

УДК 621.37/39:534

**П.Ф.ПОЛЯКОВ¹, И.Ш. НЕВЛЮДОВ², В.А. ПАЛАГИН², В.А. ХОРУНЖИЙ²,
В.П. ПОЛЯКОВ¹, Я.Ю. КОРОЛЕВА²**

¹ *Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Украина*

² *Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина*

МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Рассмотрены основные технологические методы изготовления микроэлектромеханических систем и особенности использования КМОП-технологии при изготовлении изделий микросистемной техники. МСТ наряду с нанотехнологиями является революционным направлением развития техники 21 века.

микросистемная техника

Формулирование проблемы

Цель статьи. Целью программы управляемых биологических систем является создание прототипов биосистем как платформы для разработки перспективных биосистем поиска, обнаружения, идентификации, измерения. В военных целях планируется организация исследований по управлению биологическими объектами биотическими методами через физическое, тепловое, нейронное, химическое стимулирование, внедрение управляющих материалов и/или устройств. На естественные биоорганизмы предполагается возложить функции охраны и поиска целей в условиях неизвестной окружающей среды, мелкие существа могут запускаться в развалины зданий в поисках жертв стихийных бедствий, быть запущены по трубам с микрокамерами для их обследования и т.д.

Основная часть исследований

Объединение механических и электрических (электронных) частей в единую систему было плодотворным решением в технике, известной под названием электромеханика. По мере развития этого направления (миниатюризации электронных систем управления и включения в состав систем информа-

ционной части – сенсоров и программного обеспечения) она превратилась в мехатронику [1], которая обеспечила существенное повышение надежности за счет автономности подсистем и узлов устройств, передачи ряда функций от механики – электронике или программному обеспечению, децентрализации управления, уменьшения длины линий связи, а также использования других принципов проектирования изделий мехатроники.

Следующим логическим шагом совершенствования электромеханических конструкций и систем для многих случаев применения стала микроминиатюризация механических узлов и деталей. В современных разработках – это MEMS, MOEMS, MST, systems in chip (или МЭМС, МОЭМС, МСТ), системы на кристалле микро -(опто)- электромеханические системы, микросистемная техника, микротехника, микромеханика, микроприборостроение, микроэлектроника. Все перечисленные названия – близкие по смыслу определения одной и той же техники, но в строго определенном значении не тождественны. Наиболее общим из них является МСТ, которое подразумевает интеграцию на кристалле микроэлектронных, микромеханических устройств, информационной и измерительной подсистем. При этом в основе развития и практического использования

технологий микросистемной техники лежат технико-экономические факторы (ожидаемые в будущем преимущества). Известно, что массовое производство микросхем дешево. В то же время классические промышленные технологии (механообработка, литье, технология переработки пластмасс, фотонно-корпускулярные методы обработки и др.), используемые при изготовлении традиционных электромеханических устройств, характеризуются резким увеличением стоимости производства по мере снижения линейных размеров и роста точности изготовления деталей механических систем. Этим и обусловлено стремление к изготовлению электронной и механической части в едином технологическом процессе, что при массовом производстве значительно снизит стоимость всего электромеханического устройства.

«Классические» изделия МСТ должны обеспечивать минимальные габаритно-массовые характеристики (ГМХ), низкое энергопотребление, минимальную стоимость, высокую надежность и стабильность параметров, массовость производства и широкую номенклатуру модификаций. Достаточно четким определением МСТ в современном понимании можно считать формулировку В. В. Лучинина [2] с дополнениями авторов (в скобках): «Микросистемная техника – это научно-техническое направление, целью которого является создание в ограниченном объеме твердого тела или на его поверхности микросхем, (механизмов микромеханики и функциональной электроники) в виде упорядоченных композиций областей с заданными свойствами, структурой (и связями между ними), статическая или динамическая совокупность которых обеспечивает реализацию процессов генерации, преобразования, передачи энергии и движения в интеграции с процессами восприятия (измерения) и обработки, трансляции, сохранения информации (и общения) при выполнении запрограммированных операций и действий в определенных условиях эксплуатации с

необходимыми функциональными, временными и надежностными показателями».

Существуют аналитические материалы, отстаивающие необходимость совместного рассмотрения микро- и нанoeлектромеханики [3], потому что объединение интеллектуальных возможностей электроники и роботизированных устройств, оснащенных сенсорами и способных к перемещению и общению, выводит человеческое общество на совершенно новый этап развития. Эти направления дополняют, способствуют развитию друг друга и выявлению эффектов, недостижимых в отдельных применениях МЭМС и НЭМС, а зачастую просто неразличимы, хотя физико-химические процессы и принципы действия устройств разных диапазонов размеров существенно различаются. По линейным размерам компонентов изделия разной степени миниатюризации принято делить следующим образом [4 – 8]: электромеханика и мехатроника (механические компоненты) >1 мм; МЭМС, МОЭМС, МСТ – 1...1000 мкм; НЭМС (нано- ЭМС), нанотехнологии (НТ) – 0,1 (1,0)...100,0 нм. Известно, что все атомы имеют размеры порядка 0,1 нм, а наибольший диаметр у урана ~0,22 нм. Среднее расстояние между атомами в молекулах порядка 0,15 нм. Наноструктуры находятся на границе (или разделе на шкале размеров) самых малых из созданных человеком устройств и наибольших молекул живых организмов. МЭМС и НЭМС рассматривают все свойства структур в микро- и наномасштабах независимо от того, какими они являются: химическими, физическими (электромагнитными, оптическими, квантовомеханическими), биохимическими, биологическими. МСТ и НТ признаны приоритетными направлениями техники в 21 веке во многих странах мира: США, Европейский союз, Япония, Китай, Бразилия, Россия [3, 9 – 13]. Национальной нанотехнологической инициативой США (долгосрочная приоритетная комплексная программа, принятая в 2000 г.), НТ рассматривается как эффективный ин-

струмент, способный обеспечить лидерство США в первой половине текущего столетия (государственное финансирование на 2005-2008 г.г. 3,7 млрд.долл.), новейшие технологии этих направлений являются фундаментом научно-технической революции 21 века, сравнимым и даже превосходящим по своим масштабам преобразования, вызванные научными открытиями 20 века. Эти преобразования произойдут в промышленности и на транспорте, в военной технике, медицине, экологии, науке и образовании, социальной сфере. МЭМС-изделия известны более пятидесяти лет, но их промышленное производство отставало. Только 15 – 20 лет назад ряд сенсоров нашел широкое применение в автомобильной технике с объемами использования по несколько миллионов штук в год. Известно, что только массовое производство может обеспечить низкую стоимость изготовления изделий. Поэтому на этапе разработки, изготовления опытных образцов трудно обеспечить экономическую эффективность работ, необходима государственная поддержка исследований, создания экспериментальной базы и материально-технического производства. В общем случае в составе МСТ можно выделить следующие составляющие: источники энергии и передачи движения – активаторы (актюаторы), электронные подсистемы (системы на кристалле (СНК), микропроцессоры, ЗУ, микроконтроллеры), сенсоры, объемные электрорадиоэлементы с управляемыми параметрами, системы внутренних межсоединений и телекоммуникационных связей. Каждая система может использовать для своего функционирования разные эффекты (электромагнитные, оптические, механические, молекулярно-квантовые, мезаскопические, химические, биохимические, биологические). Электронные подсистемы МЭМС – это интеллектуальные устройства, которые реализуются на базе универсальных микросхем (СНК, микропроцессоры, память, АЦП, ЦАП, ОУ и др.), на базе микросхем, которые программируются изготовителем микро-

схем, а также программируемых потребителем и на базе заказных микросхем, разработанных специально для конкретных устройств. Основной идеей развития проектирования заказных микросхем является использование в проекте готовых сложно-функциональных (СФ) блоков или IP (intelligent property)-блоков. Так как в технологиях МЭМС по сравнению с микроэлектронными новыми элементами являются микроминиатюрные подвижные механические детали и узлы, перечислим наиболее употребляемые из них.

Это – балки, валы, волноводы, двигатели, дисплеи, дозаторы, зажимы, затворы, зеркала, зубчатые колеса и передачи, кабели, консоли, линзы, мембраны, микроманипуляторы, микророботы, оптомодуляторы, оптосоединители и коммутаторы, пинцеты, подшипники, позиционеры, полосковые линии, поршни, пружины, резонаторы, сенсоры физических величин, столы, струны, транспортеры, фильтры и др. В настоящее время уже определился ряд типовых технологических методов изготовления МСТ (около 20), которые используют достижения различных отраслей фундаментальной науки и представлены на рис. 1.

Среди этих методов в первую очередь необходимо отметить распространение традиционной полупроводниковой КМОП-технологии на изготовление микромеханических устройств на кристаллах кремния, с использованием подложки одновременно как конструкционного материала для механических деталей и сборочных единиц и как материала для электронных схем. Но если в обычной полупроводниковой технологии структура материала изменяется лишь в поверхностном слое, то для МЭМС необходимы трехмерные (3D) структуры, которые вызывают необходимость совершенствования стандартных процессов. Такие технологические процессы можно характеризовать как направление «сверху-вниз» [8], т.е. от больших размеров к меньшим за счет улучшений исходной технологии. К таким технологиям относятся, в частности, процессы LiGa и

HRPSS [14, 15], которые базируются на процессах литографии, гальваники и синхротронной обработки высокоэнергетическими лучами. Один из вариантов LiGa технологии приведен на рис. 2.

Для получения микромеханических деталей используются следующие методы: микрообработка фрезерованием, алмазная и микроэрозионная обработка, методы формовки (микролитье под давлением, штамповка, спекание) [16], волоконная технология [17], корпускулярно-фотонное формообразование (лазерное осаждение из газовой фазы – LPCVD, испарение, фотостимулирование полимеризации, обработка ионным лучом) [18], 3D-МЭМС термокомпрессионная сварка [19], использование биологических объектов в качестве микромеханических деталей, вакуумная технология автоэмиссионных углеродных нанотрубок, нанотехнологии с использованием наноперьевой литографии [4], нанопринтинг и процессы химического распознавания, самоорганизации и самосборки [9], создание подвижных компонентов биологическими методами на основе ДНК-структур [20], использования оболочек углеродных, кремниевых нанотрубок и фуллереноподобных материалов [21] с их заполнением газами, жидкостями, твердыми веществами, фотонных кристаллов [3] и др. Относительно методов получения МЭМС необходимо отметить перспективность только тех из них, которые обеспечивают групповое изготовление и самосборку, саморепликацию, самоорганизацию, распознавание, потому что только эти свойства могут обеспечить их массовое изготовление и низкие цены продукции.

Методы механической микрообработки дают возможность индивидуального изготовления элементов и могут использоваться лишь в таких областях, как аэрокосмическая, военная, где важны, прежде всего, габаритно-массовые характеристики, а не экономические показатели. Возможно их применение для изготовления инструмента и технологической оснастки. При изготовлении формовочного

инструмента по LiGa технологии возможно получение многоместных матриц и, соответственно, обеспечение группового литья сложных тонкостенных деталей из полимерных материалов: полиамидов, полибутилентерефталата, поликарбоната, полиэтилена, полиметилметакрилата (ПММА), полиоксиметиленов, полипропилена, полифениленсульфона, полиэфиркетона, полиэфиримида. Гладкие поверхности стенок инструмента обеспечивают извлечение литых деталей из матриц, которые изготавливаются без литьевых уклонов. При изготовлении керамических деталей из окиси алюминия, окиси циркония, нитрида кремния, пьезокерамики сначала льется ленточная заготовка, затем производится штамповка полуфабрикатов, удаление материала связки и конечная операция – спекание. Недостатками технологии является большая усадка и шероховатость поверхности.

Для формирования устройств микромеханики используют толстые слои резиста ПММА, при обработке которых обычно применяют интенсивные рентгеновские пучки, получаемые в синхротронных источниках (накопительное кольцо с энергией электронов более 2 ГэВ). Такой пучок вызывает значительную флуоресценцию от подложки, ослабляющую адгезию ПММА, что ограничивает допустимое время экспонирования, а, следовательно, и глубину экспонирования. На рис. 2 приведен вариант последовательного многократного экспонирования, более дешевый, не требующий очень жесткого излучения. Исходная структура состоит из алюминиевой подложки, слоя ПММА толщиной 2 мм и медной фольги (9мкм). Во избежание напряжений из-за различия коэффициентов расширения многослойная структура формируется при температуре не выше 60°C. С помощью контактной маски и негативного УФ-фоторезиста (35мкм) экспонированием/проявлением создается форма для гальванического нанесения золота как абсорбера рентгеновской маски (20мкм). Особенность предложенного варианта – применение конформной маски с абсорбером, закрепленным на

поверхности и уничтожаемым на каждой подложке по готовности микроструктуры; отсутствие трудностей работы с хрупкими мембранами, потребности в совмещении последовательных экспозиций, достаточность меньшей толщины абсорбера, и следовательно, увеличение точности маски, улучшение качества переноса изображения (не «работает» дифракция в зазоре между маской и резистом). Для сохранения адгезии абсорбера на ПММА до последнего проявления граница не должна получать дозу более $1/3$ предельной. Для этого достаточно 20 мкм золота вместо обычных 27 мкм при одноразовом экспонировании. Дополнительно усилить границу удастся, нанося подслои из меди распылением, и добавляя «грунтовый» адгезионный слой, не чувствительный к рентгеновскому излучению, в том числе и флуоресценции из меди. Перед вторым облучением «второй» уровень поверхности ПММА имеет пористый характер, что облегчает выход газов, не вызывает «вспенивание» и даже допускает увеличение поверхностной дозы до 200 кДж/см^2 , сокращая тем самым продолжительность последующего проявления. Сравнительные измерения показали, что при трехкратном экспонировании при 35°C удастся достичь двукратного сокращения суммарной продолжительности проявления. Как пример, изготовлена система щелей шириной 0,1 мм, глубиной 2 мм и протяженностью 10 мм. Причем известное «дифракционное» искажение верхней кромки структуры оказывается уменьшенным втрое (до 0,1 мкм) за счет полного отражения лучевого потока от вертикальной стенки ПММА за краем абсорбера. И, наконец, преимущество алюминия заключается в возможности дополнительно закрепить «высокую» микроструктуру на подложке, усилив шероховатость поверхности травлением в соляной кислоте вместе с нанесением защитного слоя титана.

Существует два направления корпускулярно-фотонных технологических процессов (КФТП):

локально-стимулированное наращивание (осаждение или полимеризация) и локально-стимулированное травление вследствие действия на материал концентрированного потока энергии (светового, электронного, ионного лучей).

Основными направлениями стимулированного роста 3D структур сложной конфигурации является лазерное осаждение из газовой фазы (LPCVD) и фотополимеризация. Используются криптонофторовые лазеры с длиной волны $\lambda = 248 \text{ нм}$. Длительность импульса – десятые доли наносекунды, частота – около 2 кГц. Волоконная технология развивалась из известной технологии микроканальных пластин. До 60 – 70 % (и даже 90 %) объема полимерных или стеклянных структур составляют идентичные цилиндрические каналы диаметром от единиц до десятков микрометров. Получены пластины даже с диаметром каналов и толщиной стенок между ними $\sim 33 \text{ нм}$. При этом плотность каналов составляет $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Каналы структуры могут быть заполнены различными материалами (полимерами, металлами, полупроводниковыми, магнитными составами т.д.). Суть волоконной технологии состоит в перетягивании пучка плотноспеченных волокон. Волокна изготовлены из двух марок стекла, которые значительно отличаются друг от друга растворимостью в водном растворе HCl. Масштаб перетягивания (рис. 3) не превышает соотношения 1:20 и может повторяться многократно.

Технология волоконных МЭМС может обеспечивать перетягивание в одном цикле геометрически подобных микроструктур с множеством типоразмеров волокон; возможность интегрального и группового изготовления изделий одновременно; перетянутому пучку можно придать сложную 3D геометрию (рис. 4). По этой технологии могут изготавливаться электродвигатели, летательные аппараты, солнечные батареи и множество других микро-

структур с высоким отношением объема отверстий к общему объему конструкции. Волоконная технология не требует помещений с контролируемым микроклиматом, не нужны специалисты высокой квалификации.

сварки кремниевых пластин для изготовления 3D-МЭМС: – анодная термокомпрессия – процесс взаимной приповерхностной миграции частиц пластин кремния и пирека (боросиликатное стекло с 3,5% окиси натрия) под действием приложенного напряжения и механического давления;

Существуют три метода термокомпрессионной

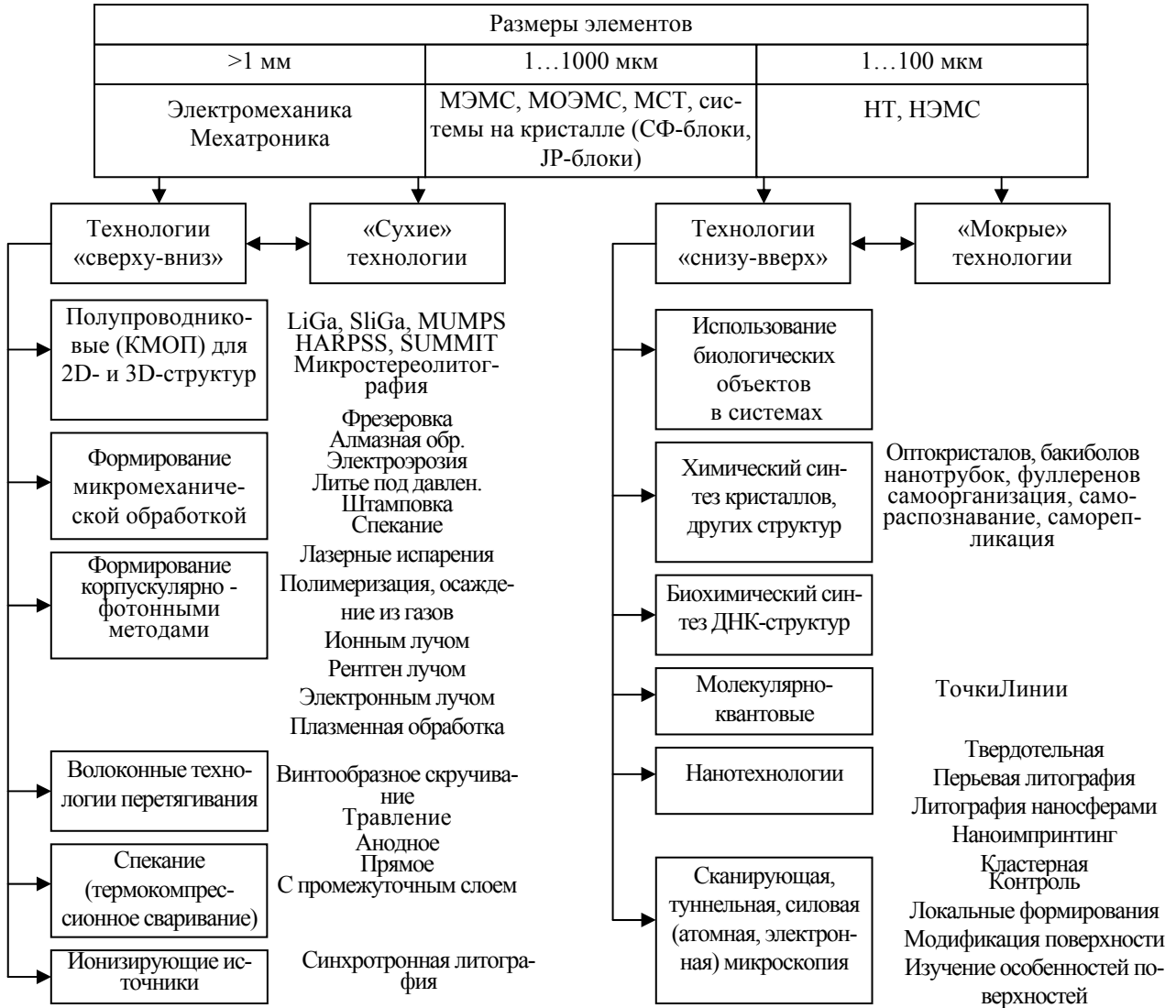


Рис. 1. Классификационная схема технологии МЭМС, НЭМС

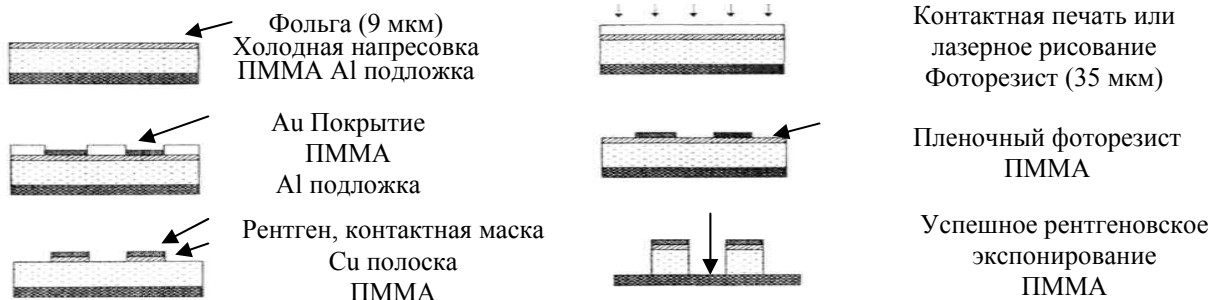


Рис. 2. Вариант LiGa-технологии

- прямая термокомпрессия – спекание двух плотносоединенных кремниевых пластин, одна из которых имеет гидрофильную, а вторая гидрофобную поверхности, что обеспечивает хороший контакт перед высокотемпературным спеканием (1000°C);
- термокомпрессия с промежуточным слоем в

виде эвтектики низкотемпературного стекла (температура плавления 363°C при содержании в эвтектике 2,85 % – Si и 97,15 % – Au). При применении термокомпрессионной сварки необходимо анализировать совместимость процесса с серийной технологией изготовления СБИС, УБИС.



Рис. 3. Технология получения микроволоконных пучков: а – вариант упаковки волокон в пучок; б – перетяжка пучка

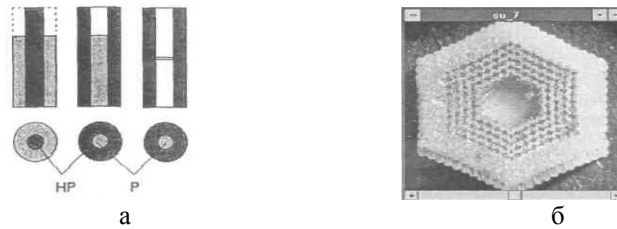


Рис. 4. Объемные микроволоконные структуры: а – получение объемных элементов типа «штырь», колодка, мембрана; б – многovitковая спиральная обмотка

Этот метод открывает возможности изготовления гибридных МЭМС и корпусов готовых изделий. Сварка является ключевой операцией производства МЭМС в объеме кремния или в приповерхностных слоях поликремния. Она представляет широкие возможности массового производства компонентов МСТ, как микромеханических, так и электронных. С использованием этой технологии изготавливаются сенсоры ускорения, резонансные гироскопы, датчики давления, в том числе для автомобильных систем управления подачей топлива. Анодная термокомпрессия является процессом взаимной диффузии частиц кремниевой подложки и пирекса (боросиликатного стекла с 3,5% содержания окиси NaO_2) под действием приложенного напряжения и внешнего механического давления (рис. 5).

Кроме того, под действием сильного электрического поля ионы кислорода высвобождаются из

пирекса и мигрируют в область раздела «пирекс-кремний». Окисление кремния формирует слой SiO_2 , чем и заканчивается термокомпрессия пластин. Высокий отрицательный потенциал электрода вызывает миграцию ионов Na^+ к нему и их нейтрализацию.

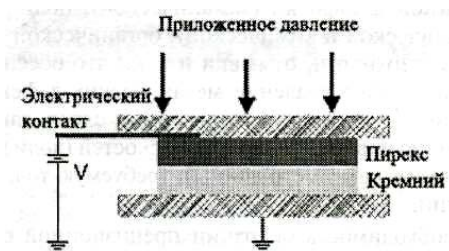


Рис. 5. Анодная термокомпрессия

На границе раздела «кремний-пирекс» образуется область электрического заряда, который определяет силу электрического притяжения во всей площади контакта.

Нагрев перехода до $+500^{\circ}\text{C}$ усиливает мигра-

цию ионов, вызывая увеличение силы притяжения свариваемых пластин. Процесс термокомпрессионной сварки требует прецизионной обработки поверхностей, обеспечения контакта по плоскости спекания. Прецизионная обработка поверхностей кремния (после порезки слитков) и пирекса может включать полный набор операций шлифования (механического), полирования (механического и химического), очистки органическими растворителями, отмывки и т. д.

Это обеспечивает удаление механических дефектов, физических повреждений слоев, загрязнений, а также параллельность поверхностей (доли мкм/см длины), необходимую толщину пластин. Метод прямой термокомпресии обеспечивает спекание двух предварительно обработанных и плотно соединенных кремниевых пластин. Одна из них имеет гидрофобную, а другая гидрофильную поверхность, что обеспечивает хороший контакт перед высокотемпературным спеканием. Гидрофобная поверхность получается в результате предва-

рительной высокочастотной обработки, которая упорядочивает структуру поверхности и обеспечивает притяжение и контактирование пластин.

Присутствие гидроксильных радикалов на зеркально отполированной кремниевой поверхности обеспечивает надежное схватывание пластин после контакта. Оно усиливается дополнительным прижимом в средней точке одной из пластин, чтобы создать исходную точку контакта в момент, когда механические распорки по краям обеспечивают отсутствие физического контакта между пластинами (рис. 6).

Удаление боковых механических распорок вызывает «волну схватывания пластин», которая распространяется от середины к краям со скоростью, которая определяется вязкостью и давлением окружающей среды. Жесткое механическое схватывание кремниевых пластин после удаления распорок важно и для полного выдавливания воздушных прослоек между ними.



Рис. 6. Сварка методом прямой термокомпресии:
а – начальная фаза сварки; б – боковые распорки удалены

Последующее нагревание обезвоживает поверхность и стимулирует ряд новых процессов. Гидроксильные группы образуют молекулы воды, которые в свою очередь вызывают окисление поверхностей спекания кремниевых пластин и образование слоя Si-O-Si. При температуре спекания больше 1000°С кислород внедряется в кристаллическую решетку, что обеспечивает образование границы раздела, которая не отличается по физико-химическим свойствам от других составляющих всей кремниевой структуры.

Термокомпрессия с промежуточным слоем выполняется нанесением на пластины непосредственно перед спеканием эвтектики или стекла.

Важным в этом случае является контроль равномерности поверхностного взаимодействия компонентов в его начальной стадии и при температуре плавления (363°С при содержании в эвтектике 2,85 % Si и 97,15 % Au). Сплав формируется на границе раздела компонентов путем взаимного проникновения материалов и затвердевания после охлаждения.

Для обеспечения качественного спекания на всей площади кремниевых пластин производится их предварительная подготовка – удаление окисных пленок, которые могут мешать проникновению золота в кремний при формировании эвтектического слоя.

После нанесения пленки, содержащей золото (эвтектика), непосредственно перед спеканием образовавшуюся поверхность обрабатывают ультрафиолетом, чтобы удалить органические примеси, которые снижают качество поверхностного контакта.

Как и при анодной и прямой термоэмиссии, к кремниевым пластинам прикладывается внешнее давление и создается необходимый температурный режим.

Сравнительно низкая температура образования эвтектического слоя делает метод термокомпресии с использованием промежуточного слоя привлекательнее, но, как и при анодном спекании, этого еще недостаточно для полной совместимости процесса с серийной технологией изготовления СБИС. Этот метод пригоден для герметизации и корпусирования готового изделия.

Все перечисленные выше методы относятся к технологиям “сверху-вниз”, а также, в основном, к “сухим” технологиям в противоположность химическим, биохимическим и биологическим процессам, которые создают компоненты, начиная с атомно-молекулярного уровня, и классифицируются как технологии “снизу-вверх” и “мокрые” технологии. Хотя такое деление и условно, но имеет принципиальные различия в методах изготовления и сборки.

В современных промышленных технологиях основным является принцип “сверху-вниз”, но количество процессов “снизу-вверх” будет постоянно увеличиваться, принимая во внимание большое значение молекулярных и нанотехнологий, в которых решающую роль играют процессы химическо-

го, биохимического синтеза, самоорганизации, самосборки, самовосстановления, самораспознавания, саморепликации, направленного информационно-химического синтеза. Принцип “снизу-вверх” означает создание приборов и устройств, собранных из молекул или атомов.

Заключение

1. МСТ является динамичной, быстро развивающейся отраслью техники, использующей достижения микроэлектроники и других видов микромеханической обработки, которая обеспечивает при массовом производстве низкую стоимость и трудоемкость изготовления микромеханических изделий. МСТ уже сформировалось как одно из ведущих направлений техники 21 века.

2. Приведенные технологические процессы позволяют изготавливать сложные МЭМС – устройства, содержащие механические и электронные подсистемы.

3. МЭМС – сенсоры являются изделиями, наиболее быстро находящими потребителей.

4. В настоящее время создано большое количество разнообразных микромеханических компонентов, технологии изготовления которых могут использоваться для разработки конкретных МЭМС.

5. Основная доля МЭМС в настоящее время производится в гибридном исполнении.

6. Существенной является проблема выбора для производства определенных типов МСТ, поскольку сфера взаимодействия изготовителя и потребителя в этой области техники только складывается.

Литература

1. Исии Т., Симояма И., Иноуэ Х., Накадзима Н. Мехатроника. – М.: Мир, 1988. – 318 с.
2. Лучинин В.В. Научно-технический прорыв на микроуровне // Петербургский журнал электроники. – 2000. – № 3-4. – С. 4-11.

3. Перспективы развития наноэлектронных и микроэлектромеханических систем // Электронная промышленность. – 2004. – № 3. – С. 22-29.
4. Ратнер М., Ратнер Д. Нанотехнология: простое объяснение очередной гениальной идеи. – М.: Изд. Дом «Вильямс», 2004. – 240 с.
5. Бескорвайный И.М. Технологические поколения современной электроники // Нано- и микросистемная техника. – 2004. – № 9. – С. 2-4.
6. Шевченко В.Я. О терминологии: наночастицы, наносистемы, нанотехнологии // Микросистемная техника. – 2004. – № 9. – С. 2-4.
7. Мальцев П.П. О классификации в области микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. – 2005. – № 1. – С. 9-10.
8. Вернер В.Д., Мальцев П.П., Сауров А.Н., Чаплыгин Ю.А. Технологии миниатюризации «сверху-вниз» или «снизу вверх» // Нано- и микросистемная техника. – 2005. – № 1. – С. 5-9.
9. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления наследований / Под ред. М.К. Роко, Р.С. Уильямса и П. Аливисатоса.: Пер. с англ. – М.: Мир, 2002. – 292 с.
10. Алфимов С.М., Быков В.А., Желудева С.И., Мальцев П.П., Петрунин В.Ф., Чаплыгин О.А. Развитие в России работ в области нанотехнологий // МСТ. – 2004. – № 8. – С. 2-8.
11. Иванов А.А., Мальцев П.П. Микросистемная техника – основа научно-технической революции в военном деле // МСТ. – 2004. – № 10. – С. 2-6.
12. Степанов Ю.И. Применение технологий МЭМС и МСТ в автомобильной технике // Микросистемная техника. – 2003. – № 12. – С. 22-28.
13. Лучко В.А.. МЭМС – технология переворачивает представление о технике инфракрасного видения // Микросистемная техника. – 2004. – № 2. – С. 6-7.
14. LiGa technology for 3D – microstructure // J. Micromech. Microeng. – 1999. – № 9. – P. 58-63.
15. Farroky Ayazi, Khalif Nazafi. A HARPSS Polysilicon vibrating ring gyroscope // Microelectromechanical Systems. – June 2001. – Vol. 10, № 2. – P. 169-179.
16. Шалобаев Е.В., Монахов Ю.С., Стржинский В.Е., Шалько С.А. Технология изготовления зубчатых колес и передач МЭМС. Технологии индивидуального формообразования микромеханики // Микросистемная техника. – 2004. – № 8. – С. 24-28.
17. Суховеев С.П. Волоконные МЭМС и НЭМС // Микросистемная техника. – 2004. – № 1. – С. 2-11.
18. Вернер В.Д., Мальцев П.П., Сауров А.Н., Нальгин Ю.А. Синергетика микроминиатюризация, микроэлектронная техника, наноэлектроника // Микросистемная техника. – 2004. – № 7. – С. 23-29.
19. Телец В.А., Негина Ю.С., Орлов А.А. Изготовление трехмерных МЭМС методами термокомпрессионной сварки // Микросистемная техника. – 2004. – № 3. – С. 2-6.
20. Нейдриен Симан. Нанотехнология и двойная спираль ДНК // В мире науки. – 2004. – № 9. – С. 22-31.
21. Алферов Ж.Н., Алсеев А.Л., Гапонов С.В., Коньев П.С., Панов В.Н., Полторацкий Э.А., Сибельдин Н.П., Сурис Р.А. Наноматериалы и нанотехнологии // Микросистемная техника. – 2003. – № 8. – С. 3-13.

Поступила в редакцию 13.10.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.И. Загарий, Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков.