

ФОРМ-ФАКТОР РАДИОЧАСТОТНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Часть 3

В первых двух частях статьи были описаны этапы процесса корпусирования РЧ-компонентов, рассмотрены компоненты для различных видов монтажа печатных плат и вариантов форм-факторов. В третьей части будет продолжен рассказ о различных РЧ-компонентах.

В статье сохранена сквозная нумерация рисунков и использованных источников литературы.

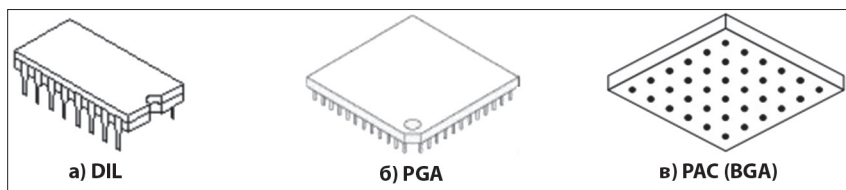
МНОГОЧИПОВЫЕ (МНОГОКРИСТАЛЬНЫЕ) МОДУЛИ МКМ (MULTICHIP MODULE, MCM)

Анализ достижений и тенденций развития электронной техники за рубежом показывает, что все более отчетливо прослеживается тенденция миниатюризации и интеграции компонентов. В одном электронном устройстве современных комплексных РЧ-систем могут быть использованы цифровые и аналоговые ИС, пассивные компоненты, микроэлектромеханические МЭМС (*RF MEMS*) и оптические МОЭМС (*MOEMS*) компоненты, СВЧ приемопередающие устройства. Процессы интеграции в таких системах идут практически параллельно как на уровне кристаллов, так и на уровне систем в корпусе (SIP). Для получения наивысших технических показателей, повышения быстродействия, снижения энергопотребления и стоимости актуальными являются разработка и применение корпусов (рис. 36) для многочиповых или многокристалльных модулей МКМ [35].

Англо-русский интернет-словарь по нанотехнологиям [33] дает такое определение МКМ форм-фактора:

- **Многочиповый или многокристалльный модуль, МКМ (*Multi Chip Module, MCM*)** — микроячейка; взаимосвязь двух или более полупроводниковых микросхем в форме полупроводникового элемента. Специализированный электронный блок, в котором множество микросхем, полупроводниковых кристаллов или других модулей собрано таким образом, чтобы облегчить их использование в качестве единой интегральной цепи.

Многокристалльный, или многочиповый (мультичиповый), модуль способен поддерживать несколько микросхем в одном корпусе. Как правило, многочиповые модули на основе керамики содержат высокопроизводительные ИС



▲ Рис. 36. Наиболее часто применяемые варианты корпусирования МСМ-компонентов

с большим количеством выводов и используют некоторую форму усовершенствованной технологии межсоединений компонентов в корпусе (*interconnect technology*), такую как TAB, COB или C-4.

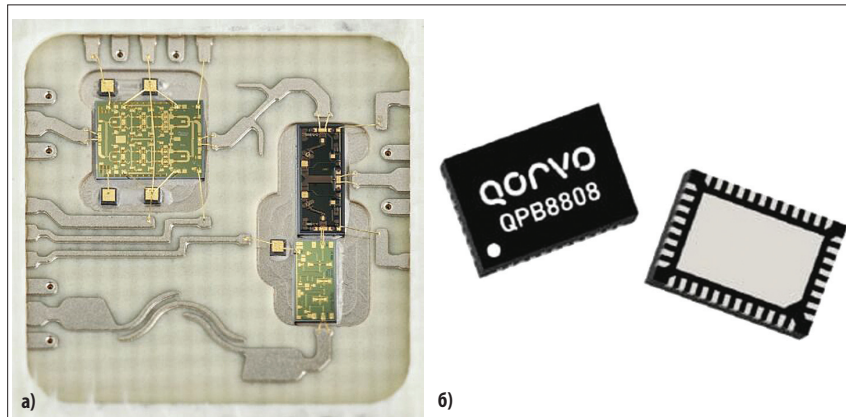
Параметры, используемые для определения **многочипового модуля**, являются неопределенными, но один из основных критериев — это корпус, который содержит не менее 20% кремния, не менее 100 вводов/выводов на подложке и имеет не менее четырех слоев [34].

Многокристалльный модуль МСМ представляет собой общую электронную сборку, например корпус с несколькими проводящими клеммами, или «контактами» (*pins*), в которой интегрировано несколько интегральных схем или чипов, полупроводниковые матрицы и дискретные компоненты. Как правило, это выполнено на объединяющей подложке для того, чтобы использовать сборку как единый компонент, как более круп-

ную ИС. Такие термины, как «гибрид» (*hybrid*) или «гибридная интегральная схема» (*hybrid integrated circuit*), также относятся к МСМ.

На рынке РЧ-компонентов МКМ-модули представлены в различных формах в зависимости от сложности и стратегии развития компонентов, которой придерживаются их разработчики. Разновидности МКМ могут варьироваться от использования размещенных на небольшой общей печатной плате нескольких корпусированных микросхем, что по сути дела имитирует более сложную корпусированную ИС, до полностью пользовательских корпусов микросхем, интегрирующих несколько бескорпусных микросхем на подложке с высокой плотностью соединений HDI (*High Density Interconnection*).

Многочиповый модуль усилителя **Qorvo QPB8808** (рис. 37) с полосой пропускания 50–1218 МГц. QPB8808 размещен в стандартном 40-контактном



▲ Рис. 37. Выполненные в виде МСМ входной РЧ-блок диапазона 26 ГГц компании Plextek RF1 и усилитель компании Qorvo QPB8808

корпусе QFN размером 5×7 мм с открытой теплоотводящей площадкой EP (*Exposed Paddle*) под устройством для теплового и электрического заземления. Компактная многочиповая конструкция модуля обеспечивает экономичное решение, уменьшая занимаемое на плате место по сравнению с традиционными гибридными корпусами.

Многочиповые модули MCM — важная часть современной индустрии электронной миниатюризации и микроэлектронных систем (рис. 38). Такие модули классифицируются в зависимости от технологии, используемой для создания HDI-подложки [36]:

- MCM-C (*Ceramic MCM, Multilayer Ceramic Technology*) керамический МКМ (рис. 39) — используются керамические подложки MCM, такие как низкотемпературная спеченная керамика (*Low temperature cofired ceramic LTCC*), высокотемпературная керамика (*High temperature cofired ceramic, HTCC*), с проволоочной связью между чипами;

- MCM-D (*Deposited MCM, Thin Film Technology*) — осажденный МКМ. Модули наносятся на базовую подложку с использованием тонкопленочной технологии. Используется диэлектрический слой над керамической, стеклянной или металлической подложкой, и тонкопленочные соединения создаются на диэлектрическом слое;

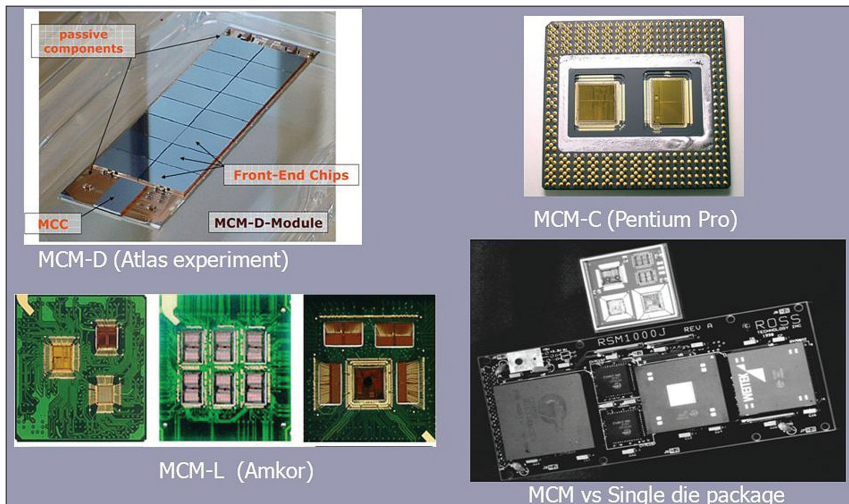
- MCM-L (*Laminated Substrates MCM*) — ламинированный МКМ использует ламинированную печатную плату (*laminated circuit board*), имеющую до 25 слоев с проводниками (*tracking layers*). Подложка представляет собой многослойную печатную плату (PCB);

- MCM-S (*Silicon MCM*) — кремниевый МКМ — используется кремниевая подложка с дорожками (*tracks*), созданными в кремнии, как и в обычных микросхемах.

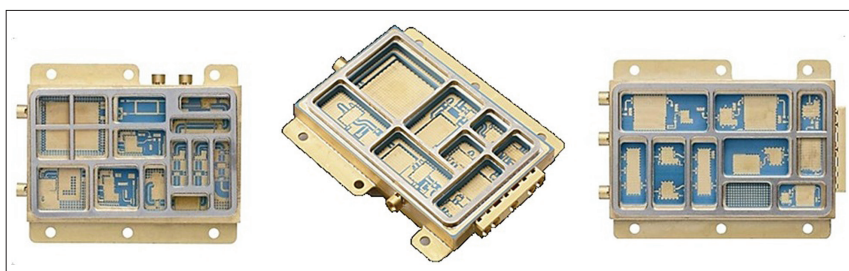
Российской компанией «ТЕСТПРИБОР» [11] разработан 602-выводной металло-керамический корпус 6-го типа по ГОСТ Р 54844 (рис. 40) для МКМ, имеющий три монтажные площадки и посадочные места для монтажа SMD-конденсаторов, который является одним из самых перспективных типов для современных микросборок специального применения. Габаритные размеры тела корпуса не более 41,71×41,71×4,52 мм.

МНОГОЧИПОВЫЕ РЧ-КОМПОНЕНТЫ

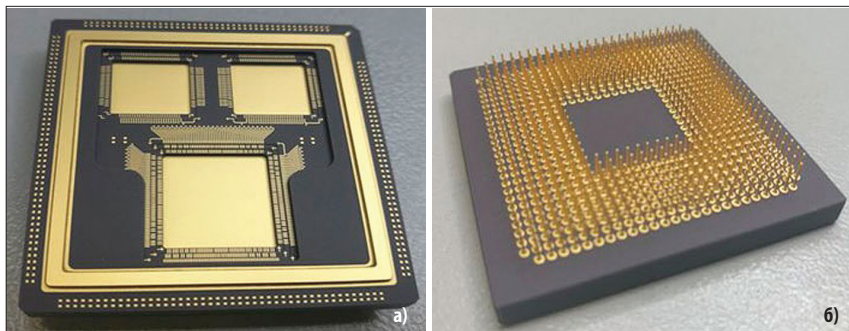
На пассивную многослойную ИС могут устанавливаться элементы, изготовленные с применением других технологий: полупроводниковые приборы, монолитно-интегральные схемы управления сигналом, микроэлектромеханические системы (МЭМС), перестраиваемые компоненты на основе сегнетоэлектри-



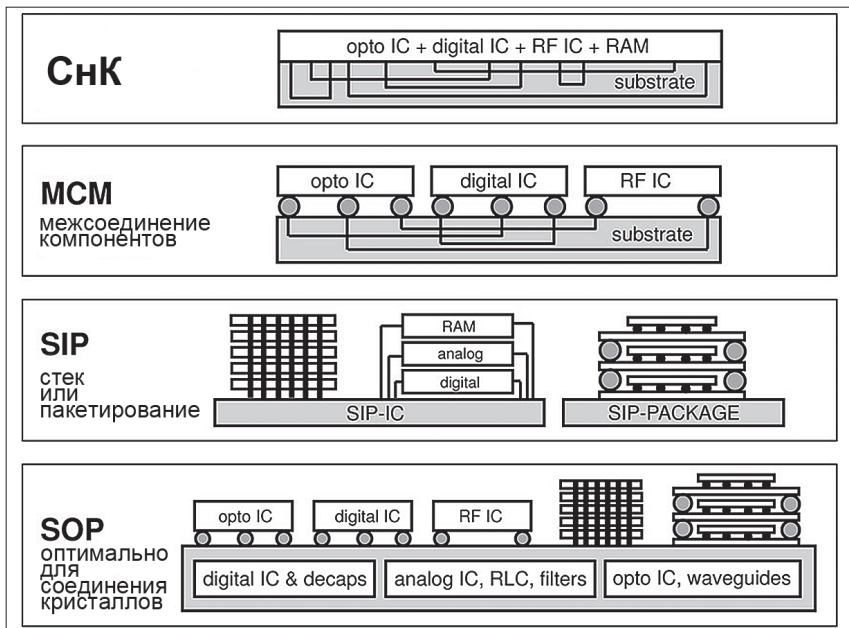
▲ Рис. 38. Разновидности многочиповых модулей



▲ Рис. 39. Корпуса для MCM-C-компонентов компании KYOCERA



▲ Рис. 40. Корпус МК 6103.602-А: а) вид сверху; б) вид снизу



▲ Рис. 41. Сравнение многочиповых компонентов SOC, MCM, SIP и SOP [37]

ческих материалов и т.д. Это позволяет создавать многофункциональные модули, выполненные на единой подложке, для обобщенной характеристики которых зачастую используется термин «многочиповые модули» — MCM (Multi-Chip Module). Компоновка на единой подложке (System-on-Chip, SoC) или в едином корпусе (System-in-Package, SiP) является самым быстроразвивающимся и перспективным направлением современной микроэлектроники [37, 48].

Разработчиками было предложено и исследовано множество методов для объединения нескольких чипов в одном корпусе. Введение в корпус РЧ-компонентов имеет свои особенности.

Во многих случаях радиочастотные схемы добавляются к большим системам на чипе SoC в одночиповом исполнении.

Существует несколько основных категорий систем в корпусе (рис. 41), представляющих собой варианты двух- (2D) и трехмерного (3D) корпусирования полупроводниковых компонентов с помощью методов создания межсоединений проволоочной разваркой выводов и монтажа перевернутых кристаллов (flip chip) [37–39]. Эти основные категории многочиповых компонентов — система на чипе SoC, MCM, система в корпусе SiP, система на чипе SoC — более подробно рассмотрены далее.

КОРПУС НА КОРПУСЕ PoP

В компонентах «корпус на корпусе» PoP (Package-on-a-Package) заключенные в корпус однокомпонентные элементы монтируются вертикально поверх друг друга (stacked technology). Корпуса могут содержать дискретные компоненты (РЧ-узлы, процессор, память, логика) или быть системой в корпусе (SiP), объединенной с другим компонентом для обеспечения расширенной функциональности. Отдельные элементы могут подключаться к общей системе с помощью массивов шариковых сеток (рис. 42). Эта технология значительно повышает плотность упаковки электронных компонентов на плате [40].

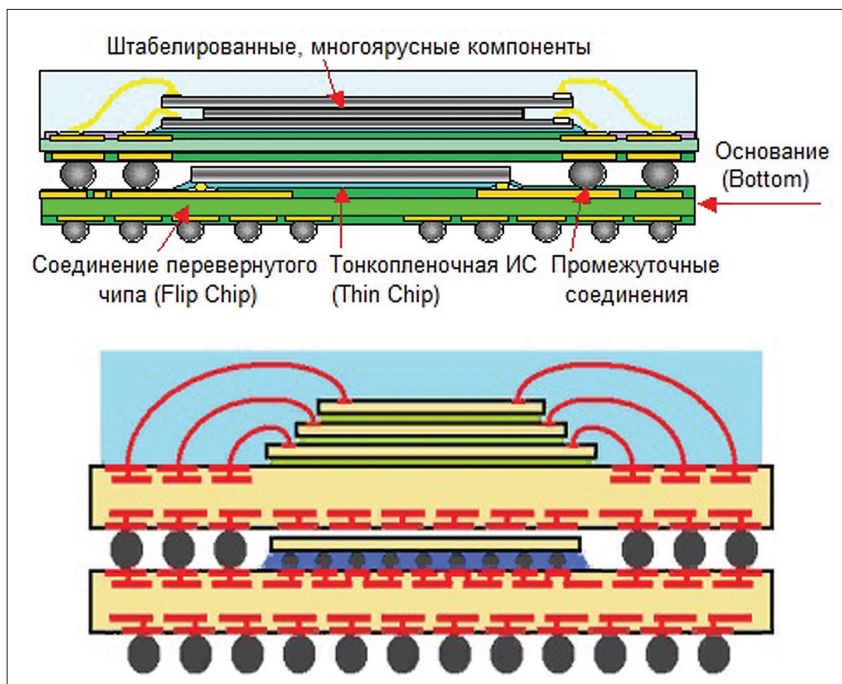
На рис. 43 показано поперечное сечение, выполненное в соответствии с концепцией PoP.

СИСТЕМА В КОРПУСЕ SiP

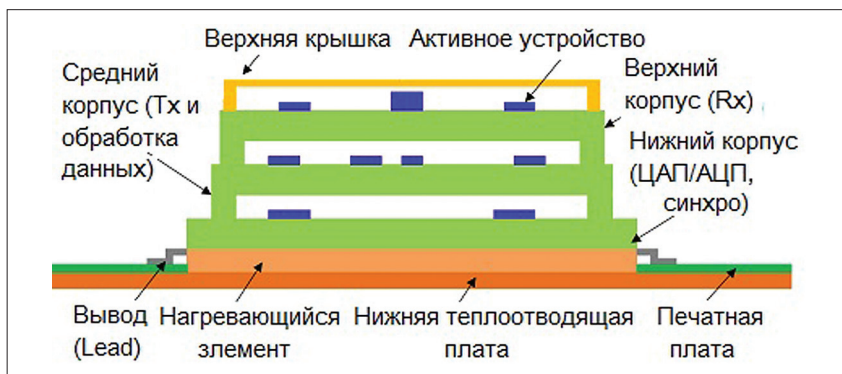
В компонентах типа «РЧ-система в корпусе» SiP (System-in-Package) на единой подложке интегрируются РЧ и цифровые ИС, логические ИС, пассивные компоненты, фильтры на ПАВ и механические детали (рис. 44). В реализации радиочастотных RF SiP корпус не просто является промежуточным соединителем между интегральной схемой и платой, а становится средством интеграции системы и может содержать большое количество пассивных элементов. Это само по себе значительно отличает RF SiP от типового корпусирования цифровых SiP или ИС. Например, соединительная подложка (substrate interconnect) и металлические структуры (metal structures) могут рассматриваться как критические устройства, которые требуют тщательного моделирования, выделения и включения в моделируемые функциональные цепи для того, чтобы можно было понять и управлять РЧ-эффектами высокого порядка, такими как дисперсия и излучение [41].

СИСТЕМА НА ЧИПЕ SoC (SYSTEM-on-CHIP)

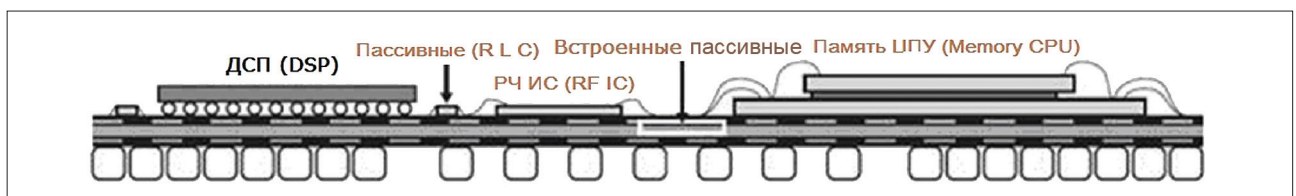
В системе на кристалле SoC (System-on-Chip) все необходимые компоненты системы объединяют в один чип или интегральную схему. Обычно система SoC может основываться либо на микроконтроллере, включая процессор CPU, оперативную память RAM, постоянную память ROM и другие периферийные



▲ Рис. 42. Концепция изготовления компонентов «корпус на корпусе» PoP (Package-on-Package) [40]



▲ Рис. 43. Вид поперечного сечения радиочастотного компонента RF PoP, установленного на пластине теплоотвода [41]



▲ Рис. 44. Пример структуры РЧ-системы в корпусе SiP [42]

устройства, либо только на микропроцессоре CPU.

Во многих случаях радиочастотные схемы просто добавляются к большим цифровым SoC в одночиповом решении [43]. Другой подход заключается в интеграции РЧ-схем с использованием методов «система в корпусе» (SiP) — это приводит к тем же проблемам тестирования и проверки, что и в решениях SoC. Наиболее комплексный системный подход позволяет использовать корпус с несколькими чипами (*multi-die package*), который может включать цифровую SoC вместе с беспроводным, сенсорным и исполнительными чипами при необходимости.

В настоящее время, несмотря на то, что многие РЧ-блоки реализованы в виде единой микросхемы или «системы на кристалле» (SoC), в тракте передачи им все же требуется внешний усилитель мощности УМ (PA) для достижения желаемой мощности передачи. Усилитель и неправильная фильтрация или ее отсутствие являются очень распространенными причинами того, что радиочастотные конструкции не соответствуют требованиям нормативных документов по ЭМС.

РАДАР НА ЧИПЕ RoC

В силу большого разнообразия типов современных РЛС (радаров), применяемых в них технологий и массового тиражирования ИС для них, весьма привлекательным является размещение в многочиповом компоненте всего РЧ-блока, аналоговый интерфейс, бейсбэнд-тракт, цифровой интерфейс и последетекторной обработки сигналов радара. Это позволяет наилучшим образом использовать площадь чипа для улучшения его характеристик, обеспечивает оптимальное разделение между аналоговыми и цифровыми функциями компонента и обеспечивает интерфейсы с высокой пропускной способностью между различными сегментами трактов, будь то аналоговая, цифровая или программируемая части чипа.

Такое решение, получившее название «радар на чипе» (*Radar on Chip, RoC*), предлагает, например, компания **Uhnder** (Austin, Texas), создавшая первый в мире автомобильный цифровой радар на чипе (RoC) [44]. Компания работает для автомобильной промышленности, поставляя радиолокационные чипы нового поколения, способные достигать беспрецедентных уровней производительности в новом автомобильном радиолокационном диапазоне 76–81 ГГц. Датчики, основанные на технологии цифровой модуляции DCM (*Digitally Coded Modulation*), легко превосходят текущие требования к усовершенствованным системам по-

мощи водителю ADAS (*Advanced Driver Assistance Systems*) для первых трех уровней автономности, которые планируются сегодня для серийных автомобилей и будут масштабироваться до гораздо более жестких требований, поскольку индустрия переходит к полной автономии.

ТРЕХМЕРНЫЕ 3D ИС

Одной из основных тенденций в электронике является уменьшение габаритов компонентов при одновременном повышении их производительности и функциональности. Для решения этой задачи успешно применяются методики трехмерной компоновки составных элементов интегральных схем. Наиболее интенсивно развиваются методы 3D-интеграции, которым посвящен обзор [45].

Трехмерная интегральная схема **3D ИС** (*three-dimensional integrated circuit, 3D IC*) представляет собой интегральную схему, изготовленную путем укладки (штабелирования, *stacking*) кремниевых пластин или кристаллов и их вертикального соединения, например с помощью сквозных кремниевых переходных отверстий (*through-silicon vias, TSV*) или медных соединений Cu-Cu. Такие 3D-компоненты ведут себя как единое устройство с улучшенными рабочими характеристиками при уменьшенной потребляемой мощности и меньшей занимаемой площади на чипе, чем обычные двумерные компоненты. 3D ИС всего лишь один из множества вариантов трехмерной интеграции 3D, в которых используется вертикальное пространство ИС для достижения лучших характеристик изделия.

Над классификацией различных технологий 3D-интеграции для дальнейшего создания стандартов и дорожных карт 3D-интеграции работали такие международные организации, как комитет **JIC** (*Jisso Technology Roadmap Committee*) и **ITRS** (*International Technology Roadmap for Semiconductors*).

Трехмерные интегральные схемы могут быть классифицированы по уровню иерархии межсоединений на глобальном (корпусирование, *package*), промежуточном (контактная площадка, *bond pad*) и локальном (транзисторном) уровнях. В общем, трехмерная интеграция — это широкий термин, который включает такие технологии, как трехмерная упаковка пластин (*3D wafer-level packaging, 3DWLP*), интеграция 2,5D и 3D с применением коммутационных подкристалльных переходных плат-интерпозеров (*interposer-based integration*), 3D-стекированные ИС (*3D-SIC, 3D stacked IC*), монокристалльные 3D ИС, трехмерная гетерогенная интеграция (*heterogeneous integration*) и 3D системная интеграция [45, 46].

МОДУЛЬНОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ

Термин «модульное выполнение» употребляется в документе ГОСТ Р 52003–2003 [47] — «Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств. Термины и определения». В классификации по конструктивной сложности РЭС можно разделить на средства в *модульном* и *немодульном* исполнении. Уровни разукрупнения РЭС в немодульном исполнении по конструктивной сложности включают *шкаф, блок и ячейку*. Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств в **модульном исполнении** по конструктивной сложности включают *электронный модуль; унифицированный электронный модуль; стандартный электронный модуль; специализированный стандартный электронный модуль и модули 3-го, 2-го, 1-го и нулевого уровня*.

Магистрально-модульное исполнение радиоэлектронного средства — конструктивно-технологический метод создания радиоэлектронного средства в модульном исполнении с использованием рациональной структуры соединения и коммутации его составных частей, обеспечивающий взаимозаменяемость радиоэлектронных средств и их составных частей, а также техническую совместимость в соответствии с заданными требованиями к их разработке [47].

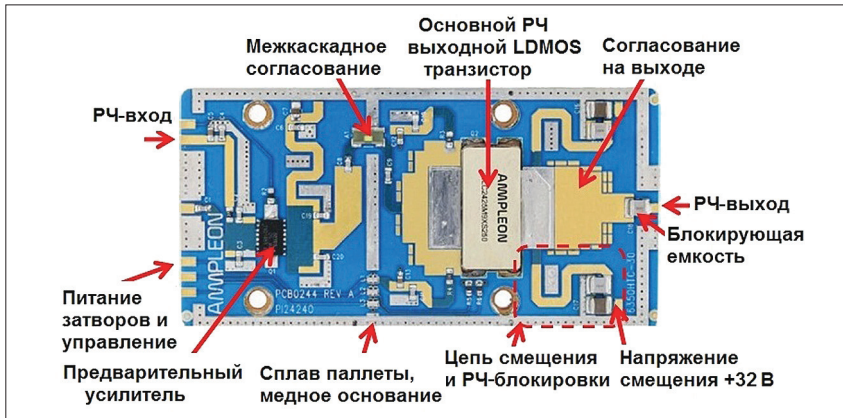
Можно дать и еще одно определение, содержащееся в ГОСТ 25804.1–83 «Аппаратура, приборы, устройства и оборудование систем управления технологическими процессами атомных электростанций. Основные положения» [48]:

Модульное исполнение — конструктивное исполнение систем и элементов управления технологическими процессами атомных электростанций, при котором аппаратура, приборы, устройства и оборудование компонуются в единой несущей конструкции (модуле) и изготавливаются по самостоятельному ТУ.

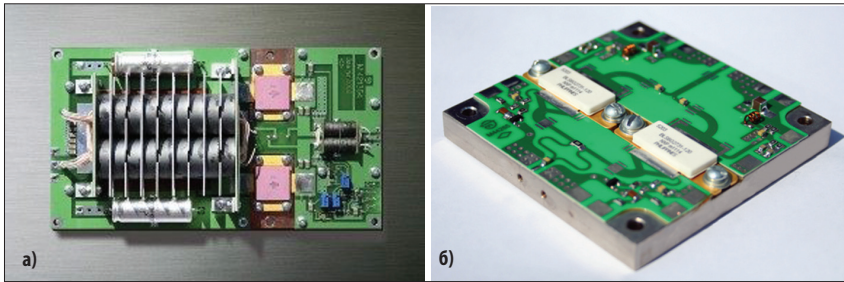
УСИЛИТЕЛЬНЫЕ ПАЛЛЕТЫ PSM

Радиочастотные усилительные паллеты, или субблоки (*Pallet, Power Solution Module PSM*), представляют собой усилители мощности, чаще всего — однокаскадные. Одним из их достоинств является наличие входных и выходных согласующих цепей, обеспечивающих согласование с 50-омным трактом в заданной полосе частот [49].

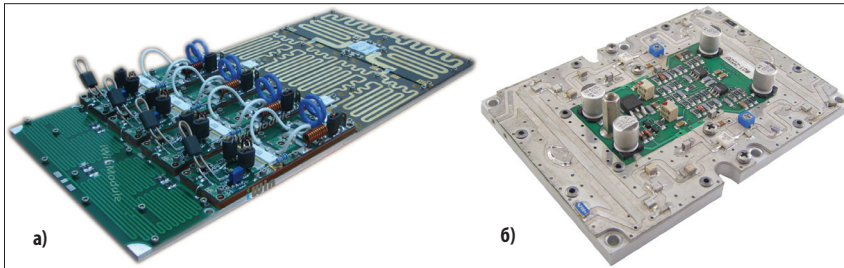
Конструктивно усилительные паллеты состоят из металлического основания (рис. 45) — фланца-теплоотвода, диэлектрической подложки с необходимой топологией схемы согласующих цепей и смонтированными на ней электронными компонентами, в том числе мощными высокочастотными транзи-



▲ Рис. 45. Конструкция и топология усилителя мощности 250 Вт диапазона 2,4–2,5 ГГц PC24250 Pallet от компании Ampleon



▲ Рис. 46. Усилительные паллеты, разработанные Научно-исследовательским институтом электронной техники АО «НИИЭТ» моделей УМ0328-1000 (M421354) и M44265



▲ Рис. 47. Паллеты A3000-FM и U05-TV компании iWin Module

сторями. Подложкой служит печатная плата, на которой методом поверхностного монтажа установлены маломощные компоненты. Мощные элементы и транзисторы монтируются непосредственно на фланце.

Преимущество усилительных паллет заключается в меньшей себестоимости из-за отсутствия герметизированных корпусов и унифицированных габаритов, поскольку размеры паллет и конфигурация размещения контактных площадок или соединителей определяются техническими требованиями заказчика. Это обеспечивает большую универсальность в применении.

На рис. 46 показано конструктивное исполнение усилительных паллет, разработанных АО «НИИЭТ». Усилительный модуль модели УМ0328-1000 (M421354) с выходной мощностью 1000 Вт предназначен для работы в диапазоне 3–30 МГц. Габариты устройства 225×125×46 мм, напряжение питания 50 В, входное и выходные сопротивления 50 Ом. Коэффициент усиления по мощности устройства, работающего в классе АВ, равен 20 дБ.

Усилительный модуль модели M44265 (рис. 46б) от АО «НИИЭТ» предназначен для применения в усилителях мощности РЛС S-диапазона частот (2,7–3,1 ГГц). Габариты модуля 70×70×13 мм, выходная мощность составляет 300 Вт, напряжение питания равно 35 В.

Усилительная паллета A3000-FM, производимая компанией iWin Module (рис. 47), предназначена для использования в передатчиках FM-диапазона. Этот усилитель выполнен с использованием микрорешетчатых технологий, для повышения надежности в нем применены MOSFET-транзисторы. Диапазон рабочих частот 87,5–108 МГц, коэффициент усиления 25 дБ, выходная мощность 3 кВт. Паллета U05-TV предназначена для использования в диапазоне 470–860 МГц с выходной мощностью 5 Вт.

Отделение высокочастотных приборов PPGR компании Microsemi Corporation начало производство мощных СВЧ-паллет для применения в радарах [50], работающих в диапазонах частот L (1200–1400 МГц) и S (2700–3100 МГц, 3100–3400 МГц). Такие СВЧ-модули позволяют получить в 2–3 раза большую выходную мощность по сравнению с одиночными транзисторами и имеют крайне простую концепцию работы plug-and-play, что позволяет интегрировать СВЧ-модуль в систему без настройки и согласования волновых сопротивлений. Все это существенно упрощает систему пользователя, значительно снижает время разработки, уменьшает размер усилителя более чем на 50% и заметно ускоряет процесс сборки и изготовления.

МОДУЛИ СТАНДАРТОВ SFP, SFP+ И XFP СО СЛОТАМИ ДЛЯ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ОПТИКИ

Современное телекоммуникационное оборудование зачастую имеет слоты для подключения оптических приемопередатчиков (трансиверов, transceiver) различных форм-факторов (GBIC, SFP, SFP+, XFP, QSFP, CFP), предназначенных для различных скоростей передачи и конкретных целей заказчика (рис. 48).

Наиболее распространенным и дешевым стандартом сменных оптических



▲ Рис. 48. Модули стандартов GBIC, SFP, SFP-Plus и XFP

модулей является **SFP** (*Small Form-factor Pluggable*) [51].

Это модули малогабаритной конструкции в продолговатом металлическом корпусе. С одной стороны модуль имеет соединитель для подключения к коммутационному оборудованию, с другой — в модуле имеются два оптических порта (*duplex*): излучателя (Tx) и фотоприемника (Rx) для работы в двухволоконном режиме, либо один оптический порт (*simplex*) для одноволоконных SFP. SFP — промышленный стандарт модульных компактных приемопередатчиков (трансиверов), используемых для передачи данных в телекоммуникациях. Предназначением модулей (трансиверов) является преобразование сигналов от активных устройств сети в световые волны. Наиболее распространенные области применения SFP-модулей — передача данных в сетях на скоростях выше 100 Mbps.

Модули SFP используются для присоединения платы сетевого устройства (коммутатора, маршрутизатора или подобного устройства) к оптическому волокну или неэкранированной витой паре, выступающих в роли сетевого кабеля. Модуль SFP пришел на смену более громоздкому модулю GBIC. Модуль имеет соединитель, сопоставимый по размеру с соединителем 8P8C, то есть позволяет на 1 юните (1U, 43,7 мм) 19-дюймового телекоммуникационного оборудования разместить до 48 оптических портов.

Стандарт XFP, имеющий англоязычное название *10 Gigabit Small Form-factor Pluggable*, — стандарт для трансиверов, работающих в высокоскоростных компьютерных и телекоммуникационных сетях, построенных с применением оптического волокна в качестве среды для передачи данных. Стандарт был определен промышленной группой XFP MSA (*Multi-Source Agreement*) в 2002 году. Инициаторами MSA выступили Broadcom Corporation, Brocade, Emulex Corporation, Finisar, JDS Uniphase, Maxim Integrated Products, ONI Systems, ICS (a Sumitomo Electric company), Tусо Electronics и Velio. Вместе с разработкой стандарта XFP был подготовлен стандарт XFI (*10 Gigabit Small Form-factor Interface*), который определяет электрические характеристики интерфейса XFP. Кодирование битовой последовательности (PCS) вынесено из модуля на устройство-носитель, а сам XFP является, по сути, универсальным последовательным преобразователем.

Модули стандарта XFP имеют меньшие в сравнении с GBIC размеры, а также большую скорость передачи данных. При сравнении XFP-модуля с модулями формата SFP следует обратить внимание

на размеры и скорость передачи данных — XFP-модуль несколько больше SFP-модуля, но значительно выигрывает в скорости. Данный стандарт очень популярен, но постепенно вытесняется изделиями стандарта SFP+, имеющими схожие скоростные характеристики, но меньшие физические размеры.

Стандарт SFP+ является развитием более раннего стандарта SFP interface (*INF-8074*). SFP+ (*Enhanced Small Form-factor Pluggable, SFF-8431, SFF-8083*) — промышленный стандарт модульных компактных приемопередатчиков (трансиверов), используемых для передачи данных в телекоммуникациях. SFP+ представляет собой расширенную версию приемопередатчика SFP, способного поддерживать скорости передачи данных до 10 Гбит/с. Сначала SFP+ был издан 9 мая 2006 года, а версия 4.1 опубликована 6 июля 2009 года.

Обычный SFP-модуль не может быть использован в соединителе SFP+, если иное не оговорено в спецификации оборудования. Для соединителей X2 существуют переходники на один модуль SFP+ или два модуля SFP. За счет малых габаритов количество соединителей SFP+ на стандартный 1U 19" может быть существенно больше, чем других соединителей 10G. Ограничение в габаритах ухудшило охлаждение модулей SFP+, в результате чего они имеют меньшую мощность по сравнению с другими модулями, способными поддерживать скорости передачи данных до 10 Гбит/с, что сказывается на максимальной длине оптического кабеля между модулями. Посадочное место для модулей SFP+ имеет те же габариты, что и у SFP, разница заключается в протоколах передачи информации между модулем и коммутатором.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СВЧ-СБОРКИ IMA

Почти все ведущие компании-разработчики предлагают на рынке интегральные СВЧ-сборки IMA (*Integrated Microwave Assembly, RF/Microwave Assemblies*) — изделия, направленные на максимальное удовлетворение потребностей конкретных пользователей.

В таких компаниях на протяжении их развития основной упор, внутренние исследования и разработки направлены на создание предприятия, способного быстро адаптироваться к меняющимся потребностям клиента и рынка, предлагая при этом конкурентоспособные цены и короткие сроки.

Типичные СВЧ-сборки IMA:

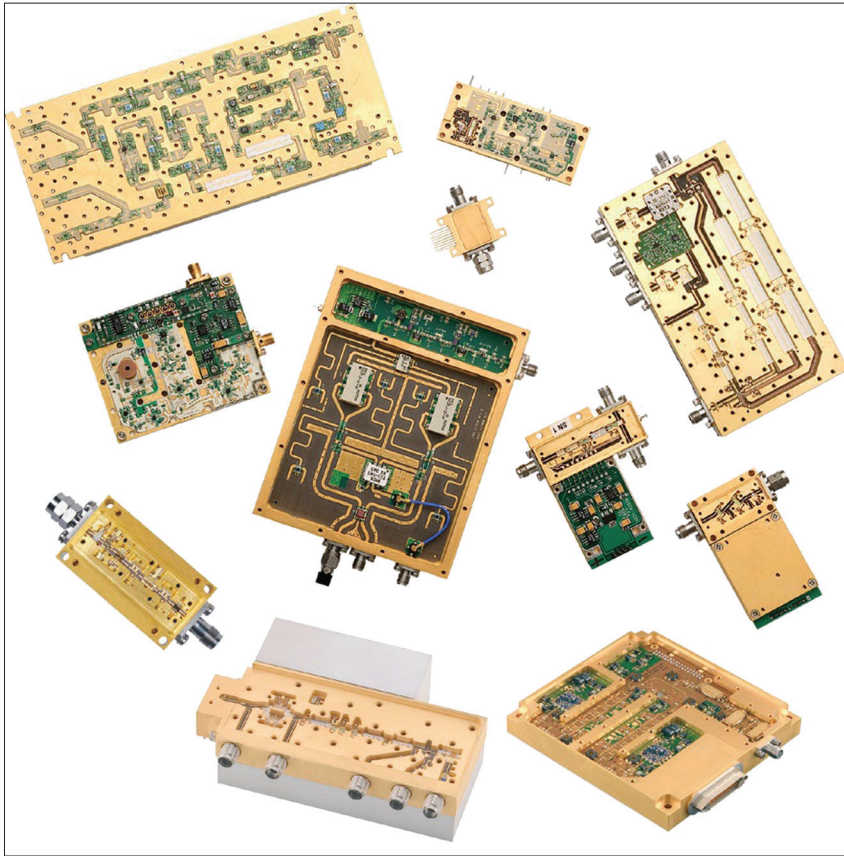
- преобразователи частот (*Block Converters*);
- банки коммутируемых фильтров (*Switch Filter Banks*);
- модули дистанционных возбуждателей (*Remote Exciter Modules*);

- моноимпульсные приемники (*Monopulse Receivers*);
- возбудители РЛС/приемники научно-исследовательских систем (*SAR Exciter/Receiver Systems Research and Development Subsystems*);
- бортовые космические компоненты (*Spaceborne Components*);
- входные РЧ-блоки трехканальных моноимпульсных приемников (*Three-Channel Monopulse Receiver Front Ends*);
- подсистемы приема пятиканальных фазовых интерферометров (*Five-Channel Phase Interferometer Receiver Systems*);
- подсистемы радаров с фазированной антенной решеткой (*Phased Array Radar Subsystems*);
- подсистемы распределения РЧ-сигнала (*RF Signal Distribution Subsystems*).

Эти компоненты называют интегральными микроволновыми сборками IMA, суперкомпонентами (*super components*), многофункциональными сборками (*multi-function assemblies*), интегральными радиочастотными/микроволновыми сборками (*integrated RF/Microwave Assemblies*) и микроволновыми субсборками (*microwave sub-assemblies*).

Общая концепция проектирования микроволновых компонентов позволяет ведущим компаниям-производителям оперативно обслуживать и удовлетворять потребности заказчиков с помощью однофункциональных компонентов (*single-function components*) или многофункциональных сборок (*multifunction assemblies*). Большинство таких многофункциональных сборок разрабатывается с учетом уникальных требований заказчиков. Многофункциональные блоки более компактны, меньше по размеру и легче по весу, чем конструкция, состоящая из отдельных системных блоков. Кроме того, приобретаемая потребителем стандартная многофункциональная сборка обычно имеет проблемы с системным интерфейсом, которые корректно могут быть решены только на уровне производства. Только в этом случае при установке такой сборки на следующем уровне интеграции системы характеристики ввода/вывода будут соответствовать проектным спецификациям.

По такому пути развивается, например, компания **L3 Narda-MITEQ** (сейчас **L3Harris**) [52]. Несмотря на то, что компания предлагает одну из самых широких линий стандартных РЧ-продуктов (рис. 49), основная часть бизнеса MITEQ заключается в производстве индивидуальных компонентов, сборок, подсистем, систем многофункциональных сборок и интегрированных СВЧ-сборок, разработанных специально для удовлетворения потребностей конкретных заказчиков.



▲ Рис. 49. Интегральные СВЧ- сборки IMA, предлагаемые компанией L3 Narda-MITEQ

Компания **Narda** производит три типа интегральных СВЧ-сборок [53]:

- **Простые интегральные СВЧ IMA-модули** (*Simple IMA modules*) — в функциональную сборку интегрируются два или более СВЧ-компонента с использованием обычных технологий СВЧ ИС.
- **Комплексные IMA-модули** (*Complex IMA Modules*) — используется технология MMC для создания устройств гораздо более высокого уровня интеграции. В этих модулях обычно предусмотрена топология Ultimate MIC или Ultimate SMT.

Примерамиборок IMA данного уровня могут служить сборки Smart IMA, которые используют микроконтроллер для обеспечения максимальной выходной мощности РЧ-компонентов с минимальным постоянным током при изменениях температуры и колебаниях параметров системы.

Программируемый источник FPGA (*FPGA Programmable Source*) — этот Ultimate MIC содержит встроенные настраиваемые логические блоки FPGA для обеспечения обработки СВЧ-сигналов произвольной формы.

- **Компактные СВЧ-подсистемы CMS** (*Compact Microwave Subsystems*) — используются модули IMA и вспомогательные устройства для создания полной функциональной подсистемы. Примеры типовых CMS:

EW Receiver — радиоприемник радиопротиводействия, представляет собой компактную сборку модулей многослойных микроволновых схем MMC (*multilayer microwave circuitry*), содержащих в очень маленьком корпусе входные и выходные цепи коммутации, РЧ-фильтры и цепи с двумя усилителями.

RF Distribution Network — комплексная распределительная сеть, объединяющая два мультиплексора с входными и выходными коммутационными цепями.

Приемопередатчик спутниковой системы SATCOM — автономный приемопередатчик для приложений в диапазонах X, Ku или Ka. Устройство имеет высокую эффективность, низкую потребляемую мощность и малый вес.

На рис. 50 приведены примеры трех типовборок, выпускаемыхкомпанией L3 Narda-MITEQ: **простой** (входной

РЧ-блок), **комплексной** (твердотельный усилитель мощности SSPA Ka-диапазона) и **компактной** (РЧ-распределительная сеть).

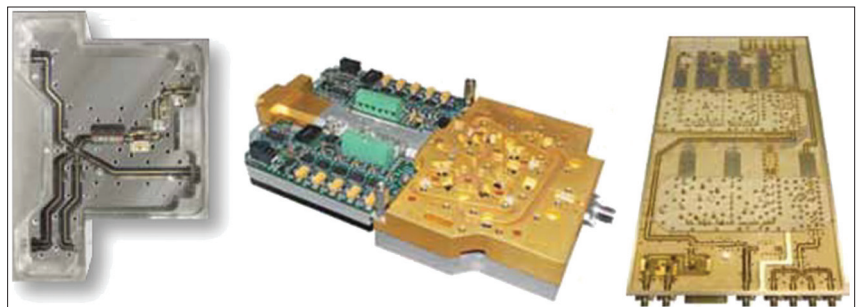
КОМПОНЕНТЫ ФОРМАТОВ PXI/VXI

Модульная платформа PXI (*eXtensions for Instrumentation*) предназначена для построения многофункциональных контрольно-измерительных систем, систем тестирования оборудования, систем автоматизации, модульных лабораторных приборов и т. д. РЧ-компоненты в форматах PXI и VXI представляют собой функционально законченные модульные решения на базе стандарта открытых модульных систем для самых разнообразных применений.

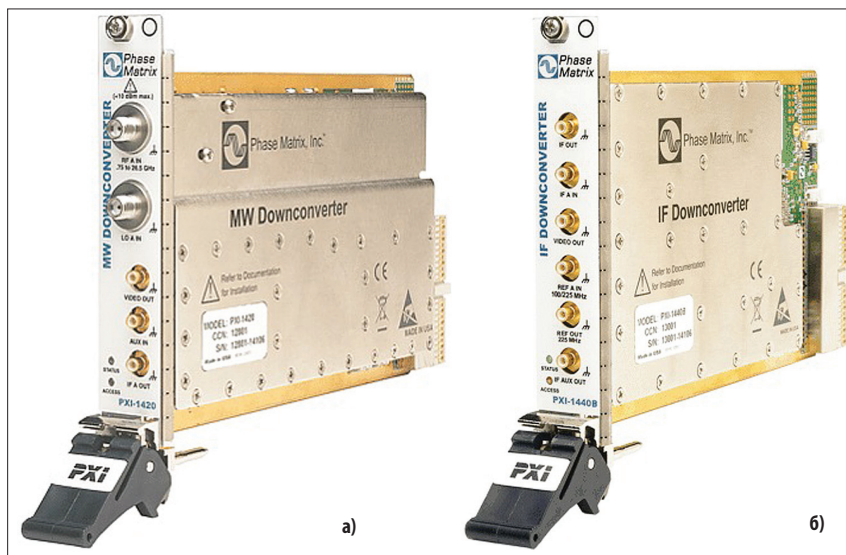
Использование наиболее распространенного стандарта PXI позволяет решать задачу постоянного увеличения производительности, функциональности и надежности контрольно-измерительной аппаратуры. С помощью данной платформы легко устанавливать, заменять и использовать разные измерительные устройства вместе, в едином компактном исполнении. В настоящее время модули формата PXI насчитывают более 1500 моделей различного назначения, изготавливаемых членами производителей контрольно-измерительного оборудования PXI System Alliance, а также компаниями, не входящими в альянс.

Например, семейство понижающих преобразователей **формата PXI**, разработанныхкомпанией **Phase Matrix**, входящей в состав National Instruments, состоит из пяти модулей: локального генератора (PXI-1450B), преселектора/аттенюатора (PXI-1410) и показанных на рис. 51 собственно модулей понижающего преобразования РЧ, ПЧ и СВЧ (PXI-1430B, PXI-1440B и PXI-1420 соответственно).

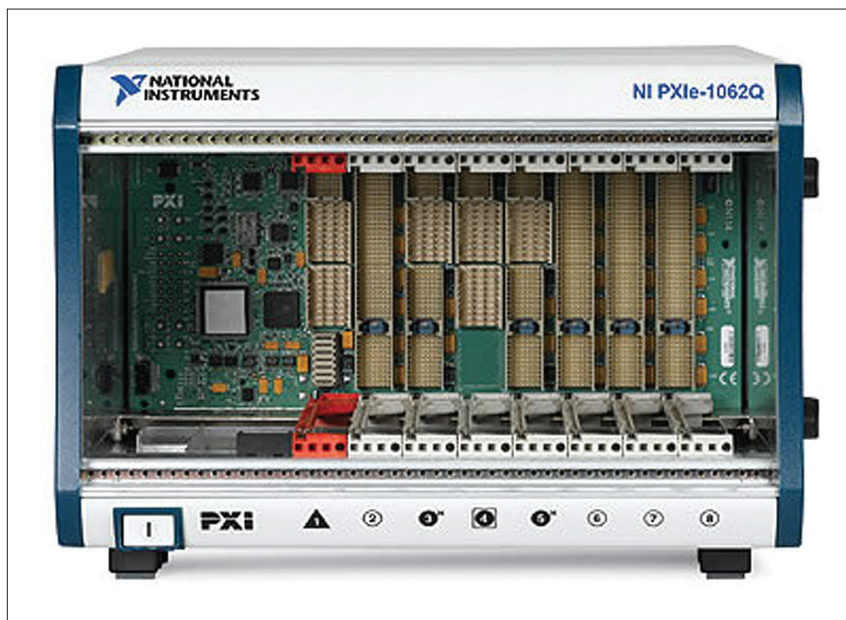
Для установки модулей компании-разработчики предлагают типы шасси с различными техническими характеристиками, начиная недорогими и заканчивая высококачественными вариантами на большое число модулей для



▲ Рис. 50. Примеры трех основных видовборок, производимыхкомпанией L3 Narda-MITEQ



▲ Рис. 51. Преобразователи частот с понижением PXI-1420 MW (2,75–26,5 ГГц) и PXI-1440B IF (100 кГц — 425 МГц), предлагаемые компанией Phase Matrix



▲ Рис. 52. Вариант шасси для модулей PXI от компании National Instruments

решения комплексных задач (рис. 52). Шасси обеспечивают прочную модульную упаковку для создаваемой системы и обычно доступны в конструктивах 4, 6, 8, 14 и 18 слотов для установки модулей размером 3U и 6U.

Шасси обеспечивают электропитание и охлаждение модулей, содержат шину передачи данных, шину синхронизации и шину триггерных сообщений. Шасси отличаются размерами, количеством слотов для установки модулей, пропускной способностью шины передачи данных (133 Мбайт/с для PXI, до 12 Гбайт/с для PXIe), мощностью блока питания и производительностью системы охлаждения. Существуют и шасси с уникальными возможностями, к примеру резервированием источников питания с возможностью горячей замены или пониженным шумом системы охлаждения.

В рамках схожей архитектуры можно создавать множество приложений: в области медицины, безопасности, промышленных технологий, транспорта и т. п. [54]. И именно модульный формат позволяет из одних и тех же элементов строить множество различных систем. Это открывает принципиально новые возможности, зачастую недоступные при использовании настольных приборов. ●

ЛИТЕРАТУРА

33. *Англо-русский интернет-словарь по нанотехнологиям.* www.nanotech_en_ru.academic.ru/
 34. *Electronics Terminology English vocabulary.* *Английский словарь терминологий электроники.* www.slovar-vocab.com/english/electronics-terminology-vocab
 35. *Сайт компании Plextek RFI.* www.plextekrfi.com/mmic/mmic-rfic-design/

36. *Медведев А. Современные компоновки микросхем. Компоненты и технологии.* 2007. № 2.

37. Minz J. R., Thyagara S., Lim S. K. *Optical Routing for 3-D System-On-Package//IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies.* 2007. Vol. 30. Iss. 4.

38. *Типы форм-факторов SiP, SoC, PoP, CoM — особенности и отличия.* 12–04–2018. www.digitrode.ru/articles/1322-tipy-form-faktorov-sip-soc-pop-com-osobennosti-i-otlichya.html

39. *Хохлун А. Некоторые тенденции развития мировой электроники. Перспективы для российской промышленности//ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес.* 2012. № 6.

40. Manoharan A., Peterson K., Alvares L., Sraanivasulu M. B., Wu T. *Package Type and Material Selection for Different Component in Microelectronic Packaging Systems Cell Phone Packaging.* 2013.

41. Hou F., Liu F., Shangguan D. *Thermal management of 3D RF PoP based on ceramic substrate.* *IEEE 64th Electronic Components & Technology Conference.* 2014.

42. *RF SiP Design Methodology and Flow.* Cadence WHITE PAPER. www.pdf.semanticscholar.org/257e/258def715b930a03a39de12037fa87d7686a.pdf

43. Rickert P., Krenik W. *Cell phone integration: SiP, SoC, and PoP//IEEE Design & Test of Computers.* 2006. Vol. 23. Iss. 3.

44. *Delivering the World's First Digital Radar on Chip (RoC).* *High Frequency Electronics.* April 2019.

45. *В. Тюльпанов, А. Васильев. Сборка интегральных схем по технологии 3D-интеграции//Наноиндустрия.* 2013. № 7.

46. *Three-dimensional integrated circuit.* www.en.wikipedia.org/wiki/Three-dimensional_integrated_circuit.

47. *ГОСТ Р 52003–2003. Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств. Термины и определения.*

48. *ГОСТ 25804.1–83. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование систем управления технологическими процессами атомных электростанций. Основные положения.*

49. Семейкин И., Кожевников В., Грищенко С. *Мощные усилительные паллеты для модулей АФАР//Современная электроника.* 2010. № 2.

50. *Чанг Д., Тимоцин В. Новые силовые ВЧ-модули для применения в радарной технике L- и S-диапазонов частот в концепции plug-and-play//Компоненты и технологии.* 2007. № 9.

51. *Small Form-Factor Pluggable Transceiver (SFP).* www.techopedia.com/definition/24949/small-form-factor-pluggable-transceiver-sfp

52. *Сайт компании L3 Narda-MITEQ. RF/Microwave Components.* www.nardamiteq.com/page.php?ID=55

53. *Narda today. RF & Microwave Product Overview.* www.nardamiteq.com/images/pdf/literature_shortform.pdf

54. *Берту Ф. Контрольно-измерительное оборудование: какой форм-фактор выбрать?//Электроника НТБ.* 2013. № 8.