

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ МИКРО- И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

М. Макушин¹, В. Мартынов², д. т. н.

УДК 621.37/39
ВАК 05.27.06

Как в радиоэлектронике отказались от использования отдельных компонентов в пользу блоков и модулей, так и в микроэлектронике проектирование систем приходит на смену проектированию ИС. Появление СФ-блоков, систем-на-кристалле, систем-в-корпусе, интеграция разнородных кристаллов, применение технологий этажерочных межсоединений сквозь подложку ИС и/или кремниевую пластину, технологий трехмерного корпусирования ведут к тому, что микроэлектроника превращается в сегмент радиоэлектроники по созданию функционально законченных систем с повышенным быстродействием, надежностью и т. п. Техничко-экономические тенденции развития радиоэлектроники заключаются в том, что в современных условиях определяющим фактором становятся не столько технические достижения (минимальные топологии, быстродействие, производительность и т. д.) или архитектурные преимущества, а технологичность, воспроизводимость и рентабельность производства. В статье предпринята попытка определить основные взаимосвязанные тенденции развития зарубежной электроники – от материалов и оборудования до СФ-блоков и конечных радиоэлектронных систем.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В сфере материалов, используемых для изготовления ИС (как базы конечных электронных систем), общая тенденция развития связана с поиском материалов, способных заменить кремний, так как его физические характеристики перестают удовлетворять требованиям перспективных поколений ИС. С точки зрения эксплуатационных характеристик и прежде всего подвижности носителей заряда про-

должается поиск альтернатив кремниевой технологии на уровне топологий менее 16–14 нм (а в дальнейшем с переходом на топологии 10–9 нм и пост-КМОП-топологии 7–5 нм).

К перспективным материалам долгое время относили фуллерены, углеродные нанотрубки (УНТ) и графен^{*}, которые и сейчас являются объектом пристального внимания. Разработка методов сортировки УНТ на проводящие, полупроводящие и изолирующие

¹ АО "ЦНИИ "Электроника", mmackushin@gmail.com.

² АО "ЦНИИ "Электроника".

* Graphene – графен, планарный слой sp^2 -связанных атомов углерода. Графены являются двумерными аналогами трехмерного графита.

дала следующий побочный эффект: при нанесении на подложку рисунка чернилами с наночастицами при помощи наноструйного принтера характеристики проводимости элементов рисунка формируются за счет толщины каждого конкретного элемента. При условии создания рентабельного производственного процесса подобная методика может совершить революцию в формировании рисунка не только ИС, но и функциональных узлов, печатных плат.

Исследования в области графена и его производных (графем и т.п.), вклад в развитие которых внесли нобелевские лауреаты российского происхождения Гейм и Новоселов, показывают большие перспективы применения данного материала. Графен обладает подвижностью носителей заряда, в сотни раз превышающей аналогичный показатель кремния. Материал, являющийся монослоем углерода атомарной толщины, обеспечивает, как и УНТ, возможность перехода к молекулярной электронике. Подобный переход может кардинально изменить методы изготовления полупроводниковых приборов и конечных электронных систем, многократно увеличить их производительность при снижении размеров.

Основные трудности на пути внедрения подобных материалов в массовое производство касаются интеграции с подложкой и выбора подложки, воспроизводимости формируемого рисунка, необходимости создания соответствующего оборудования.

При этом благодаря непрерывности исследований в области перспективных материалов их перечень может пополняться. Так, недавно был создан силицен – графеноподобная пленка из отдельных нанолент кремния. Таким образом удалось преодолеть существенный барьер. Ранее создать кремниевую пленку толщиной в один атом не позволяли атомные связи в кристалле кремния. Силицен отличается от графена более рифленой поверхностью, но электронные свойства силициновых нанолент и листов схожи с электронными свойствами графена, поскольку кремний и углерод обладают четырьмя валентными электронами. Соответственно, данные элементы должны демонстрировать определенную степень схожести, включая возможность создания разных форм проводников и полупроводников на их основе. Если удастся создать коммерчески жизнеспособный силицен, то заводы по обработке пластин будут отдавать предпочтение этому материалу, а не графену из-за внутренней совместимости силицена и кремния. И экономически это будет оптимальный вариант благодаря отработанности кремниевых технологий.

Отдельным направлением в области создания перспективных электронных материалов можно считать

их искусственное конструирование, а не использование существующих в природе. Речь идет о технологиях с применением метаматериалов, свойства которых обусловлены периодической микроструктурой, создаваемой человеком. Метаматериалы синтезируются путем внедрения в исходный природный материал различных периодических структур с самыми разными геометрическими формами, которые модифицируют диэлектрическую ϵ и магнитную μ восприимчивости исходного материала. Условно такие включения можно рассматривать как чрезвычайно большие искусственные атомы.

Метаматериалы находят применение в военной технике. Как известно, стелс-технологии основаны на специально разработанных геометрических формах (что может влиять на скорость и другие летно-технические характеристики боевой авиации), отражающих непоглощенное излучение в сторону от средства обнаружения, и применении радиопоглощающих материалов и покрытий. Покрытие из метаматериалов может наноситься на конструкции любой формы, не приводя к потерям скоростных характеристик (а также маневренности и т.п.) воздушного или подводного объекта из-за увеличения сопротивления среды. Суть метаматериалов, разрабатываемых для использования в качестве маскирующих покрытий (вплоть до создания индивидуальных плащей-невидимок) в том, что они не поглощают излучение в радиолокационном, ИК-и других областях спектра, а канализируют его. Сканирующий луч захватывается покрытием и обтекает защищаемый объект с разных сторон. На обратной стороне объекта сканирующий луч вновь объединяется и следует по направлению от радара или иного средства обнаружения. Иными словами, по сравнению со стелс-технологией обеспечивается не снижение заметности объекта, а его невидимость для средств обнаружения.

Еще более перспективным считается использование метаматериалов в сфере электронной техники и конечных радиоэлектронных систем. Так, применение метаматериалов в волоконно-оптических кабелях и системах связи, прочих оптических/фотонных системах имеет потенциал существенного увеличения пропускной способности – любые возможные дефекты сигнала будут нивелировать (дефекты будут обтекаться сигналом). То есть речь идет о практически бездефектных системах. Вероятно, на такой же эффект применения метаматериалов можно рассчитывать и в электронных системах, использующих другие области спектра. Кроме того, есть возможность удешевления производственных процессов за счет отказа от некоторых этапов обеспечения бездефектности среды передачи.

Однако возможность и степень экономии будут зависеть от издержек изготовления метаматериала.

Еще одно перспективное направление использования метаматериалов в микро- и радиоэлектронике – теплоотводящие покрытия. В ряде опытных разработок вместо теплопроводов уже используются покрытия из метаматериалов, которые экранируют элементы схемы или конечной системы от выделяемого тепла и обеспечивают его эффективный отвод. Их применение упрощает технологический процесс (благодаря отказу от формирования специальных теплоотводящих элементов) и позволяет уменьшить габариты изделия.

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

Основная тенденция – создание гибких реконфигурируемых модульных кластерных систем. Потребности выпуска постоянно обновляемой продукции и быстрого перехода к следующему поколению продукции и/или расширению ее ассортимента за счет новых типов изделий стимулируют создание гибких кластерных технологических комплексов, построенных по модульному типу, которые можно реконфигурировать в соответствии с новыми требованиями. При этом надо учитывать, что при производстве новейших ИС и конечных электронных систем зачастую параллельно можно использовать несколько перспективных конкурирующих технологий. На определенных этапах предприятиям приходится использовать мультитехнологические стратегии, чтобы снизить издержки производства на различных стадиях жизненного цикла продукции.

Хорошим примером служит литография, обеспечивающая постоянное масштабирование ИС, что позволяет повышать производительность конечных электронных систем при сохранении габаритов, уменьшать размеры системы при сохранении производительности или добиваться таких преимуществ одновременно. Долгое время для производства новейших ИС использовалась оптическая литография, при переходе к новому технологическому поколению уменьшалась длина волны используемого излучения. Финальной стадией практического применения оптической литографии стала иммерсионная литография 193-нм. С использованием методик двойного* и многократного форми-

рования рисунка, двойного экспонирования оптическая литография позволяет формировать топологические элементы на уровне до 9–11 нм. Однако по мере перехода к очередному технологическому поколению издержки оптической литографии увеличивались, и не в последнюю очередь за счет шаблонов. Стоимость критического шаблона на уровне 0,25 мкм составляла 6,0 тыс. долл., а к моменту освоения топологий 45 нм (0,045 мкм) превысила 300,0 тыс. долл. Число слоев в шаблоне ДОЗУ уже более 26, а микропроцессоров – 35, сохраняется тенденция дальнейшего роста. Соответственно, цена шаблона 28 нм составляет около 1 млн. долл., а шаблонов с топологиями 22–20 нм (осваиваются сейчас в производстве) может достигать до 3 млн. долл. Таким образом, при достижении физических пределов использования оптической литографии издержки начинают приближаться к оценочным издержкам методик литографии следующего поколения.

Необходимость достижения проектных норм с топологиями, невозможными для оптической литографии (менее 11 нм), обуславливает разработку технологий литографии следующего поколения. К ним относятся литография в предельной УФ-области спектра (EUV-литография), электронно-лучевая (e-beam) литография, наноимпринтговая литография, а также литография методом непосредственной самосборки (direct-self-assembly, DSA). Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки.

Основным фаворитом долгие годы считалась EUV-литография, на ее разработку затрачены значительные средства. Технология представляется наиболее эффективной, так как использует излучение с длиной волны 13,5 нм. Эту литографию планировалось промышленно освоить в 2005 году на уровне топологий в 90 нм. Сейчас предполагается начать изготовление ИС с ее использованием в 2017 году (Samsung) по технологии 5–7 нм. Надо отметить, что применять EUV-литографию планируется для формирования наименьших, критических топологий. Элементы ИС, не являющиеся критическими, можно будет изготавливать по большим топологическим нормам с использованием оптической литографии (иммерсионная 193-нм).

При этом до сих пор не решены вопросы создания источников излучения необходимой (для серийного производства) мощности, бездефектных шаблонов

* Double patterning – методика двойного формирования рисунка; перспективная методика, требующая двукратного экспонирования. На первом этапе осуществляется экспонирование половины линий, затем на этой площади проводятся травление и дальнейшие операции технологического процесса. Затем на пластину наносится другой слой резиста, и вторая полови-

на рисунка экспонируется в промежутки между первым набором линий. Подход достаточно дорогостоящий и медленный, но с технической стороны сравнительно легкий, хотя требует повышенной точности совмещения не ниже 2 нм.

и отставания EUV-метрологии от требований литографии (требуется затратить еще ~400 млн. долл.).

Наноимпринтинг, обладающий превосходной разрешающей способностью и не имеющий ограничений по типам конфигураций, которые могут быть сформированы, уже используется в ряде смежных с микроэлектроникой областей. Он может найти применение и в процессе изготовления шаблонов, однако использование в производстве схем памяти, ожидавшееся еще пять лет назад, до сих пор не получило развития. При этом для данной методики характерны проблемы с плотностью дефектов.

E-beam-литография с непосредственным формированием рисунка уже добилась разрешения, пригодного для топологических норм 14-нм и 10-нм в рамках производства логических схем (сообщалось о многообещающих работах по формированию топологий менее 9 нм, вплоть до 5 нм). Однако главный недостаток таких систем – низкая производительность. Сейчас различные поставщики (включая Mapper Lithography) пытаются повысить ее за счет "многолучевых" методик, то есть использования матриц источников электронных лучей.

Методика DSA отличается высокой разрешающей способностью, низкой неравномерностью ширины линий, высокой точностью воспроизведения рисунка и совместимостью с существующей технологией оптической литографии. Однако трудности связаны с контролем плотности дефектов.

Таким образом, сохраняется вероятность, что некоторые или все перечисленные технологии можно будет использовать при производстве ИС в рамках мультитехнологической стратегии. Так, например, непосредственное электронно-лучевое формирование рисунка может применяться при создании опытных образцов перспективных ИС, что позволит сэкономить на создании комплектов фотошаблонов для ИС. Решение о дальнейшей их разработке еще не принято.

Возрастание издержек по мере масштабирования топологических норм может привести к тому, что часть вопросов (если не все со временем) может быть решена на пути трехмерной (3D) интеграции ИС. Подходы 3D-интеграции также перспективны на уровне электронных модулей и, соответственно, конечных систем.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ С УЧАСТИЕМ ЗАКАЗЧИКОВ

Перенос внимания поставщиков ИС с вопросов строительства современных заводов по обработке пластин по новейшим технологиям и обладания собственным базовым технологическим процессом на соз-

дание систем с участием в их разработке заказчиков (изготовителей конечных электронных систем), причем на достаточно глубоком технологическом уровне. Это очень важная тенденция, которая обусловлена следующими обстоятельствами:

- по мере продвижения технологий ко все меньшим топологическим нормам создание и содержание заводов по обработке пластин становится слишком дорогостоящим, доступным – в рамках консолидации производственной базы – все меньшему количеству крупных фирм (например, на уровне 22–20 нм первоначально, около четырех лет назад, были всего четыре корпорации – GlobalFoundries, Intel, Samsung и TSMC. Та же история повторяется при освоении топологий 16–14 нм и менее);
- в современных условиях фирмы получают доступ к схожим технологическим процессам примерно одновременно (услуги кремниевых заводов, поставщиков библиотек СФ-блоков (IP) и т.д.);
- стоимость создания базового технологического процесса при переходе на все меньшие уровни топологий постоянно увеличивается, что делает процесс все более дорогостоящим для большинства фирм-поставщиков ИС.

Таким образом, по мере перехода все большего количества фирм от модели IDM к fabless-модели место базового технологического процесса как конкурентного преимущества занимает ноу-хау в области проектирования систем, причем в ограниченном секторе рынка. Разработка новейших базовых технологических процессов становится делом крупнейших корпораций или так называемых экосистем. Современные экосистемы^{*}, как правило, объединяют традиционные IDM (в т.ч. крупнейшие), foundry и fabless-фирмы, поставщиков библиотек СФ-блоков и инструментальных средств САПР. В их

* Ecosystem – сообщество фирм, объединенных не только общей программой НИОКР, как консорциум, но и устойчивыми технологическими и производственными связями. По мере укрепления взаимосвязи проектирования и технологического процесса на уровне 65-нм и 45-нм цифровых, 90-нм и 65-нм радиоконструкций и конструкций смешанной обработки сигнала кремниевые заводы активизируют сотрудничество с разработчиками ИС в целях обеспечения приемлемого выхода годных и ускорения освоения массово-поточного производства. В экосистеме кремниевые заводы оказывают клиентам более высокий уровень поддержки, чем вне ее. Экосистемы формируются вокруг специфических DFM-возможностей (design-for-manufacturability – проектирование с учетом пригодности для массового производства, ключевая зона – управление током утечки), включающих взаимоотношения foundry с их стратегическими партнерами, а также поставщиками инструментальных средств САПР.

работе часто принимают участие и изготовители конечных электронных систем. Четко эта тенденция проявилась при переходе от технологического процесса 65-нм к 45-нм и далее к процессам 32–28 нм, 22–20 нм, 16–14 нм, а также к процессам с меньшими топологиями.

Об относительно ограниченном секторе рынка (для большинства фирм) можно сказать следующее. Например, беспроводные системы связи – слишком широкий рынок, поэтому многие фирмы сосредоточились в более узких сегментах – Wi-Fi (стандарты семейства 802.11), Bluetooth, а теперь LTE, Advanced LTE, IoT и т. п. Консолидация среди изготовителей ИС и поставщиков конечных электронных систем заставляет проектировщиков фирм двух типов сотрудничать теснее. Обычно сегменты конечных систем поделены между немногочисленными фирмами. Так, на рынке смартфонов по итогам 2015 года пять игроков контролировали ~55% всего объема продаж. Поэтому подход полупроводниковых фирм к обслуживанию заказчика меняется. Если до недавних пор отдел маркетинга изучал спрос и формировал требования к новым семействам изделий, то теперь требуется намного более тесное сотрудничество с заказчиком.

ПЛАТФОРМЫ КОНЕЧНОЙ ПРОДУКЦИИ

Суть этой тенденции – изменение подходов к созданию конечных систем: ориентация на представленные на рынке ИС уступает место ориентации на платформы, в том числе платформы разработки.

Данная тенденция начала складываться в первой половине 2000-х годов и к 2016-му получила логическое завершение. По мере усложнения электронной компонентной базы, конечных электронных систем, повышения уровня интеграции, значения и сложности встраиваемого ПО изготовители конечных систем столкнулись с рядом проблем.

Ориентация при создании конечных электронных систем на имеющиеся в наличии электронные компоненты не позволяла полностью удовлетворить требования конечных пользователей таких систем. Кроме того, при интеграции в систему электронных компонентов различных изготовителей параметры наиболее производительных компонентов не использовались полностью – "отсекались" возможностями наименее производительных компонентов.

В рамках архитектур систем назрела необходимость создания платформ разработки, то есть набора взвешенных требований ко всем используемым компонентам. На их основе создавались платформы семейств конечной продукции, что позволило отказаться от поиска нужных компонен-

тов и заставить изготовителей ЭКБ выпускать продукцию не по их усмотрению, а в соответствии с требованиями архитектур конечных систем. Таким образом, обеспечивается стандартизированная возможность бесшовной (без снижения параметров) интеграции ЭКБ различных поставщиков. За счет этого существенно упростился процесс создания новых конечных систем, сократились сроки их вывода на рынок. Соответственно, снизились издержки системных интеграторов и расширился диапазон конкурентоспособности.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПЛАТФОРМЫ КОНЕЧНЫХ СИСТЕМ

Тенденция представляет собой дальнейшее развитие вычислительной парадигмы: один компьютер / много пользователей → ПК / пользователь → один пользователь / множество средств с вычислительными / управляющими возможностями.

Масштабирование микропроцессоров и других ИС, повышение производительности, пропускной способности обеспечили переход от ЭВМ коллективного пользования к персональным компьютерам. Следующим этапом стало оснащение пользователя несколькими, помимо настольного ПК и / или ноутбука, устройствами с вычислительными / связ-

ными/управляющими возможностями и выходом в Интернет (включая формирование Интернета вещей – IoT): сетевыми телефонами/коммуникаторами, персональными цифровыми помощниками (PDA), цифровыми телевизионными приставками, потребительской электроникой, системой "интеллектуального дома" и т.п. Развитие тенденции послужило предпосылкой для цифрового стиля жизни, оказывающего значительное влияние на современное общество (социальные сети, мультимедийные интерактивные СМИ, видео по заказу и другие интерактивные интернет-сервисы).

Можно констатировать, что формируются сетевые социумы – сложные сообщества людей, приборов, информации и услуг, которые объединяются посредством коммуникационных сетей для достижения оптимальной выгоды от использования ресурсов, а также синхронизации событий и их последствий.

При этом наблюдается быстрая сменяемость перспективных платформ конечных пользовательских электронных систем в зависимости от прогресса в области полупроводниковых приборов, прикладного обеспечения, архитектур приборных структур и конечных электронных систем. Так, еще шесть-семь лет назад на рынке мобильных ПК наибольшими темпами рос сегмент нетбуков. Сегодня в качестве конкурента дешевых и средних ноутбуков их заменили планшетные ПК. Правда, темпы роста сегмента падают из-за быстрого развития рынка смартфонов, прикладные процессоры которых уже около трех лет не уступают по производительности процессорам планшетных ПК и даже ноутбуков младших моделей.

Данная тенденция возникла на основе развития процессорной техники и систем-на-кристалле, теперь это параллельные и взаимовлияющие один на другой процессы.

МНОГОЯДЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И СИСТЕМЫ С РАЗНОРОДНЫМИ ЯДРАМИ

Суть тенденции – переход от одноядерных процессоров к многоядерным и далее к системам с разнородными ядрами. Потребности повышения производительности ПК обусловили необходимость использования в них более чем одного процессора. Однако параллельно возникла задача ускорения их взаимодействия, снижения тепловыделения и потребляемой мощности, то есть нужно было разместить их не по отдельности на плате или в составе многокристального модуля, а на одном кристалле. Это обеспечивало решение проблем за счет существенного уменьшения длины межсоединений. На данном этапе возникли не только многоядерные процес-

соры, но и системы-на-кристалле, в которых, помимо процессорных ядер, могли присутствовать элементы логики, блоки памяти и т.п.

Развитие данных направлений потребовало формирования и быстрого расширения индустрии поставщиков библиотек СФ-блоков микропроцессоров, а затем и других типов ИС и их сочетаний. Появилась индустрия СФ (IP) – поставщиков. По результатам 2015 года отгрузки коммерческих ядер (на уровне СФ-блоков) центральных процессоров превысили 13 млрд. шт., ЦОС-процессоров – 1 млрд. шт., графических процессоров – 600 млн. шт. Надо отметить, что все эти ядра реализуются не на физическом уровне, а в виде библиотек СФ-блоков через практику лицензирования. Появление индустрии IP-поставщиков привело к возникновению прикладных процессоров для мобильных телефонов и разработке смартфонов. Среди изготовителей прикладных процессоров для планшетных ПК первоначально не оказалось традиционных изготовителей микропроцессоров для настольных ПК и ноутбуков, таких как Intel, AMD, Via Technologies. Лицензируемые ядра широко используются при создании процессоров для планшетных ПК и смартфонов. Многоядерные процессорные решения реализуются на одном кристалле либо в виде многокристального модуля.

В то же время развитие технологий типа система-на-кристалле привело к созданию отдельных видов однокристалльных конечных систем: компьютер-на-кристалле, лаборатория-на-кристалле и т.п. Фактически системы-на-кристалле стали прообразом систем с разнородными ядрами, переход к которым начинается в настоящее время.

В перспективе подобные системы, состоящие из ядер различного типа, функционального назначения и поставщиков, могут оказаться комплексом многоядерных кристаллов и систем-на-кристалле. Возникновение технологий систем с разнородными ядрами тесно связано с вопросами трехмерной (3D) интеграции.

ТЕХНОЛОГИИ МНОГОПОТОКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ И ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Реализация принципов и архитектур многоядерности тесно связана с развитием технологий многопоточковой обработки данных. В системах, состоящих из множества однородных обрабатывающих элементов, общая производительность не коррелирует автоматически с простым суммированием производительности каждого элемента. При создании таких систем требуется входящий поток дробить на множество потоков, не превосходящее число обрабаты-

вающих элементов. Соответственно, в целях управления подобными потоками и их одновременной обработки нужно развивать методы параллельного программирования или программирования с массовым параллелизмом. Подобные принципы применяются на уровне как многоядерных ИС, многокристальных модулей, так и конечных электронных систем. Следует отметить, что производительность многопоточковых систем, использующих ПО с массовым параллелизмом, ограничена только пропускной способностью устройств ввода-вывода, при ее дефиците приходится выстраивать очереди различного типа.

Многоядерность, многопоточковость и программирование с массовым параллелизмом позволяют существенно увеличить производительность конечных электронных систем различного назначения, способствуют все большему разнообразию возможных вариантов этих систем.

ТРЕХМЕРНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ

Трехмерная интеграция – возможная альтернатива масштабированию планарных технологий. По мере масштабирования ИС, приближения кремниевой технологии к пределам, обусловленным физическими свойствами кремния и постоянным увеличением затрат на освоение каждого нового поколения, возникла идея наращивания функциональных возможностей и производительности ИС, электронных модулей и конечных электронных систем за счет применения методик трехмерной интеграции.

К перспективным методикам трехмерной интеграции относятся технологии TSV (through-silicon via), этажерочных межсоединений сквозь подложку ИС и/или сквозь промежуточную кремниевую пластину (интерпозер), одна из технологий трехмерного корпусирования (система-в-корпусе, многокристальные этажерочные модули и т. д.) с этажерочным расположением кристаллов в целях рационального использования пространства. Альтернативные типы трехмерного корпусирования (например, Silicon Carrier Packaging Technology корпорации IBM) не предусматривают этажирования, но подложки носителей с TSV подходят для формирования межсоединений различных кристаллов ИС в одном модуле.

В большинстве трехмерных модулей этажерочно расположенные кристаллы соединяются боковыми (краевыми) межсоединениями, которые несколько увеличивают длину и ширину модуля и обычно требуют наличия дополнительных промежуточных слоев между кристаллами. В некоторых трехмерных конструкциях TSV заменяют боковые межсоединения за счет создания вертикальных сквозных межсое-

динений, проходящих через подложку кристаллов. В результате не увеличиваются длина и ширина модуля.

Если удастся отказаться от промежуточных слоев, TSV 3D-модули оказываются более плоскими, чем 3D-модули с боковыми межсоединениями. Такая TSV-методика имеет второе название TSS (Through-Silicon Stacking или Thru-Silicon Stacking). В 3D ИС TSV-технология используется аналогичным образом, но на уровне одного интегрированного кристалла, созданного путем этажирования кремниевых пластин и/или кристаллов ИС, объединенных вертикальными межсоединениями в прибор. Благодаря этому в малом объеме удастся создать большую функциональность. Кроме того, значительно уменьшается длина межсоединений, что способствует повышению быстродействия.

В случаях, когда разнородные кристаллы размещаются на интерпозере, в котором проложены соединения с высокой пропускной способностью и низкой задержкой, через интерпозер формируются TSV, соединяющие расположенные на нем кристаллы с подложкой корпуса (модуля). По сравнению с обычными многокристальными модулями такая схема обеспечивает большую плотность размещения компонентов при снижении потребляемой мощности до десяти раз. Как показывают последние исследования, большие перспективы конвергенции разнородных кристаллов предоставляют 3D FPGA. В рамках 3D-подходов можно интегрировать FPGA с кристаллами ASIC, памяти с ASSP, ЦОС-процессоров, микропроцессоров или даже кристаллами FPGA других поставщиков. В результате повышается производительность системы за счет минимизации потребляемой мощности, снижения размеров и уменьшения используемых компонентов и материалов. Также возможна интеграция на уровне пластины разнородных чипсетов с кремниевыми интерпозерами, которые могут служить межсоединениями любого количества кристаллов или отдельных кристаллов внутри единого корпуса (модуля). В итоге планарные специализированные ASIC постепенно утратят их традиционные преимущества в массовом производстве.

В перспективе основной проблемой конвергенции на физическом уровне в рамках FPGA будет программное обеспечение. Проблемы программирования интегрированного ПО смешанных системных FPGA, содержащих процессор, ЦОС-процессор, ASIC и ASSP (все на одном кристалле или в одном модуле) потребуют новых сред программирования, охватывающих все эти разнородные блоки.

Следует отметить, что услуги по 3D-корпусированию в ближайшее время будут предлагаться ограничен-

ным количеством IDM (Intel, Samsung) и кремниевых заводов, например TSMC. Соответственно, может возникнуть дефицит услуг. Более того, по мере развития 3D-проектирования, производства и корпусирования может оказаться, что фирмы, располагающие только планарными технологиями, окажутся неконкурентоспособными.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ САПР

Тенденции в области инструментальных средств САПР – повышение вычислительной мощности и отказ от последовательных алгоритмов в пользу алгоритмов с параллельным исполнением процессов проектирования. По мере масштабирования ИС до пределов, близких к молекулярным размерам, и появления трехмерных технологий традиционные инструментальные средства и методики САПР становятся неэффективными при проектировании высокопроизводительных систем. Многим просто не хватает вычислительной мощности при использовании традиционных пошаговых механизмов на основе методов типа проб и ошибок, подбора и т.п.

В современных САПР предпринимаются попытки увеличить вычислительную мощность за счет применения новейших графических процессоров, центральных процессоров и алгоритмов, позволяющих при совмещении топологических слоев в процессе обработки данных не подбирать, а вычислять с большой точностью оптимальные места для формирования межслойных отверстий и расположения элементов. Это позволяет уменьшить длину межсоединений и, соответственно, снизить тепловыделение, увеличить быстродействие. Начинают применяться алгоритмы массового параллелизма при проектировании сходных топологий. Разрабатываются новые способы обработки и манипулирования данными, ускоряющие процесс проектирования. Так, например, существует методика преобразования входных файлов с кодовыми спецификациями на языке "C" в выходные файлы в формате GDSII*. Аналогично разрабатываются методики снижения потребляемой мощности конструкции и т.п. Все это позволяет сокращать цикл проектирования при повышении качества готового продукта.

* GDSII – graphic data system II – система обработки графических данных второго поколения, формат файлов баз данных, являющийся де-факто промышленным стандартом для обмена данными по интегральным схемам и их топологиям. Данный формат описывает плоские геометрические формы, текстовые метки и иную информацию в иерархической форме. Данные могут использоваться для обмена между САПР или для создания фотошаблонов.

* * *

Таким образом, проектирование изделий микроэлектроники превращается в проектирование все более сложных систем. Проектировщики предпочитают ориентироваться не на технические достижения и архитектурные преимущества, а на технологичность и рентабельность. Микроэлектроника по мере усложнения процессов превращается в область радиоэлектроники, создающую функционально законченные системы, которые отличаются более высокой надежностью и быстродействием.

ЛИТЕРАТУРА

- Communications, computer systems drive IC sales across all regions // Solid State Technology. The Pulse. May 26. 2016.
- Equipment spending up: 19 new fabs and lines to start construction // Solid State Technology. The Pulse. June 14. 2016.
- **Paula Doe.** Changing markets drive smarter manufacturing by IC sector // Solid State Technology. Wafer News. June 20. 2016.
- Leti extends CMOS platforms' lifespan and explores new computing paradigms // Solid State Technology. The Pulse. June 20. 2016.
- **Dick James.** Notes from The ConFab 2016 – Day 1 of The ConFab 2016 // Solid State Technology. The Pulse. June 29. 2016.
- Chip equipment spending: SEMI forecasts flat 2016, rebound in 2017 // Solid State Technology. The Pulse. July 12. 2016.
- **Junco Yoshida.** 2016 IC Industry: Who Grabbed What... So Far // EE Times. September 2. 2016
- **Zvi Or-Bach.** Moore's Law did indeed stop at 28nm // Solid State Technology. The Pulse. September 19. 2016.
- **Rick Merritt.** Chip Process Wart Heats Up // EE Times. September 12. 2016.
- Companies maximizing 300mm, 200mm wafer capacity // Solid State Technology. The Pulse. October 07. 2016.
- Leading-edge leads the way in pure-play foundry growth // Solid State Technology. Wafer News. October 03. 2016.
- **Julien Happich.** Uncertainty Grows For 5nm, 3nm // EE Times. 12. 07. 2016.
- **Julien Happich.** Leti's 5nm Node to Stack Si Nanowires // EE Times. 12. 07. 2016.
- **Dave Lammers.** MRAM Takes Center Stage at IEDM 2016 // Solid State Technology. The Pulse. December 14. 2016.

