нагрузки двигателя  $F$  равна силе трения скольжения, кроме того, учитывается и сила давления на направляющие, определяемая нормальной составляющей натяжения лепестка (второй член этого выражения):

$$F \approx k \left[ gM + \frac{3}{2} a_R b \cdot \frac{d_e}{h + 3d_e^2 / 5L_0} \right],$$

где  $k$  – коэффициент трения,  $g$  – ускорение силы тяжести.

На рис. 2 схематически показано последовательное изменение во времени формы лепестка и соответствующее изменение местоположения ротора.

При исследовании особенностей движения ротора определялись следующие параметры:  $t_{imp}$  – длительность импульса напряжения,  $h$  – шаг ротора за время  $t_{imp}$ ;  $v$  – скорость ротора в момент окончания импульса;  $F$  – сила тяги;  $T_{fl}$  – время свободного движения;  $W = k M g v_{to}$  – мгновенная мощность в момент окончания действия импульса;  $L_{rol}$  – длина электростатического наката за время  $t_{imp}$ ;  $A_{sum}(t)$  – электрическая энергия при накате;  $A_k$  – энергия сил трения (сил тяги);  $A_F(t)$  – энергия упругости лепестка;  $A_M(t) = 0.5 \cdot M v^2$  – кинетическая энергия ротора;  $M_r$  – максимальная масса ротора, которую может сдвинуть двигатель при выбранных параметрах двигателя и режимах его работы.

Поскольку при проведении численного анализа используются все основные параметры как лепестка ( $b$ ,  $L_0$ ,  $h$ ,  $E$  – модуль Юнга), так и кон-

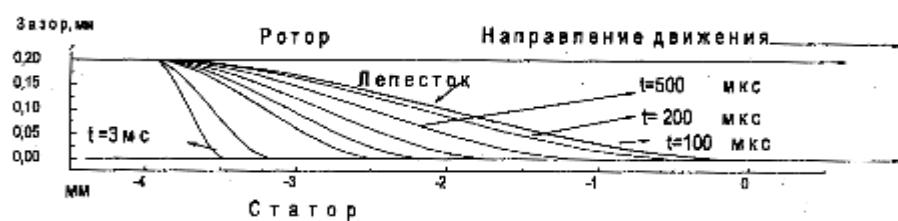


Рис. 2

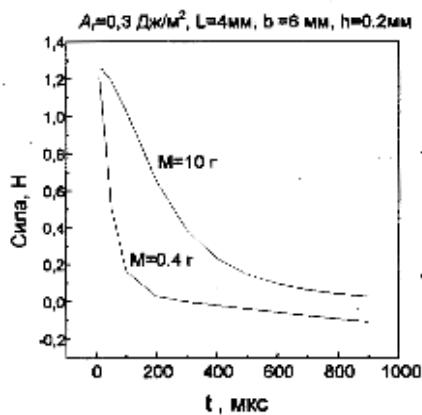


Рис. 3

структурки двигателя ( $D, k, M, \varepsilon, d$ ), а также параметры источника напряжения  $t_{imp}, V$ , то можно определять оптимальные параметры для конкретных конструкций двигателя и режимов его работы.

На рис. 3 представлена кривая, характеризующая типичное изменение силы тяги  $F$  двигателя во времени, для двух разных нагрузок (разных масс ротора  $M$ ). Здесь и далее используются следующие параметры лепестка:  $L = 4 \text{ мм}$ ,  $b = 1 \text{ мм}$ ,  $d_e = 0,2 \text{ мм}$ ,  $A_R = 0,3 \text{ Дж/м}^2$ , что соответствует удельной емкости наката в  $1000 \text{ пФ/мм}^2$  при напряжении  $24,5 \text{ В}$ , величина  $k$  выбиралась равной  $0,2$ . Можно отметить, что в реальном эксперименте при осуществлении электростатического наката металлического лепестка на поверхность сегнетоэлектрической пленки с толщиной  $1\text{-}2 \text{ мкм}$  величина  $k_0$  имела значение  $0,1\text{-}0,3$  в зависимости от качества этой пленки.

Из этого рисунка видно, что двигатель обладает высокой тяговой силой в первые моменты времени после начала действия напряжения. Эта сила в течение времени уменьшается, поскольку из-за движения ротора уменьшается натяжение лепестка. Видно, что чем больше нагрузка, тем более эффективно используется энергия электростатического наката. Из этого следует вывод, что для эф-

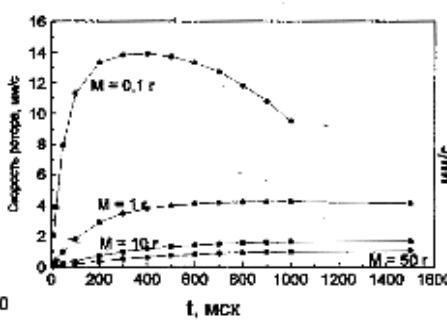


Рис. 4

фективного использования энергии, получаемой при накате,  $t_{imp}$  должна быть оптимальной и согласованной с нагрузкой.

Рис. 4 характеризует типичное изменение во времени скорости движения ротора для четырех значений нагрузки, при параметрах, указанных на рис. 3. С учетом сказанного относительно изменения тяговой силы с течением времени такое изменение скорости при малых нагрузках не является удивительным.

После выключения напряжения ротор продолжает двигаться по инерции и через некоторое время останавливается, как показано на рис. 5. Время до его остановки определяется силой трения и скоростью ротора в момент окончания импульса напряжения. Можно отметить, что для большинства практически интересных случаев путь, проходимый ротором по инерции, значительно больше расстояния, на котором происходит разгон ротора за время  $t_{imp}$ . Таким образом, мы практически имеем дело с электростатической "пушкой", которая выстреливает ротором за время  $t_{imp}$ . При этом ускорение, приобретаемое ротором и зависящее от его массы, может быть очень высоким и достигать несколько десятков  $g$ , в пределе – до  $10000 \text{ g}$  (когда масса ротора равна массе лепестка и без учета сопротивления воздушной подушки).

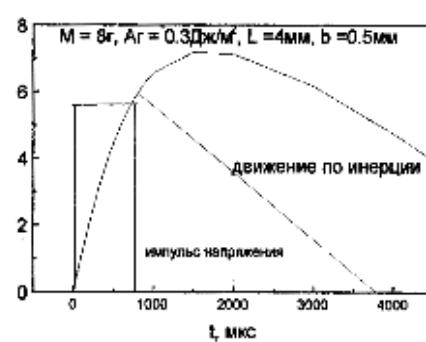


Рис. 5

Преобразование энергии электростатического наката во время движения ротора в различные формы энергии – кинетического движения, сил трения и энергию упругого изгиба лепестка – для двух различных нагрузок (10 и 0,1 г соответственно) характеризуют рис. 6 а и 6 б.

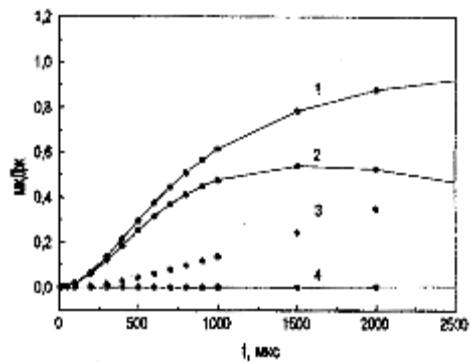


Рис. 6 а

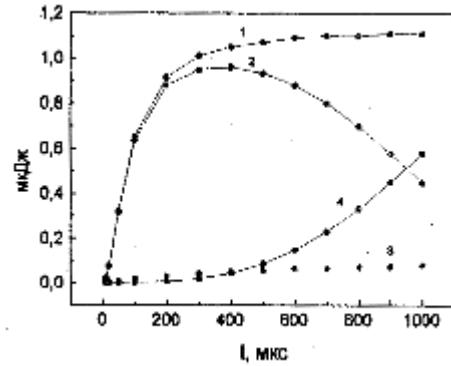


Рис. 6 б

Здесь кривая 1 описывает изменение общего энергопотребления образца в процессе электростатического наката из внешней цепи, кривая 2 характеризует долю этой энергии, расходуемую на приобретение ротором с массой  $M$  кинетической энергии  $Mv^2/2$ , кривая 3 - энергии, затрачиваемой во время одного цикла на преодоление трения (это фактически полезная работа - на внешнюю нагрузку), кривая 4 - работа изгиба лепестков (работа против сил упругости). Как видно, с ростом  $t_{imp}$  происходит перераспределение различных форм энергий во времени, характер этого перераспределения зависит от параметров и режимов работы микродвигателя. Можно отметить, что при изменении совокупности параметров микродвигателя изменяется и характер перераспределения указанных энергий, и возможно выбрать такие параметры, при которых большая часть электрической энергии преобразуется в механическую энергию - в движение ротора с коэффициентом преобразования энергии 80-90%.

Рис. 7 описывает изменение шага во время разгона при различных нагрузках без учета движения по инерции (здесь  $A_R = 0,3 \text{ Дж/м}^2$ ).

Рис. 8 характеризует специфику отдачи мощности микродвигателя на внешнюю нагрузку, под которой понимается движение массы ротора  $M$

со скоростью  $v$  с преодолением сил трения, с коэффициентом трения  $k$ . Как видно, увеличивая силу трения, можно увеличить полезную мощность двигателя.

### Экспериментальные результаты по исследованию электростатического наката на поверхность пленки сегнетоэлектрика

Ниже приведены некоторые экспериментальные данные, подтверждающие корректность использования указанной модели микродвигателя и характеризующие некоторые свойства рассматриваемых планарных микродвигателей.

Для исследования основных принципов электростатического наката металлических лепестков на поверхность сегнетоэлектрика были созданы экспериментальные образцы многолепестковых микродвигателей. В качестве материала сегнетоэлектрика использовались пленки ниобат бария стронция  $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$  с диэлектрической проницаемостью 1500-3000. Толщина пленок составляла 1-2 мкм. Они синтезировалась методом ВЧ-распыления на поверхность кремниевой подложки, на которую предварительно наносился электрод  $(\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2)$  [14-17]. Сопротивление электрода составляло 10-200 Ом. В каждой из двух групп было по 10 лепестков, длина каждого ле-

пестка 4 мм, ширина 0,5 мм. Наличие двух групп лепестков обеспечивало реверсивное движение ротора.

Рис. 9 характеризует изменение среднего шага ротора массой 0,5 г в пошаговом режиме в непрерывном движении при изменении амплитуды импульсов напряжения и периоде следования  $T = 3 \text{ мс}$ .

Рис. 10 иллюстрирует необходимость оптимизации нагрузки микродвигателя при заданных значениях  $t_{imp}$  и  $V$  для обеспечения максимальной его мощности.

При фиксированной нагрузке существует оптимальная длительность импульса, при которой двигатель имеет наибольшую мощность. Указанное на рис.10 значение мощности (при  $V = 100 \text{ В}$ ) в пошаговом режиме движения определялось по формуле  $P = kMgv$ , где  $v$  - скорость непрерывного движения ротора. Поскольку в непрерывном пошаговом движении не учитывался разгон и последующее торможение ротора, то можно полагать, что в данном случае мощность, развиваемая при накате, значительно больше.

В процессе эксперимента измерялись масса ротора  $M$ , длительность импульса напряжения  $t_{imp}$ , коэффициент трения  $k$ , амплитуда импульса  $V$ , полный пролет ротора  $H$ . Наблюдалось движение ротора при напряжениях 30 В и менее (см. рис.9).

В движении ротора можно выде-

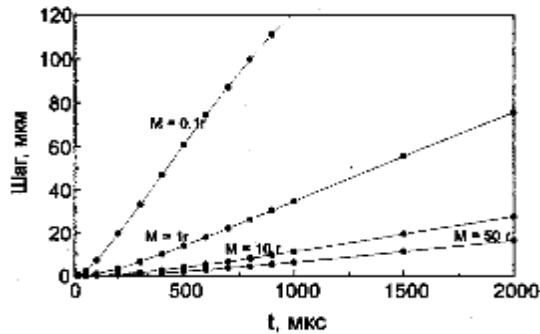


Рис. 7

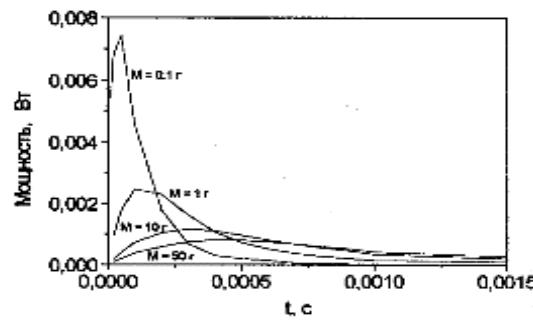


Рис.8

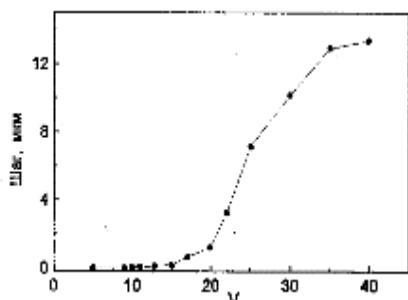


Рис. 9

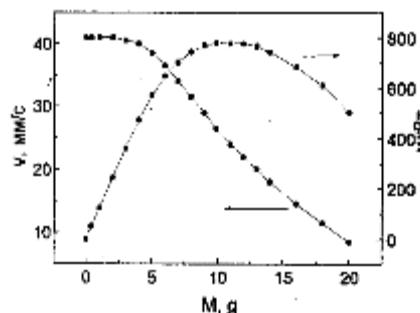


Рис. 10

лиять две стадии. На первой из них ротор набирает ускорение под влиянием электростатических сил при накате во время действия импульса напряжения. На второй стадии после снятия напряжения происходит движение ротора по инерции и последующая его остановка из-за действия сил трения. Если на образец подается серия импульсов, то движение ротора становится непрерывным.

\*\*\*

В данной работе рассмотрен принцип работы нового электростатического микродвигателя, отличающегося исключительно высокой энергоемкостью, его конструкция и характеристики. Математическое моделирование основных закономерностей движения ротора микродвигателя за счет электромеханического преобразования энергии при электростатическом накате металлических пленок на поверхность сегнетоэлектрика по-

казало возможность достижения высокой эффективности такого преобразования энергии – до 80-90%

Экспериментальные результаты данной работы свидетельствуют о возможности создания методами технологии микроэлектроники шаговых энергоемких реверсивных микродвигателей и подтверждают основные закономерности в кинетике преобразования энергии, полученные в модельных представлениях. Применение технологии микроэлектроники в механике позволит резко снизить стоимость двигателей, увеличить их прецизионность, перейти к идее их массовой "штамповки". Напряжение электропитания таких двигателей соизмеримо с напряжениями устройств микроэлектроники и можно говорить о создании микромеханических микросхем. Отметим, что при изготовлении групп металлических лепестков не потребуется субмикронная технология – достаточно использования аппаратуры с 1-2 мкм проектными нормами.

#### Список литературы

- 1 Esashi M. Packaged Sensors, Microactuators and Three-Dimensional Micro-fabrication // J of Robotics and Mechatronics, 1995 V.7 № 3. P 200-203.
- 2 Fedder G.K., Chang J.C., Home R.T. Termal Assembly of Polysilicon Microstructures With Narrow - Ga pElectrostatic Comb Drive // Technical Digest of the IEEE Sohd-State Sensor and Actuator Workshop Hilton Head Island, SC, June 1992 .P. 63-68.
- 3 Grettillat M.A., Thiebaut P., Under C. and Rool N.F. Integrated circuit compatible electrostatic polysilicon microrelays // J Micromech Microeng , V.5 (1965). P. 156-160.
- 4 Yao J.J. and MacDonal J.J. A rmcromachined, single-crystal silicon, tunable resonator // J Micromech Microeng V.6 (1996). P. 257-264.
- 5 Polla J.J. Microelectromechanical Systems Based on Ferroelectric Thin Films // Microelectnmc Engineering, 29, 1995. P. 51-58
- 6 Matoda J.J., Ishikawa, Kim J.J. and Muller J.J. A Bistable Snapping Microactuator // Proc IEEE Micro Electro Mechanical Sys-tems Workshop, 1994. P. 45-50.
- 7 Teegarden D., Lorenz G. and NeuL R. How to model and simulate microgyroscope systems // IEEE Spectrum July 1998. P. 66 – 75.
- 8 Wakabayashi S., Sakata M., Goto H., Takeuchi M. and Yada T. Static Characteristics of Piezoelectric Thin Film Budding Actuator Jpn // J Appl Phys V.35. 1996. P. 5012-5014.
- 9 Jenkins D.F.L., Cunningham M.J. and Clegg W.W. The use of composite piezoelectric thick films for actuation and control of miniature cantilevers // Microelectnmc Engineering , 29, 1995. P. 71-74.
- 10 YangY-J., Bm C-J., Matoba H. and Muller R.S. Thermal Anahsis of a Bistable Microactuator // ASME, Symposium on Micro-Mrchanical Systems, Dynamic System and Control, 1994. V.2 .P.687-693.
- 11 Dyatlov V.L., Konyashkin V.V., Potapov B.S., Pyankov Yu.A. Planar electrostatic micromotors // Electnchestvo 1996, № 1. P. 8-18.
- 12 Dyatlov V.L., Konyashkin V.V., Potapov B.S. and Fadeev S.I. Plyonochnaya electromekhamca (Nauka Sib Branch, Novosibirsk, 1991. 248 p.
- 13 Kostsov E.G. and Dyatlov V.L. Electrostatic Microactuton on the Basis of Ferroelecnc Films // Journal of the Korean Physical Society, 1998. V.32. P. S1755-S1756.
- 14 Dyatlov V.L. and Kostsov E.G. Electromechanical energy converters of micromechanic devices on the basis of ferroelectric films // Nuclear Inst and Methods in Physics Research, A 405, 1998. P. 511-513.
- 15 Dyatlov V.L. and Kostsov E.G. Planar electrostatic micromotor on the basis of the ferroelectric films, Ferroelectrics // 1999 (в печати).
- 16 Antsigin V.D., Egorov V.M., Kostsov E.G., Sterelychina L. N. Ferroelectrics properties of thin strontium barium niobate films // Ferroelectrics, 1985 V.63. P. 235-242.
- 17 Kostsov E.G., Malinovskii V.K. Large-scale use of ferroelectricity in microelectronics is reality // Ferroelectrics, 1989 V.94. P. 457-462/
- 18 Baginsky I.L. and Kostsov E.G. Information writing mechanisms in thin-films MFIS-structures // Ferroelectrics, 1993. V.143. P. 239-250.
- 19 Kostsov E.G. Ferroelectric films-Peculiarities their application in construction of new generation memory devices // Ferroelectrics, 1995. V.167. P. 169-176.

**И.А. Каляев**, д-р техн. наук проф., **В.Н. Котов**, канд. техн. наук, **В.Г. Кливдухов**, **А.П. Кухаренко**, канд. техн. наук доц., НИИ многопроцессорных вычислительных систем Таганрогского государственного радиотехнического университета.

## МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ: ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ

*Представлены результаты разработок Технологического центра микросистемотехники НИИ МВС ТРТУ в области построения микроэлектронных сенсорных систем для решения ряда конкретных народнохозяйственных задач. Приведены примеры их практического применения. Показаны основные технические характеристики полученных разработок и возможности Технологического центра НИИ МВС ТРТУ по созданию микроэлектронных систем.*

В последние годы особую актуальность приобрели разработки в области создания микроэлектронных мультисенсорных устройств различного назначения. В основу этого направления положены принципы построения преобразователей различных физических величин в электрические сигналы, а также новые принципы извлечения полезной информации из этих сигналов, базирующиеся на совместной интеллектуальной обработке всей совокупности сигналов, поступающих от мультисенсорной системы.

Создание таких систем должно, на наш взгляд, рассматриваться в качестве третьей промышленной революции вслед за первыми двумя – машинно-энергетической и информационно-компьютерной. Потребность в таких устройствах стремительно растет в связи с быстрым развитием автоматизированных систем контроля и управления, внедрением новых технологических процессов, переходом к гибким автоматизированным производствам. С ростом автоматизации производств к сенсорам таких систем предъявляются все более высокие требования. Помимо высоких метрологических характеристик сенсоры должны обладать высокой надежностью,

долговечностью, стабильностью, малыми габаритами, массой и энергопотреблением, совместимостью с микроэлектронными устройствами обработки информации при низкой трудоемкости изготовления и небольшой стоимости.

При разработке микроэлектронных сенсорных систем, как правило, на передний план выдвигаются новые технологии и варианты конструктивных решений.

Наиболее бурно развивающимся в последние годы направлением построения датчиковой аппаратуры является микромеханика. Микромеханический полупроводниковый чувствительный элемент мембранныго или балочного типа, изображенный на рис. 1, не имеет подвижных или трущихся частей. Размеры его, как правило, не более 10 x 10 x 0,4 мм и масса не более 0,1 г. Возможность группового производства с применением процессов фотолитографии и прецизионного травления, разработки и создания элементов с наперед заданными электромеханическими параметрами (омическим сопротивлением, чувствительностью, вибропрочностью, уда-ростойкостью и собственной резонансной частотой) создает реальные предпосылки для построения контрольно-измерительной техники практически для любого диапазона измеряемых величин с требуемыми и воспроизводимыми параметрами.

На экспериментально-производственных площадях Технологического центра микросистемотехники НИИ многопроцессорных вычислительных систем Таганрогского государственного радиотехнического университета (МВС ТРТУ) сосредоточено технологическое оборудование для разработки и производства кремниевых интег-

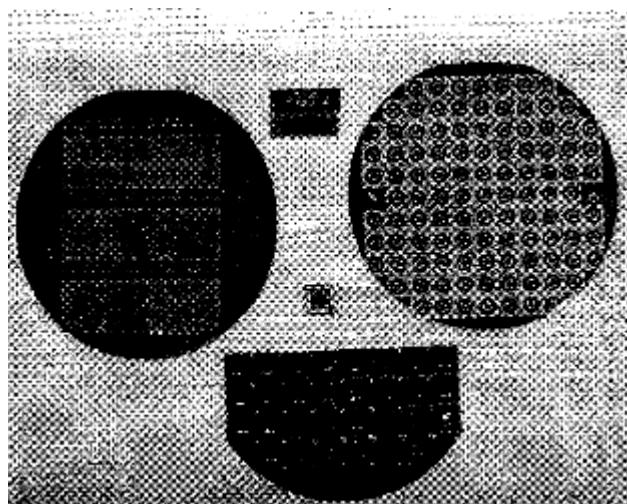


Рис. 1

**Основные параметры некоторых конструктивов коммутационных плат и микросборок**

Основные технические параметры	Материал коммутационной платы		
	сигалл	поликор	кремний
Поле коммутации	48x60 мм	48x60 мм	80x80 мм
Количество уровней коммутации	1...3	1...3	1...3
Минимальные размеры коммутационных линий	100 мкм	50 мкм	100 мкм
Минимальные размеры коммутационных 1ГЮЩЗДОК	200x200 мкм	200x200 мкм	70x70 мкм
Материал межслойной изоляции	Фоторезистполиамид $\text{SiO}_2$	Фоторезистполиамид ; $\text{SiO}_2$	Фоторезистполиамид $\text{SiO}_2$
Материал для разводки коммутации	Al-V-Cu	Al-V-Cu	Al; Al-V-Cu
Технология	Тонко-пленочная	Тонко-пленочная	Тонко-пленочная
Диапазон рабочих температур	-20...+50 °C	-30...+50 °C	-40...+80°C
Диапазон рабочих частот	0...1 МГц	0...30 МГц	0... 10 МГц
Количество внешних вызовов	до 69	до 69	до 85

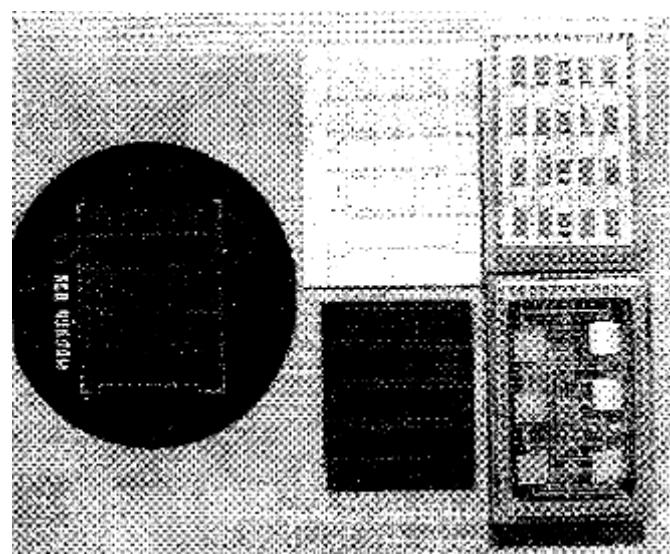


Рис.2

росхем, микросборок и других микроэлектронных структур и устройств различного функционального назначения. Одним из основных направлений деятельности в последнее время является разработка и изготовление микроэлектронных сенсорных элементов и построение на их основе контрольно-измерительной аппаратуры и мультисенсорных диагностических систем.

Разработанная и освоенная технология микропрофилирования монокристаллического кремния, совмещенная с технологией производства интегральных микросхем, дает широкие возможности для построения интегрированных на одном или нескольких полупроводниковых кристаллах многофункциональных устройств с применением также элементов микрооптики и интегральной оптики. Такие системы, имеющие унифицированные выходные сигналы, могут быть сопряжены с вычислительной техникой для сбора, обработки и накопления информации. Для полевых условий эксплуатации эти системы могут разрабатываться и изготавливаться в виде автономных устройств с передачей результатов измерений в центры сбофаиформациейрадиокоммуникациями и соответственно уменьшения собственных массогабаритных характеристик является создание функционально-законченных измерительных устройств в виде микросборок, изготовленных на основе многоуровневых кремниевых или других коммутационных плат.

Основные параметры некоторых конструктивов коммутационных плат и микросборок представлены в табл. 1.

Образцы некоторых конструктивов коммутационных плат и микросборок представлены на рис. 2.

В результате проведенных совместных работ с ОАО ТАНТК им Г М Бериева для самолетов-амфибий Бе-200 и Бе-103 были разработаны и изготовлены в требуемых количествах полупроводниковые датчики контроля давления на днище гидросамолета при посадке его на воду. Созданные серии датчиков ТДД-10И, ТДД-15И, ТДД-15И-Г полностью адаптированы к бортовой системе магнитной записи и условиям эксплуатации. Выполнена также техническая проработка изготовления трехкомпонентных датчиков перегрузок и вибраций в диапазоне (-2... +10) г на рабочие частоты до 2000 Гц с размерами 30 x 20 x 15 мм, массой 30 г и нормализованным выходным электрическим сигналом,

К настоящему времени имеется обширный материал по результатам экспериментальных проработок по заказам предприятий нефтехимического, энергетического и автомобилестроительного комплексов по созданию датчиков абсолютного, относительного, дифференциального давления и вакуумметров на малые диапазоны измеря-

мых величин для жидких и газообразных сред, в том числе и агрессивных, а также малогабаритных прецизионных полупроводниковых датчиков температуры. Такие устройства позволяют проводить измерения давлений до 0,1 Па и менее. Типовой датчик температуры, выполненный на основе кремниевого кристалла размером 1,5 x 1,5 мм, имеет диапазон измерения -55 +150 °C и чувствительность порядка 5 мВ/°C, что в 100 раз превышает чувствительность лучших термопар для указанного диапазона измерений.

Технические характеристики различных конструкций датчиков на основе полупроводниковых сенсорных элементов представлены в табл. 2.

Различные варианты конструкций датчиков на основе полупроводниковых сенсорных элементов представлены на рис. 3 и 4.

Коллективом Технологического центра разработана и освоена система бесконтактного контроля физических параметров подвижных узлов деталей и механизмов, которая уже несколько лет эксплуатируется на действующих производствах ряда предприятий нефтехимического комплекса для контроля режимов работы турбинных и компрессорных агрегатов.

Система состоит из комплекта первичных преобразователей, выполненных в виде индуктивных элементов (датчиков), изготовленных по планарной микроэлектронной технологии, или в объемном исполнении, и вторичных преобразователей – усилителей.

Данная система может быть как автономным устрой-

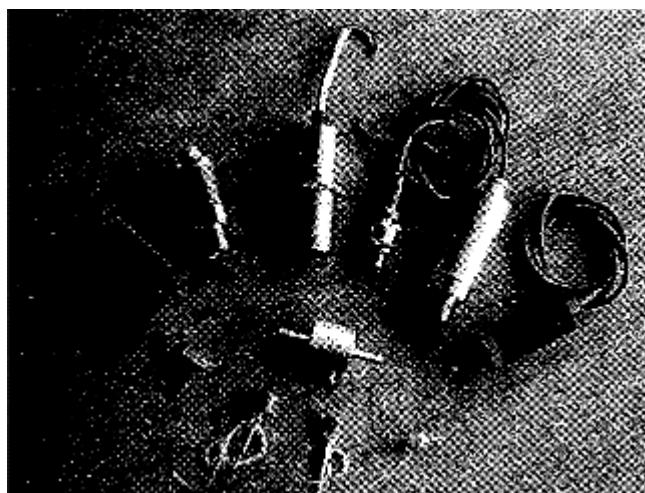


Рис.3

ством, так и входной частью измерительного комплекса, позволяющего контролировать относительную вибрацию, осевое смещение, угол поворота, линейные перемещения и размеры, частоту вращения деталей и узлов механизмов, крутящий момент, усилие и т.д. Преобразователь осуществляет пропорциональное преобразование зазора между торцом индуктивного элемента и деталью в линейно изменяющееся напряжение. Материалом измеряемой детали может являться практически любой металл сталь, титан, алюминий, медь и т.д.

Таблица 2

#### Основные технические характеристики конструкций датчиков на основе полупроводниковых сенсорных элементов

Основные технические параметры	Интегральный преобразователь давления ИПД-10-2	Интегральный преобразователь давления ТДД-15И	Реле давления газовое РДГ-150 / 10	Интегральный преобразователь давления ИЛУ 5 01	Полупроводниковый датчик температуры
Диапазон измеряемых величин	0...10 <sup>4</sup> Па	0...1,5·10 <sup>4</sup> Па	100...1500 Па	-5...0...+5g	-50 +200°C
Диапазон рабочих температур	-40...+80 °C	-60...+60 °C	-10...+40 °C	-10...+50 °C	-50...+150°C
Основная погрешность	2%	2%	-	-	-
Напряжение питания	+24 В	+12 В	+5 В±5%	+5 В±0,1 В	-
Выходной сигнал	0÷5 мА	0÷5 мА	-	-	-
Коэффициент преобразования	-	-	-	1,2 мВ/(В·г)	1,4 Ом / °C
Гистерезис порога срабатывания	-	-	±50 Па	-	-
Сила потребляемого тока	-	-	≤ 50 мА	-	≤ 10 мА
Допустимая перегрузка по давлению	-	-	Не более 30% от верхнего предела	-	~
Габаритные размеры	Ø 30x120 мм	Ø 27x35 мм	Ø 60x70 мм	30x20x5 мм	1,5x1,5x 0,4x мм
Масса	100 г	50 г	200 г	14 г	0,02 г

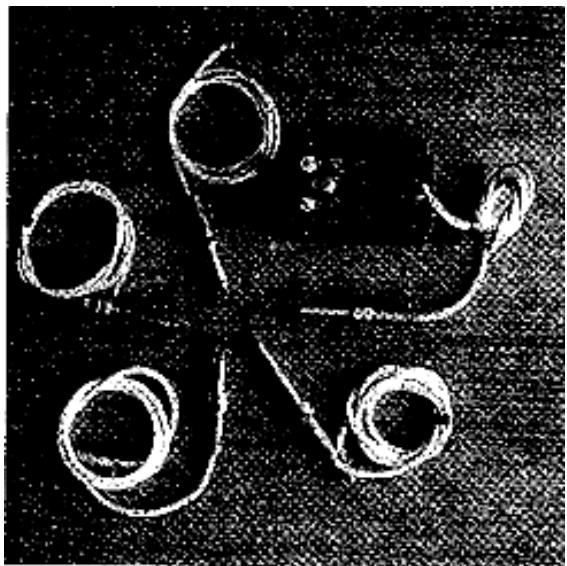


Рис. 4

Диапазон измеряемых зазоров при диаметре индуктивного элемента 5 мм составляет от 0,25 до 1,50 мм, при дальнейшем увеличении диаметра индуктивного элемента измеряемый зазор также может быть увеличен. Порог чувствительности такой системы не хуже 0,5 мкм. Внешний вид фрагмента системы представлен на рис. 5.

В последнее время в связи с бурным развитием технических средств связи, сбора и обработки информации, особенно в условиях образования непрерывных многоканальных информационных потоков, существует серьезная проблема дальнейшего увеличения быстродействия обрабатывающих информационных систем, помехоустойчивости информационных каналов и их защиты от случайного или несанкционированного доступа. Оптоэлектроника в данном случае является одним из эффективных и универсальных средств дальнейшего раз-

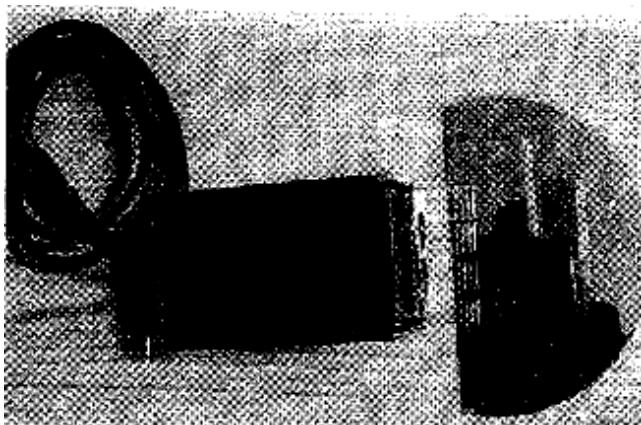


Рис. 5

вития информационно-вычислительных, управляющих и сенсорных систем с высокой степенью селективности и защищенности. Приборы оптоэлектроники характеризуются исключительной функциональной широтой, они успешно используются во всех звеньях информационной системы для генерации, преобразования, передачи, хранения и отображения информации.

В связи с этим одним из основных направлений деятельности Технологического центра в последнее время является разработка и построение электронно-оптических устройств на основе элементов микрооптики и интегральной оптики. Так, например:

- разработана технология изготовления сферических и цилиндрических микролинз и микролинзовых матриц на стекле и кварце;
- получены элементы спайсовых соединений и разъемов – сепараторов для оптических волокон на основе микропрофилированных кремниевых структур;
- выполнена разработка и организовано мелкосерийное производство фотосчитывающих устройств типа ФСУ-03 для тарировки параметров электрических счетчиков;
- планируется разработка и освоение интегральных оптоэлектронных и электронно-оптических устройств преобразования сигнала для линий связи и внутренней коммутации блоков вычислительных систем.

Еще одним перспективным направлением деятельности Технологического центра фундаментального характера является синтез новых материалов и структур, исследование их свойств и построение сенсорных и микромеханических систем с более широкими функциональными возможностями применительно для информационных и робототехнических комплексов, в частности, построение элементов высокотемпературной сенсорики на основе широкозонных материалов, таких как SiC, AlN и др.

Существующий научно-практический задел разработчиков НИИ МВС ТРТУ в области построения информационно-вычислительных, управляющих систем и робототехнических комплексов и возможности Технологического центра в области синтеза многофункциональной датчиковой аппаратуры, устройств сопряжения и других периферийных систем создают реальные возможности для комплексного подхода в решении сложных задач. Такие информационно-управляющие системы, сопряженные, например, посредством мультиплексных каналов с периферийной контрольно-измерительной аппаратурой, позволяют создавать функционально-законченные бортовые и наземные комплексы с новыми, более высокими эксплуатационно-техническими характеристиками.

**А.И. Погалов, д-р техн. наук проф., В.П. Тимошенков, канд. техн. наук доц., С.П. Тимошенков, канд. техн. наук доц., Ю.А. Чаплыгин, д-р техн. наук проф.,** Московский государственный институт электронной техники, г. Зеленоград

## РАЗРАБОТКА МИКРОГИРОСКОПОВ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР КРЕМНИЯ И СТЕКЛА

*Рассматривается интегральный микрогироскоп колебательного типа. Предложена конструкция, реализуемая на основе многослойных структур, позволяющая методами интегральной технологии создать устройство, обладающее высокими точностными характеристиками. Составлена и проанализирована эквивалентная схема паразитных элементов микрогироскопа. Представлена методика определения модуля упругости и параметров напряженно-деформированного состояния многослойных структур, предложен способ определения рационального соотношения между параметрами слоев.*

Микромеханические системы, изготовленные с использованием достижений полупроводниковой технологии, имеют большие перспективы для различных областей применения и существенные резервы в снижении издержек на их производство. Возможности прецизионной обработки материалов, групповая технология формирования приборов, совмещение (или близкое взаимное расположение) механической и электрических частей прибора, а также разнообразие технологических процессов являются неоспоримыми достоинствами использования достижений микроэлектроники при изготовлении микроэлектромеханических элементов и систем.

Существует огромное число различных вариантов организации механических систем, опирающихся на известные (ранее широко применяемые) и новые решения, учитывающие специфику используемых материалов и процессов. Одним из интереснейших направлений разработки

микроэлектромеханических систем (МЭМС) являются микродвигатели и микроколебательные системы - акселерометры и гироскопы. Кремний, как самый популярный полупроводниковый материал, имеет массу достоинств и неоспоримые преимущества перед многими другими материалами, используемыми для изготовления на их основе микромеханических устройств.

Микроколебательные системы, основанные на гироскопическом эффекте, имеют широкие перспективы применения в системах ориентации в пространстве [1]. К достоинствам микрогироскопов колебательного типа (МГКТ) можно отнести следующее:

- возможность микроминиатюризации; методы ин-

тегральной технологии позволяют изготавливать микро-механическую колебательную систему гироскопа с габаритными размерами 5-10 мм (и менее) при точности изготовления 1-2 мкм;

- возможность совместного изготавления микромеханической части гироскопа и электронной схемы обработки сигналов в едином технологическом цикле;

- приемлемую точность определения угловых скоростей и ускорений; оценки показывают [2], что случайная составляющая собственного ухода МГКТ может составлять до 1 угл. град/ч. Максимальная измеряемая угловая скорость 200 угл. град/с при погрешности измерения 0,05%.

Существует значительное число конструкций МГКТ. Все они содержат несколько подвижных механических систем, которые могут колебаться во взаимно перпендикулярных плоскостях. Колебания в одной плоскости являются вынужденными. Наведенные колебания в другой плоскости появляются тогда, когда микрогироскоп поворачивается.

Структурная схема МГКТ представлена на рис. 1. Она содержит внутреннюю колебательную систему (ВКС) 1 и внешнюю рамку (ВР) 2. Между собой ВКС и ВР соединены с помощью упругих торсионов 3. Внешняя рамка соединена с неподвижным основанием посредством

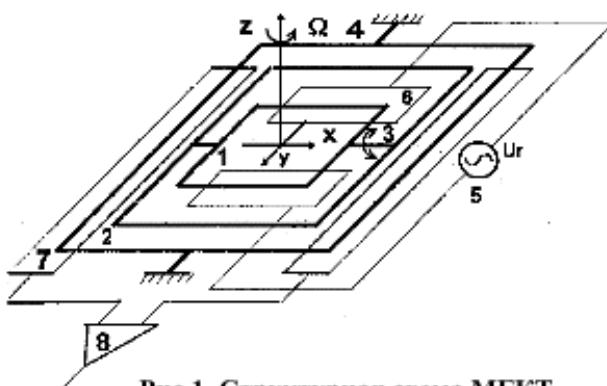


Рис.1. Структурная схема МГКТ

аналогичных упругих торсионов 4. Внешняя рамка и внутренняя колебательная система электрически соединены между собой и подключены к нулевой шине. ВКС может совершать вынужденные колебания относительно оси X под действием генератора гармонических колебаний 5 и системы обкладок 6, которые совместно с ВКС образуют плоский конденсатор. В случае вращения системы вокруг оси Z внешняя рамка будет совершать колебания относительно оси Y, амплитуда которых является функцией угловой скорости О и частоты колебаний ВКС. Информация об угловой скорости снимается с помощью системы обкладок 7 (образующих с внешней рамкой плоский конденсатор) и устройства обработки информации 8.

Анализ предложенной структурной схемы показывает, что она технологически реализуема, однако при изготовлении устройства проблемными вопросами являются следующие:

- способ создания микрообъема, получение полированных поверхностей вытравливаемых элементов, форма поперечного сечения торсионов, обеспечивающих упругие колебания, и получение необходимых размеров элементов;
- способ возбуждения вынужденных колебаний;
- способ снятия сигнала, являющийся функцией угловой скорости.
- обеспечение одинаковой собственной частоты колебаний во взаимно перпендикулярных плоскостях;
- групповая сборка элементов конструкции микрогироскопа.

Способ создания элементов устройства (механических и электронных плат колебательной системы, рамок и торсионов, обеспечивающих упругие колебания) определяется технологией изготовления. Получение высокого рельефа при травлении достигается благодаря использова-

нию химического анизотропного или плазмохимического травления.

Сочетание различных методов травления позволяет формировать торсионы, имеющие в сечении треугольную, трапециевидную, х-образную и прямоугольную формы, а также может обеспечить получение гладкой (полированной) поверхности вытравливаемых элементов, что является необходимым, поскольку сказывается на добротности колебательной системы.

Проведенные расчеты для торсионов различной формы показали, что модуль кручения для торсиона треугольной формы имеет максимальное значение. Использование трапециoidalного и прямоугольного сечения уменьшает модуль кручения на 6,7% и 13,3% соответственно. Наименьшее значение модуля кручения имеет торсион круглой формы. В расчетах использованы значения параметров торсионов, изготовленных из кремния длиной  $l=50$  мкм, высотой  $d=50$  мкм, модуль сдвига составил  $G=55$  ГПа.

Следует отметить, что при химическом травлении технологически наиболее легко реализовать торсионы трапециoidalной и треугольной формы, что связано с кристаллографической ориентацией плоскостей подложки кремния. Получить идеально круглое сечение торсиона очень сложно, однако использование изотропных травителей позволяет достичь округления острых углов при неизбежном растрыве других участков поверхностей. Изготовление торсионов с вертикальными стенками (прямоугольной формой в разрезе) требует применения специальных методов, например, реактивно-ионное травление.

Для возбуждения колебаний и снятия информации об угловой скорости целесообразно использовать конденсаторы типа металл-диэлектрик-полупроводник. При этом все подвижные части микроколебательной

системы необходимо подключить к нулевой шине. Это означает, что материал колебательных систем должен быть проводящим. Как видно из рис. 1, подключение к нулевой шине внутренней колебательной системы и внешней рамки обеспечивается через торсионы.

Недостатком такого способа возбуждения колебаний и снятия полезной информации является необходимость в прецизионном изготовлении зазора в МДП конденсаторах. В большинстве случаев это достигается методами прецизионного травления и посадки изготовленных микроколебательных систем в специальные посадочные места.

Обеспечение одинаковой собственной частоты колебаний внутренней системы и внешней рамки необходимо для эффективной работы МГКТ. Уравнение собственной частоты колебаний следующее [3]:

$$\omega_0^2 = \frac{12f_k}{ml_k} \quad (1)$$

где  $m$  и  $l_k$  - масса и длина колебательной системы соответственно,  $f_k$  – модуль кручения.

Анализ выражения (1) с учетом технологических возможностей показывает, что одним из наиболее эффективных способов подстройки собственных частот колебаний внутренней колебательной системы и внешней рамки является изменение длины торсиона и/или массы системы.

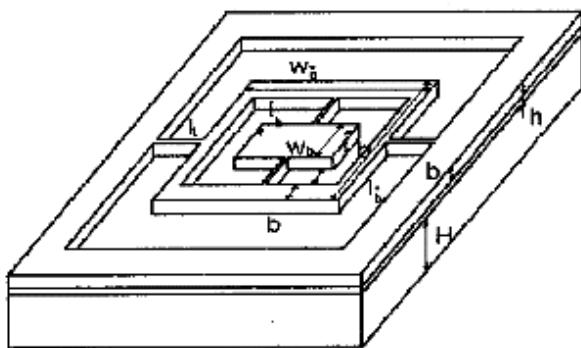
Как уже было отмечено ранее, основными недостатками МГКТ, таких как, например, конструкции приборов компании Charles Stark/Draper Lab., Inc., является прецизионная посадка микроколебательной системы в специально изготовленное посадочное место. При этом точность посадки должна составлять 0,5-1 мкм, так как от этого зависит чув-

ствительность устройства к угловой скорости. Избежать прецизионной посадки можно тем формированием колебательной системы на многослойных структурах (типа структур кремний на изоляторе КНИ), имеющих строго определенную толщину монокристаллического кремния и промежуточного слоя диэлектрика ( $\text{SiO}_2$  или многокомпонентного стекла) на специальном основании. Технология получения подобных структур включает операции прецизионной химико-механической обработки пластин кремния, формирование рельефа методами травления (обычно жидкостного анизотропного и/или плазмохимического), наращивание вспомогательных и конструкционных слоев, сращивание кремниевых пластин. Повторные операции химико-механической обработки, травления и наращивания позволяют формировать необходимую многослойную структуру.

Основными принципами проектирования и изготовления МГКТ из кремния являются следующие:

- прибор должен быть изготовлен с использованием интегральной кремниевой технологии;
- конструкция прибора должна обеспечивать простоту выполнения и расчетную точность функционирования;
- зазоры между элементами колебательной системы обеспечиваются методами селективного травления материалов с различными свойствами или методами плазмохимического травления;
- габаритные размеры механических элементов прибора определяются на основании расчета колебательной системы и ограничиваются технологическими возможностями производства.

Конструкция МГКТ представлена на рис. 2.



**Рис. 2. Конструкция МГКТ:**

$l_b$  - длина внутренней рамки;  $W_b$  - ширина внутренней рамки;  $l_b^*$  - длина внешней рамки;  $W_b^*$  - ширина внешней рамки;  $h$  - толщина  $\text{SiO}_2$ ;  $H$  - толщина базовой подложки;  $B$  - толщина  $n^+ - \text{Si}$ ;  $l_t$  - длина торсиона

Ее основу составляет колебательная система в виде центральной рамки, прикрепленной двумя торсионами к внешней рамке, которая, в свою очередь, прикреплена торсионами (расположенными перпендикулярно к направлению торсионов центральной рамки) к основанию. Генерация и измерение параметров колебаний осуществляется с помощью емкостной схемы, расположенной на несущей подложке.

Размеры конструкции рассчитываются в соответствии с уравнением (2), полученным путем подстановки выражения для модуля кручения в уравнение (1):

$$l_b^3 W_b = \frac{24 G_{\text{Si}} b^3}{\sqrt{3} \omega_0^2 l_t \rho_{\text{Si}}} \quad (2)$$

где  $l_b$ ,  $W_b$ ,  $b$ ,  $l_t$  – геометрические размеры колебательной системы – длина, ширина, толщина рамки и длина торсиона соответственно (рис. 2);  $\rho_{\text{Si}}$  – плотность кремния.

Результаты расчета геометрических размеров колебательной системы позволили конкретизировать технологические параметры многослойной структуры, составить и проанализировать эквивалентную схему паразит-

ных элементов МГКТ. Эквивалентная схема паразитных элементов МГКТ представлена на рис. 3, где  $R_{t1}$ ,  $R_{t2}$  – сопротивление внутренних и внешних торсионов соот-

ветственно;  $R_m$  – сопротивление обкладок конденсатора внутренней колебательной системы;  $C_r$  – емкость конденсатора внутренней колебательной системы;

$C_u$  – емкость конденсатора внешней колебательной системы;  $R_b/2$  – сопротивление внешней рамки;  $R_p$  – сопротивление разводки. Из схемы следует, что часть напряжения, обеспечивающая раскачку внутренней колебательной системы, поступает на измерительный конденсатор  $C_u$  и является паразитной ( $U_p$ ). Напряжение  $U_p$  определяется выражением

$$U_p = \frac{U_r \cdot R_{t2}}{R_m + R_{t1} + R_{t2} + R_b/2 + R_p + Z_{C_r}}, \quad (3)$$

где  $Z_{C_r} = \frac{1}{JW_0 C_r}$  – емкостное сопротивление конденсатора  $C_r$ ;  $U_r$  – напряжение раскачки внутренней колебательной системы.

При  $b = 25$  мкм и  $l_t = 25 \div 50$  мкм сопротивление внутреннего и внешнего торсионов составит от 3 до 10 Ом. (при расчете удельное сопротивление кремния принимали равным 0,01 Ом·см). Сопротивление внешней и внутренней рамки при  $l_b = 2,5$  мм составит 4-5 Ом, а электропроводящая разводка из поликремния (при 10 Ом) составит 25-30 Ом. Анализ предложенных расчетов показывает, что наибольший вклад в сумму паразитных сопротивлений вносит поликремниевая разводка, наличие кото-

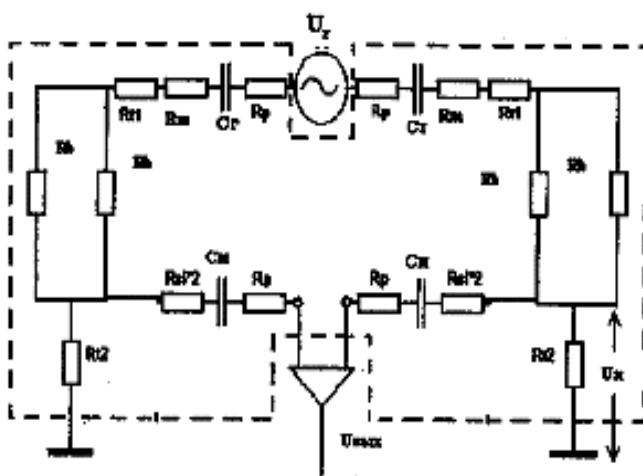


Рис. 3. Эквивалентная схема паразитных элементов МГКТ:

кой обусловлено высокотемпературными процессами формирования слоев МГКТ. Однако возможно снижение сопротивления разводки в 2-3 раза при использовании полицидов или металлов с низким удельным сопротивлением.

Микроэлектромеханические системы являются сложными многослойными конструкциями, состоящими из полупроводниковых, диэлектрических и проводящих слоев. Большинство технологических процессов изготовления многослойных структур связано с высокотемпературными операциями. Вследствие различий физико-механических свойств материалов в слоях возникают значительные механические и структурные напряжения, которые существенно влияют на технологические процессы формирования слоев и сборку МЭМС, на электрические параметры и качество изделий.

Неоднородное распределение деформаций и напряжений по толщине слоев обуславливает изгиб и коробление конструкции. Напряжения приводят к активации периферийных, поверхностных и гетерогенных внутренних источников дислокации в слоях. Основной причиной влияния механических напряжений на электри-

ческие параметры изделия является изменение структуры энергетических зон полупроводниковых материалов [4, 5]. Для обеспечения качества изделий необходим минимальный уровень внутренних механических напряжений в слоях. Поэтому разработка конструктивно-технологических мероприятий оптимизации напряженно-деформированного состояния по слоям является актуальной задачей, для решения которой необходим выбор параметров слоев с учетом согласования их физико-механических свойств и геометрических размеров.

При разработке модели напряженно-деформированного состояния многослойной структуры учитывали все конструктивно-технологические особенности исследуемого изделия, использовали достоверные данные о физико-механических свойствах материалов, применяли обоснованные критерии прочностной надежности, выявляли факторы, оказывающих наибольшее влияние на надежность изделия.

Оценку напряженно-деформированного состояния проводили с применением теории упругости многослойных пластин [6]. При этом использовали допущения о малости деформаций, о неизменности нормалей, о ненадавливании слоев. Поэтому полученные соотношения справедливы для тонких, жестких однородных изотропных слоев постоянной толщины. Кривизну нейтральной поверхности многослойной структуры при температуре  $T$  определяли по формуле

где  $E_i$ ,  $v_i$ ,  $\alpha_i$ ,  $h_i$  - модуль упругости, коэффициент Пуассона, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), толщина  $i$ -го слоя, соответственно;  $n$  - число слоев, первому слою  $i=1$  соответствует кремниевая подложка.

$$\frac{1}{\rho} = 6T \sum_{i=2}^n \frac{E_i \cdot h_i}{1-v_i} (\alpha_i - \alpha_1) \left/ \left( \frac{E_1 h_1}{1-v_1} \right) \right., \quad (4)$$

где  $E_i$ ,  $v_i$ ,  $\alpha_i$ ,  $h_i$  - модуль упругости, коэффициент Пуассона, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), толщина  $i$ -го слоя, соответственно;  $n$  - число слоев, первому слою  $i=1$  соответствует кремниевая подложка.

Толщина и жесткость слоя кремния существенно превышает аналогичные параметры остальных слоев, поэтому линейные деформации всех слоев приблизительно равны и определяются температурной деформацией слоя кремния.

Напряжения в  $i$ -м слое определяли по формуле

$$\sigma_i = E_i (\alpha_1 - \alpha_i) T / (1 - v_i). \quad (5)$$

Напряжения в подложке определяли по формуле

$$\sigma_1 = -\frac{1}{h_1} \sum_{i=2}^n \sigma_i \cdot h_i \times \left[ 1 + 6 \left( z + \frac{h_1}{2} \right) / h_2 \right], \quad (6)$$

где  $z$  - расстояние от нейтральной линии.

Для минимизации напряженно-деформированного состояния многослойной структуры, уменьшения влияния напряжений на свойства материалов и электрофизические параметры технологические режимы нанесения слоев и их физико-механические и геометрические параметры подбирали так, чтобы слои имели деформации разных знаков. При этом толщину стеклоприпоя определяли по формуле

$$h_n = \frac{\sum_{i=2}^{n-1} E_i \cdot h_i (\alpha_i - \alpha_1) T_\Sigma}{T_n E_n (\alpha_1 - \alpha_n)}, \quad (7)$$

где  $T_\Sigma$  - суммарная температура технологического воздействия на  $i$ -й слой.

Модуль упругости – аддитивное свойство материала, поэтому модуль упругости слоев в многослойном образце определяли с помощью формулы

$$E = \sum E_i \cdot J_i / J_1, \quad (8)$$

где  $E_i$ ,  $J_i$  - модуль упругости и момент инерции образца;  $J_1$  - момент инерции слоя.

Модуль упругости образцов определяли с использованием резонансного метода испытаний и формулы [7]:

$$E = \frac{12\rho}{h^2} 4\pi^2 f_p^2 \frac{l^4}{(\alpha \cdot l)^4} K_\pi \cdot K_T, \quad (9)$$

где  $\rho$  - плотность материала образца;  $h$ ,  $l$  - толщина и длина свободной части образца;  $f_p$  - значение первого основного тона резонансной ча-

стоты колебаний;  $\alpha l$  - коэффициент, зависящий от условий закрепления и формы колебаний; для первой формы при консольном закреплении  $\alpha l = 1,875$ ;  $K_\pi$  - коэффициент, который исключает влияние систематической погрешности модуля упругости в результате возникновения сдвиговых компонент тензора деформации и инерции вращения при возбуждении колебаний;  $K_T$  - коэффициент, учитывающий температурное расширение материала в исследуемом интервале температур.

В качестве конструкционного материала многослойной структуры использован кремний. Изоляционные слои выполнены из оксида кремния  $\text{SiO}_2$ , или нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Планирующие слои, а также некоторые элементы электропроводной разводки выполнены из поликремния  $\text{Si}^*$ . Сборку слоев осуществляли с применением стеклоприпоев, низкотемпературного свинцово-силикатного материала С-67 (температура соединения около  $500^\circ\text{C}$ ) или аморфного стекла барий-алюмо-силикатной системы БАС (температура соединения около  $1200^\circ\text{C}$ ).

Физико-механические свойства материалов, используемых при формировании многослойных структур,

представлены в таблице [4, 5, 8].

Модуль упругости материалов определяли на плоских образцах с размером в плане  $60 \times 3$  мм, которые закрепляли консольно. Определение резонансной частоты колебаний образцов проводили на электродинамическом возбудителе колебаний типа ВР-5 фирмы "Дерритрон электроник вибраторс" (Великобритания).

Сопоставление опытных значений деформаций многослойных структур с расчетными значениями показали их удовлетворительную сходимость. Расхождения не превысили 27 %. Несоответствие расчетных и опытных данных обусловлено в основном следующими факторами: неоднородностью физико-механических параметров и неидеальностью геометрической формы слоев; анизотропией упругих свойств материалов слоев и их зависимостью от температуры; образованием упруго-пластических деформаций и релаксацией механических напряжений в слоях; различием структуры и свойств материала граничных и объемных участков слоев.

Итак в публикуемой работе:

- рассмотрена структурная схема микрогироскопа колебательного типа. Предложена конструкция, использующая достоинства SOI-технологии;

#### Физико-механические свойства материалов используемых в многослойных структурах

Материал	Ориентация	Модуль упругости $E$ , ГПа	Коэффициент Пуассона, $\nu$	ТКЛР, $10^{-6} \text{ К}^{-1}$
Кремний	(100)	130-169	0,065-0,3	2,8-4,5
	(111)	169	0,26	
	(130)	130-169	0,09-0,3	
Поликремний	-	155-167	0,2	3,0-3,8
$\text{SiO}_2$	-	75	0,17	0,5-0,6
C-67	-	70	0,2	6,3-6,7
БАС	-	100	0,2	3,7
$\text{Si}_3\text{N}_4$	-	130-180	0,26	2,25-2,9

- рассмотрены различные варианты торсионов для крепления микроколебательной системы. Установлено, что наиболее технологичным является торсионы треугольной и трапецидальной формы;
- предложены принципы проектирования и проведен расчет конструкции микрогироскопа, пригодного для интегрального исполнения;
- составлена и проанализирована эквивалентная схема паразитных элементов МГКТ, рассчитаны элементы эквивалентной схемы;
- представлена методика определения модуля упругости и параметров напряженно-деформированного состояния многослойных структур. Предложен способ определения рационального соотношения между параметрами слоев в многослойной структуре.

#### Список литературы

- Putty M., Najafi K.** A micromachined vibrating ring gyroscope // Technical Digest, Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head, 1994, June. P. 13-16.
- Kumar K., Barban N. and Elwell J.M.** The charles stark Draper laboratory. Inc., Cambridge, MA 02139.
- Феодосьев В.И.** Сопротивление материалов. М.: Наука, 1964.
- Захаров Н.П., Багдасарян А.В.** Механические явления в интегральных структурах. М.: Радио и связь, 1992. 144 с.
- Концевой Ю.А., Литвинов Ю.М., Фаттахов Э.А.** Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1982. 240 с.
- Бояршинов С.В.** Основы строительной механики. М.: Машиностроение, 1973. 456 с.
- Дягтерев А.А., Летягин В.А., Погалов А.И.** Основы механики и сопротивление материалов. Лабораторный практикум / Под ред. В.А. Летягина. М.: МИЭТ, 1997. 188с.
- Физические величины:** Справочник /Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.:Энергоатомиздат, 1991. 1232с.

УДК 621.3.049.77.025.5

**Л.Ю.Бочаров,** канд. техн. наук, Институт проблемных исследований АЕН РФ, **П.П.Мальцев** д-р техн. наук проф., Секция прикладных проблем при Президиуме РАН

## СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЗА РУБЕЖОМ

*Рассмотрены основные зарубежные проекты в области микросистемной техники и приведены некоторые достижения в этой области, а также проведена оценка микроэлектромеханических систем с помощью коэффициента качества в виде произведения числа транзисторов ( $T$ ) и числа механических компонентов ( $M$ ).*

Современное развитие микроботехнических систем способно оказать существенное влияние на многие области деятельности человека. Как считают зарубежные эксперты, в промышленном производстве и медицине XXI века микророботы будут играть ведущую роль. Технологической базой микроробототехники является микроэлектромеханика - высокая технология двойного назначения, базирующаяся на использовании методов и средств микроэлектроники. В США и Японии осуществляется ряд проектов, цель которых - создание микророботов.

Показательным примером является японский проект "Micromachine Technology Project". Он стартовал в 1991 году и был рассчитан на период до 2000 года. Основной целью этого проекта являлось развитие технологий для создания микроробототехнических средств, способных решать следующие задачи:

- автономно передвигаться внутри кровеносных сосудов и органов живых организмов, осуществляя ди-

агностику заболеваний и хирургические операции;

- проводить диагностирование и ремонт сложного промышленного и транспортного оборудования в труднодоступных местах (внутри трубопроводов авиационных двигателей, оборудования атомных электростанций и химических производств).

Общий запланированный объем финансирования этого проекта составляет 250 млн. долл. Только на изучение фундаментальных закономерностей микромира в области механики, гидродинамики, теплопередачи, разработку новых материалов, в том числе с управляемыми свойствами, исследование элементной базы микроустройств (включая технологии их изготовления) было затрачено порядка 100 млн. долл.

Этот проект выполняется в рамках многоцелевой программы "Industry Science and Technology Frontier Program", руководство которой осуществляется Агентством промышленных наук и технологий (AIST) Министерства внешней торговли и про-

- рассмотрены различные варианты торсионов для крепления микроколебательной системы. Установлено, что наиболее технологичным является торсионы треугольной и трапецидальной формы;
- предложены принципы проектирования и проведен расчет конструкции микрогироскопа, пригодного для интегрального исполнения;
- составлена и проанализирована эквивалентная схема паразитных элементов МГКТ, рассчитаны элементы эквивалентной схемы;
- представлена методика определения модуля упругости и параметров напряженно-деформированного состояния многослойных структур. Предложен способ определения рационального соотношения между параметрами слоев в многослойной структуре.

#### Список литературы

- Putty M., Najafi K.** A micromachined vibrating ring gyroscope // Technical Digest, Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head, 1994, June. P. 13-16.
- Kumar K., Barban N. and Elwell J.M.** The charles stark Draper laboratory. Inc., Cambridge, MA 02139.
- Феодосьев В.И.** Сопротивление материалов. М.: Наука, 1964.
- Захаров Н.П., Багдасарян А.В.** Механические явления в интегральных структурах. М.: Радио и связь, 1992. 144 с.
- Концевой Ю.А., Литвинов Ю.М., Фаттахов Э.А.** Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1982. 240 с.
- Бояршинов С.В.** Основы строительной механики. М.: Машиностроение, 1973. 456 с.
- Дягтерев А.А., Летягин В.А., Погалов А.И.** Основы механики и сопротивление материалов. Лабораторный практикум / Под ред. В.А. Летягина. М.: МИЭТ, 1997. 188с.
- Физические величины:** Справочник /Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.:Энергоатомиздат, 1991. 1232с.

УДК 621.3.049.77.025.5

**Л.Ю.Бочаров,** канд. техн. наук, Институт проблемных исследований АЕН РФ, **П.П.Мальцев** д-р техн. наук проф., Секция прикладных проблем при Президиуме РАН

## СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЗА РУБЕЖОМ

*Рассмотрены основные зарубежные проекты в области микросистемной техники и приведены некоторые достижения в этой области, а также проведена оценка микроэлектромеханических систем с помощью коэффициента качества в виде произведения числа транзисторов ( $T$ ) и числа механических компонентов ( $M$ ).*

Современное развитие микроботехнических систем способно оказать существенное влияние на многие области деятельности человека. Как считают зарубежные эксперты, в промышленном производстве и медицине XXI века микророботы будут играть ведущую роль. Технологической базой микроробототехники является микроэлектромеханика - высокая технология двойного назначения, базирующаяся на использовании методов и средств микроэлектроники. В США и Японии осуществляется ряд проектов, цель которых - создание микророботов.

Показательным примером является японский проект "Micromachine Technology Project". Он стартовал в 1991 году и был рассчитан на период до 2000 года. Основной целью этого проекта являлось развитие технологий для создания микроробототехнических средств, способных решать следующие задачи:

- автономно передвигаться внутри кровеносных сосудов и органов живых организмов, осуществляя ди-

агностику заболеваний и хирургические операции;

- проводить диагностирование и ремонт сложного промышленного и транспортного оборудования в труднодоступных местах (внутри трубопроводов авиационных двигателей, оборудования атомных электростанций и химических производств).

Общий запланированный объем финансирования этого проекта составляет 250 млн. долл. Только на изучение фундаментальных закономерностей микромира в области механики, гидродинамики, теплопередачи, разработку новых материалов, в том числе с управляемыми свойствами, исследование элементной базы микроустройств (включая технологии их изготовления) было затрачено порядка 100 млн. долл.

Этот проект выполняется в рамках многоцелевой программы "Industry Science and Technology Frontier Program", руководство которой осуществляется Агентством промышленных наук и технологий (AIST) Министерства внешней торговли и про-

мышленности (MITI). Проект финансируется через государственную корпорацию "Организация развития новых видов энергетики и промышленности" (NEDO). Головной организацией является Центр микромашин (MMC) в Токио [1-4].

На первом этапе изучались фундаментальные закономерности микромира в области механики, гидродинамики, теплопередачи. Осуществлялась разработка новых материалов, в том числе с управляемыми свойствами. Исследовалась элементная база микроустройств, включая энергетические микроэлементы, и технология ее изготовления.

В 1994 году в проект были включены работы, направленные на создание микропроизводств, т.е. на разработку миниатюрного, высокоточного и экономичного микроэлектромеханического оборудования, предназначенного для производства миниатюрных прецизионных приборов и устройств. В апреле 1996 года начался второй завершающий этап проекта, включающий создание микросистем, способных осуществлять автономное передвижение и манипуляции.

Результаты, полученные в ходе выполнения проекта "Micromachine Technology Project", позволяют создавать робототехнические устройства для промышленных и медицинских целей примерно к 2001 году. Однако уже 1999 году японские фирмы представили на рынок роботизированные игрушки с элементами искусственного интеллекта.

Собака, имеющая четыре основных инстинкта (любовь, поиск, движение, перезарядка) и упрощенную эмоциональную модель, а также способная приобретать новые навыки, была разработана фирмой "Sony" и в 1999 году их продано 3 тыс. штук по цене 2 тыс. долл. Масса самоубирающегося хромированного песика –

1,5 кг, длина - 27 см. Кошку, способную произносить 50 фраз и поднимать настроение собеседника, а также передавать медицинскую информацию для клиента и сообщать о состоянии пациента в сетевой центр, представила в 1999 году фирма "Matsushita Electric", планирующая продавать устройство с 2001 года по цене 430 долл.

Характерной чертой мирового технологического развития последнего десятилетия XX века является зарождение интегрально образующихся (комплексных) технологий. К их числу относятся технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС). Интеграция достижений в области электроники, механики, информатики и измерительной техники, объединенных тенденцией к миниатюризации, определила зарождение этих технологий в конце 80-х – начале 90-х годов. Огромное число (более 250 в 1994 г. и уже более 400 в 1997 году) университетов и коммерческих компаний США и Японии, сконцентрировав усилия на развитии технологий МЭМС, открыли широчайший спектр их возможного применения. Общее число зарегистрированных в мире патентов в области технологий МЭМС резко возросло и к 1998 году достигло 1000, из них более 300 принадлежит США. Сейчас в этой области ежегодно регистрируется более 200 патентов.

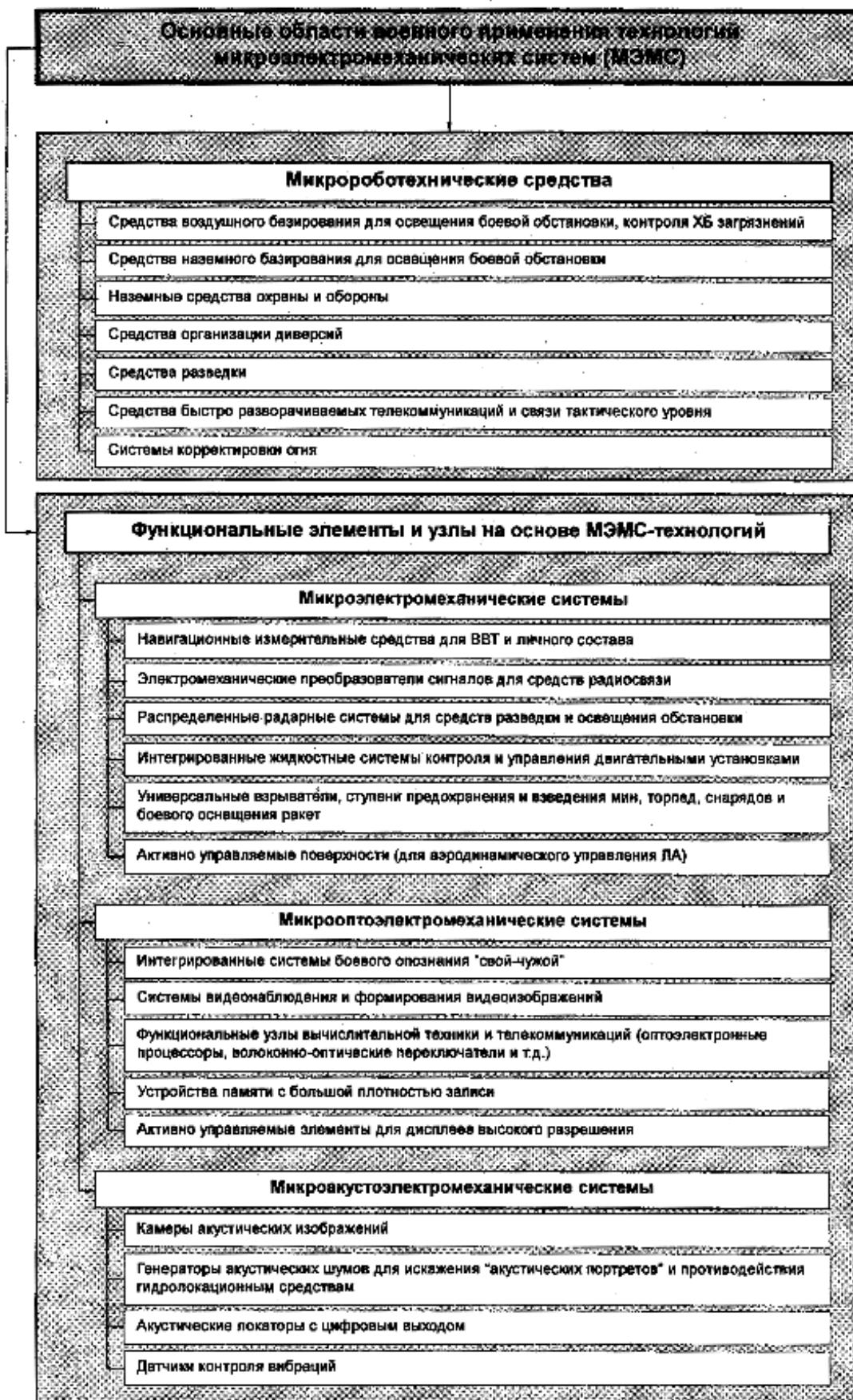
Показателен и рост мировых объемов производства (продаж) МЭМС, который по сравнению с 1995 годом увеличился более чем в 2 раза и составил в 1998 году порядка 4 млрд. долл. США. Прогнозируется, что в 2000 году он составит более 13 млрд. долл.

В 1995 году к соперничеству двух мировых лидеров в области МЭМС – США и Японии – активно подключились страны Европы и Юго-Восточной Азии. Так, например, чис-

ло университетов и коммерческих компаний, занимающихся исследованиями и разработками технологий МЭМС, в Германии к 1997 году стало в 1,5 раза больше, чем в США и практически сравнялось с Японией. Важно отметить, что мировая динамика развития МЭМС связана с неуклонным ростом государственной поддержки исследований и разработок в этой области. Данный факт определяется в первую очередь тем, что технологии МЭМС вошли в ту fazu своего развития, которая требует долгосрочного и устойчивого финансирования, а именно этого в нынешних условиях не могут себе позволить многие коммерческие компании.

В США инициирующим фактором в развитии микросистемной технологии стало появление программы микроэлектромеханических систем, разработанной по заказу Управления перспективных исследований министерства обороны США (DARPA) с названием MEMS – "Microelectromechanical Systems" [5, 6]. Основные области военного применения технологий микроэлектромеханических систем приведены на рисунке, а перечень научно-исследовательских работ - в таблице. Министерство обороны США выделяет гранты на развитие микроэлектромеханических систем на сумму 35 млн. долл. ежегодно. На 3-й странице обложки журнала приведены сведения, характеризующие динамику роста производства и исследований в области МЭМС.

Сандийская лаборатория в США сообщает о разработке новой технологии микроэлектромеханических систем, получившей название "Sandia Embedded Integrated Micromechanical Systems" - SEIMS . Технология позволяет выполнять компоненты систем с минимальным топологическим размером 0,5 мкм и тем самым добиваться дальнейшего снижения



Области военного применения микроэлектромеханических систем (МЭМС)

**ПЕРЕЧЕНЬ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ,  
выполняемых по заказу Управления перспективных исследований министерства обороны США (DARPA)  
в рамках программы MEMS – "Микроэлектромеханические системы"**

№ п/п	Название темы исследований	Организация-исполнитель
1.	Гибкие производственные системы для специализированных микроэлектромеханических систем (МЭМС)	Advanced MicroMachines Incorporated (AMMi)
2.	Создание монолитных мультиМЭМС-ориентированных микросистем (на одной интегральной схеме)	Analog Devices, Inc.
3.	Интегрированные миниатюрные камеры сгорания/испарители для высокопроизводительных тепловых двигателей	Battelle Memorial Institute/Pacific Northwest Laboratories
4.	Совершенствование инструментальных микросредств	Berkeley Microinstruments, Inc.
5.	Технологии модульных монолитных МЭМС-ориентированных систем	Berkeley Sensor & Actuator Center (BSAC)University of California, Berkeley
6.	Производство и применение многодатчиковых микросистем	Boeing Defense & Space Group
7.	Микромеханические массивы исполнительных элементов для деформируемых зеркал	Boston University
8.	Наноразмерные электромеханические резонаторы для устройств обработки радиосигналов	California Institute of Technology
9.	Кремниевые микродисковые массивы для устройств хранения информации	Carnegie Mellon University
10.	Микрооптико-механические системы	Case Western Reserve University
11.	Междисциплинарные исследования по выявлению перспективных направлений развития МЭМС	Case Western Reserve University
12.	Технологии создания широкодиапазонных микроакселерометров	Charles Stark Draper Laboratory, Inc.
13.	Производство дешевых МЭМС-ориентированных инерциальных датчиков	Charles Stark Draper Laboratory, Inc. & Boeing North America
14.	Разработка технологий изготовления МЭМС (с топологическими нормами менее 25 мкм) с рабочей частотой до 60 ГГц	Cornell University
15.	Биметаллические исполнительные устройства для микромашинных конструкций	EQ&GIC Sensors
16.	Надежность микромеханических конструкций	Failure Analysis Associates, Inc.
17.	Микромеханические переключающиеся фотоматрицы	General Electric
18.	МЭМС-ориентированные "умные" колеса (шины)	Goodyear Tire and Rubber Company
19.	Новые органические материалы для МЭМС	Harvard University
20.	МЭМС-ориентированные настраиваемые оптические фильтры для широкоспектральных ИК-приемников и газоанализаторов	Honeywell, Inc.
21.	МЭМС-ориентированные оптические корреляционные спектрометрические системы	Honeywell, Inc.
22.	Компактные устройства хранения информации большой емкости	IBM Almaden Research Center
23.	Гибкое производство высокочувствительных датчиков на основе тонкопленочных деформируемых кремниевых пластин	Integrated Sensing Systems, Inc. (ISSYS)
24.	Производство микросистем для медицинских и биологических исследований	Lawrence Livermore National Laboratories
25.	Применение и производство высокоэффективных микроконструкций	Louisiana State University
26.	Однокристальные кремниевые микродатчики и исполнительные микроэлементы	Lucas Nova Sensor
27.	Системы автоматизированного проектирования МЭМС	Massachusetts Institute of Technology
28.	Создание МЭМС для распределенных компьютерных сетей	MCNC
29.	Инфраструктура МЭМС	MCNC

№ п/п	Название темы исследований	Организация-исполнитель
30.	Компьютерные системы технического видения до контроля над структурами МЭМС	MIT
31.	Жидкостные микробиоприборы	MIT Lincoln Laboratory
32.	Совершенствование технологии МЭМС в интересах созданий систем безопасности морского вооружения (взрывателей, предохранительных устройств и т.д.), средств боевого оснащения и для других военных задач	Naval Surface Warfare Center, Indian
33.	Масс-спектрометр на одной интегральной схеме	Head Division
34.	Развитие процессов производства титаново-свинцово-циркониевых сплавов (соединений) для, микродатчиков и исполнительных микроэлементов	Northrop Grumman
35.	Производство термопневматических исполнительных микроэлементов для жидкостных регуляционных систем	Pennsylvania State University
36.	Лазерные 3D-инструмента (трехмерные измерители)	Redwood Microsystems
37.	Микромашинные радиочастотные переключатели и конденсаторы переменной емкости для высокозащитных систем связи и коммуникаций	Revise, Inc.
38.	Интеллектуальные активно действующие поверхности	Sarcos Research Corporation
39.	Высокоточные диагностические микросредства для жидкостных МЭМС	Sarnoff Corporation
40.	Оптико-механические дисплеи высокого разрешения	Silicon Light Machines (Echelle, Inc.)
41.	Микроэлектромеханические поглотители шума	SRI International
42.	Зондирующие матрицы на микроэлементах	Stanford University
43.	МЭМС-ориентированные системы идентификации средства связи	Tanner Research
44.	Микроэлектромеханические фотопереключатели	Texas Instruments, Inc.
45.	Вакуумная упаковка МЭМС	Texas Instruments, Inc.
46.	10-гигабайтная персональная мультимедийная карта памяти (ROM) на основе технологии МЭМС	TMS Technologies, Inc.
47.	Микроспутниковое движение и системы позиционного контроля	TRW Space & Electronics Group
48.	Адаптивные микроэлектромеханические технологии для оптико-механических модулей и систем	University of California, Berkeley
49.	Развитие микрооптикомеханических ИК-приемников с оптическим выходом	University of California, Berkeley
50.	Широкодиапазонные высокоточные позиционные микроэлементы для устройств памяти на магнитных дисках	University of California, Berkeley & IBM
51.	Маловысотные микросамолеты для решения задач освещения боевой обстановки	University of California, Los Angeles
52.	Компактные микросистемы для аэродинамического контроля и управления	University of California, Los Angeles
53.	Беспроводные интегрированные микродатчики с малым потреблением энергии	University of California, Los Angeles
54.	Производство микродатчиков и исполнительных микроэлементов	University of California, Los Angeles
55.	Пьезоэлектрические микросистемы	University of Hawaii at Manoa
56.	МЭМС-ориентированные распределенные системы химических датчиков для мониторинга боевой обстановки и мест хранения оружия	UaiversHy of Kentucky

№ п/п	Название темы исследований	Организация-исполнитель
57.	Микроинструментальный кластер для мониторинга окружающей среды	University of Michigan
58.	Применение МЭМС в беспроводных системах связи и коммуникации	University of Michigan
59.	Микроробототехнические сборочные системы	University of Southern California, Information Sciences Institute
60.	Развитие концепции артиллерийской стрельбы (управляемые снаряды на основе МЭМС)	US Army ARDEC
61.	МЭМС-ориентированные средства активного контроля объектов	Xerox Palo AltoResearch Center

размеров соответствующих систем. Технология обеспечивает также резкое увеличение интеграции в создаваемых системах разных функциональных элементов. В этой лаборатории организованы отделения робототехники и искусственного интеллекта.

Ливерморская лаборатория им. Лоуренса (США) работает над созданием микроэлектромеханических устройств, стойких к радиационным, химическим и тепловым воздействиям. Получить такие свойства позволяет применение карбида кремния в качестве исходного материала для изготовления этих устройств.

Разработанный в Оксфордской лаборатории (США) микроэлектромеханический спектрограф объемом 6 см<sup>3</sup> в 3 тыс раз меньше его неинтегрального аналога. Спектрограф может применяться в мониторинговых и аварийных системах химических предприятий.

В США исследователи Массачусетского технологического института намерены разработать микроробот-хирург для внутриполостных и внутрисосудистых операций к 2004 – 2006 годам, а микроробот для менее сложных операций может появиться еще раньше.

Огромный спектр МЭМС-техно-

логий привел к тому, что в этой области стали выделять уже отдельные направления по созданию:

- микрооптоэлектромеханических систем (МОЭМС);
- микроэлектромеханических жидкостных систем (МЭМ ЖС),
- микроакустоэлектромеханических систем (МАЭМС) и др.

Для оценки состояния и перспектив развития микроэлектромеханических систем на основе зарубежных данных можно ввести коэффициент качества, позволяющий оценить уровни интеграции МЭМС и представляющий собой произведение числа транзисторов (T) и числа механических компонентов (M). На последней странице обложки журнала приведен рисунок, иллюстрирующий возможности микросистемной техники, а также показаны примеры реализации серийно выпускаемого акселерометра, изготавливаемого по технологии с топологическими нормами 2...10 мкм, и возможные перспективы применения МЭМС для аэродинамического управления поверхностью крыла летательного аппарата. На рисунке видно, что "чисто электронные" изделия лежат по оси Y, а "чисто механические" - по оси X, но наиболее революционные проекты находятся в областях с при-

мерно равным количеством электронных и механических компонентов. Именно это сочетание и открывает новую эпоху в создании микросистем.

\* \* \*

В заключение можно отметить, что перспективы дальнейшего развития технологий МЭМС свидетельствуют об их способности уже в ближайшем будущем революционизировать все сферы жизнедеятельности человека и сыграть важную роль в научно-техническом развитии многих государств.

#### Список литературы

1. Hogan H. Invasion of The Micromachines // New Scientist, 1996, 29 June. P. 28-33.
2. Gabriel, Kaigham. Microelectromechanical Systems Program- Summary of Research Activities Advanced Research Projects Agency, July, 1994.
3. JTEC Panel Report on Microelectromechanical Systems in Japan // Japanese Technology Evaluation Center, September, 1994.
4. Microelectromechanical Systems Market Study // System Planning Corporation, July, 1994.
5. Microelectromechanical Systems Military Applications // System Planning Corporation, December, 1994
6. Gabriel, Kaigham. Engineering Microscopic Machines // Scientific American, September, 1995.

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ "МИКРОРОБОТЫ. МИКРОМАШИНЫ И СИСТЕМЫ"

Международный симпозиум "Микророботы, микромашины и системы", проводимый 24-25 ноября 1999 года в Москве в рамках Международной программы по перспективной робототехнике (IARP), призван отразить современное состояние в технологии микромашин и микросистем и определить основные направления их будущего развития. На симпозиуме в соответствии с программой будут представлены результаты фундаментальных исследований и разработок, а также применения этой новейшей техники. Такими бурно развивающимися и потенциальными областями применений могут служить промышленность и прежде всего машиностроение, включая космические исследования, океанологию, медицинскую технику, медицинскую и техническую диагностику, авиастроение и судостроение, энергетику. На симпозиуме будут представлены традиционные и новейшие МЭМС-технологии, в том числе новая разработанная российскими учеными стекловолоконная технология серийного и массового производства, позволяющая получать объемные микрокомпоненты, которые в будущем можно будет использовать как стандартные в микросборке машин и систем. Ожидается выступления ученых из Франции, США, Японии, Германии, Китая, Швейцарии и России с заявленными и рекомендованными Программным комитетом более 30 докладами.

В частности, будут представлены новейшие достижения по основным направлениям науки и технологий в микромире.

### **Фундаментальные исследования и разработки** включают:

- *создание микродатчиков, микроактуаторов, микродвигателей;*
- *микроуправление на различных уровнях, включая принятие решений, управление с элементами искусственного интеллекта, распределенное управление;*
- *интеграцию механических и электронных компонентов в единые блоки;*
- *создание источников питания для микросистем и микророботов;*
- *создание информационных микросистем и телекоммуникационного взаимодействия роботов;*
- *микрокинематику, динамические процессы в микророботах, микротрение и смазку.*

### **Технологии изготовления микророботов, микромашин, систем и их компонентов** включают:

- *LIGA-технологию;*
- *стекловолоконную технологию пространственного изготовления микросистем и их компонентов;*
- *кремниевую технологию.*

**Микроэлектромеханические системы** (существующие и потенциальные) находят применение в различных областях, таких как

- *медицинское приборостроение;*
- *биоинженерия и биотехнология;*
- *навигация, мобильные системы, энергетические установки, инспекция окружающей среды, техническая диагностика;*
- *машиностроение;*
- *энергетика.*

Симпозиум включает представление регулярных докладов, а также дискуссию за круглым столом, общую дискуссию, проведение видеосекции

Организаторами симпозиума являются РАН, Министерство науки и технологий, Институт проблем механики РАН.

Тематическое спонсирование симпозиума осуществляется представителями Международной программы по перспективной робототехнике (IARP) стран-участниц выполнения этой программы - США, Франции, Германии, Италии, Китая, Японии и России.

Финансовая поддержка симпозиума осуществляется Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ), грант 99-01-10068 и Министерством науки и технологий.

Настоящий симпозиум в рамках IARP является третьим по данной тематике. Первый и второй симпозиумы проводились в Японии и Китае.

**В.Г. Градецкий**, д-р техн. наук проф., сопредседатель оргкомитета Международного симпозиума "Микророботы, микромашины и системы" (24-25 ноября 1999 г.)

## CONTENTS

<b>Klimov D.M., Vasiljev A.A., Luchinin V.V., Maltsev P.P.</b> <i>Perspectives of Microsystem Technology Development in XXI Century</i> .....3
Perspectives of microsystem technology use which is the most rapid development global scientific technical direction are considered.
<b>Luchinin V.V., Tairov Yu.M., Vasiljev A.A.</b> <i>The Singularities of Materials Science and Technological Microsystems Basis</i> .....7
The questions connected with creation of miniature sensitive executive and power providing systems are considered. In the base of these systems functioning is the active use of classical principles of mechanics optics acoustics electrical engineering chemistry and biology which are integrated into constructive decisions on microlevel with extensive use of materials science and technological bases of microelectronics and optoelectronics
<b>Korliakov A.V., Luchinin V.V.</b> <i>Perspective Element Base of Microsystem Technology</i> .....12
The brief analysis of the main components of microsystem technology such as sensors and transducers analytic -technological microsystems, microinstruments, micromashines is conducted.
<b>Koliasnikov V.A., Rahimbabaev T.Ja.</b> <i>Microliquid Systems and their Realisation with LIGA- Technology Use</i> .....15
Microliquid systems that is miniature devices intended for execution of different chemical and physical processes with small volumes of liquid and gas are considered. It is given the analysis of their advantages and deficiencies and also the main spheres of their use are defined. Some examples of microliquid device realization made with LIGA-technology use are cited in the conclusion.
<b>Diatlov V.L., Kostsov E.G.</b> <i>Highenergycapacions Micromotors on the Base of Thin Ferroelectric Films</i> .....22
It is considered the principle of step leaved micromotors work based on the effect of electrostatic layer of metallic films on ferroelectncity surface. These micromotors made with the help of microelectronic technology have exceptionally high energycapacions (beyond 0.3 - 1J/m <sup>2</sup> at voltages 10-50 V) and precision of transfer (step from 10 Å° to 100 mem). The theoretical and experimental data characterizing energy and mechanical parameters of such micromotors are reduced.
<b>Kaliaev I.A., Kotov V.N., Klinduhov V.G., Kuharenko A.P.</b> <i>Microelectronic Sensory Systems The Experience of Creation and Use</i> .....32
The results of developments of Technological center (TC) of microsystems analysis of research Institute of multiprocessor computer systems of Taganrog radioengineering university (TRU) in the area of structure of microelectronic sensory systems for decision of some concrete pertaining to the national economy problems are represented. The examples of their practical use are conducted. The main technical characteristics of received developments and possibilities of TC of TRU by creation of microelectronic systems are represented.
<b>Pogolov A.I., Timoshenkov V.P., Timoshenkov S.P., Chaplygin Yu.A.</b> <i>Microgyroscope Development on the Base of Multilayer Structures of Silicon and Glass</i> ..36
The integral microgyroscope of vibrating type is considered. The design realizable on the base of multilayer structures. This design permits by integral technology methods to create the device having high faithful characteristics. The equivalent scheme of microgyroscope parasite elements is composed and analyzed. The definition methods of elasticity module and parameters of stress -deformed state of multilayer structures is represented. The way of between layers parameters is suggested.
<b>Bocharov L.Yu., Maltsev P.P.</b> <i>The State and Perspectives of Microelectromechanical Systems Development Abroad</i> .....41
The main foreign plans in the area of microsystem technology are considered and some achievements in this area are reduced, and also it is conducted microelectromechanical systems estimate by means of coefficient of quality in the form of product of numbers of transistors and numbers of mechanical components.



## КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ ЖУРНАЛА "МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА"

**Главный редактор** Мальцев Петр Павлович - д-р техн наук проф., начальник сектора Секции прикладных проблем при Президиуме РАН, Москва

**Зам главного редактора** Лучинин Виктор Викторович - д-р техн наук доц., директор Центра микротехнологии и диагностики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, С-Петербург

*Редакционная коллегия*

**Антонов Борис Игоревич** - зам директора издательства 'Машиностроение', Москва;

**Аристов Виталий Васильевич** - чл.-корр. РАН, директор Института проблем технологий микроэлектроники и особо чистых материалов РАН Черноголовка;

**Васильев Александр Алексеевич** - гл. специалист Миннауки России, Москва;

**Градецкий Валерий Георгиевич** - д-р техн. наук проф., нач. лаборатории Института проблем механики РАН, Москва;

**Журавлев Петр Васильевич** - канд. техн. наук с.н.с., зам. директора Конструкторско-технологического института прикладной микроэлектроники СО РАН, Новосибирск;

**Каляев Игорь Анатольевич** - д-р техн. наук проф., директор НИИ многопроцессорных вычислительных систем Таганрогского государственного радиотехнического университета, Таганрог;

**Климов Дмитрий Михайлович** - академик РАН, директор Института проблем механики РАН, Москва;

**Кузин Александр Юрьевич** - д-р техн. наук с.н.с., начальник отдела 32 ГНИИ МО РФ, Мытищи;

**Норенков Игорь Петрович** - д-р техн. наук проф., заведующий кафедрой САПР Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Москва;

**Панфилов Юрий Васильевич** - д-р техн. наук проф., Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Москва;

**Петросянц Константин Орестович** - д-р техн. наук проф., заведующий кафедрой электроники и электротехники Московского государственного института электроники и математики, Москва;

**Сауров Александр Николаевич** - д-р техн. наук доц., директор НПК "Технологический центр" Московского государственного института электронной техники, Зеленоград;

**Сигов Александр Сергеевич** - д-р техн. наук проф., ректор Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики, Москва;

**Телец Виталий Арсеньевич** - д-р техн. наук, с.н.с., заместитель начальника управления 22 ЦНИИ МО РФ, Мытищи;

**Чаплыгин Юрий Александрович** - д-р техн. наук проф., ректор Московского государственного института электронной техники, Зеленоград.