

Системы в корпусе. Краткий обзор технологий

В. Мейлицев

УДК 621.3.049.776 | ВАК 05.27.01

Увеличение функциональности электронных компонентов – один из базовых аспектов прогресса микроэлектроники. Начавшись с усложнения функции каждого прибора при переходе от отдельных транзисторов к логическим ячейкам и RS-триггерам, от них – к СИС арифметико-логических устройств, многоразрядных регистров и т. п., в последние десятилетия этот процесс обрел новое качество: «под крышей» корпуса компонента размещаются целые системы, функции которых зачастую не ограничиваются одной лишь обработкой цифровых данных. Фактически, сегодня мы наблюдаем исчезновение четкой границы между производством электронных модулей и блоков и микроэлектроникой – производством электронных компонентов.

СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ И ЕЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Существуют два варианта реализации высокоинтегрированных микроэлектронных устройств, выполняющих функции законченной системы или подсистемы: система на кристалле (СНК, англ. SoC) и система в корпусе (СвК, англ. SiP). В первом из них функциональные блоки системы являются фрагментами электрической схемы кристалла, во втором они выполнены как отдельные устройства, собранные в общем корпусе.

Среди достоинств СНК можно отметить:

- уменьшение длины связей между элементами сборки, возможность получения более высоких по сравнению с печатным узлом показателей производительности, энергопотребления, массогабаритных характеристик;
- экономия площади печатного узла с соответствующим уменьшением паразитных индуктивностей и емкостей;
- упрощение работы пользователя, меньшая вероятность ошибок при проектировании печатного узла, сокращение номенклатуры комплектующих [1].

При крупносерийном выпуске СНК может иметь меньшую себестоимость, чем аналогичный ей комплект отдельных микросхем.

Однако для СНК характерен ряд проблем, носящих более или менее принципиальный характер. Повышение характеристик СНК в решающей степени обеспечивается уменьшением проектной нормы полупроводниковых кристаллов, а на этом пути возникают препятствия, требующие поиска новых решений:

- межсоединения СНК и разводка не масштабируются теми же темпами, что и транзисторы;

- затраты на проектирование и изготовление кристаллов ИС растут все быстрее с каждым новым уровнем технологий;
- на каждом новом технологическом уровне обостряются проблемы с сопротивлением, электрической емкостью, тепловыделением и различными типами шумов [2].

При попытке компоновки сложной СНК с большими ресурсами можно получить чрезмерно крупный кристалл, который может не поместиться в размер поля фотолитографического сканера. Технологи умеют обходить это ограничение, но это очень не просто. В производстве же увеличение размера кристалла, как правило, приводит к уменьшению выхода годных.

Если в состав СНК должны входить разнородные функциональные блоки, то она может получиться слишком сложно (и дорого) реализуемой и/или недостаточно качественно работать. Например, принцип действия DRAM подразумевает наличие специальных конденсаторов, «вписывание» которых в традиционный технологический процесс может быть связано с неоправданно большими затратами. Радиочастотные или силовые компоненты, выполненные в кремниевом кристалле, будут иметь худшие параметры, чем такие же схемы на материалах A^3B^5 , а соединение на одном кристалле цифровой и аналоговой частей создает проблему шумов [1].

Когда же речь идет об интеграции блоков, для создания которых нужны разные технологии – например, Si, GaAs, SiGe и др., то неизбежен переход ко второму варианту реализации многофункциональных высокоинтегрированных микроэлектронных устройств – системам в корпусе.

ПОТЕНЦИАЛ СвК

В состав СвК наряду с цифровым блоком могут входить разнообразные сенсоры, радиочастотные тракты, МЭМС и т.д., изготовленные по наиболее подходящим для них технологиям. Каждый из входящих в СвК блоков может создаваться отдельной группой специалистов, распараллеливание сокращает время разработки и позволяет подавать на финальную сборку уже испытанные комплектующие, уменьшая как время испытаний СвК, так и вероятность получения их негативного результата, и трудоемкость поиска ошибки.

Однако достоинства многокристалльных систем не ограничиваются их потенциалом в области гетероинтеграции. Практический эффект достигается даже простым разделением большого кристалла на несколько меньших. В качестве примера можно привести микропроцессоры AMD. 28-ядерный процессор Intel Xeon имеет площадь 456 мм², а у AMD предельный размер кристалла – в нем реализован 8-ядерный процессор – составляет менее чем 200 мм². По разным оценкам, на раннем этапе жизни технологии уменьшение размера кристалла в три-четыре раза способно поднять выход годных в два-три раза, с пары десятков процентов до больше, чем половины.

Но увеличение выхода годных – не единственное преимущество подхода, реализуемого AMD. Упомянутые 8-ядерные кристаллы используются в процессорах AMD EPYC и AMD Ryzen Threadripper, причем в последнем половина ядер отключена. Зачем? Унификация кристаллов для изделий разной производительности позволяет сократить издержки; то же справедливо для «обвязки» – отключить ненужное может быть дешевле и технологичнее, чем разрабатывать и производить несколько разных моделей. И, конечно, брак при изготовлении 200-мм кристаллов тоже имеет место, а при таком подходе можно использовать не полностью исправные кристаллы [1].

Важнейшее свойство СвК – возможность построения системы с высокими характеристиками на базе компонентов предыдущих технологических уровней. Это положительно сказывается на цене изделия любого производителя; для российской же электронной промышленности это свойство в среднесрочной перспективе может стать решающим. Далее, повышение характеристик СвК путем замены ее компонентов на аналоги с улучшенными параметрами осуществится быстрее и обойдется дешевле, чем модернизация СвК. Еще более ярко преимущества СвК проявляются при создании новых образцов изделий. По данным опубликованной

в 2014 году статьи [3], на зарубежных фабриках цена изготовления одной партии кристаллов СБИС по полному циклу «фотошаблоны – пластины – тестирование» при проектных нормах 130–180 нм составляла 3–5 млн руб., при нормах 90 нм – около 10 млн, при 65 нм – около 50 млн, при 45 нм – более 100 млн руб. Столь высокая стоимость прототипных образцов СвК даже в случае последующего изготовления их большими сериями представляет собой непреодолимый барьер почти для всех производителей электронной аппаратуры. Концепция СвК, очевидно, более пригодна для прототипирования; с учетом специфики отечественной электронной отрасли, в основном многономенклатурной и малосерийной, эта составляющая потенциала СвК выглядит более значимой, чем преимущество СвК в части миниатюризации и простоты сборки микроэлектронного изделия.

ВАРИАНТ КЛАССИФИКАЦИИ СвК

Один из наиболее характерных признаков, по которым можно классифицировать множество структурных и конструктивных вариантов построения СвК, это пространственное расположение функциональных блоков внутри корпуса системы, которым определяется возможность применения в составе СвК тех или иных типов конструктивного исполнения компонентов и технологий ее сборки и монтажа. Принятие за основу этого признака позволяет строить описание всего разнообразия многокомпонентных систем без учета широты их функционала и материалов, из которых изготовлены их компоненты. Таким образом, различия между понятиями многокристалльного микро модуля, микросборки и системы в корпусе становятся несущественными для целей данной статьи, поэтому все они здесь обозначаются как СвК.

Классификация по признаку пространственного построения многокомпонентной системы (рис. 1)



Рис. 1. Классификация систем в корпусе по типу процессов сборки и монтажа [4]

предложена в работе [4]. Ее основными группами являются:

- сборка и монтаж элементов/компонентов* в одной плоскости (2D);
- сборка и монтаж элементов/компонентов через промежуточную подложку (2,5D);
- сборка и монтаж элементов/компонентов в трехмерном пространстве (3D).

ВСТРАИВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ / ЭЛЕМЕНТОВ В КОММУТАЦИОННОЕ ОСНОВАНИЕ

Это направление интеграции активно развивается в применении к подложкам СвК, выполненным из органических или керамических материалов.

Для встраивания компонентов в подложки на основе органического связующего классическим можно считать подход, воплощенный около 20 лет назад компанией Intel в технологии ВВUL. В нем было реализовано практически всё, что выполняется в настоящее время для встраивания компонентов: подготовка полости в подложке, размещение и герметизация кристалла, формирование диэлектрического слоя под его контактными площадками, обеспечение доступа к ним через отверстия в диэлектрике, их металлизация в одном процессе с созданием проводящего рисунка, формирование дополнительных слоев и т. д. Сегодня существует множество вариантов, развивающих этот классический подход [6].

Другая группа технологий встраивания исключает необходимость коммутации контактов компонента через отверстия в диэлектрике. Например, в методе, разработанном компанией Wurth Elektronik, верхний слой фольги МПП открывается травлением или УФ-лазером, а диэлектрик удаляется с помощью другого лазера – углекислотного. Таким образом, разводку можно произвести прямо на слое установки компонента, который затем монтируется по технологии flip-chip [7].

Существует также направление, в котором встраиваемые компоненты устанавливаются на основу (ядро) многослойной подложки средствами поверхностного монтажа.

Подложки из керамики допускают встраивание только пассивных компонентов – даже у низкотемпературной керамики (LTCC) температура спекания может достигать до 1000 °С. Процесс встраивания представляет собой «печатание» компонентов в ходе изготовления подложки, для чего предлагается широкий спектр материалов. В частности, резистивные пасты в системах LTCC позволяют

создавать встроенные резисторы с сопротивлением от 10 до 10000 Ом/квадрат с допусками $\pm 10\%$ и температурным коэффициентом сопротивления $\pm 200 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ [8].

СБОРКА И МОНТАЖ КОМПОНЕНТОВ / ЭЛЕМЕНТОВ НА КОММУТАЦИОННОЕ ОСНОВАНИЕ, А ТАКЖЕ СБОРКА И МОНТАЖ КОМПОНЕНТОВ / ЭЛЕМЕНТОВ НА КОММУТАЦИОННОЕ ОСНОВАНИЕ СО ВСТРОЕННЫМИ АКТИВНЫМИ И / ИЛИ ПАССИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В СвК, собираемые на отдельно изготовленном коммутационном основании, в зависимости от его материала могут монтироваться либо только бескорпусные компоненты либо и они, и микросхемы в корпусах; неупакованные кристаллы могут устанавливаться по методу flip-chip и с применением технологии TAB.

Суть метода flip-chip состоит в том, что кристалл монтируется при помощи выводов (бампов), сформированных на его контактных площадках; в некоторых технологиях проводящая структура присоединяется непосредственно к контактным площадкам кристалла.

В технологии TAB (Tape Automated Bonding) кристаллы устанавливаются на гибкий полимерный носитель, на котором металлическими пленочными проводниками организована система выводов. Монтаж собранного таким образом компонента на печатную плату или подложку СвК производится при помощи внешних выводов носителя с использованием, как правило, контактной пайки, пайки горячим газом или лазерной микросварки. В целом же для присоединения выводов элементов СвК к ее основанию применяются те же способы, что и при поверхностном монтаже, и при корпусировании обычных монолитных микросхем. При монтаже компонентов на полупроводниковые коммутационные основания используются также методы, характерные для вертикальной сборки бескорпусных кристаллов.

Сборка СвК из отдельных компонентов на заранее изготовленном основании уже давно не является единственным практикуемым подходом. Сегодня для монтажа СвК применяется широкий круг технологий, в которых этапы упаковки кристаллов и создания межсоединений объединены в единый технологический процесс. Их принято называть технологиями внутреннего монтажа; в этой группе выделяют три направления:

- монтаж в окна жесткого основания;
- монтаж в компаунды (на уровне пластины, панели);
- монтаж в гибко-пластичные полимеры [4].

Общий принцип внутреннего монтажа состоит в том, что компоненты СвК располагаются внутри ее основания. Монтаж в окна жесткого основания предусматривает фиксацию и герметизацию кристаллов в окнах, после чего над контактами кристаллов создается система электрических

* В данном случае элементы и компоненты СвК понимаются так, как они определены в ГОСТ 26975-86 «Микросборки. Термины и определения» [5]. В других фрагментах текста статьи, в том числе выше, слова «элементы» и «компоненты» могут использоваться в качестве синонима функционального блока СвК.

связей. Монтаж в компаунды сегодня представлен многочисленными вариантами технологии корпусирования на уровне панели, пластины (Wafer Level Packaging, WLP), идея которой состоит в том, что кристаллы упаковываются и получают бампы на контактные площадки до разрезания пластины.

Дальнейший процесс для двух этих вариантов в основных чертах одинаков. На всю поверхность основания, к которой кристаллы обращены лицевой стороной, наносится диэлектрическая пленка. В ней путем ионно-плазменного травления вскрываются окна над контактными площадками кристаллов, и затем на поверхности диэлектрического слоя методом вакуумного напыления металлов формируется проводящая система основания СвК [9].

При образовании основания по методу монтажа в гибко-пластичный полимер необходимость нанесения диэлектрической пленки может отсутствовать.

СБОРКА И МОНТАЖ КОМПОНЕНТОВ / ЭЛЕМЕНТОВ НА КОММУТАЦИОННОЕ ОСНОВАНИЕ ЧЕРЕЗ ИНТЕРПОЗЕР

Уменьшение размеров и рост числа выводов компонентов СвК привели к тому, что схема их соединения и коммутации с внешними выводами корпуса не обеспечивается даже 12-слойными подложками. Для решения этой проблемы в конструкцию СвК вводится интерпозер.

В традиционной конструкции интерпозера на его верхней (условно) стороне устанавливаются кристаллы, схема соединения которых реализуется в нескольких слоях металлизации (RDLs – redirect layers). На нижней стороне располагаются выводы (бампы) для присоединения к контактным площадкам основания СвК; при необходимости на этой стороне также создается несколько RDLs. В настоящее время наиболее распространены кремниевые интерпозеры, в которых соединение верхних RDLs с нижними (либо прямо с контактными площадками бампов) реализуется в виде сквозных металлизированных отверстий по технологии TSV (through-silicon-via), первоначально разработанной для стекового монтажа кристаллов памяти.

Выбор кремния в качестве материала для интерпозеров обусловлен целым рядом его свойств: высокой теплопроводностью материала и его доступностью, малым диаметром и шагом отверстий при высоком аспектном соотношении, возможностью применения стандартных технологий производства ИС, минимальными топологическими нормами, отсутствием разности ТКЛР между материалами кристалла и интерпозера. К тому же топологические нормы, лучшие по сравнению с другими возможными материалами для интерпозеров, для кремния достаточно велики, что позволяет получить высокий процент выхода годных.

Однако кремний создает и ряд проблем. Прежде всего, это полупроводник, потому перед металлизацией отверстий в них надо создать слой диэлектрика (обычно оксида

или нитрида кремния). Он хрупок, а процессы, применяемые для формирования TSV, сложны и дороги [10].

В качестве альтернативы кремнию в его роли материала для интерпозеров всё более активно выступает стекло. Диэлектрические потери в нем меньше, чем в кремнии, оно значительно дешевле. Толщина стекла, размер и форма панелей предлагают больше вариантов процессов, чем кремниевые пластины. Сквозные отверстия в стекле могут формироваться лазером, электростатическим разрядом, механическим сверлением, химическим травлением либо комбинацией этих процессов. Диаметр отверстия, который считается минимальным для стекла, равен 10 мкм. Для металлизации стекла может применяться покрытие медным сплавом, серебряная и медная пасты, серебряные и медные чернила. В отличие от кремния, стекло не требует нанесения слоя диэлектрика перед металлизацией [11].

В последнее время появляются технологии, в которых идея интерпозера реализуется другими, менее сложными средствами. В качестве примера можно привести EMIB (Embedded Multi-die Interconnect Bridge) – новую технологию, разработанную компанией Intel. Ее суть состоит в том, что один большой интерпозер заменяется несколькими встроенными в подложку кремниевыми мостами-коммутаторами. Компактные мосты, расположенные именно там, где необходимо организовать взаимодействие между кристаллами, позволяют создавать высокоплотные быстродействующие связи между кристаллами. Небольшое количество слоев трассировки, ограниченные и локально сосредоточенные области с каналами TSV вместе с малым размером кристаллов и, возможно, менее высокой топологической нормой их исполнения, делает технологию EMIB сравнительно недорогой и доступной для широкого круга производителей.

КОРПУС НА КОРПУСЕ (PACKAGE ON PACKAGE, PoP)

Микросхемы в корпусах устанавливаются друг на друга, для чего в подложках их корпусов размещены необходимые межсоединения и коммутационные слои.

PoP-интеграция сразу нашла широкое применение при сборке модулей памяти из одинаковых микросхем. По одной из технологий, применяемых для такой сборки, конструкция представляет собой вертикальный стек, в котором все корпуса, кроме верхнего, имеют контактные площадки как на нижней, так и на верхней стороне. Как правило, корпус нижней микросхемы имеет шариковые выводы с матричным расположением, а выводы остальных располагаются в несколько рядов по периметру корпуса.

Обычно в стек собирают до трех уровней. Для образования паяного соединения может использоваться припой, содержащийся в выводах верхней микросхемы, либо погружение выводов в паяльную пасту, либо каплеулавливающее

нанесение пасты на контактные площадки нижнего корпуса. При пайке за счет собственного припоя выводы предварительно погружаются во флюсующий состав, который к тому же обеспечивает фиксацию компонента. При необходимости пространство между корпусами заливают компаундом [12].

При соединении в сборке разнофункциональных микросхем часто оказывается, что они имеют различные размеры; так, логические ИС зачастую крупнее ИС памяти и имеют большее количество выводов. В таком случае сборка принимает вид пирамиды, и появляется возможность использовать корпуса с контактами, расположенными по их периметру, и выполнить электрические соединения путем разварки проволочных выводов.

Технология TMV – Through Mold Via, «отверстия сквозь заливку» – подобна TSV, но в ней отверстия с проводящим материалом проходят не через кремний, а через компаунд корпуса микросхемы (заливку кристалла на коммутационной плате) [6].

Еще один вариант называется Bond Via Array – соединение через массив. У микросхем, предназначенных для сборки в стек по этой технологии, кристаллы монтируются на высокоплотные органические подложки, по периметру которых в несколько рядов располагаются контактные площадки. У верхней микросхемы выводы выполняются в виде бампов, выводы нижней микросхемы представляют собой аналогичный по геометрии массив медных столбиков, выходящих через герметизирующий полимер от контактных площадок подложки на верхнюю поверхность корпуса.

По данным Invensas Corporation, разработавшей эту технологию, она обеспечивает шаг выводов 0,3–0,2 мм, число их рядов – от двух до шести; в результате микросхема размером 14×14 мм может иметь от 432 до 1512 выводов. Технология может быть распространена на другие варианты расположения выводов – матричные, fan-in и fan-out, – на сборки плоскостной и ступенчатой конструкции. По утверждению разработчика, технология BVA имеет потенциал для доведения шага выводов до 0,1 мм [13, 14].

КОРПУС В КОРПУСЕ (PiP)

Такая конструкция состоит из двух или более корпусов, объединенных вместе и смонтированных таким образом, что получается отдельный корпус, соединенный с платой [15].

КРИСТАЛЛ НА КРИСТАЛЛЕ

Наибольшую плотность интеграции обеспечивает технология TSV [10], но она, конечно, не является единственной технологией, применяемой для сборки кристаллов в вертикальные конструкции.

Много лет для многоуровневой сборки используется коммутация проволочными выводами, приваренными

к контактным площадкам на периферии кристаллов. Для обеспечения доступа сварочного инструмента кристаллы в сборке могут разделяться прокладками, либо располагаться уступами, либо с выдвиганием кромок с контактными площадками поочередно с разных сторон стека [16].

Почти одновременно с TSV американская компания Vertical Circuits предложила технологию, названную VIP – Vertical Interconnect Pillar (вертикальные соединительные колонки). В рамках этой технологии на уровне пластины производится покрытие кристаллов защитным слоем и вскрытие в нем окон над расположенными на одном из краев кристалла контактными площадками. После разделения кристаллы собираются в стек при помощи полимера с наполнителем, обеспечивающим нужное расстояние между ними. Вертикальные ряды расположенных друг над другом контактных площадок соединяются полосами из проводящего полимера.

Метод VIP более технологичен, чем TSV. Он не требует вмешательства в топологию, реализуется в рамках стандартной технологии. Вертикальные проводники формируются пастой на основе эпоксидной смолы с серебряными частицами; для ее нанесения не требуется дорогостоящее специальное оборудование, а ее отверждение происходит при температуре не выше 180 °С, так что кристаллы не испытывают термической перегрузки [17].

Применяются варианты создания вертикальных структур из подложек с кристаллами, разваренными проволокой или установленными по методу flip-chip, с заливкой или без нее; подложки соединяются между собой бампами. Если подложка изготавливается по тонкопленочной технологии в одном из процессов типа WLP и при этом выводы нужной величины невозможно разместить в границах площади кристалла (конфигурация fan-in), используются различные варианты реализации принципа FO-WLP (fan-out WLP, разветвление на уровне пластины). В FO-WLP подложка выполняет роль интерпозера – распределяет сигналы от высокоплотных контактных площадок кристалла к внешним выводам на площади, выходящей за габариты его проекции.

Среди множества вариантов решений класса FO-WLP известны и такие, где разветвления организуются не после, а до монтажа кристалла в финальную конструкцию. Такова, например, технология SWIFT (Silicon Wafer Integrated Fan-out Technology) компании Amkor, в которой используется пластина-носитель с заранее сформированными RDLs, к которым методом flip-chip присоединяются кристаллы, после чего проводится герметизация.

Стоит отметить, что в рамки принципа FO-WLP вписывается размещение в каждой локации пластины-носителя не одного, а нескольких кристаллов, в том числе различных. Таким образом, идея, изначально нацеленная на преодоление ограничений упаковки типа fan-in, переходит в категорию технологий внутреннего монтажа СвК.

СБОРКА НА ГИБКИХ НОСИТЕЛЯХ (ПОЛИИМИДНЫХ ПЛЕНКАХ)

Эта технология выходит за рамки классификации, в соответствии с которой организована данная статья. С технологической точки зрения она относится к категории сборки на коммутационном основании, то есть группе методов 2D-интеграции. Но на этапе монтажа в корпус полиимидные пленки можно с высокой точностью сворачивать, образуя объемные структуры – значит, с точки зрения результата этот метод должен быть отнесен к технологиям 3D-интеграции. Размер получаемой 3D-СвК по монтажной площади превышает площадь кристалла не более чем на 20% [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Концепция «система в корпусе», позволяя строить компактные многофункциональные микроэлектронные устройства из не самых высокотехнологичных компонентов, может уже сейчас стать для отечественной электронной промышленности основой для создания изделий и систем с характеристиками на уровне лучших зарубежных образцов, серьезно снизив при этом степень зависимости от импорта.

На наш взгляд, одной из технологий, способных наиболее быстро решить эту задачу для многих классов радиоэлектронной техники, является технология LTCC. Оборудование, на котором она реализуется, доступно по цене компаниям среднего бизнеса; успешно идут работы по созданию отечественных систем LTCC; ряд российских производителей уже имеет опыт ее комплексного освоения. К тому же комплекс свойств LTCC делает ее эффективным и недорогим материалом для СВЧ-техники, а это сегодня важно не только для военных и других специальных применений, но и для связи поколения 5G и всей промышленной, социальной и бытовой инфраструктуры, которая будет создаваться на ее основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шунков В.** Системы в корпусе или Что на самом деле находится под крышкой корпуса микропроцессора. <https://habr.com/ru/post/417319/>
2. Новые проблемы перспективных методик корпусирования // Зарубежная электронная техника. 2018. Вып. 7 (6656). от 12.04.2018. С. 6–11.
3. **Немудров В., Борисов К., Завалин Ю., Корнеев И., Малышев И., Шиллер В.** Системы на кристалле и системы в корпусе. Новые возможности для военной техники // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2014. № 1. С. 144–150.
4. **Вертянов Д., Сидоренко В., Тимошенков С., Ковалев А.** Перспективные конструктивно-технологические решения для производства «систем-в-корпусе» // Технологии в электронной промышленности. 2019. № 4. С. 60–64.
5. ГОСТ 26975-86 «Микросборки. Термины и определения» / Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации, <http://docs.cntd.ru/document/1200015825>.
6. **Плонски Ф.** Встраивание компонентов в печатные платы и подложки – ситуация и тенденции на общемировых рынках // Вектор высоких технологий. 2013. № 4. С. 8–22.
7. **Шёнхольц Р.** Встроенные активные компоненты. Новая технология компании Würth Elektronik / Пер. А. Новикова // Технологии в электронной промышленности. 2009. № 7. С. 40–43.
8. **Кондратюк Р.** LTCC – низкотемпературная совместно обжигаемая керамика // НАНОИНДУСТРИЯ. 2011. № 2. С. 26–30.
9. **Назаров Е. С., Вертянов Д. В.** Преимущества технологии внутреннего монтажа при производстве СБИС СМК и GPS / ГЛОНАСС-приемников. / Международная конференция «Микроэлектроника 2015». Интегральные схемы и микроэлектронные модули – проектирование, производство и применение: сборник тезисов. – М.: ТЕХНОСФЕРА. 2015. С. 89–95.
10. **Вертянов Д. В., Бураков М. М., Кручинин С. М., Сидоренко В. Н., Брыкин А. В.** Трехмерная микросборка на основе коммутационных плат из кремния и бескорпусных элементов МЭМС // НАНОИНДУСТРИЯ. 2018. № 9. С. 521–531.
11. **Солберг В.** 2.5D и 3D Технология полупроводниковых корпусов: Эволюция и Инновации. Часть 3. <https://a-contract.ru/publikacii/25d-i-3d-tehnologija-poluprovodnikovyx-korpusov-ehvoljuci-2/>
12. **Федоров С.** Микросхемы PoP. Практический опыт монтажа // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2012. № 8. С. 124–127.
13. **Солберг В.** 2.5D и 3D Технология полупроводниковых корпусов: Эволюция и Инновации. Часть 2. <https://a-contract.ru/publikacii/25d-i-3d-tehnologija-poluprovodnikovyx-korpusov-ehvoljuci/>
14. <http://www.semiconportal.com/archive/editorial/technology/process/120703-invensas.html?print>
15. Технология упаковки чипов System-in-Package (SiP). <https://sepco.ru/new-technology/tehnologiya-upakovki-chipov-system-in-package-sip.html>
16. **Нисан А.** Восемь тенденций, которые изменят электронике // Поверхностный монтаж. 2011. № 1. С. 12–15.
17. **Васин Е., Шахнович И.** 3D-монтаж микросборок. Технология VPI как альтернатива TSV // Печатный монтаж. 2010. № 3. С. 12–16.
18. **Грушевский А., Блинов Г., Семенин С., Жуков П.** Трехмерные многокристальные модули на гибком основании // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2008. № 3. С. 44–47.
19. Шесть основных составляющих инноваций Intel®: производство и упаковка. <https://www.intel.ru/content/www/ru/silicon-innovations/6-pillars/process.html>