

УДК 681.586;681.335.2

МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА. НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

© В.В. Лучинин

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет,
Центр микротехнологии и диагностики*

Поступила в редакцию 14 января 1999 г.

Определены основные понятия и тенденции развития научно-технического направления «микросистемная техника» как базиса приборов, машин и технологий будущего. Осуществлен анализ основных ветвей развития микросистемной техники, включая: сенсоры и трансдюсеры, аналитико-технологические микросистемы, микро- и наноинструмент, микромашины и миниатюрные автономные системы энергообеспечения. Сделано заключение о «революционном» характере влияния элементной базы микросистем на технику новых поколений.

1. «МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА» КАК КРИТИЧЕСКОЕ НАПРАВЛЕНИЕ

Современный этап развития высоких технологий, реализуемых на микроуровне, характеризуется второй, вслед за разработкой и широким внедрением интегральных схем, революцией в области создания микросистем. Иницирующим 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. Отличительной особенностью современного этапа является интеграция в сверхмалом объеме твердого тела или на его поверхности чувствительных, исполнительных и энергообеспечивающих элементов, в основе функционирования которых лежит активное использование классических принципов механики, оптики, акустики, электротехники, теплотехники, химии и биологии.

Революция в области микросистем происходит на основе строгого базиса фундаментальных знаний с наиболее широким использованием физико-химической, материаловедческой и технологической баз микро- и оптоэлектроники, а в последнее время и биотехнологии. Однако, переход на микроуровень требует при создании микросистем различного функционального назначения нового поколения учета факторов масштабирования, 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.

Таким образом, можно определить «микросис-

темную технику» (МСТ) как научно-техническое направление, целью которого является создание в ограниченном объеме твердого тела или на его поверхности упорядоченной 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.

Как и применительно к объектам классической интегральной электроники, сформулированное ранее определение микросистемной техники внутренне противоречиво. Это связано с тем, что если реализовать главную цель и создавать сверхинтегрированное гетерогенное твердое тело с максимальной дисперсностью индивидуальных фаз, то следствием этого является возникновение двух видов сопутствующих процессов:

- неравновесных физико-химических процессов, иницирующих гомогенизацию, в том числе, не только за счет диффузии, но и вследствие механического разрушения;
- кооперативных процессов, определяющих не только функционально полезные, но и паразитные взаимодействия.

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.

2. ИСТОРИЧЕСКИЕ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Как и в случае возникновения микроэлектроники, воплотившей свой теоретический задел в первых интегральных микросхемах, созданных в 1958–1961 годах, в рамках реализации целевой функции: массогабаритные показатели, надежность, быстродействие, отношение функциональной сложности к стоимости, основным заказчиком и финансистом «ранних» объектов микросистемной техники (1975–1987 г.г.) в виде микроэлектромеханических приборов (датчиков давления, акселерометров) являлся авиационно-космический комплекс. Появление на рынке потребления автомобилестроителей окончательно сформировало требования к «классическим» изделиям микросистемной техники: массогабаритные показатели, стоимость, надежность, воспроизводимость, массовость, номенклатура.

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

- появление в 1982 году статьи сотрудника фирмы IBM К.Петерсона [1], рассматривающей кремний не как полупроводниковый, а как конструкционный механический материал;
- разработка в конце семидесятых 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 семидесятых — начале восьмидесятых годов в Центре ядерных исследований в Карлсруэ (Германия) технологии формирования объемных структур с использованием синхротронного излучения, гальванического осаждения и прецизионного литья полимерами, получившей название LIGA-технология («LIGA» — аббревиатура немецких слов «litographie» — литография, «galvanoformung» — гальванообработка, «abformung» — прессование);
- создание сенсорных микроэлектромеханических элементов, в которых «гальванические» подсистемы взаимодействуют с «механическими», что и послужило основой для появления широко известной в настоящее время аббревиатуры MEMS.

Первое рабочее совещание по MEMS состоялось в июле 1987 года в Salt Lake City, на котором аббревиатура MEMS фактически была принята и используется до настоящего времени как обобщающее понятие. Ниже представлены основные регулярно проводимые международные специали-

зированные симпозиумы, конференции и совещания по проблемам микросистемной техники:

- European Conference on Solid State Transducers;
- International Conference «Transducers»;
- International Conference on Sensor Technology;
- International Conference on Micro Electro Mechanical Systems;
- International Conference on modeling and Simulation of Microsystems;
- International Conference «Microsystem Technologies»;
- International Symposium «Design, Test and Microfabrication of MEMS/MOEMS»;
- International Conference «Sensors, Transducers and Systems»;
- International Symposium «Micromachines and Human Science»;
- International Symposium «Micromachining and Microfabrication»;
- Workshop on Solid-State Sensors and Actuators;
- Workshop on Microelectromechanical Systems.

Существует также ряд международных специализированных периодических изданий по проблемам микросистемной техники:

- Sensors and Actuators (A & B);
- Journal of Micromechanics and Microengineering;
- Sensors and Materials;
- Journal of Microelectromechanical Systems;
- Microsystem technology (MST news).

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 об-

ласти миниатюрных недорогих диагностических систем обеспечения жизнедеятельности человека за счет принятия концепции экономической целесообразности массовой профилактики заболевания по отношению к их лечению;

- формирование рынка оборудования для технологий на микроуровне (не 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.

Наиболее яркими конструктивно-технологическими отличительными особенностями техники микросистем 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 контроль-диагностических процедур в микрообъемах и на поверхности твердого тела;
- необходимость учета размерного фактора и эффектов масштабирования в условиях новых классов микросистем (не микро- и оптоэлектронных).

Социально-экономическая эффективность развития направления «микросистемная техника» 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 в условиях создания микросистем 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, как правило, не востребовано по прямому назначению;
- возможностью реализации ранее недоступных процессов в условиях микрообъектов и

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

- высокой эффективностью адаптивно-диагностических микросистем в условиях решения задач по профилактике заболеваний, то есть сохранению «человеческого капитала».

3. СТРУКТУРА НАПРАВЛЕНИЯ «МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА»

Ранее отмечалось, что широко используемый термин MEMS, дословно отражающий лишь микроэлектромеханические системы, не дает представлений о современном состоянии вопроса в области создания микросистем.

С середины девяностых 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». Наряду с этим, для обозначения рассматриваемого направления используются такие понятия, как микросенсоры и актуаторы, мехатроника, микромеханика, микроэлектроника, микромашины [2].

В России наибольшее распространение получил термин «микросистемная техника», который был использован и в официальных документах, связанных с принятием в 1996 году «Перечня критических технологий Федерального уровня». Не вступая в полемику относительно данного термина, носящего, безусловно, достаточно общий характер, определим в рамках таблицы 1 возможную структуру направления «микросистемная техника».

Анализ современного состояния в области микросистем позволяет построить матрицу, устанавливающую связь между приоритетными направлениями разработок и сферами применения объектов микросистемной техники (Таблица 2).

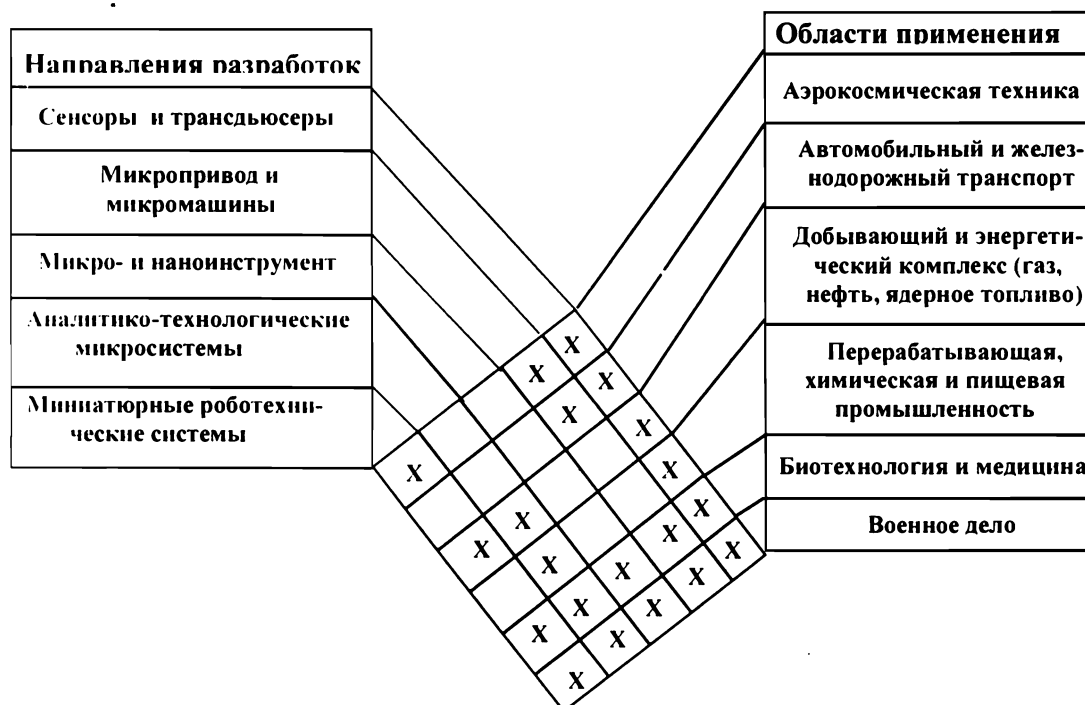
3.1. Сенсоры и трансдьюсеры

Следует отметить, 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. Кратко основные этапы данной концепции «от сенсора к трансдьюсеру» могут быть сформулированы в виде следующих направлений деятельности:

Табл. 1. Структура направления «Микро системная техника»

№ п/п	Класс объектов МСТ	Направления разработок
1	Микроэлектромеханические системы и машины.	Микромеханизмы, микропривод, микро двигатели.
2	Оптомеханические микросистемы.	Микрооптика, оптомеханические интегральные схемы.
3	Биотехнические микросистемы.	Миниатюрные автономные системы для диагностики организма и замещения органов.
4	Микросистемы энергообеспечения.	Автономные миниатюрные источники энергии, микротурбины, микросистемы рекуперации энергии.
5	Сенсорные микросистемы.	Мультисенсоры, интеллектуальные сенсоры, сенсоры с обратной связью.
6	Микроаналитические системы.	Миниатюрные аналитические приборы.
7	Технологические микросистемы.	Микро реакторы, микроинструмент, микро регуляторы, микронасосы.
8	Миниатюрные роботехнические системы.	Автономные многофункциональные диагностические и технологические минисистемы для специальных условий эксплуатации.

Табл. 2. Матрица «Разработка - применение» объектов микросистемной техники



- 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;

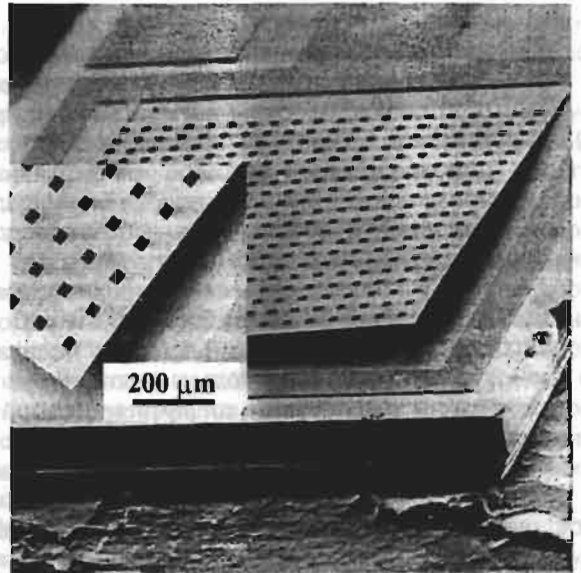
- разработка и создание интегрированных сенсоров с активной «исполнительной» обратной связью (Рис. 1.) на чувствительный элемент (например, электростатический подвес или возбуждение маятника, ротора в микроакселерометре или микрогироскопе);
- разработка и создание интегрированных сенсоров с аналитическими возможностями, то есть, 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 семидесятых годов с использованием элементов кремниевой техники (планарная конструкция с капиллярной колонкой, выполненной в виде спиральной канавки, выравненной в пластине кремния).

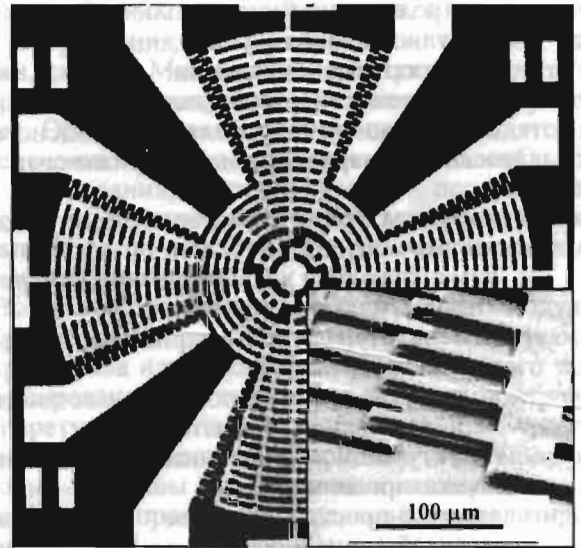
3.2. Аналитико-технологические микросистемы

Одним из перспективных направлений создания и использования микросистем является разработка аналитико-технологических микросистем, оперирующих со сверхмалыми 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 миниатюрных аналитико-технологических систем нового поколения характерно:

- блочно-модульная унификация технологических и контрольно-диагностических подсистем;
- полифункциональность и гибкость, определяющие многономенклатурность продукции и многообразие решаемых классов задач в условиях различных потребителей (химия, биотехнология, медицина, микроприборостроение, микромашиностроение);
- интегрированность аналитических и технологических модулей в пределах одного рабочего места, определяющее 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 информа-



а



в

Рис. 1. Фото маятника микроакселерометра (а) и ротора микрогироскопа (в) на основе композиции «карбид кремния — нитрид алюминия».

- ционного и энергетического обеспечения;
- локальность и прецизионность воздействия, что позволяет работать со сверхмалыми объемами и количеством веществ, уменьшить энергетические затраты, повысить эффективность и скорость протекания процесса;
- экологичность, определяемая возможностью работы со сверхмалыми количествами вредных и токсичных веществ и простотой ути-

лизации отходов;

- экономичность, определяемая групповыми принципами производства, используемыми при создании технологических микросистем, их низкой материало- и энергоемкостью, а также высокой эффективностью применения микротехнологических систем при работе со сверхмалыми количествами веществ.

Аналитико-технологические микросистемы являются новым видом оборудования для работы со сверхмалыми 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 вариационными признаками 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 замены ограниченного числа шаблонов при проведении литографических операций) без радикального изменения технологии, предопределяет внутреннюю гибкость кластерной аналитико-технологической микросистемы, что обеспечивает ее полифункциональность.

В рамках представленного ниже анализа выде-

лены некоторые основные технологические, контрольно-диагностические и транспортные модули, которые могут быть реализованы в составе миниатюрной аналитико-технологической микросистемы.

Модуль термической активации реализуется в двух модификациях:

- модуль прямого нагрева за счет протекания тока через рабочее вещество;
- модуль косвенного нагрева (вплоть до температур сублимации) с использованием встроенного микронагревателя.

Данный вид активации процессов, как правило, не является достаточно локальным и селективным.

Модуль оптической активации реализуется в двух модификациях:

- модуль инфракрасной (ИК) активации;
- модуль ультрафиолетовой (УФ) активации.

Модуль предназначен для индуцирования реакции за счет ИК и УФ излучения. Целью введения модулей оптической активации является селективная стимуляция реакций в рабочей среде за счет резонансного возбуждения колебательных степеней свободы молекул или ослабления химической связи. Активация молекул под действием излучения увеличивает скорость протекания определенных реакций, снижает температуру синтеза, изменяет адсорбционные и каталитические свойства веществ, подавляет активность определенного вида микроорганизмов, стимулирует процессы вынужденного излучения.

Модуль акустической активации. Целью введения модуля акустической активации является интенсификация акустохимических превращений и акустомеханических процессов в ультразвуковом поле, что обусловлено преимущественно кавитационными явлениями (перемешивание, коагуляция, ультразвуковое распыление и эмульгирование жидкостей, диспергирование твердых тел, распад молекул на радикалы и ионы).

Модуль электрокинетических процессов (электрофорез и электроосмос).

Электрокинетический модуль основан на активации процессов в электрическом поле и реализуется в двух модификациях:

- модуль электрофоретический сепарирующий;
- модуль электроосмотический транспортный.

Целью введения электрофоретического модуля является сепарация (диализ) частиц при движении их в электрическом поле. Разделение на фракции осуществляется за счет различия величин зарядов и масс их молекул, входящих в состав рабочей среды. Объекты разделения разнообразны (белки сыворотки крови, нуклеиновые кислоты, ионы металлов).

В основе работы электроосмотического модуля лежит движение жидкости по капиллярам или через пористые диафрагмы под действие электриче-

ского поля. Данный эффект используется при создании транспортных магистралей. Жидкая рабочая среда транспортируется по капилляру (магистрале) за счет электроосмотического эффекта при приложении к каналу разности электрических потенциалов.

Данные инжекционные системы в условиях микросистем обладают высокой скоростью транспортировки, эффективностью разделения сред и относительно низкими рабочими напряжениями.

Контрольно-диагностические модули. В состав контрольно-диагностических модулей входят сенсоры температуры, давления, потока, УФ и ИК-излучения. Контрольно-диагностические модули как правило интегрируются с технологическими и транспортными модулями.

Транспортные модули. Транспортировка веществ осуществляется за счет специальных транспортных магистралей (каналов, капилляров). Для обеспечения процессов перемещения рабочих веществ используются микроустройства (насосы, клапаны) в основе функционирования которых, лежат электрокинетические явления, электростатические, термо-, гидро- и пневмостатические эффекты.

Подача и сьем сигналов энергообеспечения управления и контроля на технологические, контрольно-диагностические модули и транспортные магистрали осуществляется за счет системы электрической коммутации, выполненной в планарном варианте [3] на основном или вспомогательном уровнях аналитико-технологической микросистемы с использованием традиционных процессов технологий микроэлектроники [4]. Схема аналитико-технологического реактора, его физическая структура и топология, а также элементы технологической реализации представлены на рис. 2.

3.3. Микроинструмент

Микроинструмент представляет собой комплекс сменных технологических микромодулей для выполнения различного рода операций с высокой локальностью воздействий. Комплекс состоит из микроустройств (Рис. 3), обеспечивающих на микроуровнях захват, подачу и отсос, нагрев, препарирование, стимуляцию и сверхлокальную (вплоть до наноуровня), диагностику. Это позволяет осуществлять операции дозирования, присоединения, удаления, модифицирования, измерения.

Фактически минимальная достаточность комплекса сменного микротехнологического инструмента, устанавливаемого в прецизионный микроманипулятор, определяется исходя из возможности локального проведения трех основных видов микроопераций: нанесения, удаления и модификация вещества. Для отдельных операций и спе-

цифических процессов возможно изменение базовых технологических микромодулей, оснащение их встроенными средствами контроля.

Микропинцет — микромеханический инструмент, работающий по принципу контролируемой деформации микробалок, обеспечивающий захват и удержание микрообъектов при их перемещении в пределах оперативного поля. Микропинцет может быть интегрирован с датчиками положения, усилия, деформации, а также средствами микроподогрева или другими инструментами, обеспечивающими специальные виды воздействий. Рабочие поверхности выполнены из (или защищены с помощью) материалов, устойчивых к химическим и механическим воздействиям. Возможны специальные формы исполнения микропинцета с микрозажимами и микрофиксаторами.

Микрокапилляр (дозатор) — устройство локальной микроподачи веществ в твердом (сыпучем), жидком или газообразном состоянии в рабочую зону микрообъекта для проведения микротехнологических операций очистки, микронанесения и травления, микрогальваники, склейки, заливки, смазки. Микрокапилляр должен работать в непрерывном и импульсном режиме на подачу или отсос. Общие технические требования сводятся к обеспечению: необходимой точности и локальности дозирования, контролируемости процесса нанесения и удаления, инертности материалов микрокапилляра по отношению к рабочим веществам и внешним реагентам.

Возможно усложнение конструкции модуля микроподачи за счет интеграции со средствами микронагрева или локального нетермического модифицирования, а также средствами контроля температуры, расхода и давления. Особые требования предъявляются к материалам микромодуля, которые должны обеспечивать надежность и безопасность проведения операций микродозирования.

Микроскальпель — инструмент для проведения прецизионных механических операций (резания, отделения, разрушения).

Общие технические требования сводятся к обеспечению: необходимой формы инструмента и особенно режущей кромки, необходимого усилия на кромке режущего или разрушающего инструмента, устойчивости режущего инструмента к механическим нагрузкам, химической инертности к рабочей среде.

Инструмент может дополнительно оснащаться микронагревателем для целей коагуляции или деформации (например, биологических тканей), микровибратором для возбуждения ультразвуковых колебаний, обеспечивающим лучшее качество реза, коагуляции или разрушения, средствами контроля температуры и усилия. Возможна модификация формы и размера рабочей части микроинст-

румента.

Микронагреватель — микроустройство для локального контактного, бесконтактного разогрева микрообъектов или рабочих веществ, проведения операций (пайки, сварки, склейки, отжига, коагуляции, деструкции, термического катализа).

Технические требования сводятся к обеспечению: необходимого диапазона рабочих температур, контролируемости температуры и процесса теплопередачи, локальности и равномерности

микроразогрева рабочей части, устойчивости к температурным и химическим воздействиям на воздухе и в активных средах.

Микрозонд — устройство для локального механического внедрения, не термического модифицирования микрообъектов (полем или излучением), а также их электрического, оптического, акустического зондирования. Основные технические требования сводятся к обеспечению: определенной формы и размера острия, электропроводности

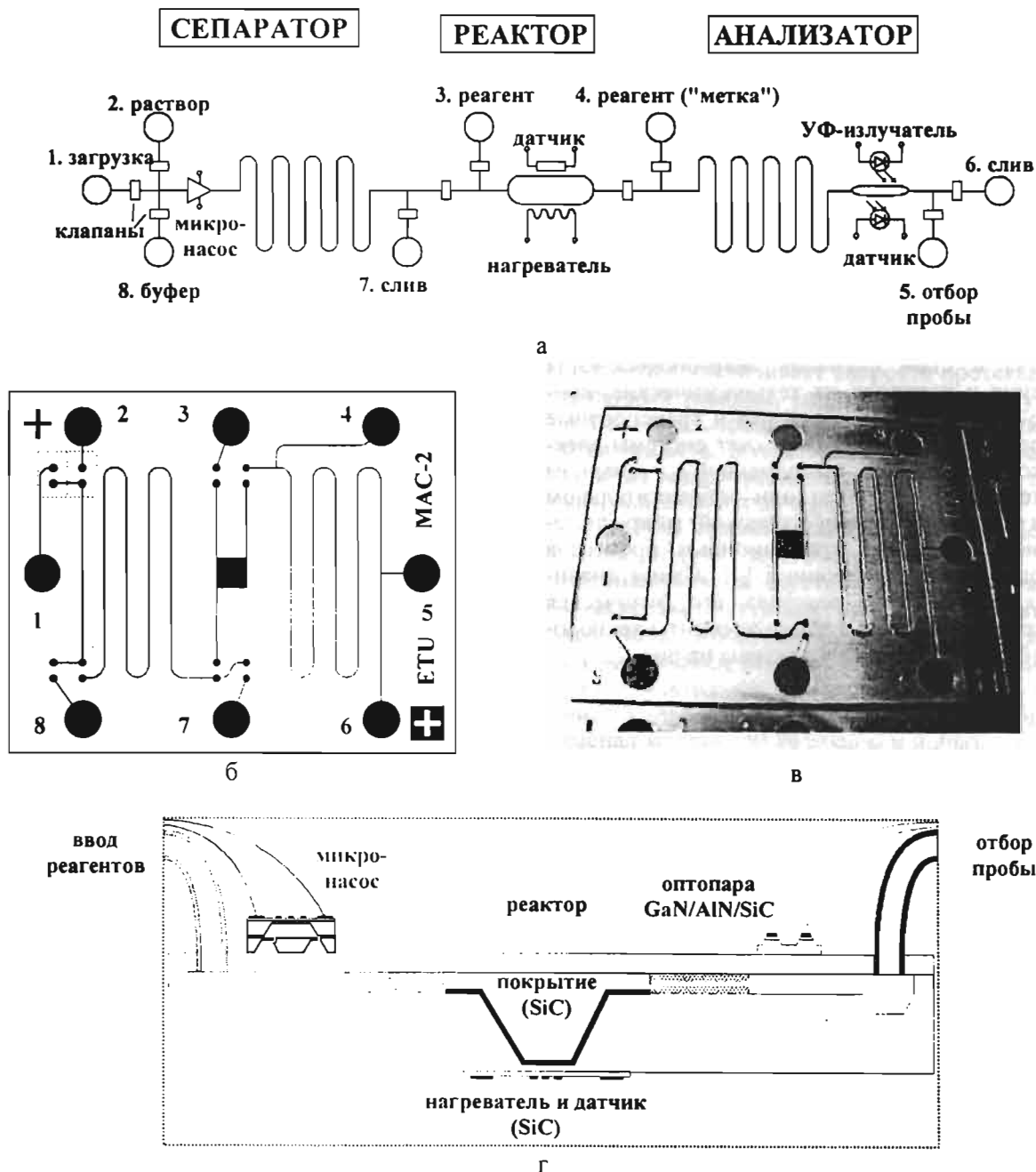


Рис. 2. Аналитико-технологическая микросистема: а — схема, б — топология, в — фотография чипа, г — сечение.

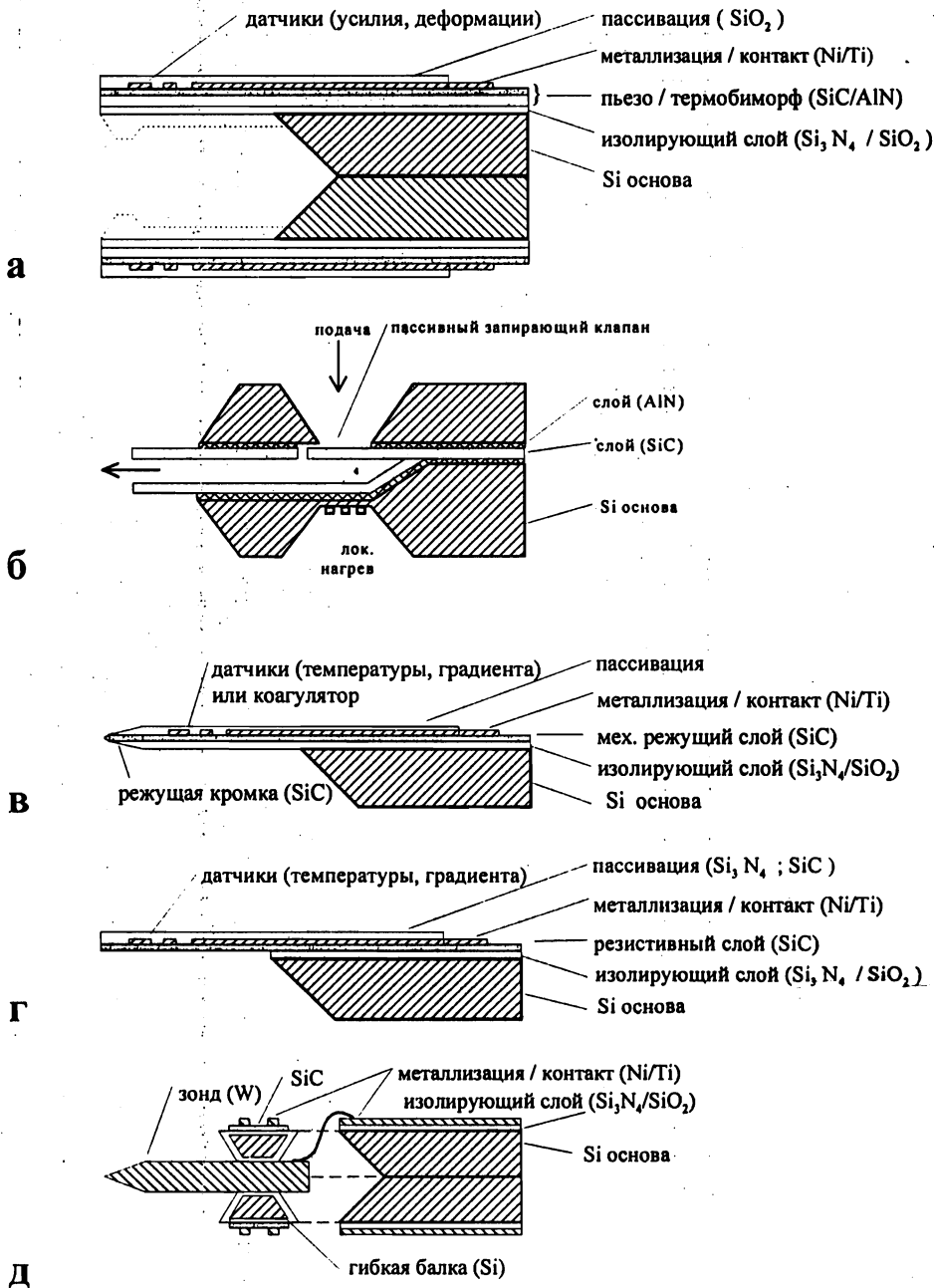


Рис. 3. Микроинструменты: а — микропинцет, б — микрокапилляр, в — микроscalпель, г — микронагреватель, д — микрозонд.

или оптической прозрачности зонда, механической и химической стойкости зонда. Микрозонд может быть выполнен с системой контроля усилия, электрическими или оптическими датчиками.

Базовый комплект микротехнологического инструмента способствует развитию как индивидуальных микроопераций и микроманипулирования

с объектами органической и неорганической природы, так и обеспечивает требуемую гибкость в работе технологических кластерных микросистем. В рамках представленных на рис. 3 конструкторско-технологических решений сделана попытка их унификации через создание базовых технологических и контрольно-диагностических модулей мик-

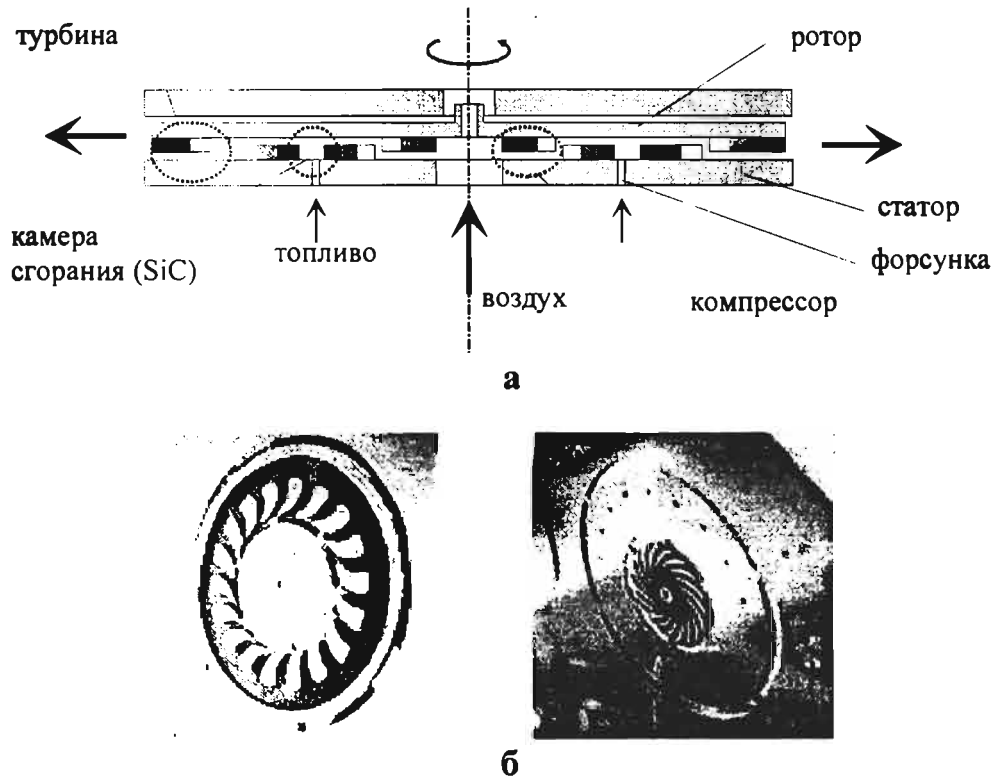


Рис. 4. Микротурбина на основе композиции "карбид кремния–кремний": а — сечение, б — фотография ротора.

роинструмента на основе широкого использования алмазоподобных материалов и технологических процессов изготовления изделий микроэлектроники методами глубинного микропрофилирования.

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» наукоемкие 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. гармонизации конструкторско-технологического единообразия и многофунк-

циональности 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 элементах 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 вы-

сокой пространственной и временной концентрации энергии при непосредственном контакте с рабочей средой, в том числе, химически активной;

– модернизация и адаптация оборудования и основных процессов (преимущественно корпускулярных) классической технологии изделий микроэлектроники к решению задач создания аналитико-технологических микросистем и микроинструмента.

3.4. Микромашины и минироботы

В условиях микросистемной техники вот уже более десяти лет ведутся целенаправленные работы в области создания микродвигателей. Преимущественно это электростатические двигатели, что связано с особенностями конструкции из-за технических ограничений в использовании третьего измерения. Создание эффективных электромагнитных двигателей стало возможным в связи с развитием так называемой «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 затем, при формировании обмоток двигателей, заполняются металлом или выполняют функцию 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 уникальными являются 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 габаритах микромашин в несколько миллиметров. На рис. 4 представлена схема микротурбины и фотография технической реализации ротора методом сухого глубинного травления. Наряду с этим для обеспечения «динамичного» и энергетически эффективного передвижения в пространстве ведутся активные работы по миниатюрным «плазменным» двигателям.

Особый интерес все ранее указанные разработки в области микромашин представляют для робототехнического направления. Минироботы, 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 робототехнических систем является возможность их применения для обеспечения безопасности и обороноспособности государства.

4. МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ БАЗИС МИКРОСИСТЕМ

Давая краткую характеристику материаловедческого базиса 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, алмазоподобный углерод), используемые для формирования:
 - несущих конструкций;
 - токоразводки;
 - смазки.
- «активные» (никель/титан, пермаллой, 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 удовлетворяться следующие критерии:

- 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; тепловую стойкость также характеризует 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 стереотип изготовления MEMS (наиболее развитого направления в области микросистемной техники) основан на широком использовании кремния — дешевого и доступного материала. В классической микроэлектромеханике, ориентированной на базовые кремниевые микротехнологии в настоящее время господствует структура «кремний на диоксиде кремния». Учитывая тот

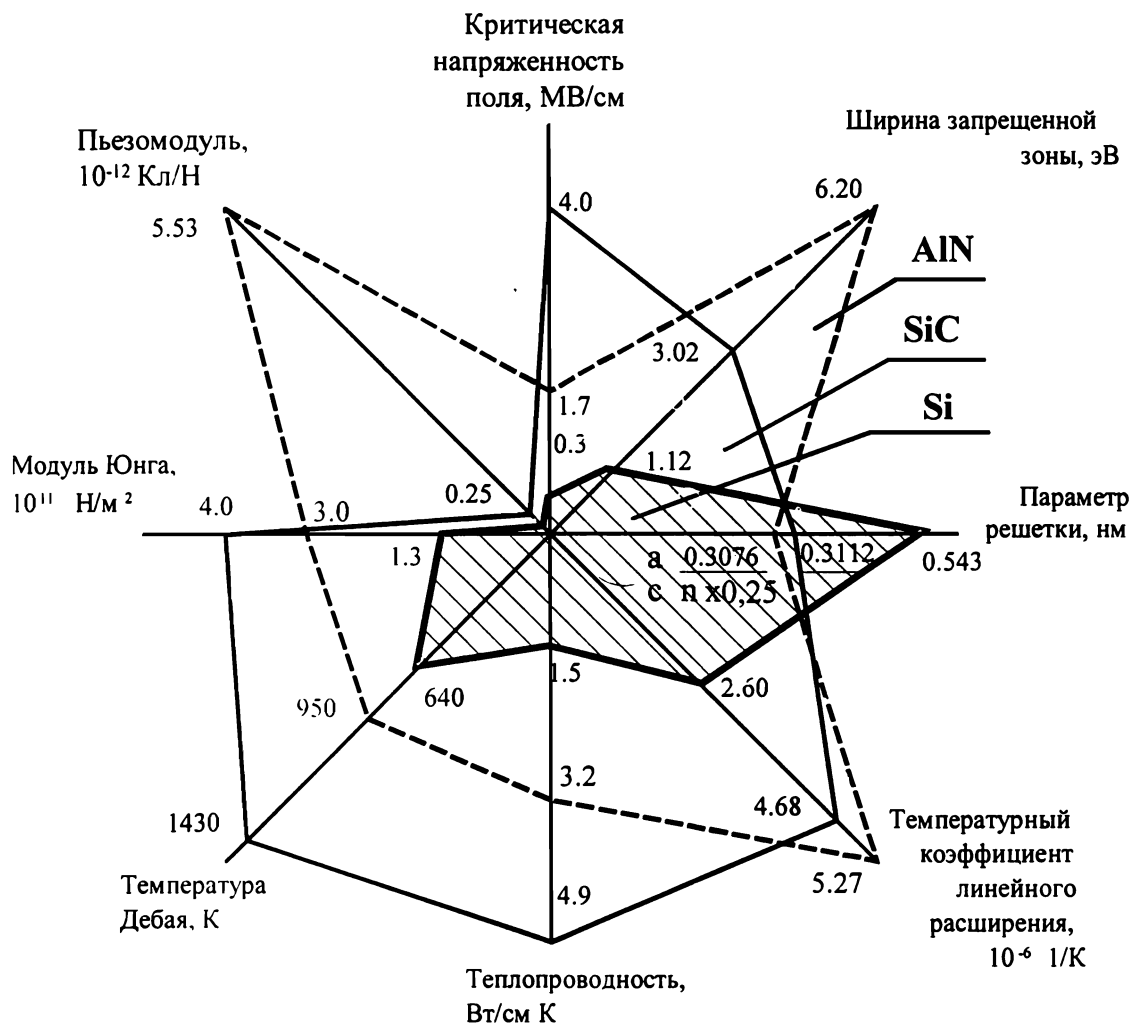


Рис. 5. Сравнение важнейших функциональных свойств кремния и композиции "карбид — нитрид алюминия" как базиса микроэлектромеханических систем.

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 — нитрид алюминия» [5]. Данная композиция (Рис. 5) 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).

Используя ранее отмеченные свойства, присущие композиции «SiC-AlN» на её основе могут быть созданы: сенсоры, аналитико-технологические микросистемы и микроинструмент (см. рис. 3), устойчиво работающий при повышенных температурах в агрессивных средах. Как показала практика композиция «SiC-AlN» является эффективным рабочим инструментом и при переходе на атомно-молекулярную технологию и диагностику. Зонды на основе SiC, AlN или композиции «SiC-AlN» могут выполнять функцию чувствительных и исполнительных элементов аналитико-технологических систем. Основными достоинствами таких нанозондов (Таблица 3), наряду с возможностью получения их с естественной огранкой, является механическая прочность, химическая стабильность, эмиссионные свойства, люминесцент-

Табл. 3. Зондовые активные элементы для нотехнологии и диагностики.

Материал	Структура, способ изготовления	Методы			Аналитические и технологические возможности			
		СТМ	АСМ	ОБМ	Акустические	Тепловые	Емкостные	Химическая стойкость
Вольфрам	поли и монокристалл вискеры	+	-	-	-	+	-	+/-
Кремний	монокристалл травление	+	-	(ИК+)	+/-	+/-	+/-	-
Кварц	монокристалл травление	-	+	+	+	-	+	+/-
Нитрид кремния	аморфный полиамид осаждение	-	+	+	+/-	-	+	+/-
Алмаз	монокристалл	+/-	+	+	+/-	+	+	+
Карбид кремния	монокристалл вискеры	+	+/-	+	+/-	+	+/-	+
Нитрид алюминия	монокристалл вискеры	-	+	+	+	+/-	+	+/-
Оптическое волокно	кварцевые волокна органические полимеры	-	-	+	+/-		-	+/-

СТМ — сканирующая туннельная микроскопия;

АСМ — атомно-силовая микроскопия;

ОБМ — оптическая ближнепольная микроскопия.

ная активность и оптическая прозрачность в широком спектральном диапазоне, вариация проводимости от диэлектрика до проводника, пьезоакустические характеристики и высокая термочувствительность.

Химическая и термическая стабильность SiC создаёт предпосылку к использованию данного материала в качестве активной рабочей среды, например, используемой в качестве микронагревателя, пассивного к кислороду в широком интервале температур и инертного по отношению к практически всем средам, включая агрессивные. Последнее обстоятельство важно не только при создании технологических и аналитических микрореакторов, но и при конструировании микромашин. Это относится в первую очередь к микротурбинам, которые могут создаваться объёмным глубинным травлением карбида кремния или кремния с использованием в качестве упрочняющих защитных покрытий SiC (см. рис. 4).

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 латеральные размеры в плоскости, т. е. возникает необходимость формирования трехмерных «3D» (D-dimension) структур.

В рамках технологии микросистем развиваются следующие технологические направления.

1. Групповая технология «поверхностной» микромеханики на основе процессов тотального нанесения и избирательного удаления слоев.
2. Групповые технологии «объёмной» микромеханики, реализуемые в виде:
 - технологии глубинного объёмного травления;
 - LIGA — технологии;
 - волоконной технологии.
3. Технология индивидуальной обработки методом корпускулярно-лучевого микропрофилирования.

Последние две технологии «объёмной» микро-

Табл. 4. Микросистемы для техники нового поколения

Направления разработок	Назначение	
	Общегражданское	Специальное
Сенсоры и трансдюсеры	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 катапультирования 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, микротурбины, 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 самодвижущиеся системы	
	Мини-роботы для диагностики: медицина, ядерная энергетика, химическая промышленность	Мини-роботы для разведки и боевых действий

механики позволяют активно развивать в конструкторско-технологическом плане треть измерение. Однако по технологическим приемам и оборудованию они существенно отличаются от традиционных операций планарного процесса, известного из кремниевой технологии.

В заключение данного раздела 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.

5. СОСТОЯНИЕ РАБОТ В ОБЛАСТИ «МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ» В РОССИИ

Создаваемая в настоящее время в наиболее развитых странах в рамках национальных программ продукция микросистемной техники (Таблица 4.) общегражданского и специального назначения ха-

рактеризуется:

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

В России специальная программа в области микросистемной техники отсутствует. В «Перечень критических технологий Федерального уровня», принятый в 1996 году, включено направление «Микросистемная техника и микросенсорика», однако работы в данной области до сих пор носят спонтанный характер, фактически отсутствует координация и интеграция научных потенциалов. До настоящего времени в России не было организовано ни одной специализированной конференции, посвященной проблемам технологии, конструирования и применения микросистем различного функционального назначения. Специализирован-

Табл. 5. Влияние объектов микросистемной техники на характеристики технических средств нового поколения

Характеристики технических средств						Направления разработок
Масса, габариты						Сенсоры и трансдюсеры
Энергопотребление						Микропривод и микромашины
Надёжность						Микро- и нанoinструмент
Безопасность						Аналитико-технологические микросистемы
Экологичность						Миниатюрные роботехнические системы
Мобильность						
Эффективность средств контроля и диагностики						
Эффективность исполнительных систем и технологических процессов						
Тиражируемость (массовость)						
Экономичность						
Социальная значимость						

+ — непосредственное воздействие, 0 — опосредованное воздействие

ные периодические издания в данной области также отсутствуют.

Имеющиеся в России научно-технический и кадровый потенциалы, а также технологическая и аналитическая базы позволяют приступить к скоординированным действиям, как в области научных исследований и образовательного процесса, так и в сфере промышленного использования объектов микросистемной техники.

Влияние объектов микросистемной техники на характеристики технических средств нового поколения, создаваемых с использованием микросистем иллюстрирует Таблица 5.

Интенсификация работ в области микросистемной техники способствует:

- сохранению ряда научно-педагогических школ;
- эффективному использованию промышленного потенциала оборонных отраслей про-

мышленности;

- развитию малых и средних научно-производственных фирм;
- созданию новых рабочих мест для высококвалифицированных кадров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системная интеграция классических принципов электроники, физики твердого тела, жидкости и газа, механики, оптики, электротехники, теплотехники, химии и биологии, но реализуемая в конструктивных решениях на микроуровне, с использованием материаловедческой и технологической базы микро- и оптоэлектроники и биотехнологии обеспечивает создание миниатюрных чувствительных, исполнительных, технологических и аналитико-диагностических приборов и устройств нового поколения.

Общепризнанно, что направление «микросистемная техника» имеет приоритетное значение для оборонной промышленности, обеспечения ядерной и экологической безопасности государства, медицинского обслуживания населения.

Страны, фактически определяющие научно-технический прогресс, используют по отношению к направлению «микросистемная техника» понятие «критические технологии», тем самым придавая программам исследований и разработок в данной области статус «национальных» и «приоритетных».

Отсутствие целенаправленного финансирования определяет разрыв между отечественной и мировой технологической культурой в области микросистемной техники, который стремительно нарастает и отставание России сказывается уже на стратегических направлениях.

Микромашины, механизмы и приборы микросистемной техники по стоимости, надежности, ресурсу, массогабаритным показателям, энергопотреблению, широте и эффективности применения настолько превосходят традиционные аналоги, что созданная без использования микросистемной техники продукция специального и гражданского назначения в ближайшем будущем может оказаться неконкурентоспособной.

Определяя возможное влияние направления «микросистемная техника» на научно-технический и образовательный потенциал России, можно отметить, что данное направление может быть охарактеризовано следующим образом:

- наукоемкое направление, способствующее сохранению и развитию научно-технических и педагогических школ;
- междисциплинарное направление, обеспечивающее интеграцию специалистов различного профиля;
- направление, имеющее реальный научно-производственный и образовательный базис;
- направление, обеспечивающее минимизацию затрат на материалы и развитие научно-учебной базы;
- направление, способствующее сохранению, развитию и эффективному использованию оборонного комплекса.

Представляется, что 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.

Автор выражает благодарность всем сотрудникам Центра микротехнологии и диагностики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, труд которых позволил практически реализовать объекты микросистемной техники, представленные в настоящей статье.

Автор благодарит директора Института Аналитического приборостроения РАН профессора Комьяка Н.И. за активную поддержку данного направления, позволившую в 1998 году заслушать и обсудить вопрос развития микросистемной техники на Президиуме Санкт-Петербургского Научного Центра РАН.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники гражданского назначения», подпрограмма «Технологии, машины и производства будущего».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Peterson K.E.* //Proc. 1EEE.1982, № 70. P. 420-457.
2. *Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication.* Ed. P. Rai-Choudhury. 1997. USA. SPIE Optical Engineering Press. 692p.
3. *Sprangers D., Prak A., Leeuwis H.*//MST News. 1997. № 22. P.15-16.
4. *Daniel J.H., Igbal S., Milington R.B.*//Sensors and Actuators. A. Physical. 1998. V.71. P.81-88.
5. *Korlyakov A.V., Luchinin V.V.*//Transactions of 4 International High Temperature Electronics Conference. 1998. USA. Albuquerque. V.1. P.250-252.

MICROSYSTEMS ENGINEERING. DEVELOPMENT AND TRENDS

V.V. Luchinin

Microtechnology and Diagnostics Center. St.Petersburg State Electrotechnical University

The paper outlines principal concepts and trends of scientific and technological development of microsystem engineering as a basis for future generations of instruments, machines and technologies. Key lines of the microsystem engineering development have been considered including sensors and transducers, analytical and/or technological microsystems, micro- and nanoinstruments, micromachines, and self-contained miniature power supply systems. A conclusion has been drawn about the "revolutionary" character of the microsystem technology impact upon new generations of equipment.