МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА И МИКРОСЕНСОРЫ

УДК 621.382.002

Метод самоформирования в технологии микросистем

В.Д.Вернер, А.Н.Сауров

Рассмотрены основные тенденции развития микросистемной техники, ее связь с технологией микроэлектроники. Показана эффективность применения метода самоформирования для создания базисных структурных микросистем.

Широко используемый за рубежом термин "информационное общество" практически означает переход в XXI век к новым принципам организации деятельности человека во всех сферах. Уровень освоения новых технологий определяет уровень оборонной, технологической и экономической независимости и безопасности.

Решение конкретной задачи обычно достигается созданием систем необходимого уровня, имеющих информационное обеспечение достаточного объема и качества, эффективное управление и результативное исполнение задач системы. Не нарушая целостности системы, ее информационная и управляющая части должны иметь минимально необходимые размеры. В технических системах это достигается использованием микроэлектроники и микросистемной техники.

Микросистемная технология (МСТ) относится к числу "критических" технологий, т.е. технологий, направленных на обеспечение военной и экономической независимости страны и конкурентоспособности продукции на мировом рынке. МСТ относится к числу технологий двойного назначения и включает элементы ряда других базовых технологий двойного назначения (технологии микроэлектроники, опто- и акустоэлектроники, лазерные, прецизионные и механотронные технологии, генодиагностика и т.д.).

МСТ насчитывает около 20 видов технологий изготовления и сборки деталей и элементов с линейным размером от нескольких микрометров до нескольких сантиметров в микросистему (МС) на одной плате или в одном объеме порядка 1 $см^3$.

МС содержит целиком или частично три основных компонента: приемник воздействия (информации) - чувствительный элемент, преобразующий внешнее воздействие в электрический или оптический сигнал; устройство обработки, хранения и передачи сигнала в аналоговой или цифровой форме; устройство, преобразующее сигнал в воздействие на внешние объекты - микроактюаторы (преобразователи). Примером МС с использованием всех трех компонентов может быть микроробот и микролаборатория на "чипе" (кристалле, подложке). Примером МС с использованием двух компонентов могут служить микродатчик, микроакселерометр, микрореле, микромотор, микродвигатель и т.д.

Малые размеры компонентов МС обеспечивают их основное преимущество - малые весогабаритные показатели. Подобно изделиям микроэлектроники, детали и компоненты МС изготовляются по групповой технологии, что обеспечивает высокую воспроизводимость параметров и низкую стоимость при массовом производстве.

© В.Д.Вернер, А.Н.Сауров, 2000

Использование бездефектных монокристаллических и других монолитных материалов обеспечивает высокую надежность МС и возможность использования их в экстремальных условиях эксплуатации. Широкий спектр конструктивных элементов МС и применяемых при их изготовлении материалов обеспечивают широкую номенклатуру МС: минимикроботы; минилетательные аппараты; отдельные узлы микроботов; блоки позиционирования; гироскопы; системы оптического наблюдения и контроля в разных диапазонах длин волн; микрооптомеханические приборы для космоса и авиации; микродатчики (физические, химические, биологические); системы мониторинга и контроля на их основе; акселерометры для систем управления, контроля, диагностики и гироскопии; микродвижетели; микроэлектромоторы; микротурбины; микроэлектро- и оптоключи; переключатели, реле; микролаборатории; микроэндоскопы, микроинструмент, биочипы.

МСТ не имеет устоявшейся терминологии, стандартизация МС только начинает формироваться. В связи с этим введем классификацию изделий МСТ (рис.1).

По принципу функционирования. Микроэлектромеханические системы (МЭМС) - наиболее устоявшийся термин. Мы будем относить к МЭМС изделия, в которых имеются механические перемещения или деформации.

Приборные микросистемы (ПМС) - их функционирование связано с электронными, оптическими или другими физическими процессами, а также химическими и биологическими процессами, происходящими на чувствительном элементе МС.

По принципу использования. Субсистемные МС, входящие в качестве составной части макросистемы изделия (например, транспортные, диагностические и т.д.).

Индивидуальные/автономные МС могут выполнять заданные функции самостоятельно (например, микроботы, имплантированный дозатор лекарств и т.д.).

По принципу технологии изготовления. Поверхностная технология, объемная (трехмерная) технология.

По принципу организации системы. Гибридная - сборка на плате разнородных элементов; интегральная - создание всех компонентов в едином технологическом процессе.

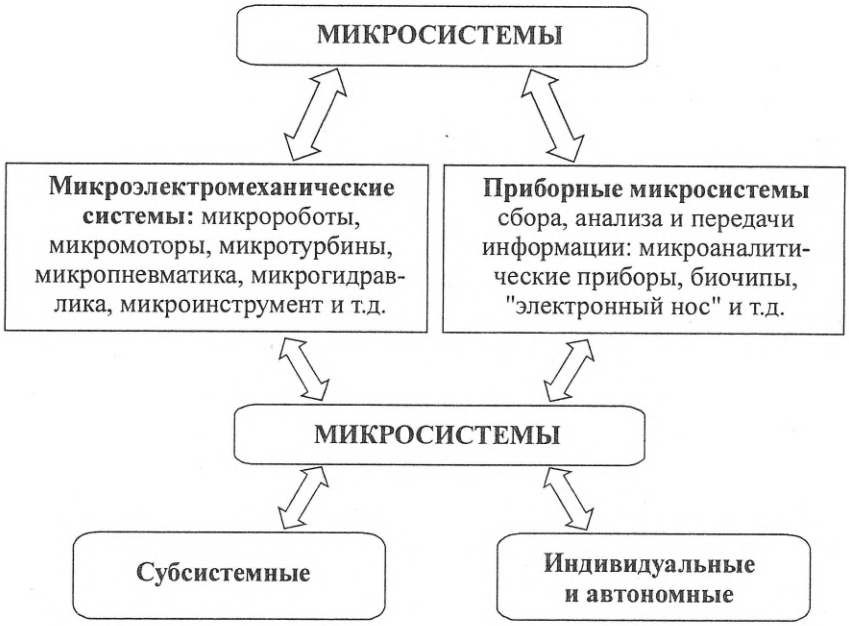

Рис.1. Классификация изделий МСТ

За рубежом перспектива широкого применения МС способствовала появлению ряда национальных и корпоративных программ по МС, финансируемых и из военных бюджетов.

Интенсивный рост числа фирм, выпускающих МС или применяющих их в своих изделиях, привел к увеличению объема мирового рынка МС (с темпом 18 - 20% в год), который по разным оценкам достигнет к 2002 г. 35 - 40 млрд долларов США при общем числе изделий около 7 млрд штук. О динамичности рынка МС как части рынка изделий высоких технологий свидетельствует также снижение цены типовых изделий МСТ в среднем в 2,6 раза за 5 лет при росте числа изделий в 4,3 раза.

Показатели динамики сложившихся секторов рынка МС (периферийные устройства вычислительной техники, МС для медицины, транспорта, телекоммуникаций и т.д.) не уступают, а в ряде случаев и превосходят показатели рынка изделий микроэлектроники, вычислительной техники и телекоммуникаций. В современной МСТ существуют две главные проблемы: снижение времени изготовления прототипов и уменьшение цены рыночного изделия. Последнее достигается только при массовом производстве.

Появление МСТ неразрывно связано с технологией массового производства - микроэлектроникой [1, 2]. Наиболее распространенной формой производственной линии МСТ является соединение типовой технологической линии микроэлектроники (например, КМОП-технологии, т.е. планарной технологии) с дополнительным набором специфических технологических операций для создания трехмерных структур. В отличие от технологии микроэлектроники, где современное массовое производство должно использовать субмикронные топологические нормы, в области МСТ минимальные топологические нормы от 4 до 1 мкм. Это позволяет создать технологическую линию МСТ стоимостью на два - три порядка ниже стоимости субмикронного производства ИС (1 - 3 млрд долларов США). Она доступна для малых фирм и стран, которые никогда не были в числе лидеров микроэлектроники (Швейцария, Дания, Норвегия и т.п.).

Сохранившаяся в России технология микроэлектроники начала 90-х гг. вполне может быть использована для МСТ [1].

Доступность МСТ - одно из ее преимуществ. Общая тенденция снижения топологических норм относится и к МСТ. Здесь также следует ожидать переход в нанометровый диапазон топологических норм. При исследованиях МС в НПК "Технологический центр", начавшихся в середине 90-х гг., из всех классов микросистем были выделены интегральные приборные микросистемы, которые включают в свой состав компоненты, изготавливаемые с применением в основном групповой технологии и процессов, подобных используемым при изготовлении интегральных схем, что позволило реализовать все компоненты микросистемы на одном кристалле в едином технологическом цикле (рис.2). Эта особенность отличает интегральные микросистемы от других микросистем, которые предусматривают использование гибридной сборки или других видов не групповой технологии для создания конечного изделия. На рис.3 приведена схема взаимосвязи интегральных микросистем с остальными отраслями полупроводниковой групповой технологии [3].

Как уже говорилось, основой технологического базиса для производства интегральных микросистем является микроэлектронная технология. Развитие и совершенствование микроэлектронных технологий позволяет не только повысить степень интеграции при создании схем обработки и преобразования сигнала интегральных микросистем, но и использовать основные технологические процессы обработки, конструктивно-технологические методы и приемы в технологии изготовления ИС для создания миниатюрных датчиков и микроисполнительных устройств. Однако во многих

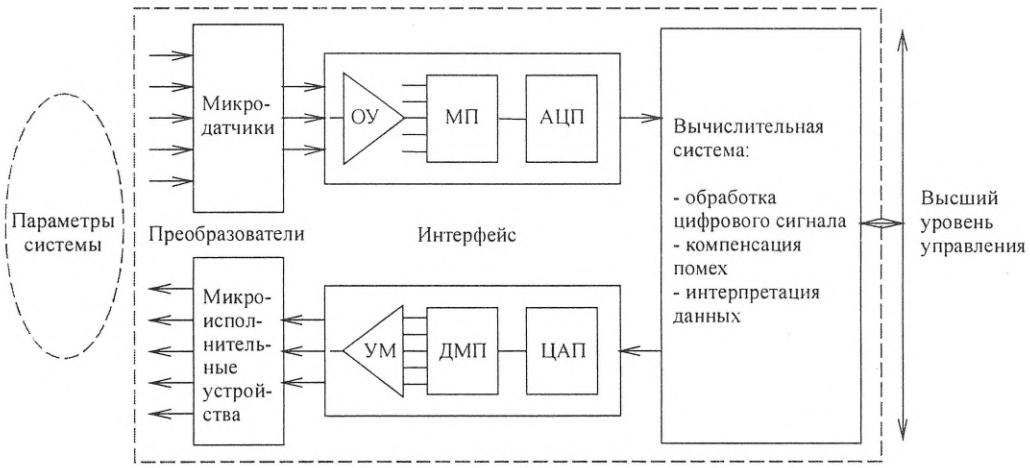

Рис.2. Организация интегральной микросистемы (ОУ - операционный усилитель; МП - мультиплексор; АЦП - аналого-цифровой преобразователь; УМ - усилитель мощности; ДМП - демультиплексор; ЦАП - цифроаналоговый преобразователь)

Рис.3. Связь интегральных микросистем с видами микротехнологии

случаях требуется создание отдельных элементов сенсоров и исполнительных устройств с размерами в несколько десятков или сотен микрон и с характерными зазорами, составляющими доли микрона, а также использующих в своем конструктивно-технологическом базисе существенную трехмерность создаваемых структур. Это затрудняет или делает невозможным использование методов традиционной литографии для создания областей микросенсоров и исполнительных компонентов интегральных микросистем.

Данная задача, в части конструкции и технологического цикла изготовления сенсорных и исполнительных компонентов интегральных микросистем, эффективно решается использованием методов самосовмещения и самоформирования, нашедших широкое применение в технологиях изготовления СБИС [4, 5]. Эти методы позволяют реализовать основные преимущества микроэлектронных технологий при изготовлении компонентов интегральных микросистем, а именно одностороннюю, высокопроизводи-

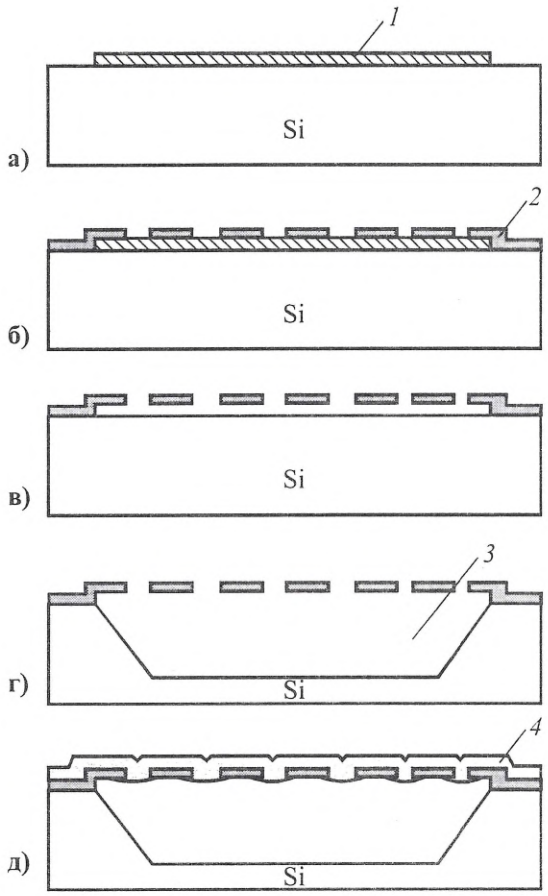

Рис.4. Структурная схема технологического маршрута изготовления диэлектрической мембраны с использованием МСФ: а - формирование опорного контура на основе ФСС (*1* - опорный контур на основе ФСС); б - формирование матрицы отверстий в слое Si_xN_y (*2* - слой Si_xN_y); в - самосовмещенное локальное удаление опорного контура; г - формирование трехмерной полости в монокремнии, самосовмещенной с мембраной (*3* - вытравленная в кремнии полость); д - самосовмещенное заполнение матрицы отверстий слоем SiO_2 (*4* - слой низкотемпературного SiO_2)

тельную, групповую обработку пластин, возможность уменьшения отдельных элементов структур вплоть до нескольких десятых микрона с сохранением их характеристик, хорошую совместимость с интегральной технологией изготовления СБИС.

Комплексное применение конструктивно-технологических приемов метода самоформирования для создания элементов интегральных микросистем позволяет получать самосовмещенные тонкие мембраны миниатюрных чувствительных элементов датчиков давления [6] и микрофонов [7], кремниевые трехмерные микронасосы, клапаны, каналы, полости [8]. Для изготовления данного класса микроисполнительных устройств широко используется комбинация приемов метода самоформирования, таких как самосовмещенное локальное замещение слоев, модификация границ элементов и областей структуры.

Разработанная структурная схема технологического маршрута, представленная на рис.4, позволяет создавать тонкие диэлектрические мембраны микросенсоров в едином технологическом цикле и на одном кристалле со схемами преобразования и обработки сигнала. Собственно для реализации самой трехмерной мембранной структуры требуется два фотолитографических процесса.

Вначале на поверхности пластины создается опорный контур на основе слоя фосфорно-силикатного стекла (ФСС), который в дальнейшем используется как вспомогательный слой (рис.4,а). После конформного низкотемпературного осаждения слоя нитрида кремния формируется фоторезистивная маска и проводится анизотропное плазменное травление незащищенных участков слоя нитрида кремния. В результате чего формируется матрица отверстий в слое нитрида кремния (рис.4,б) для последующего создания трехмерной полости в кремнии. Затем используется конструктивно технологический прием метода самоформирования, основанный на самосовмещенном локальном замещении слоя фосфорно-силикатного стекла на свободное пространство под слоем нитрида кремния. Данный прием выполняется с помощью селективного к кремнию и нитриду кремния жидкостного химического травления слоя фосфорно-силикатного стекла через матрицу отверстий (рис.4,в). После чего с помощью анизотропного травления формируется полость в монокремнии (рис.4,г), самосовмещенная относительно границ периметра слоя нитрида

кремния. Затем проводится осаждение слоя оксида кремния, который закупоривает все отверстия, сформированные в слое нитрида кремния (рис.4,д). В конечном итоге формируется тонкая диэлектрическая мембрана.

На основе данного типа мембран можно реализовать микросенсоры давления, если сформировать на ее поверхности поликремниевые тензорезисторы. Тонкую мембрану можно использовать как клапан в микронасосах с электростатическим управлением, а также она является незаменимым конструктивным элементом для создания на ее основе минимикрофонов [8].

Метод самоформирования в ряде случаев дал возможность преодолеть субмикронный барьер критических размеров в микроэлектронике без существенных затрат на фотолитографию. Проведенный анализ и частичная экспериментальная проверка применимости метода самоформирования в МСТ доказали его эффективность и в этой новой области микротехнологий.

Литература

1. ***Вернер В.Д., Сауров А.Н., Чаплыгин Ю.А., Шелепин Н.А.*** Микросистемы и биочипы // Электронные компоненты. - 2000. - № 1. - С. 32 - 36.

2. ***Галушков А.И., Зимин В.Н., Чаплыгин Ю.А., Шелепин Н.А.*** Кремниевые интегральные датчики физических величин на основе технологии микроэлектроники // Электронная промышленность. - 1995. - № 4-5. - С. 95 - 101.

3. ***Fluitman J.*** Microsystems technology: objectives // Sensors and Actuators. - 1996. - A56. - P. 151 - 166.

4. ***Сауров А.Н.*** Методы самоформирования в микроэлектронике // Изв. вузов. Электроника. - 1997. - № 5. - С. 41 - 47.

5. ***Сауров А.Н.*** Графическая модель метода самоформирования интегральных структур // Изв. вузов. Электроника. - 1998. - № 1. - С. 61 - 70.

6. ***Dudaicevs H., Kandler M.*** Surface micromachined pressure sensors with integrated CMOS read-out electronics // Sensors and Actuators A. - 1994. - P. 157 - 163.

7. ***Z.Li et al.*** Design and fabrication of singl wafer silicon condenser microphone using corrugated diafragms // Journal of microelectromechanical Systems. - 1996. - Vol. 5. - № 3. - P. 197 - 204.

8. ***O.B.Zou et al.*** Singl-chip fabrication of integrated fluid systems (IFS) // IEEE. - 1998. - P. 448 - 453.